

INSTYTUT GOSPODARKI SUROWCAMI MINERALNYMI I ENERGIAŁ PAN

# Innowacje młodych naukowców a cele zrównoważonego rozwoju



Redakcja naukowa  
Olga JANIKOWSKA

KRAKÓW 2020



INSTYTUT GOSPODARKI SUROWCAMI MINERALNYMI I ENERGIA  
POLSKIEJ AKADEMII NAUK

---

---

# Innowacje młodych naukowców a cele zrównoważonego rozwoju

Redakcja naukowa:  
dr **OLGA JANIKOWSKA**

---

KRAKÓW • 2020  
Wydawnictwo IGSMiE PAN

RECENZENCI

dr hab. inż. Natalia Iwaszczuk, prof. uczelni AGH Akademia Górniczo-Hutnicza, Kraków  
dr hab. inż. Elżbieta Pietrzyk-Sokulska, prof. em. IGSMiE PAN, Kraków

REDAKCJA NAUKOWA

dr Olga Janikowska, IGSMiE PAN

*Projekt jest współfinansowany ze środków Narodowej Agencji Wymiany Akademickiej (NAWA) w ramach projektu „Współpraca międzynarodowa w obszarze racjonalnego gospodarowania surowcami mineralnymi i gospodarki o obiegu zamkniętym” (COOPMIN) realizowanego przez Pracownię Badań Strategicznych IGSMiE PAN (2019–2020), numer projektu PPI/APM/2018/1/00003*

ADRES REDAKCJI

31-261 Kraków, ul. Józefa Wybickiego 7A  
tel. +48 12 632-33-00, fax +48 12 632-35-24

Redaktor Wydawnictwa: Magdalena Pawłowicz  
Redaktor techniczny: Beata Stankiewicz, Barbara Sudoł  
Projekt okładki: Olga Janikowska  
Zdjęcia na okładce: Canva

© *Copyright by Instytut Gospodarki Surowcami Mineralnymi i Energią PAN – Autorzy*

*Printed in Poland*

*Kraków 2020*

ISBN 978-83-956380-9-1

ISBN 978-83-959215-0-6 (wersja online)

IGSMiE PAN – Wydawnictwo, Kraków 2020

Nakład 25 egz.

Objętość ark. wyd. 24,24; ark. druk. 34,0 (×8)

Druk i oprawa: Agencja Reklamowo-Wydawnicza „Ostoja” Maciej Hubert Krzemień,  
Cianowice, ul. Niebyła 17, 32-043 Skała



## Spis treści

|   |     |
|---|-----|
| Przedmowa .....   | 5   |
| <b>CZĘŚĆ 1. Społeczna odpowiedzialność a edukacja</b>   |     |
| Wioleta GAŁAT   |     |
| Społeczna odpowiedzialność uczelni ekonomicznych .....  | 9   |
| Kinga KORNIEJENKO, Szymon GADEK   |     |
| Społeczna odpowiedzialność szkoły wyższej w kontekście epidemii koronawirusa – studium przypadku krakowskich uczelni technicznych .....                                     | 19  |
| Paulina Luiza WIZA  |     |
| Kształtowanie przewag konkurencyjnych przedsiębiorstw mleczarskich z zastosowaniem narzędzi CSR na przykładzie firmy Mlekovita .....  | 35  |
| Aleksandra WILK   |     |
| Współczesne rozumienie kariery zawodowej .....  | 51  |
| Marek Zbigniew GOLONKA  |     |
| Visual novel jako przykład grywalizacji i uczenia o wiedzy inżynierskiej .....  | 61  |
| Agnieszka NOWACZEK  |     |
| Ekoprojektowanie jako element edukacji ekologicznej .....   | 73  |
| <b>CZĘŚĆ 2. Energia ze źródeł pierwotnych i wtórnych</b>  |     |
| Paweł BARAN, Stanisław KOZIOŁ, Adam SMOLIŃSKI, Katarzyna ZARĘBSKA   |     |
| Badanie i analiza rozszerzalności węgla kamiennego w atmosferze argonu, metanu i ditlenku węgla w kontekście geologicznej sekwestracji .....                                | 85  |
| Katarzyna CZERW, Magdalena HODOWANY, Jakub SZCZUROWSKI, Stanisław KOZIOŁ  |     |
| Zastosowanie spektroskopii FTIR do badania efektów chemicznego utleniania węgla .....   | 95  |
| Justyna MUWEIS  |     |
| Wykorzystanie odpadów komunalnych do produkcji paliwa alternatywnego z zastosowaniem ekologicznej instalacji, na przykładzie przedsiębiorstwa działającego jako RIPOK ..... | 107 |
| Marek DROŹDŹ  |     |
| Innowacyjna i ekoenergetyczna oczyszczalnia ścieków – projekt technologiczny dla miejskich oczyszczalni komunalnych .....   | 119 |
| Paulina ZIELINKO, Dorota KRAWCZYK   |     |
| Miesięczny bilans energetyczny płaskiego wodnego kolektora słonecznego w warunkach klimatycznych Polski .....   | 137 |
| Agata WITKOWSKA, Bernadetta WĄDOŁOWSKA, Monika POGORZELSKA, Dorota Anna KRAWCZYK  |     |
| Modelowanie wydajności cieplnej systemu ogrzewania podłogowego w budynku mieszkalnym jednorodinnym .....  | 145 |

## Spis treści

---

|  |     |
|--|-----|
| Aleksandra SZULC-WROŃSKA, Barbara TOMASZEWSKA  |     |
| Monitoring jakości powietrza jako pierwszy krok w walce z niską emisją na obszarach<br>uzdrowiskowych .....              | 159 |
| Mariusz ADAMSKI, Maksim REBMAN   |     |
| Akumulacja ciepła w systemach wentylacyjnych budynków .....  | 173 |
| <br><b>CZĘŚĆ 3. Technologie odzysku surowców z odpadów i innowacyjne rozwiązania</b>                                     |     |
| Grzegorz PALKA, Weronika KIERES, Karolina ŁUCZAK-ZELEK, Monika PARTYKA   |     |
| Własne laboratorium badawcze w aspekcie podnoszenia innowacyjności przedsiębiorstwa ....                                 | 185 |
| Weronika URBAŃSKA, Agnieszka SOBIANOWSKA-TUREK, Katarzyna GRUDNIEWSKA  |     |
| Możliwości odzysku metali z roztworów po ługowaniu odpadów chemicznych źródeł energii<br>metodami flotacji jonowej ..... | 195 |
| Aleksander IWASZCZUK   |     |
| Odpady z biogazowni rolniczej jako surowiec do produkcji nawozów .....   | 207 |
| Weronika ROGOWSKA, Elżbieta SKORBIŁOWICZ, Mirosław SKORBIŁOWICZ  |     |
| Oczyszczalnie ścieków jako źródło mikroplastiku w środowisku wodnym .....  | 217 |
| Katarzyna GRAŻ, Ewelina GRABIAS  |     |
| Analiza nanocząstek wybranych tworzyw sztucznych .....   | 229 |
| Łukasz MACYSZYN  |     |
| Badanie sprawności nowej magnetycznej przekładni precyzyjnej .....   | 241 |
| Maciej PODSĘDKOWSKI, Rafał KONOPIŃSKI  |     |
| Mechanizm zmiennego skoku łopat dla lekkich jednostek BSL .....  | 253 |

## Przedmowa

Współcześnie wszelkie procesy rozwojowe, w tym także wdrażanie innowacji, powinny bazować na paradygmacie zrównoważonego rozwoju. Należy przy tym założyć, że równoważenie rozwoju musi się odbywać na wielu płaszczyznach, w tym ekologicznej, społecznej i gospodarczej. Według Światowej Komisji ds. Środowiska i Rozwoju (WCED 1987; 1991), zrównoważony rozwój to proces kierunkowych zmian zmierzających do sprawiedliwości intra- i intergeneracyjnej, bazujący na triadzie celów środowiskowych, społecznych, ekonomicznych. Zasada sprawiedliwości intrageneracyjnej stanowi, iż naszym obowiązkiem jest pozostawienie planety dla dobra przyszłych pokoleń przynajmniej w stanie tak dobrym, w jakim żyjemy obecnie. Natomiast zasada sprawiedliwości intergeneracyjnej wprowadza imperatyw wskazujący, że każdy członek danego pokolenia ma prawo do korzystania z dziedzictwa naszej planety w takim samym stopniu, jak pozostali. W tak rozumianym kontekście istotą zrównoważonego traktowania, podtrzymywania, utrzymywania, efektywnego wykorzystywania, musi być zarówno ekosystem globalny, wraz z zasobami bio- i abiotycznymi, wraz z niemalejącą ich różnorodnością, jak i ekosystemy regionalne i lokalne z systemami obsługi funkcji życiowych. Istotni są również poszczególni ludzie i ich wspólnoty, wraz ze swymi zróżnicowanymi kulturami, systemami społecznymi oraz różnorodnymi aktywnościami gospodarczymi.

Współcześnie najistotniejszym globalnym drogowskazem wyznaczającym pożądaną kierunek zmian rozwojowych jest dokument „Przekształćmy nasz świat: Agenda na rzecz zrównoważonego rozwoju 2030”, przyjęty 25 września 2015 r. w Nowym Jorku w Rezolucji Zgromadzenia ONZ przez wszystkie państwa członkowskie. W Agendzie wyznaczono 17 celów wraz ze 169 zadaniami. Zgodnie z ich założeniami, priorytetowymi zadaniami na najbliższe lata są: wyeliminowanie ubóstwa i głodu, zapewnienie zdrowego życia, dobrego samopoczucia, wysokiej jakości edukacji, równości płci, czystej i dostępnej energii, wzrostu gospodarczego, godnej pracy, innowacyjności przemysłu i infrastruktury, położenie kresu nierównościom. Należy podejmować działania na rzecz: zrównoważonego rozwoju miast i społeczności, odpowiedzialnej konsumpcji i produkcji, ograniczenia zmian klimatu, poprawy jakości środowiska wodnego i lądowego, a także dążyć do zapewnienia pokoju i sprawiedliwości, silnych instytucji oraz partnerstwa na rzecz celów zrównoważonego rozwoju.

Jak pisze Józef Koźmielecki w *Transgresji i kulturze* (1897), w naturę ludzką wpisane jest nie tylko wykonywanie działań zachowawczych czy obronnych, ale także ciągłe dążenie do przekraczania swoich osiągnięć i wyjście poza nie. Działania transgresyjne ujmowane są przez autora jako zdolności do przekraczania własnych osiągnięć i możliwości. Dzięki tym aktom transgresji, dzięki nieustannemu ruchowi naprzód, nasz gatunek tworzył i tworzy nowe wartości zarówno materialne, jak i symboliczne, rozwija sztukę, naukę i technologię. To właśnie akty transgresji zapoczątkowały falę wielkich odkryć geograficznych, rewolucję przemysłową czy eksplorację Kosmosu. Ten ciągły pęd naszego gatunku sprawił, że nieustannie przekraczamy dotychczasowe, jak by się mogło wydawać, nieprzekraczalne granice. Innowacyjność pojmowana jako wdrażanie nowego lub udoskonalonego produktu, nowej metody marketingowej czy organizacyjnej, jest niewątpliwie działaniem o charakterze transgresyjnym. Wydaje się być szczególnie istotna w aspekcie pomysłów prezentowanych przez młodych naukowców – bowiem to właśnie oni w przyszłości staną się motorem programowych zmian. To ich pomysły przełamywać będą kolejne granice i bariery. W nawiązaniu do celów i zadań przedstawionych w Agendzie, autorzy monografii pt. *Innowacje młodych naukowców a cele zrównoważonego rozwoju* prezentują wyniki własnych nowatorskich badań z różnych dziedzin, które mogą być wykorzystane w procesach edukacyjnych, nowoczesnych technologiach czy branżach przemysłu.

Prezentowana monografia porusza bardzo szeroki wachlarz zagadnień, w związku z czym podzielona została na trzy tematycznie spójne części:

- 1) społeczna odpowiedzialność a edukacja,
- 2) energia ze źródeł pierwotnych i wtórnych,
- 3) technologie odzysku surowców z odpadów i innowacyjne rozwiązania.

Poszczególne rozdziały nawiązują do jednego lub kilku celów zrównoważonego rozwoju, z wyszczególnieniem celu wiodącego, zaznaczonego odpowiednią kolorystyką e-booka. Autorzy monografii wskazywali najczęściej na powiązanie prezentowanych badań z działaniami na rzecz dostępnej i czystej energii, zachowaniem klimatu, innowacyjnością przemysłu i infrastruktury, odpowiedzialną konsumpcją i produkcją. Badania nawiązywały także do działań zapewniających dobrą jakość edukacji, a także rozwiązań dotyczących lepszej jakości życia społecznego w zrównoważonym mieście.

Autorzy mają nadzieję, że prezentowana problematyka zainspiruje kolejnych młodych naukowców do prowadzenia innowacyjnych badań, mających wpływ na realizowanie celów zrównoważonego rozwoju. Podziękowania za cenne uwagi składamy Recenzentkom: dr hab. inż. Natalii Iwaszczuk, prof. AGH, i dr hab. inż. Elżbiecie Pietrzyk-Sokulskiej, prof. em. IGSMiE PAN.

*dr Olga Janikowska*

## **CZĘŚĆ 1.**

### **Społeczna odpowiedzialność a edukacja**



## Spółeczna odpowiedzialność uczelni ekonomicznych

**STRESZCZENIE:** Kształcenie w zakresie społecznej odpowiedzialności biznesu ma znaczenie we wszystkich typach uczelni. Jednak w przypadku kształcenia przyszłych menadżerów i przedsiębiorców jest to zadanie szczególnie istotne. Uczelnie ekonomiczne realizują swoją odpowiedzialność społeczną poprzez przekazywanie wartości i naukę zasad odpowiedzialnego biznesu przyszłym decydom i uczestnikom życia społeczno-gospodarczego. Celem pracy jest analiza roli uczelni ekonomicznych w procesie kształcenia w zakresie społecznej odpowiedzialności biznesu i etyki. Analiza zostanie wykonana na podstawie przedsięwzięć dedykowanych uczelniom, które mają wzmocnić dydaktykę w obszarze społecznej odpowiedzialności. Podejmowane badania wpisują się w 4. cel zrównoważonego rozwoju – dobra jakość edukacji.

**SŁOWA KLUCZOWE:** społeczna odpowiedzialność, uczelnie ekonomiczne, kształcenie

## Social responsibility of economic universities

**ABSTRACT:** Education in the field of corporate social responsibility is important in all types of universities. However, in the case of educating future managers and entrepreneurs, it is a particularly important task. Economic universities implement their social responsibility by transmitting values and teaching the principles of responsible business to future decision-makers and participants in socio-economic life. The aim of the work is to analyze the role of economic universities in the education process in the field of corporate social responsibility and ethics. The analysis will be made on the basis of projects dedicated to universities, which are to strengthen teaching in the area of social responsibility.

**KEYWORDS:** social responsibility, economic universities, education

## 1. Wprowadzenie

**U**czelnie pełnią znaczącą rolę w kształtowaniu przyszłych społeczeństw. Przekazują młodym ludziom wartości i kształtują ich postawy w dalszym dorosłym życiu. W pewnym sensie od uczelni zależy, jakie w przyszłości będą oni podej-

---

<sup>1</sup> Mgr, Uniwersytet Ekonomiczny, Kraków, Polska.

mowali decyzje, zarówno w sferze gospodarczej, jak i społecznej. Uczelnie dostarczają również na rynek pracy wykształconych specjalistów. Jednak w przestrzeni społecznej pojawiają się komentarze, że absolwentom brak umiejętności praktycznych i przystosowania do zadań, które będą realizowali w miejscu pracy. Istotna jest zatem refleksja nad rolą uczelni w kształtowaniu przyszłych pracowników i przedsiębiorców, a także na ile przekazywana wiedza powinna mieć wymiar praktyczny, a na ile powinna być podstawą teoretyczną, niezbędną do samodzielnego i krytycznego myślenia. Na uczelniach ciąży zatem bardzo duża odpowiedzialność. W przypadku uczelni ekonomicznych, odpowiedzialność wynika nie tylko z kształtowania ścieżek kariery absolwentów, ale również ze sposobu realizowania zadań przez przyszłych menadżerów i przedsiębiorców. Istotne jest, na ile podejmowane przez nich decyzje będą bazować jedynie na analizie korzyści ekonomicznych, i czy w rozważaniach tych będzie miejsce na uwzględnienie oczekiwań interesariuszy i postępowanie zgodnie z zasadami społecznej odpowiedzialności biznesu. Profil kształcenia na uczelniach ekonomicznych jest zatem szczególnie istotny z punktu widzenia budowania gospodarki opartej na etyce i społecznej odpowiedzialności. Celem pracy jest analiza roli uczelni ekonomicznych w procesie kształcenia w zakresie społecznej odpowiedzialności biznesu i etyki. Realizowane badania wpisują się w 4. cel zrównoważonego rozwoju, w którym zadanie 7. zawiera zapewnienie o edukacji w zakresie zrównoważonego rozwoju. Przeanalizowane zostaną tradycyjne zadania uczelni, a także te wynikające z oczekiwań społecznych i zmian zachodzących w przestrzeni społeczno-gospodarczej, oraz przedsięwzięcia dedykowane uczelniom, które mają wzmocnić dydaktykę w obszarze społecznej odpowiedzialności

## 2. Rola uczelni

**R**ozpoczynając rozważania nad rolą uniwersytetów, należy zdać sobie sprawę z funkcji, jaką pełnią one w życiu społecznym. Jednym z podstawowych wyzwań dzisiejszego społeczeństwa jest kształtowanie kultury dialogu (Bell 1994). Ma ona istotne znaczenie w kontekście kształtowania pozycji społecznych. Uczestnictwo w dialogu, w połączeniu z kompetencjami, umożliwia realizację szeregu zadań, zarówno o charakterze indywidualnym, jak i w odniesieniu do całego społeczeństwa. Stwarza przede wszystkim możliwość zdobywania wiedzy, kształtuje świadomość w ujęciu globalnym i pozwala dostrzec złożoności świata, dzięki świadomości globalnych powiązań i zależności. Ponadto kompilacja dialogu z kompetencjami daje szansę na kształtowanie celów i sposobów ich osiągnięcia, umożliwia poprawne rozumienie i analizowanie zjawisk zarówno w bliższym, jak i w dalszym w otoczeniu. Powoduje również, że jednostka jest gotowa do realizowania różnych ról społecznych, a także prowadzi do lepszego samopoznania i kształto-



wania umiejętności inicjowania oraz utrzymywania więzi społecznych (Karwińska 2009).

Uniwersytet wypełnia istotną rolę w zakresie edukacji, w porównaniu do innych podmiotów zajmujących się kształceniem. Jego zadaniem jest kształtowanie elity, a zatem absolwentów, którzy będą podejmować zadania związane ze sprawowaniem władzy i wyznaczeniem kierunków zmian rozwoju społeczeństw. Absolwenci uniwersytetów piastowali stanowiska kierownicze, związane z działalnością polityczną, gospodarczą, oświatą, kulturą i administracją. Twórczość i kreatywność, jako cechy niezbędne do pełnienia tak ważnych ról w życiu społecznym, uniwersytety zawdzięczały swojemu kształtowi, który pozwalał na elastyczność w procesie kształcenia. Przede wszystkim uniwersytety były od wieków miejscem pracy naukowej, prowadzenia badań i twórczości artystycznej. Ponadto strzegły wartości, tzn. prawdy i dobra. Etos akademicki mówi o współpracy, zaufaniu, szacunku i bezinteresowności, co pozwala na tworzenie wspólnoty wykładowców i studentów (Leja 2008). Ochrona wartości staje się coraz istotniejsza, zwłaszcza w okresie globalizacji, która umożliwiła istnienie uniwersalnych, ponadnarodowych wartości, co stwarza szansę na stworzenie otwartego społeczeństwa. Taka sytuacja budzi również w ludziach potrzebę przestrzegania wartości społecznych. W życiu środowiska akademickiego, oprócz wartości, istotne są również normy zachowań. Natomiast na kluczowej wartości, jaką jest prawda, oparty jest cały proces badawczy związany z poszukiwaniem, odkrywaniem i dokumentowaniem wniosków. W tym miejscu pojawia się również konieczność autonomii badacza, która jest podstawą do procesu badawczego (Kisiel 1994). Inicjatywą, która w ostatnim czasie przyczyniła się do wzmocnienia etosu akademickiego, jest *Deklaracja Społecznej Odpowiedzialności Uczelni*. W 2017 r. pierwsze uczelnie podpisały deklarację, jednak zawarte w niej zasady nie są dla uczelni nowością. W 12 punktach zawiera najważniejsze zasady wynikające ze społecznej odpowiedzialności uczelni. Zasady te eksponują wartości wynikające z etosu akademickiego, jak i poszerzają zakres odpowiedzialności uczelni zgodnie z zachodzącymi zmianami w otoczeniu uniwersytetu (Gałat 2018).

Zasadnicza rola uczelni sprowadza się do trzech elementów: prowadzenia badań, dydaktyki i służby publicznej. To w murach uczelni powstaje wiedza i to tu na bieżąco jest przekazywana uczniom. Stąd też niezwykle istotny jest właściwy kształt relacji nauczyciel–student. Zadanie to można również określić mianem obsługi wiedzy. Składa się na nie gromadzenie wiedzy, powiększanie jej oraz upowszechnianie (Wójcicka 2006). W procesie wypełniania swojej roli uczelnie są instytucjami, które upowszechniają kulturę opartą na nauce. Wzorem jest nauka Arystotelesa, którą odnajdujemy chociażby w *Etyce nikomachejskiej*, określającej porządek wiedzy i poznania. Takie dookreślenie uczelni tworzy przestrzeń komunikacji dla badaczy i uczonych, jak również jest miejscem integracji nowych idei, programów czy formuł (Goćkowski 1999).

Oprócz roli czysto edukacyjnej, przed uczelniami stoi również poważne zadanie związane z kształtowaniem obywateli. Uczelnia jest ostatnim etapem edukacji przed wkroczeniem w dorosłe życie absolwentów. Upowszechnianie postaw obywatelskich to szansa na tworzenie odpowiedzialnego społeczeństwa, potrafiącego uwzględniać w swoich decyzjach szersze otoczenie. Ponadto fundamentalną rolę odgrywa tutaj nauka krytycznego myślenia, tak aby młodzi ludzie z pełną świadomością potrafili oceniać sytuację, a także odróżniać działania pozorne od tych ugruntowanych w strategii organizacji. W takim rozumieniu, od tego, jak swoje zadanie będzie wypełniać uczelnia, zależy przyszły kształt naszego społeczeństwa oraz w jakim kierunku będzie rozwijać się gospodarka, jakie decyzje polityczne i społeczne będą podejmowane. Uczelnia stanowi ostatni bastion wiedzy i wartości (Sztompka 2016). Rola uczelni w kształtowaniu postaw odpowiedzialnych społecznie jest bardzo niedoceniana. Realizować ją można chociażby poprzez wprowadzenie w programie studiów przedmiotów związanych z odpowiedzialnością społeczną czy etyką. Pozwala to na kształtowanie postaw pośród przyszłych uczestników rynku, a z pewnością pozwala na wzrost świadomości w tych aspektach (Geryk 2008).

### 3. W stronę odpowiedzialności

istotna rola uczelni, którą jest budowanie świadomego społeczeństwa, opartego na wartościach, takich jak prawda i dobro, konfrontuje się z pragmatycznym światem, który pewne potrzeby adresuje do uczelni. W latach 90. XX w. powstał w Polsce sektor usług edukacyjnych. Pojawiła się rywalizacja o adepta, którego chcą kształcić uczelnie, co bezpowrotnie skutkowało szeregiem następstw zmieniających podejście do edukacji wyższej. Uczelnie zaczęły obiecywać swoim kandydatom lepszą przyszłość zawodową, którą można określić mierzalnie. Oczywista stała się konieczność dostosowywania do rynku pracy i odpowiadanie na jego potrzeby, tak aby oferta skierowana do potencjalnego studenta stanowiła dla niego możliwość późniejszej realizacji zawodowej. Uczelnia z modelu opartego na wartościach odeszła do czysto rynkowych transakcji, gdzie oferowana jest usługa edukacyjna. Zasadniczo w „pakiecie edukacyjnym” zawarte powinny być wiedza, umiejętności i postawy. Pośrednio w tym procesie uczestniczą również przedsiębiorcy, którzy dają sobie możliwość oceny efektu, jaki został osiągnięty w toku edukacji (Szapiro 2006). Określa się, że w wyniku nie tylko oczekiwań ze strony świata biznesu, ale również w efekcie zmian wynikających z umiędzynarodowienia, wszechobecnego internetu, zmieniają się oczekiwania wobec kształcenia w tradycyjnych strukturach uniwersytetu (Auleytner 2007). Zjawisko to powoduje konieczność refleksji nad kształceniem, a zwłaszcza na uczelniach ekonomicznych, których związki ze środowiskiem gospodarczym naturalnie wynikają z profilu kształcenia. Oczekiwanie

większej otwartości uczelni można wykorzystać jako szansę na lepszą współpracę z otoczeniem i lepsze zrozumienie potrzeb interesariuszy. Przy czym należy pamiętać, że zmiany na uniwersytecie zachodzą w sposób ewolucyjny i uczelnie nie mogą ulegać chwilowym trendom, powinny się koncentrować na strategicznej współpracy i stałym dialogu z otoczeniem, dzięki któremu proces kształcenia na uczelniach może być coraz lepiej dopasowany do zmian zachodzących na świecie.

Kształcenie na uczelniach ekonomicznych ma zasadnicze znaczenie nie tylko w kontekście przekazywanej wiedzy, ale również w kontekście kształtowanych postaw. Istotę kształcenia przyszłych menadżerów oddaje koncepcja 3E Wojciecha Gasparskiego (2004), czyli: efektywność, ekonomiczność, etyczność. Zgodnie z tą koncepcją dobry menedżer powinien opierać swoje działania na 3 filarach (Rok 2007).

Próbę zestawienia istoty edukacji przyszłych menadżerów zawierają zasady odpowiedzialnego kształcenia przyszłych menadżerów – *The Principles for Responsible Management Education* (PRME), przyjęte w 2007 r. z inicjatywy ONZ. PRME stało się forum odpowiedzialnego kształcenia oraz uzyskało rekomendację Global Compact. Uczelnie przystępując do PRME zobowiązują się do:

- *rozwijania wśród studentów umiejętności generowania zrównoważonych wartości dla biznesu i całego społeczeństwa,*
- *wdrażania zasad społecznej odpowiedzialności do programów nauczania i działalności akademickiej zgodnie z wartościami promowanymi w dokumencie Global Compact,*
- *tworzenia materiałów edukacyjnych, procesów i środowiska umożliwiającego efektywne nauczanie odpowiedzialnego biznesu,*
- *prowadzenia badań w zakresie społecznej odpowiedzialności przedsiębiorstw,*
- *podejmowania współpracy z biznesem w obszarze społecznej odpowiedzialności przedsiębiorstw,*
- *wspierania dialogu z interesariuszami oraz debaty na temat społecznej odpowiedzialności i zrównoważonego rozwoju* (Rojek-Nowosielska 2013).

Ze względu na specyfikę PRME, przynależność do inicjatywy powinna interesować w szczególności uczelnie ekonomiczne, co jednak nie wyklucza innych uczelni, a zwłaszcza tych, które realizują kierunki związane z ekonomią, zarządzaniem i pokrewne. W lipcu 2020 r. w Polsce sygnatariuszami PRME były następujące uczelnie: Uniwersytet Warszawski, Szkoła Główna Handlowa w Warszawie, Uniwersytet Ekonomiczny w Poznaniu, Akademia Leona Koźmińskiego, Akademia WSB, Uniwersytet Ekonomiczny we Wrocławiu, Szkoła Główna Turystyki i Hotelarstwa Vistula, Akademia Finansów i Biznesu Vistula, Wydział Zarządzania i Ekonomii Politechniki Gdańskiej, Szkoła Biznesu Politechniki Warszawskiej, Akademia Ekonomiczna-Humanistyczna w Warszawie (PRME 2020). Pośród sygnatariuszy są zatem zarówno publiczne uczelnie ekonomiczne, jak i prywatne ośrodki. Ponadto wskazać moż-

na, że zainteresowanie inicjatywą PRME w Polsce stale rośnie. W kwietniu 2018 r. w Polsce było jedynie 5 sygnatariuszy (Gaweł 2018), a po dwóch latach ich liczba wzrosła do 11.

Wymieniona Deklaracja Społecznej Odpowiedzialności Uczelni w jednym ze swoich punktów zawiera również rekomendację, aby wzbogacać programy studiów o przedmioty związane z etyką i społeczną odpowiedzialnością biznesu, a także zrównoważonym rozwojem i innowacjami społecznymi. Takie działania pozwalają na poszerzanie horyzontów i spojrzenie na rzeczywistość społeczno-gospodarczą w sposób całościowy.

W przypadku odpowiedzialnej edukacji znaczenie ma również przynależność uczelni do Karty Różnorodności, zgodnie z którą organizacja zobowiązuje się do wprowadzenia zakazu dyskryminacji. Inicjatywa ta nie ma bezpośredniego wpływu na edukację, jednak poszanowanie i pielęgnowanie zasad różnorodności w przestrzeni akademickiej jest również istotne w procesie przekazywania i zdobywania wiedzy. Ponadto uczestnictwo w inicjatywie pozwala uczelni na prezentowanie pewnego wzoru dla innych podmiotów w zakresie poszanowania różnorodności. Do podpisania Karty Różnorodności przystąpiły dotychczas tylko trzy polskie uczelnie: Uniwersytet Łódzki, Uniwersytet Ekonomiczny w Krakowie i Szkoła Główna Handlowa (Karta Różnorodności 2020).

Zaprezentowane przedsięwzięcia skierowane do uczelni wpisują się również w realizację celów zrównoważonego rozwoju. Z całą pewnością wypełniają 4. cel – dobra jakość edukacji. W tym punkcie uczelnie realizują swoje podstawowe zadanie związane z kształceniem. Wymienić można również realizację innych celów zrównoważonego rozwoju. Karta Różnorodności wypełnia cel 5. – równość płci, oraz cel 10. – mniej nierówności. Deklaracja Społecznej Odpowiedzialności Uczelni wypełnia wszystkie wymienione już cele, jak również realizuje cele wynikające z dbałości o środowisko naturalne, a więc cel 7. – czysta i dostępna energia, i cel 13. – działania w dziedzinie klimatu. Przypisanie celów zrównoważonego rozwoju ma charakter intuicyjny. Całościowe spojrzenie na działalność uczelni ekonomicznej, jak i każdej innej, pozwala stwierdzić, że realizowanie celów zrównoważonego rozwoju jest naturalnie połączone z wypełnianiem zasad społecznej odpowiedzialności. Strategiczne realizowanie zasad społecznej odpowiedzialności wiąże się zatem z realizacją celów zrównoważonego rozwoju.

Kształcenie przez uczelnie ekonomiczne przyszłych menadżerów, przedsiębiorców, decydentów i wszystkich uczestników życia społeczno-gospodarczego powinno się opierać na czymś więcej niż na krótkoterminowych potrzebach dzisiejszego rynku pracy. Przed młodym człowiekiem czekają lata pracy w dynamicznie zmieniającej się rzeczywistości, gdzie pewne zawody znikają bezpowrotnie wypierane przez automatyzację, czy przez zastępowanie ich nowymi rozwiązaniami. Z drugiej strony, pojawia się szereg nowych możliwości, które mogą stać się dla dobrze wy-

kształconego absolwenta szansą na rozwój zawodowy i satysfakcję z pracy. Uczelnie zatem przyjmując model prorynkowy kształcenia, powinny patrzeć dalej aniżeli przedsiębiorcy postrzegający często rzeczywistość przez pryzmat dzisiejszego zysku. Studenci potrzebują takiego przystosowania w postaci zaplecza edukacyjnego, aby potrafili odnaleźć się na zmieniającym się rynku i nadążyć za zmianami. W procesie edukacji należy uwzględnić również globalny zasięg przedsiębiorstw, który także wpływa na to, jakich podstaw edukacyjnych potrzebują absolwenci, a przyszli pracownicy. Oczekiwanie coraz większej transparentności od przedsiębiorstw, a także globalne powiązania powodują, że postępowanie zgodnie z zasadami społecznej odpowiedzialności biznesu staje się jednym z podstawowych zadań przedsiębiorstw. Edukacja studentów uczelni ekonomicznych w tym zakresie pozwala zatem nie tylko na uwrażliwienie przyszłych menadżerów, ale buduje również ich konkurencyjność na rynku pracy. Dodatkowo, wprowadzony obowiązek ujawniania informacji pozafinansowych w określonej grupie przedsiębiorstw powoduje, że firmy potrzebują specjalistów, którzy będą potrafili wypełniać zadania w tym zakresie.

Uniwersytety mogą sprostać dzisiejszym wymogom rynku pracy poprzez zachowanie zasad, które dla tej instytucji są najważniejsze, jak podaje Sztompka (2016). Przede wszystkim konieczne jest kształcenie interdyscyplinarne. Posiadanie wiedzy wielostronnej pozwala na dostrzeżenie spektrum zjawiska, którego uchwycenie jest bardzo trudnym zadaniem ze względu na wielość zmiennych oddziałujących z różnym natężeniem i niemożliwych do zidentyfikowania w sposób absolutny. Z całą pewnością nieodzownym elementem przedmiotów wykładanych na uczelniach ekonomicznych jest etyka i społeczna odpowiedzialność biznesu, bez których wszelkie strategie ekonomiczne są oderwane od rzeczywistości i nie uwzględniają istotnych uwarunkowań. Uczelnie powinny również dostarczać studentom dobrą teorię. Na jej podstawie absolwent studiów jest w stanie samodzielnie interpretować poszczególne przypadki w oparciu o nabyte umiejętności krytycznego myślenia i będzie potrafił poddać je ocenie. Sztompka w ślad za rekomendacjami Academia Europaea przygotowanymi dla Komisji Europejskiej podkreśla wagę nauk humanistycznych. Jak podaje, to nauki humanistyczne i społeczne są bodźcem do innowacyjności i kreatywności. Za sprawą rozważań w tych naukach obierane są nowe kierunki badań, a także oceniana jest etyczność podejmowanych przedsięwzięć.

## 4. Zakończenie

**D**ynamika zmian, zarówno społecznych, jak i gospodarczych, potrzebuje wsparcia ze strony uczelni wyższych. Istotną rolę pełnią w tym zakresie uczelnie ekonomiczne, których absolwenci będą mieć znaczący wpływ na kształt gospodarki. Poszanowanie tradycji uczelni opartej na etosie wartości i kształcenie w zakresie społecznej odpowiedzialności może przyczynić się do trojakich korzyści. W pierwszym rzędzie pozostawi uczelni to, co najważniejsze, a mianowicie autonomiczny proces kształcenia. Następnie dostarczy na rynek pracy absolwentów z kluczowymi kompetencjami umożliwiającymi dostosowywanie się do zmieniającej się rzeczywistości i podejmujących decyzje w oparciu o oczekiwania interesariuszy. Trzecią korzyścią będzie zachowanie roli uczelni, polegającej na kształtowaniu postaw społecznych.

Zmiany na uczelniach są nieuniknione, jednak nie mogą wynikać z porywu chwili i dzisiejszych oczekiwań społecznych co do procesu kształcenia. Istotą jest spojrzenie długoterminowe i próba przewidywania w taki sposób, aby absolwent wraz ze zdobytą wiedzą posiadał podstawę do życia społecznego i gospodarczego przez cały okres swojej aktywności zawodowej. Realizację takich założeń umożliwi dialog z interesariuszami i stała współpraca pozwalająca na wypracowywanie rozwiązań podnoszących jakość edukacji i dostosowywanie programów do zachodzących zmian.

### Literatura

- AULEYTNER J. 2007. *Edukacja a rynek pracy w Unii Europejskiej*. Edukacja humanistyczna nr 2, s. 53–64.
- BELL D. 1994. *Kulturowe sprzeczności kapitalizmu*. Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa.
- GAŁĄT W. 2018. *Deklaracja społecznej odpowiedzialności uczelni jako wzmocnienie etosu akademickiego*. Zeszyty Naukowe Uniwersytetu Ekonomicznego w Krakowie nr 6 (978), s. 137–151.
- GAWEŁ W. 2018. *Dydaktyka na uczelni wyższej w perspektywie zmian społeczno-gospodarczych*. Wybrane problemy współczesnego społeczeństwa i gospodarki. Bezpieczeństwo-edukacja-ekonomia, Państwowa Wyższa Szkoła Zawodowa w Koninie, s. 109–117.
- GERYK M. 2008. *Wpływ działalności uczelni na kształtowanie społecznie odpowiedzialnych postaw wśród absolwentów*. [W:] *Studia ekonomiczne – czy tylko wiedza i umiejętności?*, (red.) J. Dietl, Z. Sapijaska, Fundacja Edukacyjna Przedsiębiorczości, Łódź, s. 81–87.
- GOĆKOWSKI J. 1999. *Uniwersytet i tradycja w nauce*. Wydawnictwo i Drukarnia Secesja, Kraków.
- Karta Różnorodności 2020. [Online] <http://odpowiedzialnybiznes.pl/karta-roznorodnosi/sygnatariusze-karty/> [Dostęp: 30.06.2020].
- KARWIŃSKA A. 2009. *Edukacja w szkole wyższej – edukacja do dialogu*. [W:] *Rola uczelni w kształtowaniu świadomości studentów. Europejska wspólnota kultury*, (red.) Bywalec Cz., Wydawnictwo Uniwersytetu Ekonomicznego w Krakowie, s. 9–28.
- KISIEL P. 1994. *Ethos uczonych we współczesnym życiu naukowym*. [W:] *Patologia i terapia życia naukowego*, (red.) J. Goćkowski, P. Kisiel, Univeritas, Kraków, s. 173–180.
- LEJA K. 2008. *Społeczna odpowiedzialność uczelni*. Wydawnictwo Politechniki Gdańskiej.

- PRME, [Online] <https://www.unprme.org/search?country=Poland> [Dostęp: 30.06.2020].
- ROJEK-NOWOSIELSKA M. 2013. *Edukacja jako instrument kształtowania wiedzy o społecznej odpowiedzialności przedsiębiorstw*. Studia Ekonomiczne. Zeszyty Naukowe Uniwersytetu Ekonomicznego w Katowicach nr 131, s. 42–50.
- ROK B. 2007. *Etyczność, ekonomiczność i efektywność w koncepcji społecznej odpowiedzialności biznesu*. Współczesne wyzwania nauk praktycznych, Wyższa Szkoła Prawa i Zarządzania, Warszawa.
- SZAPIRO T. 2006: *Ryzyko i szansa konkurencji edukacyjnej*. [W:] *Konkurencja na rynku usług edukacji wyższej*, (red.) J. Dietl, Z. Sapijaska, Fundacja Edukacyjna Przedsiębiorczości, Łódź, s. 21–30.
- SZTOMPKA P. 2016. *Uniwersytet w przestrzeni społecznej*. Zarządzanie publiczne nr 2 (36), s. 54–58.
- WÓJCICKA M. 2006. *Wartości akademickie a konkurencyjność działań*. [W:] *Konkurencja na rynku usług edukacji wyższej*, (red.) J. Dietl, Z. Sapijaska, Fundacja Edukacyjna Przedsiębiorczości, Łódź, s. 35–43.





Kinga KORNIEJENKO<sup>1</sup>, Szymon GADEK<sup>2</sup>

---

## Spoleczna odpowiedzialność szkoły wyższej w kontekście epidemii koronawirusa – studium przypadku krakowskich uczelni technicznych

**STRESZCZENIE:** Celem pracy jest wskazanie dobrych praktyk w zakresie budowania świadomości i kształtowania postaw studentów w związku z rozprzestrzenianiem się wirusa SARS-CoV-2 oraz brakiem podstawowych środków ochrony w sektorze medycznym. Wskazano inicjatywy społeczne podejmowane przez wyższe techniczne uczelnie z Krakowa oraz przeanalizowano zaangażowanie studentów, doktorantów i kadry akademickiej, ze szczególnym uwzględnieniem akcji dotyczącej drukowania przyłbic ochronnych do krakowskich szpitali. W pracy wykorzystano następujące metody badawcze: analizę krytyczną źródeł literaturowych oraz studia przypadków z aktywności realizowanych w Akademii Górniczo-Hutniczej oraz Politechnice Krakowskiej. Podjęte działania mogą służyć jako modelowe dla innych uczelni, w aspekcie rozwijania inicjatyw związanych ze społeczną odpowiedzialnością szkoły wyższej. Praca wpisuje się w 3. i 17. cel zrównoważonego rozwoju.

**SŁOWA KLUCZOWE:** GSR, USR, społeczna odpowiedzialność, szkoła wyższa, koronawirus, COVID-19

## Corporate social responsibility of the university in the context of the coronavirus epidemic – a case study of technical universities in Cracow

**ABSTRACT:** The main aim of the article is to show 'good practices' in creating awareness and shaping students' attitudes in relation to the spread of SARS-CoV-2 virus and the situation of the lack of basic protection measures in the medical sector. The article presents social initiatives undertaken by technical universities in Cracow and analyses the involvement of students, PhD candidates and academic staff in these activities, with particular emphasis on the action of printing protective helmets to hospitals. The following research methods were used in the article: critical analysis of

---

<sup>1</sup> Dr inż., Politechnika Krakowska im. Tadeusza Kościuszki, Kraków, Polska.

<sup>2</sup> Mgr inż., Politechnika Krakowska im. Tadeusza Kościuszki, Kraków, Polska.

literature sources and case studies of activities carried out at the AGH University of Science and Technology and the Cracow University of Technology. This activities can be shown as case study for 'good practices' for other universities in the aspect of developing initiatives related to the social responsibility of a university.

**KEYWORDS:** CSR, USR, social responsibility, university, coronavirus, COVID-19

## 1. Wprowadzenie

### 1.1. Społeczna odpowiedzialność uczelni wyższych

Istnieje wiele koncepcji i definicji społecznej odpowiedzialności biznesu (ang. *corporate social responsibility* – CSR) zarówno w literaturze, jak i w ujęciu normatywnym, w tym w normie PN-ISO 26000 (Cichorzewska 2015). Ogólnie CSR można określić jako rodzaj obowiązku dbałości o wszystko to, co otacza daną organizację, a także o poszanowanie wartości wewnątrz niej (Kazojć 2014). Podejście do społecznej odpowiedzialności opiera się na szeregu dobrowolnych działań organizacji w perspektywie długofalowej (Kazojć 2014). CSR podkreśla konieczność zaspokojenia potrzeb interesariuszy, zarówno tych przez nich zdefiniowanych, jak i niezdefiniowanych, co pozwala na realizację strategii organizacji, przy jednoczesnym rozwiązywaniu problemów społecznych i środowiskowych (Kazojć 2014; Leja 2017).

Zagadnienie CSR jest szeroko omawiane w literaturze w odniesieniu do przedsiębiorstw, ale w przypadku uczelni liczba opracowań naukowych jest relatywnie niewielka (Karwowska i Leja 2018). Pojęcie CSR dla uczelni wyższej zostało wprowadzone w latach 80. XX w. jako USR (ang. *university social responsibility*), czyli odpowiedzialność uczelni wyższych za wpływ ich decyzji oraz działań na środowisko i społeczeństwo poprzez transparentne i etyczne strategie (Leoński 2019). Warto przy tym zauważyć, że sama idea będąca podstawą dla koncepcji USR jest związana ze społecznością akademicką od początku istnienia uniwersytetów. Jej istotą są podstawowe wartości akademickie związane z realizacją misji uczelni wyższych. W szczególności tradycyjne role uniwersytetu, tj. kształcenie (pierwsza misja), prowadzenie prac naukowo-badawczych (druga misja) oraz kreowanie i rozwijanie relacji z szeroko rozumianym otoczeniem społecznym (trzecia misja) pokrywają się ze współczesnymi koncepcjami USR (Beck-Krala i Klimkiewicz 2011; Cichorzewska 2015; Karwowska i Leja 2018). USR ma również odzwierciedlenie w polskim prawodawstwie. Zgodnie z art. 3 ust. 2 ustawy *Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce* z dnia 20 lipca 2018 r., system szkolnictwa wyższego i nauki funkcjonuje zgodnie z poszanowaniem standardów międzynarodowych, zasad etycznych oraz dobrych praktyk w zakresie kształcenia i działalności naukowej, w tym z uwzględnieniem znaczenia społecznej odpowiedzialności nauki (Leoński 2019).

W ostatnich latach polskie szkoły wyższe podejmują dobrowolnie dodatkowe zobowiązania społeczne wykraczające poza ramy prawne i tradycyjną rolę uczelni. Uczelnie zwracają coraz większą uwagę na szeroko rozumiane problemy społeczne występujące w ich otoczeniu (Pędziwiatr i in. 2018). Jednym z przyjętych w tym zakresie zobowiązań jest *Deklaracja społecznej odpowiedzialności uczelni* (MFiPR 2019), którą 16 listopada 2017 r. podpisały 23 szkoły wyższe (Gałat 2018; Pędziwiatr i in. 2018; Leoński 2019). Następnie, w 2019 r., dokument ten został podpisany przez kolejne 60 uczelni, w tym uczelnie techniczne z Krakowa: Akademię Górniczo-Hutniczą i Politechnikę Krakowską (MFiPR 2019). *Deklaracja* określa w 12 punktach zasady związane ze społeczną odpowiedzialnością uczelni (Pędziwiatr i in. 2018; Leoński 2019). Pomimo braków opisywanych w literaturze, dokument stanowi wytyczne tworzące nowy trend w działalności polskich uczelni, uświadamiając im niezbędne działania w zakresie USR i sankcjonując funkcjonowanie pojęcia odpowiedzialności społecznej w środowisku akademickim (Gałat 2018). Należy również zauważyć, że cenną inicjatywą, związaną z podpisaniem *Deklaracji*, jest również gromadzenie danych w postaci dobrych praktyk w zakresie działań społecznych podejmowanych przez uczelnie wyższe, które zostały usystematyzowane w *Katalogu praktyk Społecznej Odpowiedzialności Uczelni w Polsce* (MFiPR 2019). W dokumencie tym pokazano szerokie spektrum działań podejmowanych przez szkoły wyższe w zakresie USR, przenikanie się tej tematyki z podstawową działalnością jednostek akademickich oraz niejednorodne podejście uczelni do tematyki społecznej odpowiedzialności, a także brak aktywnego raportowania swoich działań przez niektóre jednostki. Przykładowe obszary tematyczne związane z USR zostały zaprezentowane na rysunku 1.



Rysunek 1. Obszary odpowiedzialności społecznej określone dla uczelni wyższej wraz z podaniem przykładowych działań  
Źródło: opracowanie własne

Rysunek 1, pomimo że nie przedstawia wyczerpująco wszystkich obszarów USR, pozwala jednak pokazać różnorodność zagadnień i tematyki, jaką obejmuje. Należy przy tym pamiętać, że tematyka społecznej odpowiedzialności jest znacznie szersza i porusza również takie kwestie jak: polityka różnorodności (Pietrzak 2019) czy budowanie kultury innowacyjności (Leja 2017; Szelałowska-Rudzka i Spodarczyk 2018). Warto również zwrócić uwagę na fakt, że zagadnienia USR będą się przenikać między wyznaczonymi obszarami. Przykładowo uczelnie powinny odgrywać istotną rolę w kształtowaniu odpowiedzialnych postaw i zachowania swoich studentów (Cichorzewska 2015), ale żeby to osiągnąć, muszą skupić się nie tylko na obszarze edukacji, ale również na rozwijaniu innowacji. W omawianym przypadku, w celu efektywnego kształtowania pożądanych postaw, konieczne jest stosowanie innowacyjnych metod pracy ze studentami, które powinny być zintegrowane z filozofią kształcenia zgodnie z programem studiów (Berniak-Woźny 2017).

## 1.2. Postawa uczelni wyższych w świetle epidemii koronawirusa

Pandemia koronawirusa miała wpływ na różne sektory gospodarki i politykę CRS w wielu organizacjach (Mao i in. 2020; He i Harris 2020), w tym uczelniach wyższych. Z powodu epidemii szkolnictwo wyższe na świecie i w Polsce czekają nowe wyzwania. Najważniejsze z nich to utrzymanie ciągłości kształcenia studentów, w tym zapewnienie im dostępu do zdalnego nauczania. W tym przypadku niezbędne były szybkie decyzje władz uczelni dotyczące możliwości zdalnej realizacji treści programowych (MNiSW 2020a). Szczególnie trudne pod tym względem zadanie miały uczelnie o profilu praktycznym, np. uczelnie techniczne, które realizują zajęcia laboratoryjne z wykorzystaniem drogich, nowoczesnych urządzeń, oraz poznaniem metod badawczych realizowanych przy ich pomocy (Kotowski 2020). Dysponując nawet specjalistycznym oprogramowaniem przystosowanym do edukacji zdalnej, nie jest łatwo przekazać wszystkie zagadnienia w postaci „treści wirtualnych”. Niezbędne było więc osiągnięcie kompromisu pomiędzy jakością kształcenia a bezpieczeństwem studentów i kadry akademickiej. Kolejnym wyzwaniem była płynna obsługa zajęć wirtualnych. Pomimo iż większość uczelni ma oprogramowanie pozwalające na zdalne realizacje zajęć, to zaistniała sytuacja wymuszała zwiększenie liczby użytkowników oraz wygospodarowanie dodatkowych zasobów dla szybko rosnącej ilości przekazywanych danych. Nowa forma prowadzenia zajęć okazała się również wyzwaniem dla kadry akademickiej, gdyż nie wszyscy byli przeszkoleni do zdalnego prowadzenia zajęć na odległość. Ponadto część pracowników nie była przekonana co do efektywności zdalnego kształcenia (Korniejenko 2018). W związku z tym uczelnie musiały zorganizować odpowiednie wsparcie dla tej części pracowników w postaci dodatkowych szkoleń i instrukcji.

Kolejnym problemem do rozwiązania była realizacja praktyk studenckich. W tym przypadku niezbędne było zastosowanie elastycznego podejścia i współpracy z przedsiębiorstwami. Znaczna ich część korzystała w dużej mierze z pracy zdalnej, deklarowanej nawet do końca 2020 r. W związku z tym przedsiębiorstwa nie były zainteresowane przyjmowaniem praktykantów podczas wakacji. Dodatkowo sytuacja na rynku pracy uległa diametralnej zmianie. Jeszcze na początku 2020 r. rynek pracy miał charakter „ryнку pracownika”, ale w wyniku pandemii i wywołanego nią kryzysu w znacznym stopniu wzrosło bezrobocie. Ponadto część przedsiębiorstw zredukowała liczbę etatów lub wstrzymała nowe zatrudnienia. Zmiana ta znacząco wpłynęła nie tylko na trudności w znalezieniu atrakcyjnego miejsca praktyk, ale przede wszystkim na zmniejszenie szans absolwentów uczelni na rynku pracy.

W powiązaniu z niepewną sytuacją na rynku pracy, niezwykle istotne okazało się wprowadzenie dodatkowych działań związanych ze wsparciem finansowym studentów. Dla znacznej ich części możliwość uzyskania takiej pomocy była niezwykle istotna, ze względu na utratę dodatkowych źródeł dochodów zapewniających utrzymanie w miejscu studiowania. Obecnie, ze względu na wysokie koszty utrzymania w dużych aglomeracjach miejskich, znaczna część studentów podejmuje dodatkowe prace w sektorze turystycznym lub gastronomicznym. Zamknięcie gospodarki sprawiło, że to właśnie te sektory najbardziej odczuły skutki pandemii, a studenci pozostali bez możliwości uzyskania dodatkowych dochodów.

Ważnym zagadnieniem było również zapewnienie możliwości obrony prac licencjackich, inżynierskich, magisterskich, doktorskich itd. Wprowadzone przez Ministerstwo Nauki i Szkolnictwa Wyższego regulacje dopuściły możliwość zdalnej obrony (MNiSW 2020a), co związane było z koniecznością pokonania różnych barier wewnątrz uczelni, wynikających nie tylko z aspektów technicznych, ale również prawnych czy etycznych (Mieczarek-Taica i in. 2020). Pod tym względem decyzje szkół wyższych nie zawsze były spójne w ramach wszystkich wydziałów. Jedne z nich dopuszczały obrony on-line, inne preferowały pozostanie przy formie tradycyjnej z uwzględnieniem szczególnych zasad bezpieczeństwa.

W kolejnych miesiącach epidemii pojawiały się kolejne wyzwania, związane z aspektami umiędzynarodowienia szkolnictwa wyższego. Efektem korona-kryzysu było ograniczenie mobilności studentów i kadry akademickiej, a także opóźnienia w realizacji projektów dydaktycznych i badawczych. W przypadku uczelni technicznych dodatkowym problemem była realizacja współpracy z przemysłem, często stanowiąca znaczącą część ich działalności. Dodatkowo, ośrodki akademickie znajdowały się w najmniej dogodnym dla nich momencie z powodu zakończenia kadencji działających władz uczelni i wyborami nowych. Odchodzące władze, nawet jeśli podejmowały stosowne do zaistniałej sytuacji decyzje, zdawały sobie sprawę, że nie muszą być one aprobowane i kontynuowane przez następców. Poza tym podejmowa-

ne w danym momencie zobowiązania mogą przynosić długo-perspektywiczne konsekwencje, np. zmiany w regulacjach prawnych uczelni.

Uczelnie wyższe, mające szereg własnych problemów, nie mogą jednak zapominać, że funkcjonują również dla całości społeczeństwa. Dlatego są one zobligowane nie tylko do zapewnienia ciągłości własnego działania, ale również do udzielenia pomocy innym podmiotom, które znalazły się w trudnej sytuacji. Główną motywacją prezentowanej pracy jest pokazanie studium przypadków, w których uczelnie wyższe odpowiadają na potrzeby społeczne, aktywnie angażując w te działania zarówno kadrę akademicką, jak i studentów.

### 1.3. Społeczna odpowiedzialność uczelni wyższych a polityka zrównoważonego rozwoju

Szkoły wyższe w Polsce, prowadząc działalność badawczą i dydaktyczną, muszą brać pod uwagę zarówno społeczne, jak i gospodarcze uwarunkowania i odnosić je do polityki zrównoważonego rozwoju (Leoński 2019). Zrównoważony rozwój jest jedną z części społecznej odpowiedzialności organizacji (Kielesińska 2019; Kochmańska 2019) i stanowi punkt równowagi pomiędzy działaniami w aspekcie ekologicznym, społecznym i ekonomicznym (Kazojć 2014).

Uczelnie realizują wiele celów zrównoważonego rozwoju (ONZ 2020), jednak biorąc pod uwagę ich misję, trzy z nich są najważniejsze. Są to cel 4. – jakość edukacji, cel 9. obejmujący innowacje, oraz 17. związany z partnerstwem, który obejmuje także obszar USR. Dla uczelni technicznych obszar związany z innowacjami środowiskowymi jest wyjątkowo istotny i podkreślany w programach nauczania z zakresu: ochrony środowiska, znaczenia społeczno-gospodarczego oraz środowiskowego nowych technologii, zrównoważonego budownictwa czy nowych źródeł energii, efektywności energetycznej (Cichorzewska 2015). Obecnie uczelnie są organizacjami, które podejmując działania zgodne z USR, przyczyniają się jednocześnie do zrównoważonego rozwoju otoczenia, w którym działają (Beck-Krala i Klimkiewicz 2011).

## 2. Działania podjęte przez Akademię Górniczo-Hutniczą

**A**kademia Górniczo-Hutnicza (AGH) ma bogatą historię w realizacji działań w zakresie USR (Leja 2009; Gałat 2018). Podejmowane przez uczelnię działania zostały usystematyzowane w 2017 r., gdy przystąpiła ona do sieci współpracy *United Nations Global Compact* i zobowiązała się do tworzenia raportów społecznych (Pędziwiatr i in. 2018). Dodatkowo, w 2019 r., uczelnia podpisała

*Deklarację społecznej odpowiedzialności uczelni, w której również zobligowała się do systematycznego raportowania swoich działań (MFiPR 2019). Analiza działalności uczelni w zakresie USR jest systematycznie dokonywana w trzech aspektach: ekonomicznym, środowiskowym i społecznym (Pędziwiatr i in. 2018).*

Po wystąpieniu pandemii uczelnia podjęła systematyczne działania w ramach USR, wynikające zarówno z jej decyzji, jak i inicjatyw oddolnych. Działania te były systematycznie raportowane na stronie internetowej (rys. 2).



Rysunek 2. Strona Akademii Górniczo-Hutniczej zawierająca podziękowania dla pracowników służby zdrowia (maj 2020)

Źródło: [www.agh.edu.pl](http://www.agh.edu.pl) (print screen z dn. 10/05/2020)

Kształcenie zdalne zostało zorganizowane w krótkim czasie, a studentom i kadry akademickiej zapewniono szeroki dostęp do baz danych i e-nauczania. AGH mogły tworzone od kilkunastu lat zasoby cyfrowe, w tym: e-podręczniki Open AGH (recenzowane e-podręczniki do przedmiotów ścisłych na poziomie akademickim) oraz baza Open AGH zawierająca e-zasoby, tj. kursy online, skrypty, testy, ćwiczenia, a także prezentacje do przedmiotów ścisłych opracowane przez pracowników, doktorantów i studentów AGH. Uczelnia podjęła również szereg działań dotyczących wsparcia dla studentów i utrzymujących ciągłość jej funkcjonowania.

AGH podjęła także działania mające wesprzeć otoczenie społeczne już w pierwszym, najtrudniejszym okresie epidemii. Przekazała placówkom medycznym materiały i środki ochrony osobistej dla personelu, które zakupiono ze środków ze spontanicznej zbiórki wśród członków wspólnoty uczelni, jak i z zapasów własnych uczelni (MNiSW 2020b). Sztandarową inicjatywą uczelni w zakresie pomocy udzielanej dla otoczenia społecznego była akcja: *Przyłbica dla Medyka – AGH*, szeroko opisywana i komentowana w prasie (Kołodziej 2020), w ramach której współpracowało 215 wo-



lontariuszy z AGH (w tym studentów) oraz sympatyków akcji w różnych regionach województwa małopolskiego. Akcję wspierało dodatkowo 26 firm współpracujących z uczelnią (MNiSW 2020b). Produkcja 21 566 przyłbic ochronnych była możliwa dzięki zaangażowaniu 45 drukarek (42 z AGH i 3 prywatne) oraz udostępnieniu przez AGH pomieszczeń produkcyjnych i montażowych, a także 2 magazynów. Sprawnie zorganizowano również system ich dystrybucji. Ponadto, po pierwszym okresie działań udało się pozyskać partnerów przemysłowych do wykonania matrycy i rozpoczęcia produkcji masowej głównego elementu przyłbicy na wtryskarkach, dzięki czemu znacząco wzrosła efektywność ich produkcji. Wykonane przyłbice ochronne przekazano nieodpłatnie 207 instytucjom w całej Polsce. Należy przy tym zauważyć, że działania te w aspekcie USR to nie tylko sama pomoc dla ośrodków medycznych, ale również kształtowanie postaw odpowiedzialnych społecznie studentów.

Druk 3D wykorzystano także do wytworzenia elementów specjalistycznych do masek pomagających w oddychaniu oraz osłon dla sprzętu diagnostycznego z zakresu laryngologii. Wsparcie AGH w zakresie technologii nie ograniczyło się tylko do wykonania elementów z wykorzystaniem druku 3D. Pracownicy uczelni, dysponujący wiedzą specjalistyczną, prowadzili również konsultacje co do własności sprzętu ochronnego z punktu widzenia użytego materiału oraz badania właściwości materiałów poddanych sterylizacji, a także doradztwo w zakresie oprogramowania wspierającego działania medyczne. Uczelnia udostępniła również kamery termowizyjne dla krakowskich szpitali w celu automatycznej kontroli temperatury osób korzystających z usług medycznych. Dodatkowo AGH zakupiła respirator dla potrzeb dydaktycznych na kierunku Inżynieria Biomedyczna, z zamiarem zlokalizowania go w jednym z krakowskich szpitali (MNiSW 2020b).

Uczelnia zapewniła także pośrednią pomoc w walce z koronawirusem udostępniając zasoby obliczeniowe Cyfronetu. Umożliwił on szybką ścieżkę dostępu do mocy obliczeniowej oraz zapewnił priorytet w dostępie do zasobów obliczeniowych dla grantów zajmujących się COVID-19, w tym dla instytucji europejskich tj. EGI, PRACE, WLCG. Aktualnie około 25% mocy obliczeniowej Prometheusa jest używane do obliczeń związanych z medycyną i farmacją, a badania realizowane są m.in. w zakresie (MNiSW 2020b):

- substancji mogących blokować interakcję koronawirusa z tkankami,
- przeciwciał obecnych w czasie zakażenia,
- opracowania metodologii szybkich badań nad szczepionkami z wykorzystaniem symulacji komputerowych.

Oprócz powyższych działań, uczelnia prowadziła kampanię społeczną informując o wsparciu dla personelu medycznego na swojej stronie internetowej (rys. 2) oraz na banerach umieszczonych na fasadach akademików AGH. Przekazywane komunikaty były istotne ze względu na budowanie postaw społecznych w otoczeniu i świadczyły o szerokim rozpoznaniu potencjalnych problemów przez uczelnię.



### 3. Działania podjęte przez Politechnikę Krakowską

**P**olitechnika Krakowska (PK) jest uczelnią znacznie mniejszą niż AGH, niemniej jednak jest w gronie znaczących uczelni technicznych w Polsce. Uczelnia w 2019 r. podpisała *Deklarację społecznej odpowiedzialności uczelni* (MFiPR 2019), deklarując tym samym podejmowanie świadomych działań w zakresie USR. Przyjęta strategia informacyjna uczelni była podobna jak AGH. Podejmowane działania w zakresie USR były publikowane na głównej stronie uczelni (rys. 3).

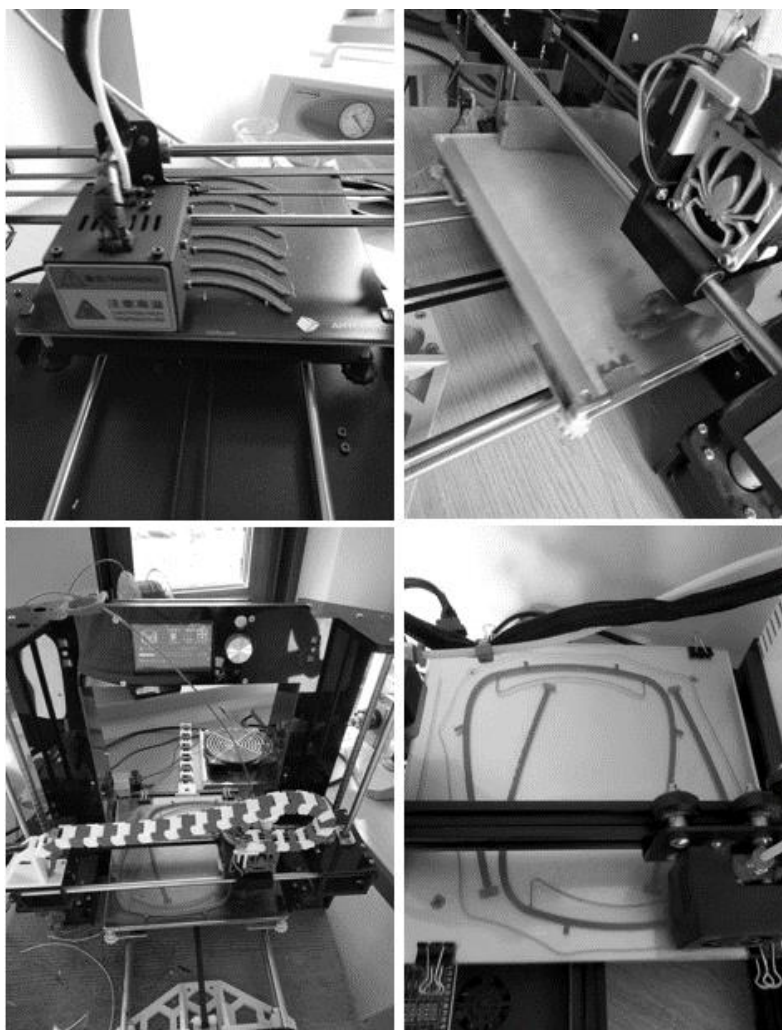


Rysunek 3. Strona Politechniki Krakowskiej zawierająca informacje dotyczące sytuacji epidemiologicznej (maj 2020)

Źródło: [www.pk.edu.pl](http://www.pk.edu.pl) (print screen z dn. 10/05/2020)

W pierwszym okresie pandemii niezbędne było zapewnienie studentom dostępu do zajęć zdalnych. Uczelnia wykorzystała do tego platformę na bazie Moodle, pozostawiając jednak pracownikom możliwość korzystania także z innych narzędzi elektronicznych, w tym z platformy Microsoft Teams. Narzędzia e-learningowe można było łatwo znaleźć przez stronę główną uczelni (rys. 3). Przeprowadzono podstawowe szkolenia w zakresie obsługi platformy. Dodatkowo studentom zapewniono wsparcie finansowe, a także konsultacje psychologiczno-pedagogiczne prowadzone przez telefon i on-line.

Na PK podjęto liczne aktywności związane z realizacją USR w czasach pandemii. Uczelnia przekazała do placówek medycznych i domów pomocy społecznej (DPS) z województwa małopolskiego 300 litrów płynu do dezynfekcji rąk, wyprodukowanego w laboratoriach Wydziału Inżynierii i Technologii Chemicznej PK (MNiSW 2020b). Udostępniła również ośrodkom medycznym kamery termowizyjne wykorzystywane w badaniach własnych oraz zaangażowała się w inne inicjatywy społeczne, m.in. szycie maseczek ochronnych (MNiSW 2020b).



Rysunek 4. Proces drukowania 3D przyłbice odbywający się na Wydziale Inżynierii Materiałowej i Fizyki Politechniki Krakowskiej  
Źródło: opracowanie własne

Na PK przeprowadzono również druk przyłbic ochronnych (rys. 4), w którym uczestniczyły przede wszystkim: Wydział Mechaniczny, Inżynierii Lądowej, Inżynierii i Technologii Chemicznej, Inżynierii Elektrycznej i Komputerowej oraz Inżynierii Materiałowej i Fizyki.

Przyłbice z PK (rys. 5) przekazano ponad 90 jednostkom z województwa małopolskiego, w tym: szpitalom, centrom diagnostycznym, przychodniom, domom pomocy społecznej, ośrodkom opiekuńczym, a także ratownikom medycznym (MNiSW 2020b). Warto przy tym zauważyć, że inżynierowie z PK opracowali dwa sposoby przyspieszonego druku przyłbic (o 63% w porównaniu z gotowym projektem udostępnionym przez firmę PRUSA), a następnie umożliwili skorzystanie ze zmodyfikowanego rozwiązania innym ośrodkom poprzez zamieszczenie instrukcji na stronie uczelni (PK 2020a).



Rysunek 5. Przyłbice drukowane na Wydziale Inżynierii Materiałowej i Fizyki Politechniki Krakowskiej  
Źródło: opracowanie własne

Technologia druku 3D została również wykorzystana przez pracowników uczelni do wykonania podwójnych adapterów, które pozwoliły podłączyć filtry medyczne do dostępnych na rynku masek do snorkelingu, przez co mogą być one użyte jako

maski chroniące ratowników medycznych i lekarzy przed koronawirusem. Na PK powstał także prototyp niskobudżetowego respiratora, wyposażonego w układ nawilżania i podgrzewania powietrza. Urządzenie zostało opracowane we współpracy ze specjalistami Uniwersyteckiego Szpitala Dziecięcego w Krakowie (MNiSW 2020b). Kolejnym zrealizowanym autorskim projektem była bramka do automatycznego pomiaru temperatury i dezynfekcji rąk z modułem transmisji danych wifi. Prototyp jest obecnie testowany w Uniwersyteckim Szpitalu Dziecięcym w Krakowie (PK 2020b). Skonstruowane prototypy są przykładem pokazującym społeczny wymiar innowacji realizowanej na uczelni, w odpowiedzi na zmieniające się warunki otoczenia i zwracającą uwagę na efekty, jakie może osiągnąć uczelnia we współpracy z otoczeniem społeczno-gospodarczym.

#### 4. Działania podejmowane przez krakowskie uczelnie wyższe na tle innych uczelni technicznych w Polsce

**P**rzykłady obu uczelni krakowskich informują o kompleksowych działaniach w zakresie USR podejmowanych w sytuacji kryzysowej, w celu wsparcia otoczenia. Wskazane powyżej działania nie były odosobnione, gdyż podobne aktywności podejmowały również inne uczelnie techniczne spoza Krakowa, zaangażowane w inicjatywy społeczne na rzecz walki z pandemią. Są to (MNiSW 2020b):

- Politechnika Koszalińska;
- Politechnika Poznańska;
- Akademia Techniczno-Humanistyczna w Bielsku-Białej;
- Politechnika Białostocka;
- Akademia Marynarki Wojennej w Gdyni;
- Zachodniopomorski Uniwersytet Technologiczny w Szczecinie;
- Politechnika Łódzka;
- Uniwersytet Technologiczno-Humanistyczny w Radomiu;
- Uniwersytet Technologiczno-Przyrodniczy w Bydgoszczy;
- Politechnika Świętokrzyska;
- Politechnika Lubelska;
- Akademia Morska w Szczecinie;
- Politechnika Rzeszowska im. Ignacego Łukasiewicza;
- Politechnika Warszawska;
- Wojskowa Akademia Techniczna;
- Politechnika Częstochowska;
- Akademia Wojsk Lądowych we Wrocławiu;
- Politechnika Opolska;
- Politechnika Gdańska;

- Politechnika Śląska;
- Politechnika Wrocławska;
- Szkoła Główna Służby Pożarniczej.

Wśród uczelni technicznych popularne były szczególnie działania związane z drukiem przyłbic ochronnych. Uczelnie starały się dopasowywać profil podejmowanych aktywności do swojej specyfiki oraz potrzeb danego regionu. Należy podkreślić zaangażowanie w te aktywności całej społeczności akademickiej, a zwłaszcza studentów, co powinno w przyszłości dać efekt większego zaangażowania społecznego tej grupy.

## 5. Wnioski

**P**andemia koronawirusa miała znaczący wpływ na funkcjonowanie uczelni wyższych na całym świecie. Dla szkolnictwa wyższego w Polsce był to szczególnie trudny czas, ze względu na wprowadzone zmiany i reformę bezpośrednio przed tym okresem. Nieugruntowana jeszcze nowa struktura uczelni musiała zmierzyć się z licznymi wyzwaniami. Czas pandemii wymagał od poszczególnych szkół wyższych podejmowania trudnych, ryzykownych decyzji, które mogą mieć odległe skutki, ale ze względu na specyfikę sytuacji musiały być podjęte prawie natychmiastowo; co nie pozwalało na wiarygodne oszacowanie ich długofalowych konsekwencji. Sytuacja rozprzestrzenia się wirusa SARS-CoV-2 pokazała również mnogość decyzji, aby zaspokoić potrzeby swoich interesariuszy, zarówno wewnętrznych (kadry akademickiej i studentów), jak i zewnętrznych (otoczenia społeczno-gospodarczego).

Uczelnie będąc w trudnej sytuacji, nie zapomniały jednak o swej istotnej roli w społeczeństwie i podjęły działania w obszarach, w których polityka państwa okazała się niewystarczająco skuteczna. W pracy pokazano wybrane dobre praktyki inicjatyw społecznych podejmowane przez techniczne uczelnie wyższe z Krakowa. Wskazują one, że uczelnie realizując USR, z jednej strony pomagają otoczeniu społeczno-gospodarczemu, a z drugiej realizują swoją misję poprzez budowanie świadomości i kształtowanie postaw studentów. Omówione działania pokazały także, iż uczelnie aktywnie adaptują się do zaistniałej sytuacji, wykorzystując inicjatywy, oddolne, np. inicjowanie badań zgodnych z aktualnymi potrzebami społeczeństwa.

## Literatura

- BECK-KRALA E. i KLIMKIEWICZ K. 2011. *W kierunku kształtowania świadomej polityki społecznej odpowiedzialności uczelni wyższych*. Prace Naukowe Uniwersytetu Ekonomicznego we Wrocławiu nr 220, s. 234–247.

- BERNIAK-WOŹNY J. 2017. *Skuteczna edukacja w zakresie Społecznej Odpowiedzialności Biznesu (CSR) jako wyzwanie dla szkół biznesu*. Kwartalnik Naukowy Uczelni Vistula nr 1(51), s. 22–34.
- CICHORZEWSKA M. 2015. *Społeczna odpowiedzialność biznesu (CSR) jako istotny element edukacji studentów uczelni technicznej*. Edukacja-Technika-Informatyka nr 6(1), s. 188–194.
- GAŁĄT W. 2018. *Deklaracja społecznej odpowiedzialności uczelni jako wzmocnienie etosu akademickiego*. Zeszyty Naukowe UEK nr 6(978), s. 137–151.
- HE H. i HARRIS L. 2020. *The impact of Covid-19 pandemic on corporate social responsibility and marketing philosophy*. Journal of Business Research nr 116, s. 176–182.
- KARWOWSKA E. i LEJA K. 2018. *Czy społeczna odpowiedzialność uniwersytetu może być bardziej odpowiedzialna? Szanse wynikające z kooperacji uczelni*. E-mentor nr 3(75), s. 4–13.
- KAZOJĆ K. 2014. *Koncepcja społecznej odpowiedzialności i jej obszary w organizacjach*. Zeszyty Naukowe Uniwersytetu Szczecińskiego. Studia i Prace Wydziału Nauk Ekonomicznych i Zarządzania nr 38, T.1 Zarządzanie, s. 57–69.
- KIELESIŃSKA A. 2019. *Paradygmat zrównoważonego rozwoju w odpowiedzialności społecznej biznesu*. Przedsiębiorczość i Zarządzanie, Społeczna odpowiedzialność biznesu T. 20, nr 11, s. 81–96.
- KOCHMAŃSKA A. 2019. *The Concept of CSR as One of The Determinants of Sustainable Development*. Zeszyty Naukowe. Organizacja i Zarządzanie, Politechnika Śląska nr 135, s. 87–97.
- KOŁODZIEJ B. 2020. *Kraków/ Ponad 20 tys. przyłbic medycznych powstało w AGH*. Nauka w Polsce, [Online] <http://naukawpolsce.pap.pl/aktualnosci/news%2C82172%2Ckrakow-ponad-20-tys-przylybic-medycznych-powstalo-w-agh.html> [Dostęp: 18.06.2020].
- KORNIEJENKO K. 2018. *Wykorzystanie wirtualnej rzeczywistości jako nowoczesnego narzędzia wsparcia w kształceniu inżynierów*. Zeszyty Naukowe Wydziału Elektrotechniki i Automatyki Politechniki Gdańskiej nr 58, s. 37–40.
- KOTOWSKI A. 2020. *Koronawirus: o kształceniu na odległość na studiach*. Rzeczpospolita, [Online] <https://www.rp.pl/Sady-i-prokuratura/304019998-Koronawirus-o-ksztalceniu-na-odleglosc-na-studiach.html> [Dostęp: 12.06.2020].
- LEJA K. 2009. *Uniwersytet społecznie odpowiedzialny – przykład AGH*. E-mentor nr 4(31), s. 4–12.
- LEJA K. 2017. *Uniwersytet na rozdrożu*. Studia i Prace Kolegium Zarządzania i Finansów, Szkoła Główna Handlowa nr 155, s. 9–24.
- LEOŃSKI W. 2019. *Społeczna odpowiedzialność biznesu w polskich uczelniach wyższych*. Przedsiębiorczość i Zarządzanie, Trendy w zarządzaniu współczesnymi organizacjami T. 20, nr 6, cz. 1, s. 239–252.
- MAO Y., HE J., MORRISON A.M. i COCA-STEFANIAK A. 2020. *Effects of tourism CSR on employee psychological capital in the COVID-19 crisis: from the perspective of conservation of resources theory*. Current Issues in Tourism; DOI: 10.1080/13683500.2020.1770706.
- MFiPR 2019. Ministerstwo Funduszy i Polityki Regionalnej 2019. *Grupa robocza ds. społecznej odpowiedzialności uczelni*. [Online] <https://www.gov.pl/web/fundusze-regiony/grupa-robocza-ds-spolesznej-odpowiedzialnosci-uczelni> [Dostęp: 10.06.2020].
- MIECZAREK-TAICA A., GÓRAK-SOSNOWSKA K. i KRAWCZYK A. 2020. *Raport: Obrony online – czy damy radę?* [Online] <https://forum-dziekanatow.pl/index.php/raport-obrony-online-czy-damy-rade/> [Dostęp: 20.06.2020].
- MNiSW 2020a. Ministerstwo Nauki i Szkolnictwa Wyższego: *Kształcenie zdalne na uczelniach*. [Online] <https://www.gov.pl/web/nauka/ksztalcenie-zdalne-na-uczelniach> [Dostęp: 10.06.2020].
- MNiSW 2020b. Ministerstwo Nauki i Szkolnictwa Wyższego: *„Politechniki pomagają” – uczelnie w walce z zagrożeniem COVID-19*, [Online] <https://www.gov.pl/web/nauka/politechniki-pomagaja-uczelnie-w-walce-z-zagrozeniem> [Dostęp: 20.06.2020].
- ONZ 2020. Organizacja Narodów Zjednoczonych (United Nations) 2020: *About the Sustainable Development Goals*. [Online] <https://www.un.org/sustainabledevelopment/sustainable-development-goals/> [Dostęp: 27.07.2020].



- PĘDZIWIATR E., CZAPLICKA-KOTAS A. i KULCZYCKA J. 2018. *Działania realizowane przez szkoły wyższe w ramach społecznej odpowiedzialności – dobre praktyki*. *Ekonomia Społeczna* nr 1, s. 45–56.
- PIETRZAK E. 2019. *Edukacja do równości i różnorodności na polskich uczelniach technicznych*. *Acta Universitatis Lodziensis. Folia Sociologica*, Kobiecość i męskość w publicznym dyskursie, społecznych praktykach i indywidualnych doświadczeniach nr 70, s. 5–16.
- PK 2020a. Politechnika Krakowska, *Inżynier potrafi i pomaga – Politechnika ze wsparciem dla medyków*. [Online] [https://www.pk.edu.pl/index.php?option=com\\_content&view=article&id=3380:inzynier-potrafi-i-pomaga-politechnika-ze-wsparciem-dla-medykow&catid=49:pk18-aktualnosci&Itemid=944&lang=pl](https://www.pk.edu.pl/index.php?option=com_content&view=article&id=3380:inzynier-potrafi-i-pomaga-politechnika-ze-wsparciem-dla-medykow&catid=49:pk18-aktualnosci&Itemid=944&lang=pl) [Dostęp: 23.06.2020].
- PK 2020b. Politechnika Krakowska, *Bramka z Politechniki Krakowskiej zbada i ochroni przed koronawirusem*. [Online] [https://www.pk.edu.pl/index.php?option=com\\_content&view=article&id=3452:bramka-z-politechniki-krakowskiej-zbada-i-ochroni-przed-koronawirusem&catid=49:pk18-aktualnosci&Itemid=944&lang=pl](https://www.pk.edu.pl/index.php?option=com_content&view=article&id=3452:bramka-z-politechniki-krakowskiej-zbada-i-ochroni-przed-koronawirusem&catid=49:pk18-aktualnosci&Itemid=944&lang=pl) [Dostęp: 23.06.2020].
- SZELĄGOWSKA-RUDZKA K.I. i SPODARCZYK E. 2018. *Spółecznie odpowiedzialny student w społecznie odpowiedzialnej uczelni w świetle wyników badania*. *Prace Naukowe Uniwersytetu Ekonomicznego we Wrocławiu, Zrównoważony rozwój – przedsiębiorczość studencka – społecznie odpowiedzialna uczelnia* nr 516, s. 87–98.





Paulina Luiza WIZA<sup>1</sup>

---

## Kształtowanie przewag konkurencyjnych przedsiębiorstw mleczarskich z zastosowaniem narzędzi CSR na przykładzie firmy Mlekovita

**STRESZCZENIE:** CSR (Corporate Social Responsibility), czyli społeczna odpowiedzialność biznesu, rozumiana jest jako koncepcja zarządzania przedsiębiorstwem, polegająca na świadomym oraz zrównoważonym działaniu. Obecnie zagadnienia związane z zastosowaniem CSR są przedmiotem wielu badań i analiz, gdyż współcześnie CSR jest ważnym czynnikiem w kształtowaniu wizerunku oraz przewagi konkurencyjnej na rynku. Celem pracy jest analiza i ocena zastosowania koncepcji społecznej odpowiedzialności w przedsiębiorstwach mleczarskich w Polsce na przykładzie firmy Mlekovita w kształtowaniu wizerunku i przewagi konkurencyjnej. Wykorzystano przegląd literatury przedmiotu, który posłużył w zdefiniowaniu koncepcji CSR, oraz raporty społecznej odpowiedzialności opublikowane przez produkuje przedsiębiorstwa mleczarskie w Polsce, w tym firmę Mlekovita. Zastosowano proste metody opisowe i przyczynowo-skutkowe. Na podstawie przeprowadzonych analiz stwierdzono, że CSR ma wymiar globalny, a korzyści, które przynosi przedsiębiorstwom, pracownikom, społeczności lokalnej oraz środowisku są znaczące. Zaobserwowano pozytywne postrzeganie wśród społeczeństwa polskich przedsiębiorstw mleczarskich, które wdrożyły działania CSR, przyczyniając się do zwiększenia stabilności ich funkcjonowania. W pracy wskazano możliwości i tworzenie przewag konkurencyjnych w aspekcie innowacji społecznych i zmieniających się modeli biznesowych. Badania zawarte w pracy wpisują się w 8. oraz 12. cel zrównoważonego rozwoju: odpowiedni wzrost gospodarczy oraz zrównoważona konsumpcja i produkcja.

**SŁOWA KLUCZOWE:** społeczna odpowiedzialność biznesu, przewaga konkurencyjna, branża mleczarska, Mlekovita

## Shaping competitive advantages of dairy enterprises using CSR tools on the example of Mlekovita

**ABSTRACT:** CSR (Corporate Social Responsibility), i.e. corporate social responsibility is understood as the concept of business management, consisting of conscious and sustainable action. Currently, issues related to the use of CSR are the subject of many studies and analyzes, because nowadays CSR is an important factor in shaping the image and

---

<sup>1</sup> Mgr inż., Uniwersytet Przyrodniczy w Poznaniu, Wydział Ekonomiczno-Społeczny, Katedra Ekonomii i Polityki Gospodarczej w Agrobiznesie, Poznań, Polska.

competitive advantage on the market. The purpose of the work is to analyze and evaluate the application of the concept of corporate social responsibility in dairy enterprises in Poland in shaping the image and competitive advantage on the example of Mlekovita. The study used literature on the subject, which was used to define the concept of CSR and social responsibility reports published by leading dairy enterprises in Poland, including Mlekovita. Simple descriptive and cause-and-effect methods were used. Based on the analyzes carried out, it was found that CSR has a global dimension, and the benefits it brings to enterprises, employees, the local community and the environment are significant. A positive perception among the society of Polish dairy enterprises that implemented CSR activities was observed, which contributes to increasing the stability of their functioning. The work indicates the possibilities and creating competitive advantages in the aspect of social innovations and changing business models.

**KEYWORDS:** Corporate Social Responsibility, competitive advantage, dairy industry, Mlekovita

## 1. Wprowadzenie

**P**roblematyka społecznej odpowiedzialności biznesu – CSR (ang. Corporate Social Responsibility) wzbudzała zainteresowanie już od momentu powstawania pierwszych przedsiębiorstw, które stosowały odpowiednie dla swoich czasów zapisy i zasady w tym zakresie. Pierwsze definicje społecznej odpowiedzialności biznesu pojawiły się z końcem XIX w. Główny nurt CSR pozostał przez dziesięciolecia niezmienny, kładąc główny nacisk w działalności przedsiębiorstwa na troskę o interes własny, a zarazem łączenie go z dbałością o zapewnienie korzyści dla jego interesariuszy. Współczesne przedsiębiorstwa są zobligowane do przestrzegania zasad zgodnych ze społeczną odpowiedzialnością biznesu, a ich prestiż i wiarygodność podlegają ocenie i krytyce społeczeństwa, które wymaga od nich stosowania w prowadzonej działalności ogólnie przyjętych norm i zasad postępowania i wywiera presję, aby właściwie realizowały przyjęte zobowiązania. Przedsiębiorstwa natomiast posługują się właściwymi kodeksami postępowania, prowadzą działalność w sposób transparentny i często zatrudniają pracowników odpowiedzialnych za wykonywanie tego rodzaju zadań w wyspecjalizowanych jednostkach organizacyjnych (Firlej 2018).

Przystąpienie Polski do struktur Unii Europejskiej spowodowało, że polskie przedsiębiorstwa, w tym również branży mleczarskiej, należą do jednolitego rynku europejskiego, który cechuje się wzmożoną konkurencją o pozyskanie klienta, dla którego kluczowe są produkty o najwyższej jakości oraz bezpieczne dla zdrowia (Grodea 2016; PKN 2013). Przystąpienie Polski do Unii Europejskiej przyczyniło się do prowadzenia działań dostosowawczych w przemyśle spożywczym, w tym także branży mleczarskiej, w celu realizacji unijnych wymagań. Podejmowane działania dotyczyły głównie unowocześniania technologii, dostosowywania standardów higieniczno-weterynaryjnych, a także wymagań z zakresu poprawy dobrostanu zwierząt i ochrony środowiska. Wszystkie te działania zostały podjęte w celu zbudowania przewagi konkurencyjnej przedsiębiorstw poprzez poprawę jakości produktów bez-

piecznych pod względem zdrowotności (Stawicka 2017; PKN 2013). Jednym z narzędzi w budowaniu przewagi konkurencyjnej przedsiębiorstw może być również zastosowanie społecznej odpowiedzialności biznesu, która obecnie jest tematem wielu badań i analiz, a jej wdrożenie przyczynia się do poprawy wizerunku firmy. Jedną z branż przemysłu spożywczego, w której stosuje się narzędzie CSR, jest branża mleczarska. Tworzy ona jeden z podstawowych działów krajowego sektora rolno-spożywczego. Polski przemysł mleczarski jest dla osób pracujących w tym sektorze stałym źródłem dochodów oraz gwarancją wyżywienia znaczącej liczby gospodarstw rolnych (Firlej 2018; Lewicka-Strzałecka 2009).

Celem pracy jest analiza i ocena zastosowania koncepcji społecznej odpowiedzialności w przedsiębiorstwach mleczarskich w Polsce w kształtowaniu wizerunku i przewagi konkurencyjnej, na przykładzie firmy Mlekovita. W ramach prowadzonych badań określono znaczenie CSR jako potencjału rozwojowego i przewagi konkurencyjnej zakładów przemysłu mleczarskiego w Polsce.

## 2. Ujęcie definicyjne społecznej odpowiedzialności biznesu

### 2.1. Ewolucja koncepcji społecznej odpowiedzialności biznesu

Idea CSR opiera się na koncepcji zrównoważonego rozwoju, powstałej na przełomie lat 60. i 70. XX w., zgodnie z którą uważa się, że w rozwoju gospodarczym oprócz aspektu ekonomicznego ważny jest także aspekt społeczny oraz ekologiczny (Charucka 2015). „Społeczne zaangażowanie pozwala dążyć do zachowania równowagi pomiędzy aspektem ekonomicznym, ekologicznym i społecznym w działalności przedsiębiorstwa, co może przyczynić się do realizacji celów związane z zrównoważonym rozwojem takim, jak ochrona zasobów naturalnych i utrzymanie stabilności ekosystemów, ze wszystkimi pozytywnymi skutkami w postaci poprawy stanu zdrowia ludzi i poprawy ogólnego bezpieczeństwa i dobrobytu” (Jaworska i Nadolna 2019; Bogdanienko 2011). Koncepcja CSR stała się w ostatnich latach przedmiotem badań i analiz ekonomistów, ale także prawników, politologów oraz etyków biznesu. Cechuje ją interdyscyplinarność, która wskazuje na konieczność integrowania i łączenia wiedzy z różnych dziedzin nauki i praktyki gospodarczej (Charucka 2015; Wiza 2020).

Pojęcie społecznej odpowiedzialności nie ma ściśle określonej definicji. W ramach podjętego przeglądu jej definicji stwierdzono, że ich główny nurt dotyczy nauk społecznych, a w szczególności ekonomii, socjologii i filozofii. Dla celów prezentowanego artykułu wybrano najbardziej odpowiadające i dopasowane do sektora rolno-spożywczego. W ujęciu instytucjonalnym Światowa Rada Biznesu ds. Zrównoważo-

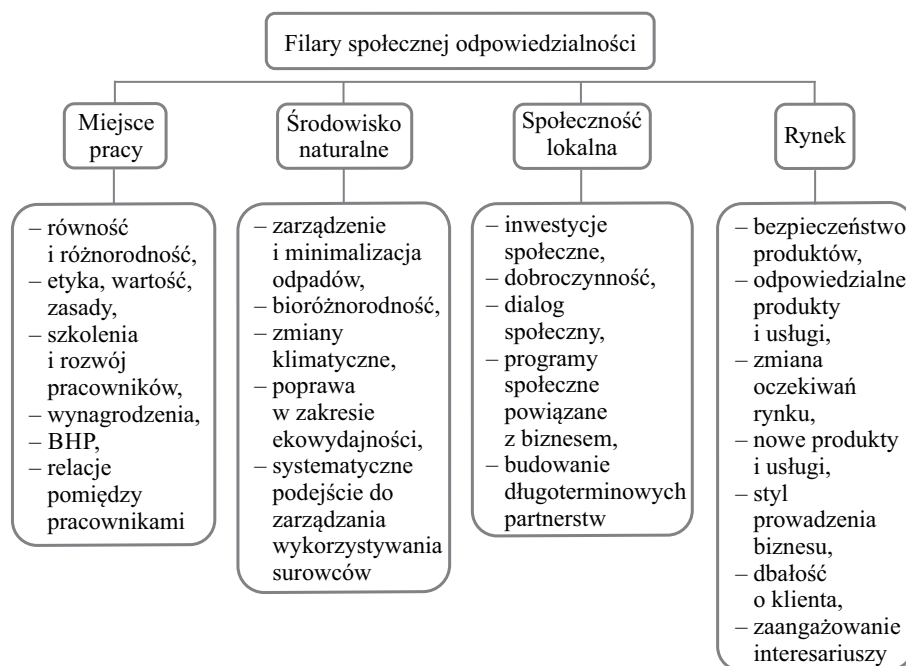
nego Rozwoju określa CSR jako „ciągłe zaangażowanie firmy, które przyczynia się do rozwoju gospodarczego, przy jednoczesnej poprawie jakości życia pracowników, ich rodzin i społeczeństwa” (Firlej 2018; WBCSD 2016). Jednym z najbardziej aktualnych określeń CSR w oparciu o opracowanie (Rybak 2004) jest „kierownictwo ma obowiązek wyboru takich decyzji i działań, które przyczyniają się zarówno do dbałości o interes własny, jak i do ochrony oraz pomnażania dobrobytu społecznego” (Rybak 2004).

CSR nie ma zastosowania wyłącznie w dużych firmach, jak mogłaby na to wskazywać nazwa *corporate*, ale także w małych i średnich. CSR ma wymiar uniwersalny, w którym kluczową rolę ogrywa zrównoważony rozwój (Charucka 2015). Z kolei rozpatrując branżowo przemysł spożywczy jako dział sektora rolno-spożywczego, należy podkreślić zasadność realizacji zasad społecznej odpowiedzialności biznesu w branży mleczarskiej, która staje przed wyzwaniem zaspokojenia potrzeb konsumentów, nie mogących z racji na schorzenia zdrowotne (np. nietolerancję laktozy) spożywać produktów mlecznych. Konsumenty coraz częściej zainteresowani są spożywaniem zdrowych produktów, wytwarzanych w akceptowanych przez nich warunkach, zazwyczaj z uwzględnieniem działań proekologicznych. Producenci produktów mleczarskich coraz częściej reagują na zmiany trendów obowiązujących względem spożywanej żywności, respektują normy produkcji tzw. zdrowych produktów, dbają o środowisko oraz starają się wdrażać i stosować bardziej nowoczesne strategie zarządzania CSR. Wielu z nich, tak jak Danone oraz Mlekovita, realizuje projekty społeczne ukierunkowane na spełnienie zasad CSR w sposób długofalowy, co powinno skutkować właściwym wymiarem ich efektywności w przyszłości. Koncepcja społecznej odpowiedzialności biznesu jest pozytywnie odbierana przez producentów funkcjonujących w branży spożywczej, którzy uważają, że jej stosowanie ma wpływ na poprawę wizerunku przedsiębiorstwa oraz umacnianie ich pozycji ekonomicznej (Firlej 2018; Bobola 2014).

## **2.2. Przyczyny zainteresowania koncepcją społecznej odpowiedzialności biznesu oraz filary CSR**

Do głównych przyczyn wzrostu zainteresowania koncepcją społecznej odpowiedzialności biznesu można zaliczyć: zmieniające się uwarunkowania społeczno-kulturowe; postępującą degradację środowiska przyrodniczego; zmiany wartości, zarówno wśród klientów (zachowania pro jakościowe i proekologiczne), jak i pracowników (dążenie do rozwoju i samorealizacji, wzrost wartości czasu wolnego); zmianę podejścia menadżerów do koncepcji rozwoju przedsiębiorstwa; wzrost konkurencji i homogenizacji produktów, które pozwalają społecznej odpowiedzialności biznesu stać się rodzajem wyróżnika, zapewniającym przewagę konkurencyjną; wzrost znacze-

nia niematerialnych zasobów firmy, poszukiwanie nowych sposobów konkurencji opartych na zaufaniu; zmiany podejścia inwestorów, którym coraz częściej nie wystarczają już wyniki finansowe. W oparciu o przegląd literatury przedmiotu wyszczególniono cztery filary społecznej odpowiedzialności (rys. 1).



Rysunek 1. Cztery filary społecznej odpowiedzialności biznesu  
Źródło: opracowanie własne na podstawie: Kozójc 2014

### 2.3. Korzyści z wdrażania społecznej odpowiedzialności biznesu

Korzyści wynikające ze stosowania zasad społecznej odpowiedzialności biznesu można podzielić na dwie grupy: korzyści dla firmy (korzyści wewnętrzne) oraz korzyści społeczne (korzyści zewnętrzne) (Rok 2004).

Koncepcja CSR jest prezentowana jako nowoczesny instrument wzrostu wartości przedsiębiorstwa pozwalającego na uzyskanie przewagi konkurencyjnej. Rozważania w ramach koncepcji CSR skupiają się na jej aspektach moralno-etycznych, korzyściach ekonomicznych, społecznych oraz relacjach podmiotów gospodarczych z otoczeniem (Zieliński 2014).

Tabela 1. Korzyści wewnętrzne i zewnętrzne wdrażania społecznej odpowiedzialności biznesu

| Korzyści wewnętrzne   | Korzyści zewnętrzne  |
|---|--|
| <p><b>Wzrost zainteresowania inwestorów:</b><br/>Kredytodawcy są bardziej zainteresowani współpracą z firmami, które dbają o akceptację społeczną i pozytywny wizerunek oraz budują dobre relacje z otoczeniem.</p>   | <p><b>Rozwiązywanie istotnych problemów społecznych:</b><br/>Przedsiębiorstwa odpowiedzialne społecznie przyczyniają się nie tylko do nagłośnienia problemów społecznych, ale również do ich rozwiązania. Firmy i instytucje, które wspierają organizacje społeczne i charytatywne, dają dobry przykład innym przedsiębiorstwom.</p> |
| <p><b>Zwiększenie lojalności konsumentów:</b><br/>Współczesny klient jest coraz bardziej świadomym konsumentem – zwraca uwagę nie tylko na jakość i cenę produktu, ale również na jego „ekologiczność” czy wizerunek producenta.</p>  | <p><b>Edukowanie społeczeństwa:</b> Firmy stosujące zasady społecznej odpowiedzialności biznesu uświadamiają obywatelom wagę takich zagadnień jak: odpowiedzialność w życiu gospodarczym, uczciwa konkurencja, dbałość o środowisko czy poszanowanie praw człowieka.</p>   |
| <p><b>Poprawa relacji ze społecznością lokalną i władzami lokalnymi:</b> Przedsiębiorstwo jest częścią otoczenia, w którym funkcjonuje. Między społecznością lokalną a przedsiębiorstwem zachodzą pewne interakcje. Zadowolone społeczeństwo, w którym funkcjonuje przedsiębiorstwo sprzyja jego rozwojowi. Prowadzenie biznesu społecznie odpowiedzialnego umożliwia pozyskanie przychylności mieszkańców a także zdobycie zaufania władz samorządowych.</p> | <p><b>Poprawa stanu środowiska naturalnego:</b> Firmy realizując programy ekologiczne przyczyniają się do zmniejszenia poziomu zanieczyszczeń i poprawy stanu środowiska. Co więcej, przedsiębiorstwa często angażują się w działania edukacyjne mające na celu wzrost świadomości ekologicznej obywateli.</p>                       |
| <p><b>Wzrost konkurencyjności:</b> Pozytywny wizerunek firmy poprawia współpracę z partnerami biznesowymi, co w efekcie może prowadzić do zwiększenia sprzedaży i uzyskania przewagi konkurencyjnej na rynku.</p>   | <p><b>Dostęp do informacji o firmie:</b> Udostępnianie informacji o firmie działającej w sferze ekologicznej, społecznej i ekonomicznej stanowi ważny czynnik motywujący do osiągania coraz lepszych wyników oraz prowadzenia przemyślanych programów społecznych.</p>   |
| <p><b>Podnoszenie poziomu kultury organizacyjnej firmy:</b> Poprzez stosowanie zasad społecznej odpowiedzialności firma podnosi swoje standardy postępowania wobec interesariuszy.</p>  | <p><b>Poszanowanie praw człowieka:</b> Dzięki opracowaniu przez firmę kodeksów etycznych czy prowadzeniu szkoleń z zakresu etyki przywiązuje się większą wagę do przestrzegania podstawowych praw człowieka.</p>   |

Źródło: opracowanie własne na podstawie: Leśna-Wierszołowicz 2016; Stawicka 2015.

## 2.4. Przejawy społecznej odpowiedzialności przedsiębiorstwa

Społeczna odpowiedzialność biznesu przejawia się w codziennej praktyce gospodarczej w dwóch wymiarach: zewnętrznym i wewnętrznym (Rok 2004). Wymiar wewnętrzny działań społecznie odpowiedzialnych podejmowanych przez przedsiębior-

stwa dotyczy przede wszystkim pracowników i obejmuje inwestycje w kapitał ludzki, w zdrowie i bezpieczeństwo pracy, przestrzeganie praw człowieka i eliminowanie różnych form dyskryminacji, co jest istotne ze względu na to, że konkurujące firmy funkcjonują w podobnych warunkach zewnętrznych, a właśnie zasoby ludzkie mogą być najczęściej tym, co je różnicuje. Tworzenie odpowiedniej kultury organizacyjnej, odpowiadającej potrzebom pracowników, ułatwia osiągnięcie zamierzonych celów. Badania wykazują, że przedsiębiorstwo przestrzegające ustalonych zasad etyki, posiadające wiarygodną kadrę zarządzającą oraz wspierające pracowników w stosowaniu tych zasad w praktyce, osiąga znacznie wyższy poziom motywacji pracowników, ich identyfikacji z firmą i zadowolenia z pracodawcy, niż podobna firma niestosująca tych metod (Makuch 2012; Jagielska i Rok 2006).

Wymiar zewnętrzny społecznej odpowiedzialności biznesu obejmuje społeczność lokalną i grono interesariuszy, czyli: partnerów i dostawców, klientów, władze publiczne i organizacje pozarządowe reprezentujące społeczność lokalną, a także środowisko przyrodnicze (Makuch 2012; Rybak 2004). Zaangażowanie organizacji w rozwiązywanie problemów społeczeństwa pomaga nie tylko otoczeniu, ale również samej firmie, poprawiając jej relacje ze społecznością lokalną i jej wizerunek oraz spajając zespół pracowników. Rodzaj wybieranej formy wsparcia zależy od zakładanych celów przedsiębiorstwa oraz spodziewanych rezultatów. Najkorzystniejsze z nich to inwestycje społeczne, które są długoterminowymi działaniami podejmowanymi we współpracy z przedstawicielami społeczności w celu rozwiązywania określonych problemów społecznych. Wyróżnia się różne formy inwestycji społecznych, a mianowicie: dotacje pieniężne i rzeczowe, partnerstwo z organizacjami pozarządowymi, udział w programach publicznoprawnych, czy też uczestniczenie w akcjach mających na celu rozwój przedsiębiorczości w społeczeństwie.

W ramach odpowiedzialności zewnętrznej firmy muszą wykazywać się troską o środowisko przyrodnicze. Podejmowanie działań mających na celu poprawę stanu środowiska jest trudne, głównie ze względów ekonomicznych. W związku z tym w sytuacji polskich przedsiębiorstw bardziej realne wydaje się redukcja negatywnych efektów ich działalności na środowisko, czyli zarządzanie środowiskowe. Idea zarządzania środowiskowego zakłada okresową weryfikację i ocenę działalności przedsiębiorstwa na podstawie wskaźników ekonomicznych i ekologicznych, w celu znalezienia możliwości działania i rozwoju zgodnego z obecnymi wymaganiami ekologicznymi, czy też wyzwaniem trwałego rozwoju (*sustainable development*).

### 3. Problem badawczy i metodologia

#### 3.1. Problem badawczy

**N**iniejsze opracowanie prezentuje analizę sprawozdania Zarządu Spółdzielni Mleczarskiej Mlekovita z działalności w 2018 r., która przyczyniła się do określenia, czy jest ona przedsiębiorstwem kierującym się praktykami społecznie odpowiedzialnego biznesu. Dotyczyła ona w szczególności odpowiedzi na pytanie, czy SM Mlekovita kieruje się koncepcją społecznej odpowiedzialności wobec pracowników spółdzielni, jak odnosi się do zagadnienia ochrony środowiska przyrodniczego oraz jakie podejmuje działania w celu poprawy ogólnego dobrobytu społecznego?

W ramach opracowania artykułu wykazano następujący problem badawczy: działania CSR są pozytywnie skorelowane z wynikami gospodarczymi i aktywnością eksportową w przedsiębiorstwach mleczarskich na przykładzie SM Mlekovita.

#### 3.2. Materiał i metody

Materiał do badań obejmował przede wszystkim analizę literatury przedmiotu, która przyczyniła się do zdefiniowania pojęcia społecznej odpowiedzialności biznesu, a także sprawozdanie Zarządu z działalności Spółdzielni Mleczarskiej Mlekovita z 2018 r., które umożliwiło określenie rodzaju działań w ramach koncepcji CSR, które zostały wdrożone w SM Mlekovita. W ramach uzupełnienia prowadzonych badań wykorzystano raporty społecznej odpowiedzialności biznesu publikowane przez przodujące przedsiębiorstwa mleczarskie w Polsce. Pozwoliły one określić wpływ wdrażanych strategii CSR na kształtowanie przewagi konkurencyjnej i wizerunku przedsiębiorstw mleczarskich z listy „TOP 10”, takich jak: SM Mlekovita, Mlekpól, Polmlek, Lacpól, Spomlek, Sierpc, Koło, Gostyń. Do prezentacji wyników badań zastosowano metodę opisową oraz krytyczną analizę literatury.

#### 3.3. Aspekt zrównoważonego rozwoju w podjętych badaniach

Przeprowadzone i opisane w pracy badania uwzględniają cel 8. – wzrost gospodarczy, oraz cel 12. zrównoważona konsumpcja i produkcja. Społeczna odpowiedzialność biznesu w kontekście zrównoważonego rozwoju ma coraz częściej zastosowanie



w branży mleczarskiej, która ze względu na rosnące potrzeby interesariuszy kształtuje wysoką jakość i innowacyjność. Praktyki te coraz częściej wpływają na wzrost eksportu i służą do określenia przewagi konkurencyjnej przedsiębiorstw na rynku globalnym. Koncepcja CSR w strategiach korporacyjnych pozwala nie tylko oceniać stopień zaawansowania danej organizacji jako społecznie odpowiedzialnej, ale także ocenić pozycję zakładów mleczarskich w systemie globalnym. Przeprowadzone badania pomogą określić, w jakim stopniu SM Mlekovita realizuje założenia koncepcji zrównoważonego rozwoju w prowadzonej działalności. SM Mlekovita, w ramach koncepcji zrównoważonego rozwoju i CSR, wprowadziła następujące działania: innowacje opakowaniowe, które nie zanieczyszczają środowiska, dbałość o rozwój pracowników, tworzenie przyjaznej kultury organizacyjnej, regularne płatności dla rolników, pomoc w rozwoju dostawców, promowanie kultury sprzedaży i konsumpcji, budowanie trwałych relacji biznesowych. W podejmowanych działaniach SM Mlekovita realizuje założenia zgodnie z czterema filarami CSR tj. miejsce pracy, środowisko, społeczność lokalna, rynek.

Społeczna odpowiedzialność biznesu w czasach postępujących procesów globalizacyjnych pełni podwójną rolę. Z jednej strony, CSR jest narzędziem obrony przed negatywnymi skutkami globalizacji, wynikającymi z działalności przedsiębiorstw, a w szczególności korporacji. W tym zakresie koncepcja CSR jest instrumentem, który chroni środowisko i społeczeństwo przed zagrożeniami ze strony tego procesu. Z drugiej zaś strony, postępująca globalizacja spowodowała, iż współczesne przedsiębiorstwa działają w warunkach silnej konkurencji oraz rosnącej presji konsumentów na działania zgodne z zasadami CSR. W efekcie jedynie firmy prowadzące działalność w sposób społecznie odpowiedzialny mogą liczyć na sukces. Uczciwa społeczna odpowiedzialność biznesu polega na wyrzekaniu się wszelkich praktyk, które są szkodliwe dla innych, a nie na robieniu wrażenia, że firma dba o otoczenie i wszystkich interesariuszy, podczas gdy tak naprawdę zabiega jedynie o dywidendy dla akcjonariuszy i bonusy dla zarządu. Wtedy CSR jest niczym więcej jak jeszcze jedną techniką marketingową, albo sposobem zarobkowania przez jednych i wydawania firmowych pieniędzy przez drugich (Wiza 2020).

## 4. Kształtowanie przewag konkurencyjnych SM Mlekovita z zastosowaniem narzędzi CSR

### 4.1. Charakterystyka przedsiębiorstwa

**S**M Mlekovita jest największą firmą mleczarską oraz największym producentem i eksporterem nabiału w Europie Środkowo-Wschodniej. Jest to przedsiębiorstwo o ustalonej renomie na świecie, lider Listy 1000 Największych Firm Branży Spożywczej w Polsce i najcenniejsza marka w produkcyjnym sektorze polskiej gospodarki. SM Mlekovita jest firmą ze 100% kapitałem polskim. Zakład, który powstał w 1928 r. w Wysokiem Mazowieckiem, zatrudniał 30 osób i zajmował się wyłącznie produkcją serów i masła. Obecnie, prowadzona konsekwentnie przez SM Mlekovita polityka rozwoju firmy spowodowała, że po 90 latach funkcjonowania jej potencjał tworzą: znakomici hodowcy, unowocześnione i nadal rozwijające się gospodarstwa, pracowitość, przedsiębiorczość i wielka zaradność rolników, 15 tysięcy dostawców mleka, 20 zakładów produkcyjnych, 160 linii produkcyjnych, 32 własne centra dystrybucyjne, w tym pierwsze w branży hurtownie firmowe w formie Cash&Carry, ponad 100 sklepów firmowych we własnej sieci detalicznej działających pod szyldem MLEKOVITKA, pozwolenie na eksport do 159 krajów na wszystkich kontynentach, 5000 pracowników, ok. 20% udziału w polskim rynku, dobrze rozpoznawalna marka oparta na komunikacie: „polska” (Sprawozdanie Zarządu SM Mlekovita 2018). Swój sukces rynkowy Mlekovita opiera niezmiennie na 5 filarach: wysokiej jakości surowca i produktów; rozpoznawalnej i dobrze kojarzonej marce, nowoczesnym i sprawnym systemie produkcyjnym, logistycznym i handlowym; dobrej strategii oraz samodzielnych i odpowiedzialnych menedżerach na wszystkich szczeblach organizacji; doświadczonej, zaangażowanej oraz zmotywowanej załodze.

### 4.2. Działania w zakresie ochrony środowiska

Mlekovita, w ramach aktywności odpowiedzialnej społecznie, podejmuje działania mające na celu ochronę środowiska. Przede wszystkim każdego roku spółdzielnia opracowuje plany oszczędzania energii w każdym z działów. Powstają inwestycje mające na celu ograniczenie zużycia wody, zmniejszenie ładunków w odprowadzanych ściekach, obniżenie zużycia energii elektrycznej i wielkości wyemitowanych zanieczyszczeń. SM Mlekovita ma własną elektrociepłownię bazującą na gazie ziemnym, oczyszczalnię ścieków oraz biogazownię. Dzięki modernizacji, w procesie fermentacji produkowany jest biogaz (OZE /odnawialne źródło energii),

który jest wykorzystywany jako paliwo w agregatach kogeneracyjnych do produkcji energii na potrzeby własne oczyszczalni ścieków, a jej nadwyżki kierowane są do sieci energetycznej. Energia cieplna wykorzystywana jest w technologii oczyszczania oraz ogrzewania budynków. Za działania zmierzające do ograniczenia zużycia energii SM Mlekovita otrzymała Świadectwa Efektywności Energetycznej. Są one nie tylko potwierdzeniem uzyskania zamierzonych efektów energetycznych, ale również efektem ekonomicznym w postaci przychodów ze sprzedaży w postaci zysku w wysokości 133 295,00 zł netto (Sprawozdanie Zarządu SM Mlekovita 2018).

### **4.3. Współpraca ze społecznością lokalną**

Na podstawie przeanalizowanych artykułów prasowych oraz sprawozdania z działalności Zarządu SM Mlekovita można zauważyć, że współpraca ze społecznością lokalną przebiega na wielu płaszczyznach. SM Mlekovita uczestniczy od ponad dekady w takich projektach jak: „Program dla szkół” – znany wcześniej jako „Szkłanka Mleka” i „Mleko w szkole”, dostarczając mleko do szkół w całej Polsce w cenie kosztów produkcji. Tym samym bierze udział w kształtowaniu dobrych nawyków żywieniowych i zdrowia młodych Polaków. Ponadto, w ramach promocji spożywania mleka, produktów nabiałowych oraz zdrowego stylu życia zakład już od kilku lat organizuje Ogólnopolskie Święto Mleka oraz sponsoruje trzecioliigowy klub piłkarski. Współpracuje również z wieloma organizacjami charytatywnymi, wspierając akcje organizowane na rzecz potrzebujących, m.in. przekazuje swoje produkty na rzecz Polskiego Banku Żywności. Innym ważnym projektem jest MOST – „Model ograniczania strat i marnowania żywności z pożytkiem dla społeczeństwa”, w którym obok Mlekovity uczestniczą: Polskie Towarzystwo Technologów Żywności, Instytut Badawczy Opakowań, Instytut Ekonomiki Rolnictwa i Gospodarki Żywnościowej – Państwowy Instytut Badawczy oraz Federacja Polskich Banków Żywności. Jego celem jest opracowanie i wdrożenie w przedsiębiorstwach sektora spożywczego procedur ograniczania strat i marnotrawstwa żywności. Docelowo ma to pozwolić przekazywać żywność zidentyfikowaną w toku procedur kontrolnych jako bezpieczną i zdatną do spożycia (przede wszystkim o krótkim terminie przydatności) do Banków Żywności. Wypracowany model ma służyć także innym producentom, a Banki Żywności pozyskają nowych partnerów (Sprawozdanie Zarządu SM Mlekovita 2018).

### **4.4. Etyka wobec pracowników SM Mlekovita**

SM Mlekovita tworzy rocznie średnio 70 nowych miejsc pracy, m.in. dla absolwentów wyższych uczelni i szkół średnich. W 2018 r. przyjęto do pracy 246 nowych

pracowników, w tym 40 absolwentów szkół wyższych i średnich. SM Mlekovita inwestuje w kapitał ludzki również poprzez szkolenia i umożliwienie podnoszenia kwalifikacji na studiach zaocznych, podyplomowych i innych formach kształcenia. Każdy pracownik ma szansę rozwoju i podnoszenia swoich kwalifikacji oraz awansu. W 2018 r. awansowano na wyższe stanowiska 54 pracowników (Sprawozdanie Zarządu SM Mlekovita 2018).

Etyka w działalności gospodarczej odnosi się do wielu aspektów działalności firmy. Jednym z ważnych jej przejawów jest uczciwe traktowanie pracowników oraz programy socjalne. W spółdzielni Mlekovita opracowano kodeks postępowania etycznego oraz przepis w formie aneksu do Regulaminu Pracy, mający zapobiegać dyskryminacji w zakresie nawiązania stosunku pracy, warunków zatrudnienia, awansowania oraz dostępu do szkolenia w celu podnoszenia kwalifikacji zawodowych, w szczególności bez względu na płeć, wiek, niepełnosprawność, rasę, religię, narodowość, przekonania polityczne, pochodzenie etniczne, wyznanie, orientację seksualną, a także bez względu na zatrudnienie na czas określony lub nieokreślony, albo w pełnym lub niepełnym wymiarze czasu pracy. Ponadto SM Mlekovita ma Zakładowy Fundusz Świadczeń Socjalnych przeznaczony na finansowanie kosztów wczasów pracowniczych, profilaktyczno-leczniczych, działalności kulturalno-oświatowej, budownictwa mieszkaniowego dla pracowników, materialnej pomocy rzeczowej i wiele innych. Działania te dowodzą, że kierownictwo zwraca dużą uwagę na odpowiednie traktowanie pracowników (Sprawozdanie Zarządu SM Mlekovita 2018).

#### **4.5. Korzyści z podjętych działań w ramach CSR dla działalności firmy Mlekovita**

SM Mlekovita należy do wąskiego grona liderów Ogólnopolskiego Rankingu Najlepszych Spółdzielni Mleczarskich za 2018 r., będąc jego zdecydowanym zwycięzcą. Ranking przygotowała redakcja ogólnopolskiego, niezależnego dodatku do „Dziennika Gazeta Prawna”. Podczas gali wieńczącej 15. jubileuszową edycję Podlaskiej Złotej Setki Przedsiębiorstw „Kuriera Porannego”, Prezes Zarządu Grupy Mlekovita Dariusz Sapiński odebrał nagrody w zakresie: Największy przychód 2017 Firmy Duże i Eksporter Roku 2017 (1. miejsce) oraz Inwestor Roku 2017 (2. miejsce). SM Mlekovita została po raz kolejny uhonorowana tytułem Firmy Dobrze Widzianej, przyznawanym przez Business Centre Club. Nagroda ta jest wyrazem uznania i podziękowania firmie, jej kierownictwu i pracownikom za zaangażowanie społeczne i realizowanie idei odpowiedzialności społecznej biznesu (Sprawozdanie Zarządu SM Mlekovita 2018).

## 5. Porównanie wdrożonej koncepcji CSR w SM Mlekovita do 10 największych przedsiębiorstw mleczarskich w Polsce

### 5.1. Społeczna odpowiedzialność biznesu 10 najważniejszych przedsiębiorstw mleczarskich w Polsce

Firma Danone, która wdrożyła koncepcję CSR zgodnie z wytycznymi OECD w stopniu zaawansowanym, była wzorem do naśladowania dla wielu polskich produjących przedsiębiorstw mleczarskich. Jednak w większości przedsiębiorstwa te wdrażały narzędzia CSR w aspekcie filantropijnym i marketingowym, odchodząc od modelu strategicznego koncepcji (tab. 2).

Tabela 2. Społeczna odpowiedzialność biznesu w 10 najważniejszych przedsiębiorstwach mleczarskich w Polsce

| Miejsce w rankingu | Nazwa mleczarni          | CSR na stronie internetowej mleczarni | Osoba odpowiedzialna za CSR | Polityka CSR | Misja i wartość | Raport społeczny | Rynek produktów CSR | Środowisko CSR | Pracownicy CSR | Społeczeństwo CSR | Certyfikaty i nagrody |
|--------------------|--------------------------|---------------------------------------|-----------------------------|--------------|-----------------|------------------|---------------------|----------------|----------------|-------------------|-----------------------|
| 1                  | Mlekovita SM             | -                                     | -                           | +            | +               | -                | +                   | +              | +              | +                 | +                     |
| 2                  | Mlekoop SM               | -                                     | -                           | +            | -               | -                | +                   | -              | -              | +                 | +                     |
| 3                  | Danone Sp. z o.o.        | +                                     | +                           | +            | +               | +                | +                   | +              | +              | +                 | +                     |
| 4                  | Polmlek                  | -                                     | -                           | +            | -               | -                | +                   | -              | +              | +                 | +                     |
| 5                  | Lacpol PHZ SM Sp. z o.o. | -                                     | -                           | +            | -               | -                | +                   | -              | -              | -                 | -                     |
| 6                  | Piątnica OSM             | -                                     | -                           | +            | -               | -                | +                   | +              | +              | +                 | +                     |
| 7                  | Spomlek SM               | -                                     | -                           | +            | -               | -                | +                   | -              | +              | +                 | -                     |
| 8                  | Koło OSM                 | -                                     | -                           | +            | -               | -                | +                   | -              | -              | +                 | +                     |
| 9                  | Sierpc OSM               | -                                     | -                           | +            | -               | -                | +                   | -              | -              | -                 | -                     |
| 10                 | Gostyń OSM               | -                                     | -                           | +            | -               | -                | +                   | -              | -              | +                 | -                     |

Objaśnienia: znak „+” w danej kolumnie, oznacza, że dane przedsiębiorstwo mleczarskie wdrożyło założenie koncepcji CSR, natomiast znak „-” w danej kolumnie oznacza, że dane przedsiębiorstwo mleczarskie nie wdrożyło założenia koncepcji CSR.

Źródło: opracowanie własne na podstawie: Stawicka 2018.

Analizując dane przedstawione w tabeli 2, można stwierdzić, że z 10 dominujących przedsiębiorstw mleczarskich w Polsce, jedynie Danone informuje konsumentów o stosowaniu praktyk CSR w opracowanych raportach społecznościowych

oraz umieszczaniu informacji na własnej stronie internetowej. Pomimo że wszystkie badane przedsiębiorstwa mleczarskie deklarują stosowanie koncepcji CSR, to większość z nich koncentruje się głównie na oferowaniu produktów najwyższej jakości, a więc CSR postrzegany jest w dalszym ciągu w ujęciu marketingowym. Nie oznacza to jednak, że dominujące polskie przedsiębiorstwa z branży mleczarskiej nie wykorzystują narzędzi CSR w celu poprawy wizerunku oraz swej sytuacji finansowej. Dowodem są działania podejmowane w zakresie poprawy jakości produktów, wprowadzania innowacji, troski o środowisko i promocji zdrowego stylu życia wśród konsumentów (Stawicka 2018). Wprowadzenie praktyk CSR w analizowanych przedsiębiorstwach mleczarskich przyczyniło się do poprawy wizerunku wśród konsumentów, zwiększenia przewagi konkurencyjnej na rynku krajowym i zagranicznym oraz wzrostu innowacji w praktykach produkcyjnych produktów mleczarskich. Przykładem jest m.in. SM Mlekovita, która odniosła sukces w eksporcie, zwłaszcza do Niemiec (ponad 20% całego eksportu). Jest to największy i najbardziej dynamicznie rozwijający się wspierany rynek zewnętrzny. W 2017 r. SM Mlekovita sprzedała na rynku niemieckim m.in.: 2955 Mg dojrzewających serów twardych, 20 615 658 l mleka UHT, 2620 Mg mleka w proszku i 175 Mg masła. W 2018 r. podczas Gali na międzynarodowych targach artykułów spożywczych Polagra, SM Mlekovita została uhonorowana tytułem *Leading Polish Food Exporter – Leading Polish Food Exporter* (Wiza 2020).

## 6. Podsumowanie

**W** oparciu o przegląd literatury przedmiotu oraz przeprowadzone analizy badawcze w zakresie wdrażania koncepcji CSR w przedsiębiorstwach mleczarskich w Polsce można stwierdzić, że:

- CSR działa na styku dwóch sfer: biznesu i społeczeństwa;
- CSR wydaje się być ważnym elementem procesu zarządzania firmą. Przestaje być utożsamiana jedynie z pewnym rodzajem działalności charytatywnej, niemającym żadnego związku z efektywnością ekonomiczną, na rzecz podnoszenia zyskowności i rozwoju gospodarczego przedsiębiorstwa;
- Korzyści z wdrażania społecznej odpowiedzialności biznesu powinny być rozważane długookresowo. Należą do nich: wzrost konkurencyjności, lepsze relacje z otoczeniem, możliwość zatrudnienia najlepszych pracowników, wzrost zainteresowania inwestorów, zwiększenie lojalności konsumentów i interesariuszy;
- CSR rozwija się systematycznie i ma coraz szersze zainteresowanie organizacji w skali całego świata, co nie jest sprzeczne z jej bardzo często lokalnym wymiarem.

Koncepcje społecznej odpowiedzialności biznesu można określić jako skuteczne narzędzie w kształtowaniu przewagi konkurencyjnej firmy, która powinna znaleźć zastosowanie we wszystkich obszarach jej funkcjonowania. Konkurencyjna firma umacnia swoją pozycję na rynku, a stosowanie koncepcji CSR korzystnie wpływa na kreowanie zysków, motywację pracowników i jest bodźcem do dalszych pozytywnych działań. Społeczna odpowiedzialność firmy oznacza wykluczenie zysku jako jedyne go motywu do podjęcia działań. Koncepcja CSR jest często określana jako niezbędna w budowaniu przewagi konkurencyjnej na rynku.

Analiza przeprowadzona w badanym przedsiębiorstwie została oparta na uproszczonych założeniach metodologicznych i nie pozwoliła na sformułowanie jednoznacznych wniosków co do stopnia wdrożenia społecznej odpowiedzialności. Miała ona charakter pilotażowego badania, którego zasadniczym celem było określenie, czy działalność analizowanej firmy odpowiada ogólnemu wyobrażeniu wzorca biznesu odpowiedzialnego społecznie. Ogólna ocena wypadła dla SM Mlekovita pozytywnie. Wybrane przykłady pokazują, że ochrona środowiska jest ważnym elementem strategii rozwoju przedsiębiorstwa. Działania SM Mlekovity mające na celu wzrost wydajności energetycznej, minimalizację ilości wytwarzanych odpadów i zapobieganie zanieczyszczeniom, a także przestrzeganie najsurowszych wymagań prawnych dotyczących ochrony środowiska, są zgodne z CSR. Działania spółdzielni, również w wymiarze społecznym, odpowiadają idei CSR. Z jednej strony przez podstawową działalność firma zapewnia miejsca pracy okolicznym mieszkańcom, z drugiej – integruje społeczność, w której działa, promuje zdrowy tryb życia i wspiera finansowo lokalne inicjatywy.

Reasumując, można stwierdzić, że jest wiele dowodów, że SM Mlekovita kieruje się założeniami społecznej odpowiedzialności biznesu. Dotyczy to szczególnie ochrony środowiska oraz działalności prospołecznej. Przedsiębiorstwo może poszczycić się znaczącymi osiągnięciami, a wdrażane w nim rozwiązania mogą być przykładem dla innych przedsiębiorstw mleczarskich w Polsce.

## Literatura

- BOBOLA A. 2014. *Społeczna odpowiedzialność biznesu jako zasób niematerialny kształtujący przewagę konkurencyjną przedsiębiorstw spożywczych*. Roczniki Naukowe SERiA XVI (3), s. 36–42.
- BOGDANIENKO J. 2011. *Odpowiedzialność społeczna a strategia organizacji*. [W:] Biernatt M., Bogdanienska J., Skoczny T. red., *Społeczna odpowiedzialność biznesu. Krytyczna analiza*. Wydawnictwo Naukowe Wydziału Zarządzania Uniwersytetu Warszawskiego, Warszawa.
- CHARUCKA O. 2015. *Znaczenie społecznej odpowiedzialności biznesu w budowaniu przewagi konkurencyjnej przedsiębiorstwa*. Zeszyty Naukowe Uczelni Vistula, Ekonomia IX. Kształtowanie wizerunku pracodawcy 44(6), s. 37–54.
- FIRLEJ K. 2018. *Corporate social responsibility as a challenge in the agri-food sector*. Roczniki Naukowe SERiA XX (4), s. 47–53.

- GRODEA M. 2016. *Milk processing and collection in Romania – an analysis across regions. Agrarian Economy and Rural Development – Realities and Perspectives for Romania*. 7<sup>th</sup> Edition of the International Symposium. The Research Institute for Agricultural Economy and Rural Development (ICEADR), Bucharest, s. 196–201.
- JAGIELSKA M. i ROK B. red. 2006. *Odpowiedzialny biznes w Polsce 2005*. Dobre Praktyki. Forum Odpowiedzialnego Biznesu, Warszawa.
- JAWORSKA E. i NADOLNA B. 2019. *Balanced scorecard for selected confectionery companies listed on the Warsaw stock exchange in Poland*. Research for Rural Development, Annual 25<sup>th</sup> International Scientific Conference Proceedings Vol. 2, s. 103–110.
- KAZOJĆ K. 2014. *Koncepcja społecznej odpowiedzialności i jej obszary w organizacjach*. Zeszyty Naukowe Uniwersytetu Szczecińskiego. Studia i Prace Wydziału Nauk Ekonomicznych i Zarządzania nr 38 T. 1 Zarządzanie, s. 57–69.
- LEŚNA-WIERSZOŁOWICZ E. 2016. *Korzyści ze stosowania zasad społecznej odpowiedzialności biznesu w przedsiębiorstwie*. Acta Scientifica Academiae Ostroviensis. Sectio A, Nauki Humanistyczne, Społeczne i Techniczne nr 8 (2), s. 65–76.
- LEWICKA-STRZAŁECKA A. 2009. *Miejsce CSR w europejskiej strategii na rzecz zrównoważonego rozwoju*. Annales. Etyka w Życiu Gospodarczym 12 (1), s. 189–195.
- MAKUCH Ł. 2012. *Zrównoważony rozwój podstawa budowania wartości przedsiębiorstw*. [W:] FOB. *Mierzenie efektywności i wpływu społecznego działań CSR*. FOB, Warszawa, s. 14–17.
- PKN 2013. *ISO 26000. Guidance on social responsibility. Norma Międzynarodowa dotycząca społecznej odpowiedzialności (International Standard on social responsibility)*, [Online] <https://www.pkn.pl/informacje/2013/09/iso-26000> [Dostęp: 7.07.2018].
- ROK B. 2004. *Odpowiedzialny biznes w nieodpowiedzialnym świecie*. Akademia Rozwoju Filantropii w Polsce Forum Odpowiedzialnego Biznesu, Warszawa.
- RYBAK M. 2004. *Etyka menedżera – społeczna odpowiedzialność przedsiębiorstwa*. Warszawa: PWN.
- STAWICKA E. 2018. *Corporate Social Responsibility and the Milk Market in Poland*. Journal of Tourism and Regional Development No. 9, s. 71–80.
- STAWICKA E. 2017. *CSR w kontekście zrównoważonego rozwoju sektora rolno-spożywczego*. Journal of Tourism and Regional Development No. 8, s. 93–104.
- STAWICKA E. 2015. *Corporate Social Responsibility in the SME sector. An analysis of the key aspects and pillars of developing the CSR strategy*. [W:] M. Rojek-Nowosielska (red.), *Social Responsibility of Organizations Directions of Changed*. Publishing House of Wrocław University of Economics Wrocław, s. 171–172.
- Sprawozdanie Zarządu z działalności Spółdzielni Mleczarskiej Mlekovita w Wysokiem Mazowieckiem w 2018 r.; [ekrs.gov.pl](http://ekrs.gov.pl) [Dostęp: 09-05-2020].
- WIZA P.L. 2020. *The use of corporate social responsibility in shaping the image and competitive advantage of dairy enterprises in Poland*. Postępy Techniki Przetwórstwa Spożywczego, Wyższa Szkoła Menadżerska w Warszawie nr 1, tom 30/56, s. 195–202.
- WBCSD (World Business Council for Sustainable Development) 2016. *Corporate Social Responsibility: Meeting changing expectations*. [Online] <https://growthorientedandsustainableentrepreneurship.files.wordpress.com/2016/07/csr-wbcd-csr-primer.pdf> [Dostęp: 7.07.2018].
- ZIELIŃSKI M. 2014. *Korzyści z wdrożenia koncepcji CSR w zarządzaniu zasobami ludzkimi*. Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej, seria: Organizacja i Zarządzanie nr 74, s. 653–666.



## Współczesne rozumienie kariery zawodowej

**STRESZCZENIE:** Zmienność i nieprzewidywalność otoczenia istotnie oddziałują na współczesne przedsiębiorstwa. Konsekwencją ich wpływu jest wewnętrzna zmiana dokonująca się w przedsiębiorstwach, której beneficjentami są pracownicy i ich kariery zawodowe. Dawniej kojarzone z linearnością i przewidywalnością, bezpieczeństwem zatrudnienia w niewielkiej liczbie organizacji aż do przejścia na emeryturę, dzisiaj określane są mianem niestabilnych, nieciągłych i nieprzewidywalnych. Celem niniejszego opracowania jest przedstawienie współczesnego rozumienia kariery zawodowej. Do jego realizacji wykorzystano metodę przeglądu literatury, dzięki której zbadano zmiany w rozumieniu kariery zawodowej. Starano się określić powody, dla których zmiany te miały miejsce, przedstawić różnice pomiędzy karierą dawniej i dzisiaj. Znajdując uzasadnienie w opisanych przemianach, przedstawiono współczesne modele karier zawodowych, które powstały na gruncie tych zmian, oraz mówiono relacje pomiędzy karierą zawodową a zrównoważonym rozwojem. Zwrócenie uwagi na rozważane w pracy zagadnienie wydaje się być istotne zarówno dla teoretyków, jak i praktyków zarządzania. Przedsiębiorcy i menedżerowie, którzy karierę zawodową analizują od strony praktyk i procesów realizowanych w organizacjach, bazując na współczesnym rozumieniu, mogą w jeszcze lepszy sposób wspomagać rozwój karier swoich pracowników, który przekłada się na rozwój całego przedsiębiorstwa. Zaś autorzy, którzy swoje opracowania poświęcają tematyce kariery zawodowej, dostrzegają postępujące przeobrażenia i poddają je naukowej analizie w swoich badaniach. Praca wpisuje się w 8. cel zrównoważonego rozwoju.

**SŁOWA KLUCZOWE:** kariera zawodowa, współczesna kariera zawodowa

## Contemporary understanding of a professional career

**ABSTRACT:** The changeability and unpredictability of the environment have a significant impact on modern enterprises. The consequence of their impact is internal change in enterprises, the beneficiaries of which are employees and their professional careers. Formerly associated with linearity and predictability, job security in a small number of organizations until retirement, today they are referred to as unstable, discontinuous and unpredictable. The aim of this study is to present the contemporary understanding of a professional career. The method of literature review was used for its implementation, thanks to which changes in the understanding of professional career were examined. Attempts were made to identify the reasons why these changes took place, to present the differences between the career in the

---

<sup>1</sup> Mgr, AGH Akademia Górniczo-Hutnicza, Wydział Zarządzania, Katedra Zarządzania Przedsiębiorstwem, Kraków, Polska.

past and today. Finding justification in the described changes, the contemporary models of professional careers that arose on the basis of these changes were presented and the relationship between professional career and sustainable development was discussed. Paying attention to the issue discussed in the study seems to be important for both management theorists and practitioners. Entrepreneurs and managers who analyze their professional careers in terms of practices and processes implemented in organizations, based on a modern understanding, can support the development of their employees' careers in an even better way, which translates into the development of the entire enterprise. And the authors who devote their studies to the subject of professional careers notice the progressing transformations and subject them to scientific analysis in their research.

**KEYWORDS:** professional career, contemporary professional career

## 1. Wprowadzenie

Organizacje mierzą się ze zmianami i nieprzewidywalnością otoczenia, w którym funkcjonują. Postępujące procesy globalizacyjne, rosnąca konkurencja, szybki rozwój technologii oraz przekształcenia społeczno-demograficzne wpływają na działania przedsiębiorstw (Smolbik-Jęczmień 2015). Te zaś pod wpływem czynników zewnętrznych muszą elastycznie reagować na zachodzące transformacje. Dokonuje się to pod postacią postępującego „spłaszczenia” organizacji, redukcji stanowisk pracy, zanikania starych zawodów czy specjalności i pojawiania się zupełnie nowych, a także upowszechnienia elastycznych form zatrudnienia. W konsekwencji przeobrażenia dotyczą także samych pracowników. Muszą mierzyć się z niepewnością i krótkotrwałością form zatrudnienia, które wpływają na brak poczucia bezpieczeństwa związanego z zapewnieniem sobie i swojej rodzinie odpowiedniego poziomu życia, wykazywać gotowość do zmiany pracy, zawodu, a także miejsca zamieszkania, i zaakceptować konieczność ciągłego rozwoju, podnoszenia swoich kwalifikacji oraz nabywania nowych umiejętności (Smolbik-Jęczmień 2017). Rezultatem wynikających z siebie zmian (na poziomie otoczenia organizacji, przedsiębiorstwa i pracownika) jest odejście od tradycyjnego modelu kariery zawodowej i skupienie uwagi na jej współczesnej formie.

Zdefiniowanie pojęcia kariery zawodowej nie jest zadaniem łatwym i jednoznacznym. Wynika to z różnorodności definicji, które odpowiadają obowiązującemu w okresie ich powstania sposobowi rozumienia tego pojęcia. Sears (1982) pisał o karierze jako „sekwencji różnych prac zarówno odpłatnych bądź nieodpłatnych realizowanych przez daną jednostkę w trakcie jej życia”. W latach 90. XX wieku Poczowski (1993) przedstawiał ją w kategorii „kolejnych stanowisk pracy, związanych z określoną pozycją w hierarchii organizacyjnej, które pracownik zajmuje w okresie zatrudnienia w danym przedsiębiorstwie”. Na początku XXI wieku karierą zawodową określano „sekwencję ról zawodowych (...), które traktowane są jako „punkty zwrotne w ocenie poruszania się jednostki w społeczeństwie” (Arthur i in. 2005). Dzisiaj definiowana jest jako „proces rozwoju wiedzy i umiejętności, kształtowania postaw,

cech osobowych, systemu wartości i motywacji na przestrzeni życia (jednostki) w celu permanentnego zwiększania swojej wartości na rynku pracy (tzw. kapitału kariery) i zapewnia zatrudnialności” (Smolbik-Jęczmień 2017).

W literaturze polskiej i zagranicznej wiele uwagi poświęca się zagadnieniom kariery zawodowej i jej przemianom ku współczesnemu rozumieniu. Tematyka ta jest analizowana np. pod kątem ciemnej strony współczesnej kariery zawodowej (w opozycji do większości opracowań które traktują o jej pozytywnych aspektach) (Baruch, Vardi 2016), liminalnych doświadczeń, definiowanych jako stan bycia pomiędzy rolami i/lub tożsamościami społecznymi, charakterystycznymi dla coraz bardziej niepewnego i zmiennego krajobrazu kariery (Ibarra i Obodaru 2016), czy kluczowej roli zrównoważonego zarządzania zasobami ludzkimi w myśleniu o współczesnych karierach (De Vos i Van der Heijden 2017). W polskiej literaturze opracowania zostały poświęcone m.in. przekształceniom w modelach karier zawodowych (Bohdziewicz 2010; Rutkowska 2010) czy nowym trendom w ich rozwoju (Solarczyk-Ambrozik 2015). W wyniku wieloaspektowego podejścia badaczy do tematu podjęto próbę przedstawienia wspólnego, współczesnego rozumienia kariery zawodowej, co obrano za cel niniejszego opracowania. Dzięki wykorzystaniu metody przeglądu literatury, zbadano zmiany w rozumieniu kariery zawodowej. Starano się określić powody, dla których zmiany te miały miejsce, przedstawić różnice pomiędzy karierą dawniej i dzisiaj. Znajdując uzasadnienie w opisanych przemianach, przedstawiono współczesne modele karier zawodowych, które powstały na gruncie tych zmian, oraz omówiono relacje pomiędzy karierą zawodową a zrównoważonym rozwojem.

## 2. Od kariery tradycyjnej do kariery współczesnej

**E**ra industrialna dała początek tradycyjnej koncepcji kariery zawodowej, która charakteryzowana była przez stabilne warunki pracy, nadmierną specjalizację, podział pracy oraz smukłe struktury organizacyjne (Kirovová 2011). Do lat 70. XX wieku badacze nie poświęcali zbyt wiele uwagi rozważaniom dotyczącym kariery. Wynikało to ze względnie stabilnych warunków funkcjonowania organizacji, gdzie problemem było głównie pozyskanie i przygotowywanie pracowników do wykonywania tych samych zadań przez praktycznie cały okres zatrudnienia (Bednarska-Wnuk i Januskiewicz 2012). W karierze tradycyjnej funkcjonowało silne uzależnienie od koncepcji administracyjnej Webera, a bezpieczeństwo utrzymania zatrudnienia gwarantowało zaangażowanie pracownika (Kirovová 2011). Najczęściej realizowana była maksymalnie tylko w kilku organizacjach i ograniczona wiekiem pracownika, gdzie osiągnięcie sukcesu zawodowego mierzone było za pomocą awansów, statusu i wysokości wynagrodzenia. Za rozwój kariery odpowiedzialna była

organizacja, która tworzyła formalne programy szkoleniowe i tworzyła liniowe ścieżki rozwoju (Sullivan 1999).

Zmiany przyniosły lata 90. XX wieku. Zaczęto wtedy coraz częściej odchodzić od modelu biurokratycznego i realizacji kariery w niewielkiej liczbie organizacji. Pracownicy wykazywali coraz większą mobilność pomiędzy miejscami zatrudnienia i różnorodność w jego formie (Bohdziewicz 2010). W konsekwencji wymagało to od nich elastycznego podejścia do zmiany specjalności, doskonalenia się i nabywania nowych umiejętności, a nierzadko całkowitego przekwalifikowania (Minta 2014).

Współcześnie do kariery zawodowej podchodzi się bardzo holistycznie. Obejmuje ona nie tylko okres pracy zawodowej, ale okres całego życia jednostki ze wszystkimi jego wymiarami. Wynika to z faktu, iż na każdym etapie rozwoju człowieka możliwe jest zdobywanie nowych kwalifikacji, umiejętności czy zawodu. W związku z tym coraz częściej mówi się o współczesnej karierze zawodowej jako karierze całościowej, za której rozwój odpowiedzialność bierze pracownik (Jakimiuk 2013).

Nowe myślenie o karierze zawodowej charakteryzowane jest także przez postrzeganie aktywności jednostki, która wykazuje się postawą proaktywną i kreatywną, samodzielnie podejmuje decyzje, którym przyświecają ambitne cele. Wymaga to od niej regularnego analizowania otoczenia oraz rynku pracy, aby na bieżąco móc reagować na zachodzące zmiany i pojawiające się trendy. Kluczowym jest nieustanne przygotowywanie się w nowoczesny, twórczy i zaangażowany sposób do nowych wyzwań, które niesie ze sobą zawodowa przyszłość. Współczesna kariera nie pozwala zatem na stabilizację, utrzymanie jednej pozycji czy rezygnację z rozwoju i nauki, ale jednocześnie może doprowadzić jednostkę do stania się „niewolnikiem rozwoju własnej kariery” czy „kolekcjonerem kompetencji”, które nie znajdują pokrycia w wykonywanej pracy (Baruch i Vardi 2016; Smolbik-Jęczmień 2017).

Podjmując próbę zobrazowania różnic i przekształceń tradycyjnej kariery zawodowej w kierunku współczesnej, powołać można się na pracę Lanthalera i Zugmana (2000). Autorzy dokonali interesującego porównania nowego sposobu myślenia o karierze, zbudowanego na dziesięciu filarach, przeciwstawiając go tradycyjnemu rozumowaniu. Koncepcję badaczy przedstawiono w tabeli 1\*.

### 3. Modele współczesnej kariery zawodowej

**W**raz ze wzrostem zainteresowania badaczy tematyką kariery zawodowej, w literaturze pojawiły się liczne koncepcje i modele kariery. Do najpopularniejszych z nich należą: model heksagonalny Hollanda, koncepcja Roe, koncepcja Scheina czy teoria rozwoju zawodowego Supera (Miś 2007). Chociaż mo-

\* Poszczególne filary zostały szczerzej omówione w Smolbik-Jęczmień 2017: 75-76.

Tabela 1. Filary kształtujące zmianę rozumienia kariery zawodowej

| Tradycyjna kariera zawodowa          | Współczesna kariera zawodowa  |
|--------------------------------------|-------------------------------|
| Bezpłatnie lub przy niskich kosztach | Zależnie od inwestycji        |
| Przypadkowo                          | Zgodnie ze strategią          |
| Jednorazowo                          | Nieustannie                   |
| Z wysiłkiem                          | Z przyjemnością               |
| W tajemnicy                          | Jawnie                        |
| Jednoosobowo                         | Razem z innymi                |
| W oparciu o zależności               | Samodzielnie                  |
| Lokalnie                             | Globalnie                     |
| Liniowo                              | Nieliniowo                    |
| Tylko w obszarze zawodowym           | We wszystkich obszarach życia |

Źródło: opracowanie własne na podstawie: Lanthaler i Zugmann 2000.

dele te stanowią filary rozważań nad karierą zawodową, odnoszą się w większej części do jej tradycyjnej formy. Zmiana postrzegania kariery zawodowej w kierunku współczesnego rozumienia ponownie skłoniła badaczy do refleksji nad tym tematem i doprowadziła do wyłonienia modeli odpowiadającym nowemu myśleniu o karierze.

„Kariera inteligentna” jest pierwszym modelem opisującym współczesne rozumienie kariery zawodowej. Jej autorzy, Arthur, Calman i DeFillippi (1995), szukali odpowiedzi na przemiany, które zachodziły w strukturach organizacyjnych korporacyjnego świata w latach 80. i 90. XX wieku. Stwierdzili oni, że podstawą sukcesu kariery są trzy subiektywne drogi „wiedzenia” (*knowing*), odzwierciedlające rozwój istotnych obszarów życia danego człowieka:

- wiedzieć dlaczego (*knowing-why*),
- wiedzieć jak (*knowing-how*),
- wiedzieć kto/komu (*knowing-whom*).

Trzecia droga modelu „inteligentnej kariery” zwraca uwagę na potrzeby zarówno jednostki, jak i organizacji, wskazując na wzajemne zależności – gdy przedsiębiorstwo potrzebuje pracownika do osiągnięcia zamierzonego wyniku, lub gdy to pracownik potrzebuje przedsiębiorstwa do osiągnięcia własnej zawodowej satysfakcji. Sposoby zdobycia przez pracownika wiedzy z każdego z trzech obszarów, pozostają ze sobą w nieustannych relacjach, co autorzy porównują do rozwijającego się w czasie procesu budowania „niefinansowego” (*nonfinancial*) kapitału kariery.

Drugim modelem współczesnej kariery zawodowej jest model „kariery bez granic” (*boundaryless careers*). Jego autorzy, Arthur i Rousseau (2001), zwracając uwagę na nieprzewidywalność i wrażliwość rzeczywistości społecznej na sytuację rynkową, podjęli próbę sformułowania odpowiadającej tym uwarunkowaniom formy kariery – „Kariery bez granic”, określaną jako międzyorganizacyjną lub pozaorganiza-

cyjną. Charakteryzuje ją to, że jest w małym stopniu związana z jedną organizacją, a funkcjonuje pomiędzy różnymi przedsiębiorstwami, pracodawcami i stanowiskami. Model ten odzwierciedla także sposób postrzegania kariery przez jej „właściciela”, który bezgraniczność dostrzega nie tylko w aspekcie zawodowym, ale także pomiędzy pracą a sferą prywatną, życiem osobistym i rodzinnym. Reprezentantami takiego modelu kariery są współcześni specjaliści, których praca toczy się równoległe nawet w kilku globalnych przedsiębiorstwach, w różnych środowiskach, strefach czasowych, a często także zdalnie przy wykorzystaniu nowoczesnych środków komunikacyjnych, z własnego biura czy domowego gabinetu. Wzmoczonego przyrostu reprezentantów takiego oblicza kariery „bez granic” można było doświadczyć na przełomie I i II kwartału 2020 roku, kiedy światowa pandemia choroby koronawirusowej COVID-19 wymusiła na wielu pracownikach (niezależnie od wykonywanej profesji) przejście na pracę zdalną.

Mainiero i Sullivan (2005) to autorki kolejnego modelu współczesnej kariery zawodowej. Porównując ją do kalejdoskopu, opisały sposoby określania zmieniających się na przestrzeni czasu życiowych priorytetów człowieka. Ich oddziaływanie na karierę ma miejsce za sprawą następujących czynników („ABC kariery”):

- autentyczności (*authenticity*) – zapewniającej zgodność roli zawodowej i środowiska pracy człowieka z jego wartościami, ideałami i poczuciem tożsamości;
- równowagi (*balance*) – zapewniającej osiągnięcie optymalnego balansu między pracą i aktywnością człowieka poza nią;
- wyzwań (*challenges*) – zapewniających człowiekowi rozwój i poszerzanie własnych możliwości.

Występujące zależności pomiędzy wymienionymi powyżej czynnikami i ich konfiguracja wpływają na wyłonienie się dwóch kluczowych typów „kariery kalejdoskopowej”:

- typ Alfa – jednostka odczuwa pragnienie realizacji wyzwania, któremu podporządkowuje swoją aktywność. Z czasem pragnienie to przybiera postać osiągnięcia autentyczności, aż do momentu, w którym całe działanie zostaje zdominowane przez potrzebę życiowej równowagi. Jednostki realizujące ten typ „kariery kalejdoskopowej” są postrzegane jako skoncentrowane na rozwoju, gotowe do ciężkiej pracy kosztem osobistych potrzeb i pragnień. Badania auterek pokazują jednak, że dzięki pojawiającej się potrzebie autentyczności, w rezultacie dążą do osiągnięcia równowagi między wszystkim sferami ich życia;
- typ Beta – początkowo jednostka również odczuwa potrzebę realizacji wyzwań, jednak w pewnym momencie następuje wzrost znaczenia potrzeby równowagi, zbalansowania wszystkich istotnych dla niej sfer życia, aby w końcowej fazie kariera uległa przekształceniu na skutek potrzeby autentyczności. Autorki wskazują, że typ Beta „kariery kalejdoskopowej” częściej dostrzegany

jest u kobiet niż u mężczyzn. Wynika to z faktu, iż kobiety mają większą potrzebę realizacji roli rodzinnej (żony i matki) oraz pogodzenia jej z rolą zawodową.

Czwartym modelem jest „kariera proteuszowa” (*protean career*) Halla (Briscoe i Hall 2006). W swojej koncepcji autor zwraca uwagę na zmianę własności oraz charakteru kariery. Jednostka tworzy ją przy uwzględnieniu dwóch wymiarów:

- określa cele zważając na własny, indywidualny system wartości (*values driver career orientation*);
- jest zdolna do samodzielnego i niezależnego zarządzania karierą, biorąc pod uwagę zewnętrzne uwarunkowania (*self-directed*).

Według autora najczęstszymi reprezentantami „kariery proteuszowej” są osoby silnie skoncentrowane na ciągłym rozwoju, ukierunkowane na własne wartości oraz kompetencje pozwalające na „sterowanie” swoją karierą zawodową.

#### 4. Współczesna kariera zawodowa a zrównoważony rozwój

Zmieniające się współcześnie dynamiczne otoczenie organizacji, które warunkuje dzisiejsze rozumienie kariery zawodowej, w coraz większym stopniu stymulowane jest przez społeczną odpowiedzialność biznesu. We wrześniu 2015 roku podczas Szczytu Zrównoważonego Rozwoju w Nowym Jorku przyjęto nowy plan rozwoju świata do 2030 roku: Agendę na Rzecz Zrównoważonego Rozwoju. Opiera się ona na wizji budowy lepszego świata z korzyścią dla wszystkich ludzi, planie naprawy oraz ratowania świata. Agenda zawiera 17 Celów Zrównoważonego Rozwoju i 169 zadań do zrealizowania. Jednym z nich jest cel opierający się na promowaniu stabilnego, zrównoważonego i inkluzywnego wzrostu gospodarczego, pełnego i produktywnego zatrudnienia oraz godnej pracy dla wszystkich ludzi (cel 8. – Wzrost gospodarczy i godna praca) (Colglazier 2015).

Agenda 2030 wskazuje kierunek działań mających doprowadzić do pokonania najważniejszych wyzwań naszych czasów. Stawką w tych działaniach jest przyszłość obecnego i kolejnych pokoleń, która właśnie jest budowana. To dzisiaj tworzony jest świat, w jakim chcielibyśmy żyć za kilkadziesiąt lat. Takie postrzeganie przyszłości przyświeca współczesnemu rozumieniu kariery zawodowej, której rozwój wpisuje się w cel 8. Agendy na Rzecz Zrównoważonego Rozwoju. Przemiany, które dokonują się na tej płaszczyźnie, nastawione są na zmniejszanie stopy bezrobocia i niwelowanie ubóstwa poprzez elastyczne reagowanie na zmiany zachodzące na rynkach pracy i w otoczeniu organizacji, nabywanie nowych umiejętności, przekwalifikowanie i mobilność pracowników. Zrównoważone podejście do zatrudnienia stawia przed organizacjami wyzwanie kształtowania warunków umożliwiających pracownikom podejmowanie pracy wysokiej jakości, która oddziałuje na gospodarkę bez uszczerbku

dla środowiska. Przedsiębiorstwa powinny stwarzać nowe możliwości pracy oraz zapewniać godziwe warunki jej wykonywania. Takie podejście w pełni odpowiada kierunkowi, w którym podążają współczesna kariera zawodowa i jej rozwój. Organizacje, które wspierają pracowników, stwarzają możliwości zatrudnionym, są partnerami ich karier, a nie kreatorami. Zmieniające się oblicze kariery wynika m.in. z coraz większej świadomości zatrudnionych, dotyczącej skutków działań przedsiębiorstw w obszarze zrównoważonego rozwoju, a co za tym idzie przebiegu ich zawodowej drogi i możliwego rozwoju kariery w przyszłości.

## 5. Wnioski

**W**skutek zmian zachodzących w otoczeniu zewnętrznym przedsiębiorstw i reakcji wzajemnych powiązań, które wywołują, rozumienie kariery zawodowej ulega przemianom. Tradycyjne podejście zostaje zastąpione przez nowy sposób myślenia o karierze. Te zmiany, mające miejsce wśród praktyków zarządzania, znajdują swoje odbicie na gruncie teoretycznym i naukowym, skutkując powstawaniem nowych modeli i koncepcji. Poruszanie tematyki współczesnego rozumienia kariery zawodowej jest zatem ważne dla obu obszarów. Przedsiębiorcy i menedżerowie, którzy karierę zawodową analizują od strony praktyk i procesów realizowanych w organizacjach, bazując na współczesnym rozumieniu i uwzględniając ideę zrównoważonego rozwoju, mogą w jeszcze lepszy sposób wspomagać rozwój karier swoich pracowników, który przekłada się na rozwój całego przedsiębiorstwa. Zaś autorzy, którzy swoje opracowania poświęcają tematyce kariery zawodowej, dostrzegają postępujące przeobrażenia i poddają je naukowej analizie w swoich badaniach. Niniejsze opracowanie może więc stanowić punkt wyjścia do badań empirycznych, eksplorujących wybrany element lub obszar współczesnego rozumienia kariery zawodowej.

## Literatura

- ARTHUR M.B., CALMAN P.H. i DeFILLIPPI R. 1995. *Intelligent enterprise, intelligent career*. Academy of Management Executive nr 4, t. 9, s. 7–22.
- ARTHUR M.B., KHAPOVA S.N. i WILDEROM C.P. 2005. *Career success in a boundaryless career world*. Journal of Organizational Behavior: The International Journal of Industrial, Occupational and Organizational Psychology and Behavior nr 26, t. 2, s. 177–202.
- ARTHUR M.B. i ROUSSEAU D.M. red. 2001. *The boundaryless career: A new employment principle for a new organizational era*. Oxford University Press on Demand, Oxford.
- BARUCH Y. i VARDI Y. 2016. *A fresh look at the dark side of contemporary careers: Toward a realistic discourse*. British Journal of Management nr 27, t. 2, s. 355–372.



- BEDNARSKA-WNUK I. i JANUSZKIEWICZ K. 2012. *Oblicza kariery w XXI wieku*. [W:] *Historia i perspektywy nauk o zarządzaniu. Księga pamiątkowa dla uczczenia Jubileuszu 40-lecia pracy naukowo-dydaktycznej Prof. zw. dra hab. Arkadiusza Potockiego*, B. Mikula (red.). Fundacja Uniwersytetu Ekonomicznego w Krakowie, Kraków.
- BOHDZIEWICZ P. 2010. *Współczesne kariery zawodowe: od modelu biurokratycznego do przedsiębiorczego*. Zarządzanie Zasobami Ludzkimi nr 3–4, s. 39–56.
- BRISCOE J.P. i HALL D.T. 2006. *The interplay of boundaryless and protean careers: Combinations and implications*. Journal of Vocational Behaviour nr 69, t. 1, s. 4–18.
- COLGLAZIER W. 2015. *Sustainable development agenda: 2030*. Science nr 349, t. 6252, s. 1048–1050.
- De VOS A. i Van der HEIJDEN B.I. 2017. *Current thinking on contemporary careers: the key roles of sustainable HRM and sustainability of careers*. Current opinion in environmental sustainability nr 28, s. 41–50.
- IBARRA H. i OBODARU O. 2016. *Betwixt and between identities: Liminal experience in contemporary careers*. Research in Organizational Behavior nr 36, s. 47–64.
- JAKIMIUK B. 2013. *Aksjologiczne aspekty kariery*. Annales Universitatis Mariae Curie-Skłodowska, sectio J–Paedagogia–Psychologia nr 26, t. 1–2, s. 75–88.
- KIROVOVÁ I. 2011. *Od tradiční kariéry k současným kariérním koncepcím*. Ceskoslovenska Psychologie nr 55, t. 4, s. 316–331.
- LANTHALER W. i ZUGMANN J. 2000. *Akcja Ja: nowy sposób myślenia o karierze*. Twigger, Warszawa.
- MAINIERO L.A. i SULLIVAN S.E. 2005. *Kaleidoscope careers: An alternate explanation for the "opt-out" revolution*. Academy of Management Perspectives nr 19, t. 1, s. 106–123.
- MINTA J. 2014. *Oblicza współczesnych karier w perspektywie poradczej*. Dyskursy młodych andragogów nr 15, s. 113–127.
- MIŚ A. 2007. *Koncepcja rozwoju kariery zawodowej w organizacji*. Zeszyty Naukowe/Uniwersytet Ekonomiczny w Krakowie. Seria Specjalna, Monografie (183).
- POCZTOWSKI A. 1993. *Rozwój potencjału pracy jako problem zarządzania zasobami ludzkimi w przedsiębiorstwie*. Zeszyty Naukowe/Akademia Ekonomiczna w Krakowie. Seria Specjalna, Monografie (118).
- RUTKOWSKA M. 2010. *„Nowa kariera” i jej egzemplifikacje w postaci kariery proteuszowej i kariery bez granic*. Zarządzanie Zasobami Ludzkimi nr 1, t. 72, s. 9–20.
- SEARS S. 1982. *A definition of career guidance terms: A national vocational guidance association perspective*. Vocational Guidance Quarterly nr 31, t. 2, s. 137–143.
- SMOLBIK-JĘCZMIENIŃ A. 2015. *Współczesne przeobrażenia w podejściu do kariery zawodowej jako konsekwencja zmian zaistniałych w globalnej gospodarce*. Management Forum nr 3, t. 3, s. 56–62.
- SMOLBIK-JĘCZMIENIŃ A. 2017. *Kształtowanie własnej kariery zawodowej w kontekście wielopokoleniowości*. Wydawnictwo Uniwersytetu Ekonomicznego we Wrocławiu, Wrocław.
- SOLARCZYK-AMBROZIK E. 2015. *Nowe trendy w teoriach rozwoju karier – implikacje dla poradnictwa kariery*. Studia Edukacyjne nr 35, s. 21–53.
- SULLIVAN S.E. 1999. *The changing nature of careers: A review and research agenda*. Journal of management nr 25, t. 3, s. 457–484.



## Visual novel jako przykład grywalizacji i uczenia o wiedzy inżynierskiej

**STRESZCZENIE:** Visual novel to gatunek gier interaktywnych, zawierający opowiadanie w formie tekstu opartego na stylu narracyjnym i interaktywności wspomaganą obrazami statycznymi lub ruchomymi częściami obrazu zwanymi sprite. Te gry można traktować jako interaktywne książki z dodanymi multimediami. Celem badań jest wykorzystanie cech powieści wizualnych do stworzenia aplikacji e-learningowej. Program ten może stać się istotnym narzędziem w procesach edukacyjnych. Co więcej, głos wykładowcy w dialogach może być pomocny dla osób z pełną lub ograniczoną wadą wzroku. Dialogi w aplikacji mogą być również kontrolowane za pomocą klawiatury, która jest wygodna dla osób mających choroby narządów ruchu. Jedno z nich zawiera artykuły z bazy IEEE dotyczące danych związanych z badaniami nad visual novel. Inne źródła pochodziły z informacji na oficjalnych stronach internetowych, takich jak Steam, lub innych witrynach powiązanych z twórcami i wydawcami visual novel. Pierwsza część niniejszej pracy opisuje przykłady zrzutów ekranu zaczerpniętych z visual novel Maitetsu i Senren \* Banka. Maitetsu zawiera terminologię inżynierską związaną z pociągami. Senren \* Banka opracowany przez Yuzusoft ma dopracowany interfejs gry. W drugiej części pracy zostaną omówione pomysły połączenia visual novel z teoretyczną wiedzą inżynierską, takie jak formalne metody stosowane w informatyce, łańcuch Markowa lub probabilistyczne automaty czasowe. Podsumowując, praca zawiera informacje na temat gatunku gier visual novel i tego, w jaki sposób gry te można wykorzystać w bardziej efektywnym nauczaniu studentów. W związku z tym praca wpisuje się w 4. cel zrównoważonego rozwoju.

**SŁOWA KLUCZOWE:** visual novel, VN, Senren \* Banka, Maitetsu, rozgałęzienie, grywalizacja

## Visual novel as example of gamification and teaching engineering knowledge

**ABSTRACT:** Visual novel is an interactive game genre featuring text-based story with narrative style of literature and interactivity aided by static or sprite-based visuals. These games can be considered as interactive books with added media. The purpose of research is to use visual novel features to create e-learning application. This program can teach students more efficiently. Moreover, audible voice of a lecturer in dialogues can be helpful for invalids with blindness

---

<sup>1</sup> Mgr inż., AGH Akademia Górniczo-Hutnicza, Kraków, Polska.

or sight restrictions. Dialogues in application can be also controlled by keyboard which is convenient for persons who have movement illness and can not properly move mouse. When researching this topic, various sources were investigated. One of them were articles from IEEE explore database related to research connected to visual novel. Another sources came from information on official websites like Steam or other websites connected to visual novel developers and publishers. First part of article describes examples of screens which was taken from visual novel Maitetsu and Senren \* Banka. Maitetsu contains engineering terminology connected to trains. Senren \* Banka developed by Yuzusoft have nice game interface. In second part of article will be described ideas to connect visual novel with theoretical engineering knowledge such as formal method used in computer science, Markov Chain or Probabilistic Timed Automata which can be considered by student as boring to learn. In summary, this article presents information about visual novel game genre and how these games can be used in process of teaching student more efficiently.

**KEYWORDS:** Visual novel, VN, Senren \* Banka, Maitetsu, Branching path, Gamification

## 1. Wprowadzenie

### 1.1. Co to jest visual novel?

**V**isual Novel (VN) to gatunek gier interaktywnych wywodzącym się z Japonii, zawierający opowiadanie w formie tekstu opartego na stylu narracyjnym i interaktywności wspomaganą obrazami statycznymi lub ruchomymi częściami obrazu zwanymi *sprite*. Najczęściej w VN do obrazów jest używana stylistyka animowana, natomiast rzadziej jest to forma z wykorzystaniem fotografii. Ujmując prościej, gry te można traktować jako interaktywne książki z dodanymi multimediami. Pojęcie „powieść wizualna” wywodzi się z angielskiego terminu *visual novel*. W pracy używa się nazw angielskich, ponieważ rynek VN w Polsce praktycznie nie istnieje, a jedyny sposób na zakupienie tytułu to Steam lub skorzystanie z amerykańskich firm tłumaczących VN z japońskiego, takich jak: MangaGamer lub JAST USA. Steam w wersji spolszczonej swojego serwisu nie używa terminu „powieść wizualna” tylko „Visual Novel”, natomiast polskie fora internetowe używają pojęcia *visual novel*.

### 1.2. Kiedy wydano pierwszą VN?

Szukając informacji w internecie, można natrafić na różne wydania tytułu pomiędzy rokiem 1980 a 1983. Najlepszą internetową bazą danych dotyczącą *visual novel* jest <https://vndb.org>. Rysunek 1 przedstawia tablicę tytułów posortowaną według daty wydania, z której można wyczytać, że pierwszą VN było *Mission Asteroid* wydane w 1980 roku. Po kliknięciu na tytuł można otrzymać bardziej szczegółowe informacje wraz z przykładem zastosowanych grafik. W bazie danych są również zawarte informacje, w jakim języku są dostępne tytuły, na jakich platformy systemowe zosta-

ły wydane. Podczas wykonania zrzutu przedstawionego na Rysunku 1 internetowa baza danych dysponowała informacjami o 27 372 tytułach VN. Tabela 1 przedstawia 6 pierwszych wydań tytułów VN wraz z datami zarejestrowanymi w internetowej bazie danych vnndb.

| Title  | Released | Popularity | Rating   |
|--|----------|------------|----------|
| Water's Edge                                   | unknown  | 0.00       | 0.00 (0) |
| Welcome To... Chichester 3 : How I Met Grendel | unknown  | 0.00       | 0.00 (0) |
| Wet Summer Days                                | unknown  | 0.00       | 0.00 (0) |
| Wheel of Fortune                               | unknown  | 0.00       | 0.00 (0) |
| When Shadows Ate the Light                     | unknown  | 0.00       | 0.00 (0) |
| Whiteheart Woods                               | unknown  | 0.00       | 0.00 (0) |
| White Violin                                   | unknown  | 0.00       | 0.00 (0) |
| Wild Isolation                                 | unknown  | 0.00       | 0.00 (0) |
| Wingdaria Destiny                              | unknown  | 0.00       | 0.00 (0) |
| Wintersands                                    | unknown  | 0.00       | 0.00 (0) |
| Wishes in Pen: Chrysanthemums in August        | unknown  | 0.02       | 6.13 (2) |
| Witch Apprentice                               | unknown  | 0.01       | 6.12 (1) |
| World End Phenomenon                           | unknown  | 0.00       | 0.00 (0) |
| ¿Y este USB?                                   | unknown  | 0.00       | 0.00 (0) |
| Yogscast Dating Sim                            | unknown  | 0.00       | 6.01 (2) |
| You Saved Me                                   | unknown  | 0.00       | 0.00 (0) |
| Yuri Clicker                                   | unknown  | 0.00       | 0.00 (0) |
| Zodiac Axis                                    | unknown  | 0.03       | 6.19 (3) |
| Mission Asteroid                               | 1980     | 0.00       | 6.03 (2) |
| Lolita: Yakyuuken                              | 1982-12  | 0.03       | 5.93 (2) |
| Date Adventure                                 | 1983-01  | 0.00       | 0.00 (0) |
| Ninja Adventure                                | 1983-01  | 0.00       | 0.00 (0) |
| Puzzle Adventure                               | 1983-01  | 0.00       | 0.00 (0) |
| Seiko no Adventure                             | 1983-02  | 0.00       | 0.00 (0) |
| Genma Taisen                                   | 1983-03  | 0.00       | 0.00 (0) |
| Happy Bushman                                  | 1983-03  | 0.00       | 0.00 (0) |
| Mystery House                                  | 1983-04  | 0.00       | 0.00 (0) |
| Icarus   | 1983-05  | 0.00       | 0.00 (0) |
| Lolita 2                                       | 1983-05  | 0.01       | 6.03 (1) |

Rysunek 1. Spis tytułów visual novel w internetowej bazie danych vnndb  
 Źródło: <https://vnndb.org> [Data wejścia 28.05.2020]

Tabela 1. Tytuły i daty 6 najwcześniej wydanych VN

| Tytuł VN           | Data wydania |
|--------------------|--------------|
| Mission Asteroid   | 1980         |
| Lolita: Yakyuuken  | 1982-12      |
| Date Adventure     | 1983-01      |
| Ninja Adventure    | 1983-01      |
| Puzzle Adventure   | 1983-01      |
| Seiko no Adventure | 1983-02      |

Źródło: opracowanie własne na podstawie internetowej bazy danych vnndb.

### 1.3. Co stanowi o popularyzacji VN?

Według autorów artykułu *From hypertext to hyperdimension Neptunia: The future of VR visual novels: The potentials of new technologies for branching-path narrative games* (Crawford i Chen 2017), zakończone sukcesem kampanie translacyjnej na *Kickstarter* przyczyniły się do spopularyzowania VN poza Japonią. Tabela 2 przedstawia przykłady 3 tytułów z kampanii translacyjnej na platformie *Kickstarter* z uwzględnieniem zebranych donacji w porównaniu do pierwotnego celu. Przy tytułach VN zamieszczono dodatkowo odnośniki do stron internetowych z oryginalnego artykułu, w celu bardziej szczegółowego potwierdzenia rezultatów zawartych w tabeli (w przypadku *Grisaia* chodzi o tłumaczenie całej trylogii).

Tabela 2. Przykład donacji na tłumaczenie VN w *Kickstarter*

| Tytuł VN                             | Cel [\$] | Rezultat [\$] |
|--------------------------------------|----------|---------------|
| <i>Muvluv</i> (Muv Luv Team 2015)    | 250 000  | 1 255 444     |
| <i>CLANNAD</i> (Sekaiproject 2015a)  | 140 000  | 541 161       |
| <i>Grisaia*</i> (Sekaiproject 2015b) | 160 000  | 475 255       |

Źródło: opracowanie własne na podstawie artykułu (Crawford i Chen 2017).

Kolejnym czynnikiem, który zwiększył popularność VN, jest platforma Steam. Jest to serwis internetowy, który głównie zajmuje się dystrybucją cyfrową gier komputerowych.

Dobrym przykładem udanej sprzedaży *visual novel* na Steam jest *Nekopara*. Seria została stworzona przez *Neko Works* i jest fabularnie umiejscowiona w fikcyjnym świecie, gdzie ludzie żyją razem z inteligentnym gatunkiem przypominającym dziewczyny z kocimi uszami i ogonem. W maju 2016 roku ta VN została sprzedana w 500 tysiącach kopii (@nekopara\_pr, 4 maj 2016). W kwietniu 2017 roku ilość sprzedanych kopii *Nekopara* wzrosła dwukrotnie do poziomu ponad miliona (@nekopara\_pr, 1 kwietnia 2017). W grudniu tego samego roku *Nekopara* stała się jednym z najlepiej zarabiających tytułów, o czym można się przekonać wchodząc na adres [http://store.steampowered.com/sale/2017\\_top\\_new\\_releases](http://store.steampowered.com/sale/2017_top_new_releases). Natomiast w kwietniu 2018 roku seria została sprzedana w ilości ponad 2 milionów kopii (Pineda 2018).

### 1.4. Obecny stan badań na świecie związany z VN

Popularność VN sprawiła, że część naukowców zaczęła wykorzystywać *visual novel* lub ich cechy w swoich badaniach. Jednak podejście do tego tematu wśród naukowców jest zróżnicowane. Przykładowo autorzy artykułu (Crawford i Chen 2017)

próbują przewidzieć przyszłość *visual novel* w połączeniu z technologią *Virtual Reality* (VR). Praca stanowi istotny element badawczy, gdyż przedstawia przykłady z przeszłości mediów wykorzystujących nieliniową ścieżkę fabularną, takich jak *interactive Fiction* (IF) lub książki posiadające wiele zakończeń fabularnych, znanych jako *gamebooks*. Spora część artykułów dotyczących badań nad *visual novel* omawia doświadczenia z budowaniem własnych aplikacji VN lub *frameworków* do tworzenia VN, które są oparte na najnowszych technologiach (Yusuf i in. 2011; Emi i Okuda 2016; Hakkun i in. 2018) oraz (Owada i Tokuhisa 2012). Naukowcy również wykorzystują cechy *visual novel* i częściowo elementów grywalizacji do edukacji związanej z polityką (Pasqualini i in. 2019), kulturą (Andrew i in. 2019) lub nauką języka angielskiego (Faizal 2016), tworząc tym samym e-learningowe systemy.

## 2. Przegląd wybranych *visual novel*

**G**łównym celem stworzenia gry jest jej sprzedaż. W związku z tym *visual novel* musi posiadać cechy, które przyciągną nabywców i najczęściej nie są to aspekty edukacyjne. Duża część VN to symulatory randkowe rozgrywane się w szkole z elementami fantastyki lub fabularnie zmienionymi cechami świata rzeczywistego. Głównymi bohaterami są ludzie młodzi. Oczywiście jest również dużo oryginalnych tytułów, jak horror *Saya no Uta*, gdzie bohaterami są osoby dorosłe, a wszystkie opcje zakończenia gry są tragiczne. Innym oryginalnym tytułem jest *Gyakuten Saiban*, tłumaczony jako *Phoenix Wright*, przedstawiający adwokata, którego klienci są oskarżeni o ciężkie zbrodnie, mimo że są niewinni. Gra polega na znalezieniu dowodów ich niewinności. W tej części pracy opisane zostaną część cech VN przedstawiających zrzuty ekranu zaczerpnięte z *visual novel* Maitetsu i Senren \* Banka. Wybrano Maitetsu, ponieważ zawiera terminologię inżynierską związaną z pociągami. Natomiast Senren \* Banka opracowany przez Yuzusoft ma ładny interfejs gry.

### 2.1. Wybór ścieżki w VN

Yuzusoft jako producent jest znany z tworzenia VN z dopracowaną i dynamiczną oprawą wizualną. Za grafikę w grach tego producenta jest odpowiedzialny artysta Kobuichi, jeden z najlepszych artystów w tej branży. Senren \* Banka jest jedną z gier wyprodukowanych przez Yuzusoft. Gra to posiada wiele zakończeń w zależności od wyborów głównego bohatera i rozwoju jego relacji z głównymi bohaterkami serii.

Poniżej przedstawiono przykład wyboru, jakiego musi dokonać użytkownik, by móc kontynuować grę. Budując e-learningowy system, ten mechanizm wyborów można zaimplementować do quizów, odpowiedzi, które w późniejszym etapie będzie

można przeliczyć na ocenę. Należy zauważyć, że to nie musi być wybór tylko dwóch opcji. Niektóre VN idą dalej i implementują dużą ilość wyborów, które nie mają wpływu na kierunek, w jakim będzie się toczyć fabuła, do tego stopnia, że baza *vndb* nadaje takim tytułom znaczniki *meaningless choices*.



Rysunek 2. Przykład wyborów z *Senren \* Banka* wyprodukowanego przez Yuzusoft  
Źródło: własnoręcznie wykonany zrzut ekranu w Windows10 z gry *Senren \* Banka*

W lewym górnym rogu odnaleźć można stan czasowy fabuły, niektóre VN podają w tym miejscu aktualną datę, która najczęściej w takich przypadkach jest mocno powiązana z fabułą. Przykładowo, niezrealizowanie zadania w odpowiednim czasie może skutkować końcem i doprowadzić do *BAD ENDING*, czyli złego zakończenia gry. W zależności od fabuły takich zakończeń może być wiele, a w przypadku niektórych VN z gatunku *mystery* może to być śmierć bohatera kończąca się jako *DEAD ENDING*.

W dolnej części widoczny jest panel, którego zadaniem jest pomoc m.in. w zapisie i odczycie stanu fabularnego, w jakim znajduje się fabuła gry. Ikonka głośnika służy do odsłuchania wypowiedzianych przez bohaterkę zdań. W przypadku tłumaczeń angielskich, głos podkładany pod bohaterów jest japoński, co jest jednym z atutów VN i niektórzy fani decydują się na zakup właśnie z powodu ulubionego podkładu głosowego nazywanego w Japonii *seiyuu*. Kolejną bardzo użyteczną opcją jest możliwość pomijania już wcześniej czytanego tekstu. Należy pamiętać, że VN mają nieliniową fabułę i gracz po dojściu do jednego z zakończeń, ponownie rozpoczyna grę, by dokonać innych wyborów i tym samym osiągnąć inne zakończenie gry. Najczęściej tekst



w VN jest wyświetlany u dołu ekranu, w prostokącie mieszczącym 2 lub 3 linie tekstu, ale są wyjątki i niektóre VN implementują zmieniający położenie prostokąt, lub tekst jest wypisywany na całej powierzchni obrazu. W przypadku, gdy użytkownik jest zmęczony ciągłym klikaniem myszki, by przejść do kolejnych linii tekstu, w panelu pomocniczym istnieje opcja *auto*, która po pewnym czasie automatycznie wyświetla kolejne linie tekstu.

## 2.2. Przykładowe elementy menu głównego VN

Rysunek 3 przedstawia tytułowe menu w *Senren \* Banka*. Najważniejsze opcje występujące w prawie każdym VN to START, LOAD, SETTINGS i EXIT. W przypadku VN z rysunku 3 opcja EXTRA i AFTER pojawiła się dopiero wtedy, gdy gracz przeczytał fabułę i doszedł do któregoś z zakończeń. START służy do rozpoczynania fabuły od początku. LOAD zawiera zapisane w trakcie fabuły stany i pozwala wrócić do zapisanych stanów fabularnych. W porównaniu do rzeczywistych książek, stan czytanego tekstu w VN można zapisywać w każdej chwili.

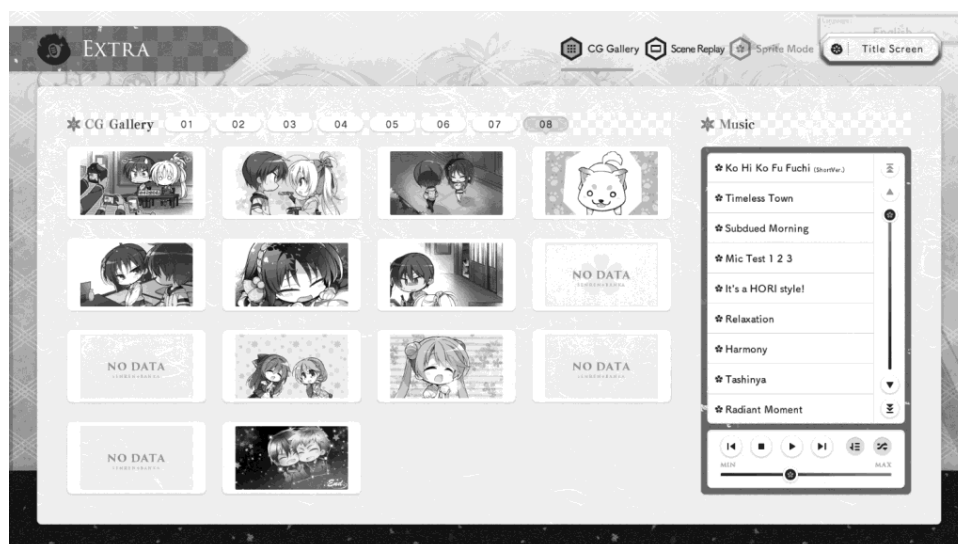


Rysunek 3. Przykład tytułowego menu z *Senren \* Banka* stworzonego przez Yuzusoft  
Źródło: własnoręcznie wykonany zrzut ekranu w Windows10 z gry *Senren \* Banka*

### 2.3. Co zawiera opcja EXTRA i co to jest CG?

CG to skrót od *computer graphic*. Są to powiązane z fabułą VN obrazy stworzone przez artystę. Gracz będzie mógł zobaczyć CG dopiero, gdy dokona odpowiednich wyborów fabularnych. Sekcja EXTRA zawiera zbiór CG, które gracz już widział w *visual novel*. Zebranie wszystkich CG można traktować jako element grywalizacji. Poza zbieraniem CG, niektóre VN oferują zbieranie muzyk powiązanych z częściami fabularnymi w VN. W przypadku *visual novel* przeznaczonych dla osób powyżej osiemnastego roku życia jest możliwość zbierania części fabuły związanej ze scenami seksualnymi.

Poniżej rysunek 4 przedstawia jak wygląda w Senren \* Banka sekcja EXTRA. Warto zauważyć, że nie zebrane CG w albumie to puste miejsca, które można uzupełnić, gdy wybierze się inne ścieżki fabularne w grze.

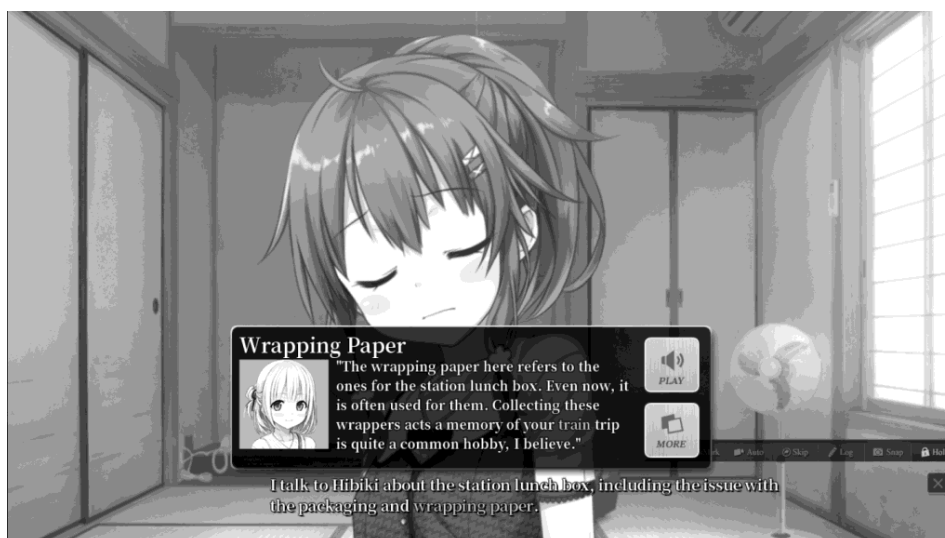


Rysunek 4. Sekcja EXTRA w Senren \* Banka (producent Yuzusoft)  
Źródło: własnoręcznie wykonany zrzut ekranu w Windows10 z gry Senren \* Banka

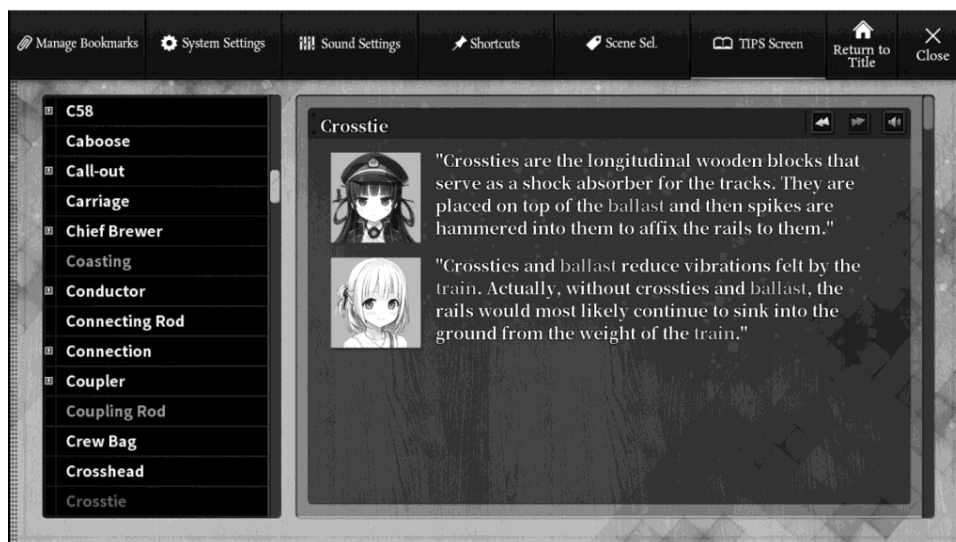
W przypadku planowania stworzenia e-learningowego systemu można zamiast CG zbierać dostęp do quizów, co daje możliwość sprawdzenia się w ich rozwiązywaniu. Dodatkowo istnieje możliwość stworzenia listy z informacjami, z jakich testów w systemie e-learningowym użytkownik uzyskał maksymalny wynik.

## 2.4. Przykład wykorzystania wiedzy inżynierskiej w Maitetsu

Tytuł Maitetsu jest nawiązaniem do spółki kolejowej Meitetsu świadczącej przewozy na terenie prefektur Aichi i Gifu w Japonii. Firma jest drugim najstarszym operatorem kolei elektrycznej w Japonii. VN Maitetsu zawiera dużo terminologii związanej z infrastrukturą kolejową z pociągami, ich rodzajami oraz trochę przyszłościowej fantastyki, takiej jak sztuczna inteligencja, którą symbolizują postaci niektórych głównych bohaterek serii. Rysunek 5 przedstawia efekt załączenia w tekście powiązania, które wyświetla okienko wyjaśniające. Rysunek 6 z kolei przedstawia, jak wygląda sekcja wyjaśniająca zagadnienia po kliknięciu w opcję MORE z rysunku 5. Należy zaznaczyć, że informacje zawarte w sekcji wyjaśniającej są dodatkowo czytane na głos przez bohaterów i mają za zadanie wyjaśnić graczowi terminologię związaną w pociągami i całą infrastrukturą kolejową.



Rysunek 5. Okienko wyjaśniające w Maitetsu (producent Yuzusoft)  
Źródło: własnoręcznie wykonany zrzut ekranu w Windows10 z gry Maitetsu



Rysunek 6. Sekcja wyjaśniająca w Maitetsu (producent Yuzusoft)  
Źródło: własnoręcznie wykonany zrzut ekranu w Windows10 z gry Maitetsu

### 3. Badania

**B**adania własne autora pracy zaliczają się do dziedziny informatyki technicznej i telekomunikacji, a bardziej szczegółowo do kwestii związanych z prawdopodobieństwem, optymalizacją oprogramowania oraz modelowania i weryfikacji czasowej systemów. Autor obecnie jest na etapie planowania, a jednym z jego projektów jest wykorzystanie cech powieści wizualnych do stworzenia aplikacji e-learningowej, w której można umieścić zagadnienia informatyczno-matematyczne.

#### 3.1. Jak badania wpisują się w cele zrównoważonego rozwoju?

Badania autora wpisują się w 4. cel zrównoważonego rozwoju. Zapewnienie wszystkim edukacji wysokiej jakości oraz promowanie uczenia się przez całe życie. W kolejnych paragrafach tego podrozdziału zostanie opisana użyteczność tworzenia e-learningowej aplikacji na bazie silnika do *visual novel*, która powinna odpowiedzieć na pytanie związane z wpisywaniem się badań w 4. cel zrównoważonego rozwoju wymieniony w Agendzie.

Program mógłby przyczynić się do bardziej efektywnego kształcenia uczniów. Co więcej, narracja wykładowcy w dialogach może być pomocna dla osób z pełną lub

ograniczoną wadą wzroku. Dialogi w aplikacji mogą być również kontrolowane za pomocą klawiatury, która jest wygodna dla osób z chorobami narządów ruchu i które nie mogą prawidłowo przesunąć myszką. Proponowany system e-learningowy będzie oparty na silniku Ren'Py, który cechuje duża przenośność nie tylko na system Windows, ale też linux, android, iOS oraz Mac OS X. Ren'Py oferuje również przenośność do HTML5, co daje możliwość wykorzystania przeglądarek internetowych. Trzeba tu również zaznaczyć, że *visual novel* w większości przypadków nie należy do programów wymagających, co umożliwia uruchomienie aplikacji na sprzęcie różnej jakości.

Dla niektórych osób tematy na poziomie szkoły wyższej z zakresu informatyczno-matematycznego mogą być trudne do zrozumienia. Możliwe, że zbudowanie systemu e-learningowego wykorzystującego cechy *visual novel* zachęci te osoby do sięgnięcia po literaturę z tego zakresu.

### 3.2. Obecnie planowana teoria w aplikacji

Badania prowadzone przez autora są obszerne pod względem teoretycznym i wymagają zrozumienia takich podstaw, jak znajomość łańcuchów Markowa (*Markov Chains*), procesów Markowa (*Markov Processes*), stochastycznych sieci Petriego (*Stochastic Petri Nets*), probabilistycznych automatów czasowych (*Probabilistic Timed Automata*). Zagadnienia te wraz z przykładami użycia można użyć do zbudowania zawartości aplikacji. Początkowym etapem może być stworzenie quizów i zaimplementowanie ich do aplikacji opartej na silniku Ren'Py. Jeśli chodzi o dalszy pomysł na rozwój aplikacji, to można dołączyć część fabularną, przedstawiającą przykładowo losy studenta, który będzie uczestniczył w wykładach na uczelni oraz pisał testy. Celem gry fabularnej byłoby wtedy zaliczenie roku.

### 3.3. Wnioski

W artykule przedstawiony został krótki wstęp do tematyki *visual novel*. Dodatkowo zostały zaprezentowane przykłady zarówno z prac naukowców nad wykorzystaniem tematu w badaniach, jak i obecnej sytuacji na rynku. W przyszłości artykuł może wpłynąć na większe spopularyzowanie *visual novel*, powodując wzrost tłumaczeń tytułów VN z Japonii typu *Aiyoku no Eustia*. Natomiast pomysł stworzenia aplikacji e-learningowej na bazie cech zaczerpniętych z VN może w przyszłości mieć istotne znaczenie i stać się ważnym suplementem procesu edukacyjnego.

## Literatura

- ANDREW J., HENRY S., YUDHISTHIRA A.N., ARIFIN Y. i PERMAI S.D. 2019. Analyzing the Factors that Influence Learning Experience through Game Based Learning using Visual Novel Game for Learning Pancasila, *Procedia Computer Science* Vol. 157, s. 353–359, ISSN 1877-0509; DOI: 10.1016/j.procs.2019.08.177.
- CRAWFORD R. i CHEN Y. 2017. *From hypertext to hyperdimension Neptunia: The future of VR visual novels: The potentials of new technologies for branching-path narrative games*. 23<sup>rd</sup> International Conference on Virtual System & Multimedia (VSMM), Dublin, s. 1–7.
- EMI K. i OKUDA S. 2016. *EPUB-type visual novel gives us happy math: A prototype of edutainment software on math*. IEEE 5<sup>th</sup> Global Conference on Consumer Electronics, Kyoto, s. 1–2; DOI: 10.1109/GCCE.2016.7800538.
- FAIZAL M.A. 2016. *The effects of conversation-gambits visual-novel game on students' english achievement and motivation*. International Electronics Symposium (IES), Denpasar, s. 481–486, DOI: 10.1109/ELECSYM.2016.7861054.
- HAKKUN R.Y., AI SABAH A Z D., FATHONI K., RAMADIJANTI N. i BASUKI A. 2018. *Online Visual Novel Game Framework*. 2018 International Conference on Information and Communication Technology Convergence (ICTC), Jeju, s. 166–170; DOI: 10.1109/ICTC.2018.8539388.
- Muv Luv Team 2015. *Muv Luv a Pretty Sweet-Visual Novel Series*. Kickstarter; [Online] <https://www.kickstarter.com/projects/muvluv/muv-luv-a-pretty-sweet-visual-novel-series> [Dostęp: 29.05.2020].
- OWADA S. i TOKUHISA F. 2012. *Kadecot: HTML5-based visual novels development system for smart homes*. The 1<sup>st</sup> IEEE Global Conference on Consumer Electronics 2012, Tokyo, s. 17–19; DOI: 10.1109/GCCE.2012.6379572.
- PASQUALINI E., de CASTRO PRADO R., GARCIA R.K., SANTOS LOPES T.Y. i NETO L.B. 2019. *Development of a Game for High School Students on Politics*. XIV Latin American Conference on Learning Technologies (LACLO), San Jose Del Cabo, Mexico, s. 20–23; DOI: 10.1109/LACLO49268.2019.00014.
- PINEDA R.A. 2018. *Nekopara Games Have Sold 2 Million Copies*, *Anime News Network*. [Online] <https://www.animenewsnetwork.com/daily-briefs/2018-04-25/nekopara-games-have-sold-2-million-copies/.130754> [Dostęp: 29.05.2020].
- Sekaiproject 2015. *CLANNAD Official English Release*. Kickstarter; [Online] <https://www.kickstarter.com/projects/sekaiproject/clannad-official-english-release> [Dostęp: 29.05.2020].
- Sekaiproject 2015. *The Grisaia Trilogy: Three Huge Visual Novels for PC*. Kickstarter; [Online] <https://www.kickstarter.com/projects/sekaiproject/the-grisaia-trilogy-three-huge-visual-novels-for-p> [Dostęp: 29.05.2020].
- YUSUF R., WURYANDARI A.I. i ZPALANZANI A. 2011. *Production system and paradigm adjustment in collaborative works for designing mobile application; Visual Novel engine (VisNoE) case study*. Proceedings of the 2011 International Conference on Electrical Engineering and Informatics, Bandung, s. 1–6.
- @nekopara\_pr, 4 maj 2016. *ネコぱらシリーズの売り上げが累計50万本突破しました*, Twitter; [Online] [https://twitter.com/nekopara\\_pr/status/727796825470558208](https://twitter.com/nekopara_pr/status/727796825470558208) [Dostęp: 29.05.2020].
- @nekopara\_pr, 1 kwietnia 2017. *Nekopara series surpassed one million copies total! We appreciate your continuous support!* Twitter; [Online] [https://twitter.com/nekopara\\_pr/status/848371313076977664](https://twitter.com/nekopara_pr/status/848371313076977664) [Dostęp: 29.05.2020].

## Ekoprojektowanie jako element edukacji ekologicznej

**STRESZCZENIE:** Z perspektywy środowiskowych celów zrównoważonego rozwoju, efektywność energetyczna i zminimalizowanie zużycia surowców naturalnych są istotnymi przesłankami dla ekoprojektowania produktów. Kwestia wydłużonej przydatności do użycia i przyszłego recyklingu produktu powinna zostać rozstrzygnięta jeszcze na etapie jego planowania. Projekt produktu przekłada się na jego środowiskowe oddziaływanie poprzez wzbudzenie zmiany w zachowaniu społeczeństwa. Aby ta zmiana była możliwa, ważna jest edukacja przyszłych projektantów w zakresie nowych wyzwań, trendów i korzyści, jakie niesie za sobą projektowanie uwzględniające aspekty środowiskowe i cały cykl życia produktu. Celem rozdziału jest analiza wiedzy i umiejętności, jakie powinien posiadać przyszły pracownik w zakresie ekoprojektowania w branży tworzyw sztucznych. Praca wpisuje się w 4. i 12. cel zrównoważonego rozwoju.

**SŁOWA KLUCZOWE:** zrównoważony rozwój, edukacja, ekoprojektowanie, tworzywa sztuczna

## Ecodesign as an element of environmental education

**ABSTRACT:** From the perspective of environmental sustainability goals, energy efficiency and minimizing the consumption of natural resources are important prerequisites for eco-design products. The issue of extended shelf life and future recycling of the product should be resolved at the planning stage. Product design translates into its environmental impact by inducing a change in the behavior of society. For this change to be possible, it is important to educate future designers on new challenges, trends and benefits of designing that takes into account environmental aspects and the entire life cycle of the product. The aim of the chapter is to analyze the knowledge and skills that a future employee in the field of eco-design in the plastics industry should have. The work is part of the fourth and twelfth goals of sustainable development.

**KEYWORDS:** sustainable development, education, eco-design, plastics

---

<sup>1</sup> Mgr, AGH Akademia Górniczo-Hutnicza, Kraków, Polska.



## 1. Wprowadzenie

**W**zrównoważonym rozwoju dąży się do poprawy jakości życia oraz do osiągnięcia dobrobytu współczesnych i przyszłych pokoleń. Mając na uwadze te założenia, Unia Europejska zaczęła dostrzegać zagrożenia spowodowane nadmierną eksploatacją zasobów naturalnych, nieustannie wzrastającą konsumpcją i generowaną coraz większą ilością odpadów. Aby zapobiec całkowitej degradacji środowiska i spowodować zmianę podejścia przedsiębiorców do wyrobów i społeczeństwa do konsumpcji, ogłoszono Komunikat Komisji do Parlamentu Europejskiego, Rady Europejskiego Komitetu Ekonomiczno-Społecznego i Komitetu Regionów z 2 lipca 2014 roku – COM(2014) 398 final „Ku gospodarce o obiegu zamkniętym: program ‘zero odpadów’ dla Europy”, według którego gospodarka o obiegu zamkniętym (GOZ, ang. *circular economy*) oznacza wyeliminowanie pojęcia „odpadów” i uznanie, iż wszystko ma swoją wartość. Takie podejście oznacza przejście od wydajności do użyteczności w sposobie projektowania/myślenia o wyrobach, uwzględnianie całego cyklu życia wyrobów oraz budowanie wiedzy i świadomości odpowiedzialnego konsumenta. Plan działania UE dotyczący GOZ stanowi zorientowany na przyszłość program na rzecz czystszej i konkurencyjnej Europy, współtworzony z podmiotami gospodarczymi, konsumentami, obywatelami i organizacjami społeczeństwa obywatelskiego.

Społeczeństwo, które poprzez szkolenia, kursy i edukację ekologiczną jest świadome swojego znaczenia w całym łańcuchu zależności i przepływu informacji pomiędzy elementami GOZ, przyczynia się do osiągnięcia założeń zrównoważonego rozwoju poprzez preferowanie przedsięwzięć proekologicznych i wyrobów przyjaznych środowisku w całym cyklu życia, posiadających odpowiednie parametry i oznakowanie ekologiczne. Przedsiębiorcy przygotowując się do wdrażania nowego modelu gospodarczego, podejmują szereg działań wspomagających i ukierunkowanych na ekoprojektowanie. Jest ono wskazane jako priorytet w Mapie drogowej transformacji w kierunku GOZ, opracowanej przez Ministerstwo Inwestycji i Rozwoju, a także w Krajowym Planie Gospodarki Odpadami 2022. Jeśli wprowadzane na rynek opakowania, stające się po użyciu odpadami, są źle zaprojektowane (nieprzemysłane materiały, kolory, połączenia itp.), firmy gospodarujące odpadami nie mogą przekazać ich do recyklingu materiałowego. Mogą jedynie je zeszkładować lub spalić. Nowe podejście do projektowania zrównoważonych opakowań sprzyjać będzie oszczędnościom poprzez: minimalizację ilości i wielkości opakowań, zapobieganie marnowaniu produktów i umożliwienie zawracania materiałów do obiegu dzięki zagwarantowaniu ich przydatności do recyklingu. W rozdziale zaprezentowano wyniki analizy SWOT przedsiębiorców w zakresie kompetencji wiedzy i umiejętności, jakie powinni posiadać przyszli pracownicy i eksperci w zakresie ekoprojektowania produktów.



## 2. Ekoprojektowanie – nowe wyzwania dla producentów

**W**edług K. Michalskiego i J. Sitko „zapobieganie powstawaniu odpadów jest kwestią złożoną i nie należy do rzeczy prostych. Wymaga zaangażowania i współpracy wielu środowisk, ale przede wszystkim wypracowania jednolitej linii myślenia sfery produkcyjnej, handlowej i konsumpcyjnej, skutecznie wspieranej prawem” (Michalski i Sitko 2016: 85). Wdrażając zasady GOZ charakteryzujące się uszczelnieniem systemu gospodarowania, wzrostem poziomów odzysku i recyklingu odpadów, zmniejszeniem masy składowanych odpadów oraz wzrostem świadomości społecznej w zakresie prawidłowego postępowania z odpadami osiągnięte zostaną zarówno korzyści środowiskowe, jak ekonomiczne i społeczne. C.C. Parker podaje, że już w latach osiemdziesiątych, prognozowano, że „ (...) zapobieganie wytwarzaniu odpadów, ekoprojekt, ponowne wykorzystanie odpadów i tym podobne działania mogą przynieść przedsiębiorstwom w Unii Europejskiej oszczędności netto sięgające 600 mld EUR lub 8% rocznego obrotu, prowadząc jednocześnie do ograniczenia łącznych emisji gazów cieplarnianych o 2–4% rocznie” (Parker i Turyle 1986: 336).

Ekoprojektowanie jest wyzwaniem zarówno dla producentów opakowań, jak i projektantów oraz ekspertów w tej dziedzinie. Wszyscy oni muszą nauczyć się sprostać nowym wymaganiom i przyjętym normom. Do współpracy muszą też włączyć się podmioty zajmujące się gospodarką odpadami i Jednostki Samorządu Terytorialnego, ponieważ są one zobowiązane do osiągania odpowiednich poziomów recyklingu. Krajowy Plan Gospodarki Odpadami 2022 wskazuje ekoprojektowanie jako metodę zapobiegania powstawaniu odpadów i definiuje je jako „stosowanie przez producenta rozwiązania technologicznego ułatwiającego ponowne użycie i przetwarzanie odpadów opakowaniowych oraz minimalizację masy opakowań”. Jako wyzwanie uznaje „wciąż niewystarczające uwzględnianie aspektów środowiskowych przy projektowaniu produktu z zamiarem poprawienia charakterystyki oddziaływania, jakie dany produkt wywiera na środowisko na etapie wytwarzania i przez cały cykl jego życia, takich jak: ograniczenie masy opakowania oraz ograniczenie wielkości opakowania w stosunku do wielkości produktu, stosowanie opakowań wielokrotnego użytku, jeśli ma to uzasadnienie ekologiczne i ekonomiczne” (Krajowy Plan Gospodarki 2016).

Dyrektywa PE 2009/125/WE określa ekoprojekt jako podejście zapobiegawcze, mające na celu optymalizację ekologiczności produktów przy zachowaniu ich cech funkcjonalnych, dając rzeczywiste nowe możliwości producentom, konsumentom i całemu społeczeństwu. Kluczowym aspektem jest wpływ produktu i jego opakowania na środowisko w całym cyklu życia, wydłużenie trwałości produktów, a także unikanie w procesie produkcyjnym i w samym produkcie szkodliwych dla środowiska i zdrowia substancji. Projektowanie jest procesem złożonym, zajmującym w cyklu życia wyrobu znaczące miejsce. Decyzje podjęte w fazie projektowania wpływają na koszty produkcji wyrobu (Dostatni i in. 2014) oraz determinują działania, które będą

musiały być podjęte w ostatniej fazie cyklu życia wyrobu (po jego wycofaniu z użycia) (Dostatni i in. 2014). W związku z powyższym, podczas projektowania zaczęto skupiać się również nad aspektami środowiskowymi. Zdefiniowano takie pojęcia jak zielone projektowanie, projektowanie dla środowiska (*Design for Environmental*) czy też ekoprojektowanie (Kurczewski i Lewandowska 2008).

Ekoprojektowaniu poświęca się coraz więcej uwagi zarówno w strategicznych dokumentach UE, jak i Polski. Przyczynia się do tego m.in. większa świadomość społeczeństwa na temat zagrożeń środowiska naturalnego oraz wyczerpywanie się zasobów naturalnych. Zgodnie z normą PKN-ISO/TR 14062:2004 ekoprojektowanie oznacza „włączanie aspektów środowiskowych do projektowanie i rozwoju wyrobu” [PKN-ISO/TR 14062:2004]. Ekologiczne projektowanie jest uzupełnieniem projektowania tradycyjnego o ocenę oddziaływania na środowisko naturalne, a także perspektywę całego cyklu życia. Na rysunku 1 przedstawiono elementy składowe ekoprojektowania łączące projektowanie z aspektami środowiskowymi.



Rysunek 1. Schemat wskazujący najważniejsze elementy ekoprojektowania  
Źródło: opracowanie własne na podstawie: Dostatni i Kowalewska 2016

Celem ekologicznego projektowania produktu jest wybranie najbardziej korzystnej możliwości pod względem wszystkich analizowanych aspektów. Projektant powinien podejmować decyzję polegającą na wybraniu opcji najbardziej ekologicznej pod warunkiem, że spełnia ona w zadowalającym stopniu wymagania techniczne i wytrzymałościowe (Lewandowska i Foltynowicz 2006). Podczas procesu projektowania oddziaływanie na środowisko można uznać za niewielkie, jednakże praca projektanta, a także zbiór działań, jakie towarzyszą w ekoprojektowaniu, mogą w szczególny sposób doprowadzić do minimalizowania kosztów środowiskowych. Analiza i redukcja oddziaływań na środowisko podczas projektowania w całym cyklu życia są podstawową zasadą projektowania dla środowiska (Zarębska i Joachimiak-Lechman 2016).

Ekoprojektowanie wykorzystuje wiele różnych metod i narzędzi, które nie są ujęte podczas tradycyjnego projektowania. Bardzo ważnym aspektem jest praktyczna wiedza projektanta dostosowana do określonego rynku i branży, dla której powstaje nowy produkt. Dodatkowo konkurencja pomiędzy producentami wyrobów wymusza stosowanie nowych metod i narzędzi, które pomagają spełniać zarówno wymagania użytkowników, jak i wymagania środowiskowe (Dostatni i Karwasz 2009).

### 3. Edukacja w zakresie ekoprojektowania w sektorze tworzyw sztucznych na przykładzie projektu PackAlliance

**N**a całym świecie uczelnie i instytucje szkolnictwa wyższego starają się podejmować działania służące edukacji ekologicznej i kształtowaniu prawidłowych postaw społecznych. Podczas Konferencji Rektorów Europejskich (ang. *European Rectors' Conference*) w 1993 roku uznano, że uniwersytety, ze względu na unikatowe połączenie nauczania, prowadzenia badań i służenia społeczeństwu, są szczególnie predysponowane do realizacji koncepcji zrównoważonego rozwoju. Zadania i zobowiązania uczelni wyższych do realizacji edukacji ekologicznej w myśl idei zrównoważonego rozwoju zostały zapisane w dokumencie Copernicus Charta, który podpisało 326 uniwersytetów zobowiązując się tym samym do wdrażania zasad zrównoważonego rozwoju. Temat wzrostu zaangażowania szkolnictwa wyższego w realizację wyzwań zrównoważonego rozwoju w zakresie edukacji ekologicznej jest elementem wielu dyskusji oraz podejmowany jest w wielu raportach i opracowaniach.

Potrzeby szkoleniowe należą do obszaru kompetencji pracowników, które powinno się rozwijać, aby umożliwić efektywne wykonywanie obowiązków. Identyfikacja potrzeb szkoleniowych jest najważniejszym elementem na drodze do utworzenia prawidłowego procesu szkolenia. Proces szkolenia to zespół czynności, w wyniku których ustalany jest charakter niezbędnych form szkolenia i wyboru pracowników w nim uczestniczących. Analiza potrzeb szkoleniowych polega na zidentyfikowaniu rozbieżności między tym, co dzieje się w firmie, a tym, co powinno się w niej dziać, aby usprawnić pewne procesy w organizacji (Serafin 2011). Rozbieżności te powinny zostać wyeliminowane właśnie przez szkolenie. Z drugiej strony, idealnym rozwiązaniem byłoby dopasowanie kompetencji pracowników do wymogów firm z danego sektora gospodarki. Taka forma dopasowania musiałaby odbywać się już na etapie kształcenia na odpowiednich kierunkach studiów. Według międzynarodowych badań studentów i absolwentów, bycie ekspertem w swojej dziedzinie to dla prawie 40% młodych osób biorących udział w badaniu główny cel kariery zawodowej (Deloitte 2013).

Na przeciw takiemu podejściu wychodzi projekt PackAlliance, który należy do europejskiego sojuszu na rzecz szkolenia w dziedzinie innowacji i współpracy w zakresie opakowań z tworzyw sztucznych. Projekt realizowany jest przez naukowców, pracowników Akademii Górniczo-Hutniczej w Krakowie w latach 2020–2022. Głównym celem projektu jest integracja uczelni, przedsiębiorstw oraz społeczeństwa na rzecz wspierania transformacji gospodarki z modelu linearnego do modelu obiegu zamkniętego, w łańcuchu dostaw opakowań z tworzyw sztucznych. Projekt ma za zadanie wypełnić luki między ofertą edukacyjną szkolnictwa wyższego a potrzebami wiedzy wykwalifikowanej kadry w przemyśle opakowań z tworzyw sztucznych, niezbędnej do wdrażania procesów z zakresu GOZ. Efektem wypracowanych rozwiązań w projekcie będzie m.in. opracowanie programu studiów podyplomowych, na podstawie rzeczywistych potrzeb przemysłu opakowań z tworzyw sztucznych. Ścisła współpraca pomiędzy krajami partnerskimi uczestniczącymi w projekcie pozwoli na utworzenie Europejskiej Sieci „PackAlliance Hubs” w każdym z krajów partnerskich projektu, tak aby promować innowacyjne rozwiązania łączące jednostki akademickie oraz przemysłowe, w celu podejmowania wspólnych działań takich jak szkolenia, warsztaty i współpraca w zakresie badań naukowych i innowacji. Wykorzystana w projekcie metodyka pozwoli na opracowanie wymaganych w branży opakowań kompetencji i dostosowanie ich do zakresu kształcenia na uczelniach.

Branża opakowań należy do dynamicznie rozwijających się w ostatnich latach sektorów. Dyrektywy unijne oraz wymogi środowiskowe stawiają przed tym sektorem bardzo wysokie wymagania; aby im sprostać, potrzebna jest szeroka wiedza zarówno technologiczna, ekonomiczna, jak i społeczna. Wyzwania stoją również przed systemem kształcenia – poprzez rozwijanie programów i mechanizmów sprzyjają lepszemu dostosowaniu szkolnictwa do potrzeb pracodawców i współczesnego rynku pracy.

#### 4. Metodyka badań

**A**by zidentyfikować i ocenić, jakie kompetencje i wiedzę powinni posiadać przyszli eksperci w zakresie ekoprojektowania i nowych technologii w sektorze tworzyw sztucznych, postanowiono przeprowadzić badanie identyfikujące najważniejsze umiejętności pracowników. 29 czerwca 2020 roku pracownicy i eksperci z Akademii Górniczo-Hutniczej, Instytutu Gospodarki Surowcami Mineralnymi i Energią PAN, Fundacji Innowo zorganizowali i przeprowadzili webinar dla przedstawicieli zarówno przedsiębiorstw z sektora tworzyw sztucznych, jak i naukowców i specjalistów w zakresie plastików i ekoprojektowania. W spotkaniu udział wzięło blisko 50 osób, byli to: polscy naukowcy, przedstawiciele przemysłu, przedsiębiorcy, młodzi pracownicy przedsiębiorstw produkcyjnych oraz studenci i przedstawiciele-

le m.in. Instytutu Gospodarki Surowcami Mineralnymi i Energią PAN Kraków, Akademii Górniczo-Hutniczej w Krakowie, Politechniki Łódzkiej, Grupy Azoty, Szkoły Głównej Gospodarstwa Wiejskiego, Tauronu, Rossmanna, Plastics Europe, Plastcard, DB Schenker, Eneris, Ikea, SR Consulting, Rekopolu Organizacji Odzysku Opakowań, Crido. Celem zorganizowanego webinarium było zbadanie potrzeb edukacyjnych, przegląd opinii, klasyfikacja i określenie barier i wątpliwości, promocja networkingu i współpracy nauki z przemysłem oraz kreowanie nowych pomysłów dotyczących współpracy nauki z biznesem. Wnioski z dyskusji posłużyły do przeprowadzenia analizy SWOT w obszarze ekoprojektowania i nowych technologii, której wyniki zaprezentowano w tabeli 1.

Tabela 1. Wyniki analizy SWOT dotyczące ekoprojektowania i nowych technologii

| MOCNE STRONY   | SŁABE STRONY  |
|--|---|
| <ul style="list-style-type: none"> <li>– Umiejętność identyfikowania aspektów środowiskowych związanych z produktem i włączenie ich do procesu projektowania</li> <li>– Znajomość procesu produkcji i cyklu życia produktu pozwalająca na obniżenie materiałochłonności i energochłonności produktów w całym łańcuchu wartości</li> <li>– Znajomość preferencji konsumenckich i rynku dostawców</li> <li>– Umiejętność wykorzystania nowych modeli biznesowych opartych na gospodarce o obiegu zamkniętym</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>– Brak świadomości co do możliwości wynikających z proekologicznych rozwiązań</li> <li>– Brak wiedzy na temat oddziaływania na środowisko poszczególnych etapów procesu produkcji, np. ilość zanieczyszczeń</li> <li>– Brak wiedzy na temat możliwości wykorzystania materiałów przyjaznych dla środowiska</li> <li>– Ograniczenia wynikające z dokonanych inwestycji w zakresie „niewłaściwego wyboru” z punktu widzenia środowiskowego</li> <li>– Ograniczenia związane z dostępem do środków finansowych na inwestycje i rozwój firmy</li> <li>– Brak wiedzy i umiejętności wykorzystania narzędzi do oceny środowiskowej, np. LCA</li> </ul> |
| SZANSE   | ZAGROŻENIA  |
| <ul style="list-style-type: none"> <li>– Wsparcie innowacji proekologicznych na poziomie UE i kraju poprzez regulacje prawne i zwiększenie świadomości społecznej</li> <li>– Większa dostępność do pozyskania preferencyjnego finansowania</li> <li>– Nowoczesne technologie umożliwiające wykorzystanie potencjału firmy i uzyskanie przewagi konkurencyjnej</li> <li>– Możliwości zdobywania wiedzy i podnoszenia kwalifikacji w zakresie kompetencji prośrodowiskowych (uczelnie, firmy szkoleniowe)</li> </ul>   | <ul style="list-style-type: none"> <li>– Rosnąca konkurencja na rynku produktów i technologii prośrodowiskowych</li> <li>– Zbyt szybki rozwój nowych technologii i ich koszty</li> <li>– Nowe strategie i wytyczne w zakresie postrzegania firm jako przyjaznych środowisku – coraz większe wymagania dotyczące aspektów środowiskowych, konieczność posiadania patentów i licencji dla zaistnienia w sektorze</li> <li>– Wzrost obciążeń finansowych, np. wprowadzenie nowych podatków</li> </ul>  |

Źródło: opracowanie na podstawie przeprowadzonego webinarium.

## 5. Wnioski z badań

**P**rzeprowadzona analiza pokazała, że pomimo coraz lepszej edukacji, a przede wszystkim coraz szerszej oferty edukacyjnej, wciąż występuje problem wykorzystania specjalistycznej wiedzy przy wykonywaniu pracy związanej z ekoprojektowaniem i nowymi technologiami. Wiedza i umiejętności absolwentów wyższych uczelni oraz pracowników wymagają uzupełnienia. Dotyczy to szczególnie tematyki związanej z: oceną cyklu życia (*Life Cycle Assessment – LCA*); zagospodarowaniem odpadów; projektowaniem; wytwarzaniem i analizą właściwości materiałów funkcjonalnych o znaczeniu biologicznym i medycznym, ich zastosowaniem oraz metodami utylizacji.

Zrównoważony rozwój społeczno-gospodarczy to troska o sprzyjający człowiekowi klimat i środowisko. Aby ocenić wpływ działalności człowieka na otaczający go świat, niezbędne są narzędzia i metody do kompleksowej analizy tego wpływu. Ocena cyklu życia to metoda, która pozwala na oszacowanie obciążenia środowiska powodowanego przez dany produkt, proces produkcyjny lub działalność, poprzez określenie zużycia energii i materiałów oraz zanieczyszczeń odprowadzonych do środowiska, ocenę skutków środowiskowych związanych ze zużyciem energii, materiałów i emisji zanieczyszczeń, a także ocenę możliwości poprawy oddziaływania na środowisko w całym cyklu życia (Bajdur i in. 2018).

Uczestnicy webinarium zwrócili uwagę, iż konieczna jest lepsza współpraca biznesu z sektorem naukowym, a nauka powinna być wsparciem dla biznesu w dwóch równoległych obszarach: poszukiwania nowych rozwiązań i dostarczania wiedzy na temat LCA i istniejących opakowań.

Dostępność analiz dotyczących materiałów pochodzenia biologicznego byłaby korzystna dla różnych podmiotów. Istotnym aspektem ekoprojektowania dla opakowań w GOZ jest tworzenie zintegrowanych łańcuchów wartości i dostaw (surowiec–produkt–surowiec). Zauważono również, że świadomość konsumentka w zakresie materiałów pochodzenia biologicznego jest niewystarczająca, a konsumenci nie mają dostatecznej wiedzy na temat prawidłowej segregacji odpadów. Poza tym, nie zawsze na produktach oraz opakowaniach znajduje się wystarczająca informacja, w jaki sposób należy z nimi postąpić po zużyciu. Problematyczna też okazała się kwestia segregacji odpadów resztkowych. Dużym problemem są zmieniające się przepisy prawne dotyczące odpadów plastikowych.

Z przeprowadzonej analizy wynika, że edukacja w zakresie tworzyw sztucznych jest coraz lepsza, a studenci kierunków związanych z sektorem plastików zdobywają specjalistyczną wiedzę, lecz trudno jest im ją wykorzystać, gdy stają się pracownikami. Odpowiednie kursy i szkolenia przygotowujące do pracy w określonym sektorze byłyby pomocne, a zdobyta podczas studiów wiedza byłaby rozwijana i uzupełniana.

## Podsumowanie

**D**ziałania podejmowane przez sektor szkolnictwa wyższego są szczególnie ważnym elementem edukacji w myśl zrównoważonego rozwoju. Uczelnie wyższe przygotowują i kształcą przyszłe pokolenia profesjonalistów, dzięki którym możliwa będzie zmiana i wprowadzanie zasad zrównoważonego rozwoju w różnych sferach życia społecznego (Adomssent 2016). Zarówno podejmowane ogólnoswiatowe działania, jak i te przedsięwzięte przez uczelnie świadczą o tym, że szkolnictwo wyższe coraz lepiej stosuje zalecenia i wytyczne zawarte w Strategii Edukacji dla Zrównoważonego Rozwoju. Uczelnie poprzez realizowane projekty o zasięgu międzynarodowym włączają się w realizację celów zrównoważonego rozwoju. Akademia Górniczo-Hutnicza, jak i wiele innych polskich uczelni, podejmuje działania mające kluczowe znaczenie dla realizacji edukacji w myśl idei zrównoważonego rozwoju, który jest uważany za priorytetowy kierunek rozwoju społeczno-gospodarczego. Na podstawie przeprowadzonej analizy potwierdzono jeden z ważnych celów Dekady edukacji dla zrównoważonego rozwoju: „konieczność ustawicznej edukacji nie tylko dzieci i młodzieży, ale także dorosłych (pracujących): kierownictwa i pracowników w handlu i przemyśle, aby umożliwić im przyjęcie praktyk i trybu pracy zgodnych z zasadami zrównoważonej produkcji i konsumpcji” (Kostecka 2009).

## Literatura

- ADOMSSSENT M. 2016. *Higher Education for Sustainability: Challenges and Obligations from a Global Perspective*. [W:] Adomssent M., Godemann M., Leicht A., Busch A. (red.): *Higher Education for Sustainability*. VAS, Frankfurt am Main 2006.
- BAJDUR W., KULCZYCKA J. i ODZIMEK T. 2018. *Zarządzanie i Finanse*. Journal of Management and Finance t. 16, nr 4, część 2, s. 23–35.
- COM(2014) 397 final, Directive of the European Parliament and of the Council, amending Directives 2008/98/EC on waste, 94/62/EC on packaging and packaging waste, 1999/31/EC on the landfill of waste, 2000/53/EC on end-of-life vehicles, 2006/66/EC on batteries and accumulators and waste batteries and accumulators, and 2012/19/EU on waste electrical and electronic equipment, European Commission, Brussels.
- COM(2014) 398 final, „Ku gospodarce o obiegu zamkniętym: program ‘zero odpadów’ dla Europy” Załącznik do Komunikatu Komisji do Parlamentu Europejskiego, Rady Europejskiego Komitetu Ekonomiczno-Społecznego i Komitetu Regionów, Bruksela.
- COPERNICUS Alliance; [Online] <http://www.copernicus-alliance.org> [Dostęp: 28.08.2020].
- Deloitte 2013. Pierwsze kroki na rynku pracy Międzynarodowe badanie studentów i absolwentów. [Online] [https://www2.deloitte.com/content/dam/Deloitte/pl/Documents/Reports/pl\\_Deloitte\\_PierwszeKrokiNaRynkuPracy\\_2013\\_1.pdf](https://www2.deloitte.com/content/dam/Deloitte/pl/Documents/Reports/pl_Deloitte_PierwszeKrokiNaRynkuPracy_2013_1.pdf) [Dostęp: 28.08.2020].
- DOSTATNI E. i KARWASZ A. 2009. *Systemy informatyczne wspomagające proekologiczne projektowanie*. Zarządzanie Przedsiębiorstwem Nr 2, Oficyna Wydawnicza Polskiego Towarzystwa Zarządzania Produkcją, Opole.



- DOSTATNI E. i KOWALEWSKA A. 2016. *Analiza prośrodowiskowa wyrobu i propozycja jego udoskonalenia z wykorzystaniem narzędzia informatycznego*. Innowacje w zarządzaniu i inżynierii produkcji T. 2, s. 701–712.
- DOSTATNI E., DIAKUN J., GRAJEWSKI D., KARWASZ A. i WICHNIAREK R. 2014. *Proekologiczne projektowanie wyrobów w środowisku CAD 3D z zastosowaniem technologii agentowej*. Wydawnictwo Politechniki Poznańskiej, Poznań.
- DOSTATNI E. 2004. *Zarządzanie procesem projektowania z wykorzystaniem metod rozproszonej sztucznej inteligencji*. Rozprawa doktorska, Wydział Budowy Maszyn i Zarządzania, Politechnika Poznańska.
- Europejska Komisja Gospodarcza ONZ. *Strategia Edukacji dla Zrównoważonego Rozwoju*. Ministerstwo Środowiska, Warszawa 2008.
- GEMBALSKA-KWIECIEŃ A. red. 2016. *Systemy Wspomagania w Inżynierii Produkcji*. No 4(16), s. 81–89.
- KALINOWSKA A. i BATORCZAK A. 2015. *Universities for sustainability – new challenges from the perspective of the University of Warsaw*. "Environ. Environmental and Socio-economic Studies" t. 3, z. 1, s. 26–34.
- KOSTECKA J. 2009. *Dekada edukacji dla zrównoważonego rozwoju – wizja, cel, strategia*. [W:] *Problemy Ekorozwoju/Problems of Sustainable Development* t. 4, z. 2, s. 101–106.
- KOZŁOWSKI S. 2007. *Przyszłość ekorozwoju*. Wydanie II. Wydawnictwo KUL, Lublin, ss. 622.
- Krajowy Plan Gospodarki Odpadami 2022 UCHWAŁA NR 88RADY MINISTRÓW z dnia 1 lipca 2016 w sprawie Krajowego planu gospodarki odpadami 2022, s. 11.
- KURCZEWSKI P. i LEWANDOWSKA A. red. 2008. *Zasady prośrodowiskowego projektowania obiektów technicznych dla potrzeb zarządzania ich cyklem*. Poznań.
- LEWANDOWSKA A. i FOLTYNOWICZ Z. 2006. *Prośrodowiskowe działania źródłem innowacji w przedsiębiorstwie*. [W:] *Materiały z konferencji Rozwój przedsiębiorstw w aspekcie pro jakościowego doskonalenia i innowacyjności* (red. Z. Kłos), 10–12 maja, Boszkowo, wyd. Politechniki Poznańskiej.
- Mapa drogowa transformacji w kierunku GOZ; [Online] <https://www.gov.pl/web/rozwoj/rada-ministrow-przyjela-projekt-mapy-drogowej-goz> [Dostęp: 28.08.2020].
- MICHALSKI K. i SITKO J. 2016. *Wybrane problemy minimalizacji wytwarzania odpadów*. *Systemy Wspomagania w Inżynierii Produkcji* z. 4(16), s. 80–89.
- PARKER C.C. i TURYLE R.V. 1986. *Information sources in science and technology: a practical guide to traditional and online use*. 2<sup>nd</sup> ed. Butterworths, London, s. 336.
- PKN-ISO/TR 14062:2004, Zarządzanie środowiskowe. Włączanie aspektów środowiskowych do projektowania i rozwoju wyrobu, PKN, Warszawa 2004.
- Przez edukację do zrównoważonego rozwoju, Narodowa strategia edukacji ekologicznej, Ministerstwo Środowiska, Warszawa 2001.
- Roadmap for Implementing the Global Action Programme on Education for Sustainable Development, the United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization, 2014; [Online] <http://unesdoc.unesco.org/images/0023/002305/230514e.pdf> [Dostęp: 28.08.2020].
- SERAFIN K. 2011. *Identyfikacja potrzeb szkoleniowych jako istotny obszar działań w zarządzaniu personelem*. *Problemy Zarządzania* t. 9, z. 4(34), s. 191–203, Wydział Zarządzania UW.
- Strategia Edukacji dla Zrównoważonego Rozwoju. Europejska Komisja Gospodarcza ONZ. Ministerstwo Środowiska, Warszawa 2008.
- University Educators for Sustainable Development – EU4SD; [Online] <http://www.ue4sd> [Dostęp: 28.08.2020]
- ZARĘBSKA J. i JOACHIMIĄK-LECHMAN K. 2016. *Circular economy – the role of the Environmental Life Cycle Assessment, opportunities, barriers and challenges*. *Logistyka Odzysku = Journal of Reverse Logistics* t 1, s. 5–9.



## **CZĘŚĆ 2.**

### **Energia ze źródeł pierwotnych i wtórnych**



Paweł BARAN<sup>1</sup>, Stanisław KOZIOL<sup>2</sup>, Adam SMOLIŃSKI<sup>3</sup>, Katarzyna ZARĘBSKA<sup>3</sup>

---

## Badanie i analiza rozszerzalności węgla kamiennego w atmosferze argonu, metanu i ditlenku węgla w kontekście geologicznej sekwestracji

**STRESZCZENIE:** Ditlenek węgla (CO<sub>2</sub>), pomimo iż występuje w niewielkiej ilości w atmosferze ziemskiej, ma istotny wpływ na efekt cieplarniany. Zwiększająca się liczba ludności na świecie oraz postępująca urbanizacja powodują wzrost zapotrzebowania na energię, co powiązane jest z emisją ditlenku węgla. W związku z tym prowadzone są działania mające na celu wychwycenie CO<sub>2</sub>, a następnie jego magazynowanie. Jedną z możliwości eliminacji CO<sub>2</sub> jest sekwestracja geologiczna w pokładach węgla. Jednym z problemów związanych z tą technologią jest pęcznienie węgla pod wpływem CO<sub>2</sub>, które obniża przepuszczalność skał w złożu, do którego wprowadzany jest magazynowany gaz. Celem badań był pomiar rozszerzalności węgla kamiennego w atmosferze argonu (Ar), metanu (CH<sub>4</sub>) a także CO<sub>2</sub>. Przeprowadzone eksperymenty wskazują, że wprowadzenie argonu wpływa korzystnie na zachowanie układu węgiel-gaz. Przeprowadzone badania wpisują się w 7., 9. i 13. cel zrównoważonego rozwoju.

**SŁOWA KLUCZOWE:** sekwestracja, rozszerzalność, węgiel kamienny, ditlenek węgla, metan

## Investigation and analysis of hard coal expansion in the atmosphere of argon, methane and carbon dioxide in the context of geological sequestration

**ABSTRACT:** Carbon dioxide (CO<sub>2</sub>), although present in a small amount in the Earth's atmosphere, has a significant impact on the greenhouse effect. The increasing world population and progressing urbanization cause an increase in energy demand, which is related to the emission of carbon dioxide. Therefore, activities are carried out to capture CO<sub>2</sub> and its subsequent storage. One of the possibilities of CO<sub>2</sub> elimination is geological sequestration in coal seams. One of the

---

<sup>1</sup> Dr hab. inż., AGH Akademia Górniczo-Hutnicza, Kraków, Polska.

<sup>2</sup> Mgr inż., AGH Akademia Górniczo-Hutnicza, Kraków, Polska.

<sup>3</sup> Prof. dr hab., Główny Instytut Górnictwa, Katowice, Polska.

<sup>4</sup> Dr hab., AGH Akademia Górniczo-Hutnicza, Kraków, Polska.

problems with this technology is the swelling of coal under the influence of CO<sub>2</sub>, which reduces the permeability of the rocks in the reservoir into which the stored gas is introduced. The conducted research is in line with the sustainable development plans prepared by the United Nations. Goal 13, included in the UN list, concerns taking urgent action to combat climate change and its consequences. The aim of the research was to measure the expansion of hard coal in the atmosphere of argon (Ar), methane (CH<sub>4</sub>) and CO<sub>2</sub>. The conducted experiments show that the introduction of argon has a positive effect on the behavior of the carbon-gas system.

**KEYWORDS:** sequestration, expansion, hard coal, carbon dioxide, methane

## 1. Wprowadzenie

Światowa energetyka bazuje w głównej mierze na spalaniu paliw kopalnych, przede wszystkim ropy naftowej oraz węgla (Busch i in. 2006) i emisji do atmosfery szkodliwych substancji takich jak ditlenek węgla, tlenki siarki, azotu oraz pyły. Rocznie emituje się około 36 153 mld Mg CO<sub>2</sub>, będącego jedną z przyczyn globalnego ocieplenia. Za największych emiterów uważa się Chiny (27% całkowitej emisji), USA (15%) oraz Indie (7%) (Le Quere i in. 2018). Polska znajduje się w tym zestawieniu na 21 miejscu, z udziałem na poziomie 0,9%. Rozwijająca się w szybkim tempie gospodarka krajów azjatyckich oraz zwiększenie w nich konsumpcji, pociąga za sobą wzrost zużycia węgla, ropy naftowej oraz gazu.

Aby zapobiec nadmiernej emisji ditlenku węgla, przeprowadza się jego separację, którą można realizować na trzy sposoby (Chmielniak i Wójcik 2010). Pierwszym jest wychwytywanie pierwotny (*pre-combustion*), polegający na przeprowadzeniu paliwa stałego w stan gazowy w procesie gazyfikacji. Otrzymany wówczas wodór oraz tlenek węgla może być dostarczony do dalszego wykorzystania (Gibbins i Chalmers 2008). Drugą z metod jest spalanie w czystym tlenie. Produktami tej reakcji są para wodna i czysty CO<sub>2</sub>. Trzecią i najszerzej stosowaną metodą jest wychwytywanie wtórne (*post-combustion*). Polega ona na wydzieleniu strumienia CO<sub>2</sub> zaraz za komorą spalania, bezpośrednio ze spalin. Ze względu na swoją praktyczność, metoda ta jest stosowana tam, gdzie występują duże przepływy spalin, czyli w elektrowniach oraz elektrociepłowniach. Ostatnim etapem sekwestracji jest transport czystego ditlenku węgla do docelowego miejsca składowania.

### 1.1. Koncepcja zrównoważonego rozwoju

Opisane w tym rozdziale badania wpisują się pośrednio w część celów zrównoważonego rozwoju, a szczególnie celu 13., dotyczącego działania na rzecz klimatu, opisując głównie skutki globalnego ocieplenia związanego z emisją gazów takich jak ditlenek węgla oraz sposoby na spowolnienie tego procesu. Badania dotyczące geolo-

gicznej sekwestracji CO<sub>2</sub> oraz ogólnej problematyki z tym związanej są bezpośrednią odpowiedzią na stawiane przez ONZ cele. Rozwój nowoczesnych, niskoemisyjnych technologii wpłynie wprost na zmniejszenie efektu cieplarnianego lub przynajmniej na zahamowanie jego postępowania. Kolejnym przykładem wpisywania się badań w koncepcję zrównoważonego rozwoju jest realizacja celu 7. oraz celu 9. Pierwszy z wymienionych dotyczy zapewnienia niedrogiej, niezawodnej, zrównoważonej i nowoczesnej energii. Obecnie światowa energetyka bazuje głównie na paliwach kopalnych, przez co otrzymana energia nie jest zeroemisyjna. Wprowadzenie do układów technologicznych sekwestracji pozwoli na minimalizację emisji CO<sub>2</sub>, a tym samym na uzyskanie zdecydowanie czystszej energii. Drugi z wymienionych celów dotyczy zrównoważonej industrializacji oraz wspierania innowacji. Cel ten powiązany jest z dwoma poprzednimi i sprowadza się do ograniczenia emisji ditlenku węgla. Postępująca urbanizacja na terenach mniej zamożnych wiąże się zazwyczaj z uzyskiwaniem energii z węgla i ropy naftowej. Rozwój technologii geologicznej sekwestracji pozwoliłby na minimalizację degradacji środowiska lokalnego i wykorzystanie wyeksploatowanych złóż węgla lub naturalnych pułapek, w których uwięziona była ropa naftowa na podziemne magazyny CO<sub>2</sub>.

## 2. Sekwestracja

**D**itlenek węgla, który został wydzielony w pierwszej fazie sekwestracji za pomocą procesów fizyko-chemicznych, powinien zostać zagospodarowany w taki sposób, aby zminimalizować jego wtórną emisję do atmosfery. Magazynowanie czystego CO<sub>2</sub> można przeprowadzić za pomocą biosekwestracji, sekwestracji fizycznej i chemicznej (Sedjo i Sohngen 2012). Pierwsza z nich zachodzi w sposób naturalny, np. na torfowiskach lub lasach. Gaz, będący donorem węgla, zostaje przekształcony w biomasę w procesie fotosyntezy. Aby metoda ta spełniała swoje zadanie, musi zachodzić równowaga pomiędzy wychwytywaniem ditlenku węgla z atmosfery a spalaniem biomasy. Biosekwestrację można intensyfikować poprzez budowę zbiorników wodnych i bioreaktorów oraz użycie specjalnie wyselekcjonowanych odmian sinic i glonów. Niektóre spośród nich są w stanie podwoić swoją masę w ciągu 3 godzin. Tak związany ditlenek węgla może zostać następnie przetworzony w biopaliwa oraz paszę dla zwierząt hodowlanych.

Sekwestracja chemiczna polega na uwięzieniu CO<sub>2</sub> w postaci węglanów. W reakcji z tlenkami zasadowymi, takimi jak CaO oraz MgO, uzyskuje się trwałe węglany wapnia oraz magnezu (Zarębska i in. 2018). Główną zaletą tej metody jest jej samorzutny przebieg oraz to, iż są egzotermiczne, co przekłada się na zmniejszenie wydatków na cały proces. Jedną z metod chemicznej sekwestracji CO<sub>2</sub> jest przeprowadzenie go do kwasu szczawiowego. Na obecną chwilę, na terenie Holandii prowadzone są instalacje

cje pilotażowe, mające na celu próby uprzemysłowienia całego procesu (Bouwman i in. 2010).

Sekwestracja fizyczna opiera się na składowaniu ditlenku węgla w podziemnych formacjach geologicznych oraz oceanach. Morza i oceany są potencjalnie bardzo dobrym miejscem do zatłaczania CO<sub>2</sub>. Przemawiają za tym bardzo niskie koszty przygotowania obszaru oraz instalacji. Głównym zagrożeniem związanym z tą metodą jest postępujące globalne ocieplenie. Jak wiadomo, gazy najlepiej rozpuszczają się w cieczach w niskich temperaturach, a podniesienie temperatury może spowodować niekontrolowaną desorpcję i uwolnienie ogromnych ilości gazów do atmosfery na zasadzie efektu śnieżnej kuli (Benson i Surles 2006). Dodatkowym zagrożeniem jest zachwianie naturalnej równowagi w zbiornikach, co może doprowadzić do zmian w faunie i florze na danym obszarze.

### 3. Geologiczna sekwestracja ditlenku węgla

**P**odziemne magazynowanie CO<sub>2</sub> polega na zatłaczaniu czystego gazu do naturalnych kolektorów. Mogą nimi być nienadające się do dalszej eksploatacji złoża gazowe, nieużytkowane pola naftowe oraz pokłady węgla, które ze względów ekonomicznych nie są dalej eksploatowane (Smit i in. 2014). Podobnie jak w przypadku metody składowania w morzach i oceanach, główną zaletą podziemnego składowania jest niska cena przygotowania terenu pod instalację – powstaje on samoczynnie w procesach naturalnych, a głównym nakładem finansowym jest konieczność uszczelnienia otworu doprowadzającego. Dodatkowo, na korzyść tej metody przemawia stosowanie jej podczas eksploatacji złóż ropy naftowej, zmniejszając tym samym cenę jej wydobycia oraz podnosząc efektywność całego procesu. Do głównych zagrożeń należy ewentualna niestabilność geologiczna terenu. Wszelkie ruchy skorupy ziemskiej mogą prowadzić do rozszczenia zbiornika, a tym samym wydostania się ditlenku węgla na powierzchnię. Ze względu na swą gęstość, większą niż powietrza, unosi się on bezpośrednio nad gruntem, wypierając tlen. Niekorzystnym zjawiskiem, które towarzyszy metodzie składowania CO<sub>2</sub> w pokładach węgla, jest proces jego pęcznienia (Milewska-Duda 1989; Ceglarska-Stefańska 1990). Sorbowane w matrycy węglowej, głównie w strukturze mikroporów, cząsteczki par i gazów powodują jej rozszerzanie. Może to powodować powstawanie pęknięć, które mogą doprowadzić do rozszczenia podziemnego magazynu. W pracy przedstawiono wyniki eksperymentalne wpływu dodatku innych gazów na rozszerzalność matrycy węglowej. Aby zminimalizować to zjawisko, można zastosować dodatki innych gazów, podawane razem ze strumieniem CO<sub>2</sub>.

#### 4. Materiały do badań

Przedmiotem badań była próbka węgla kamiennego, pochodząca z jednej z polskich kopalń z terenu Górnośląskiego Zagłębia Węglowego. Z macierzystej skały wycięto próbkę węgla w kształcie prostopadłościanu. Użycie litej skały podczas badań daje możliwość obiektywnej oceny otrzymanych wyników, gdyż jedynie w tym wypadku próbka zachowuje swoją naturalną porowatość. Masa próbki wynosiła 14,9 g. Analizę petrograficzną węgla przeprowadzono za pomocą mikroskopu polaryzacyjnego Olympus i Polmi. W tabelach 1 i 2 przedstawiono wyniki analizy petrograficznej oraz elementarnej i technologicznej.

Tabela 1. Skład petrograficzny badanej próbki węgla

| Węgiel | Witrynit [%] | Liptynit [%] | Inertynit [%] | Współczynnik odbicia światła |
|--------|--------------|--------------|---------------|------------------------------|
| Coal A | 53           | 8            | 39            | 0,92                         |

Źródło: opracowanie własne

Tabela 2. Charakterystyka próbki węgla

| Węgiel | C <sup>daf</sup> [%] | S <sup>daf</sup> [%] | H <sup>daf</sup> [%] | N <sup>daf</sup> [%] | O <sup>daf</sup> [%] | W <sup>a</sup> [%] | A <sup>a</sup> [%] | V <sup>daf</sup> [%] |
|--------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|--------------------|--------------------|----------------------|
| Coal A | 84,96                | 0,58                 | 4,6                  | 1,7                  | 3,76                 | 0,68               | 3,78               | 25,50                |

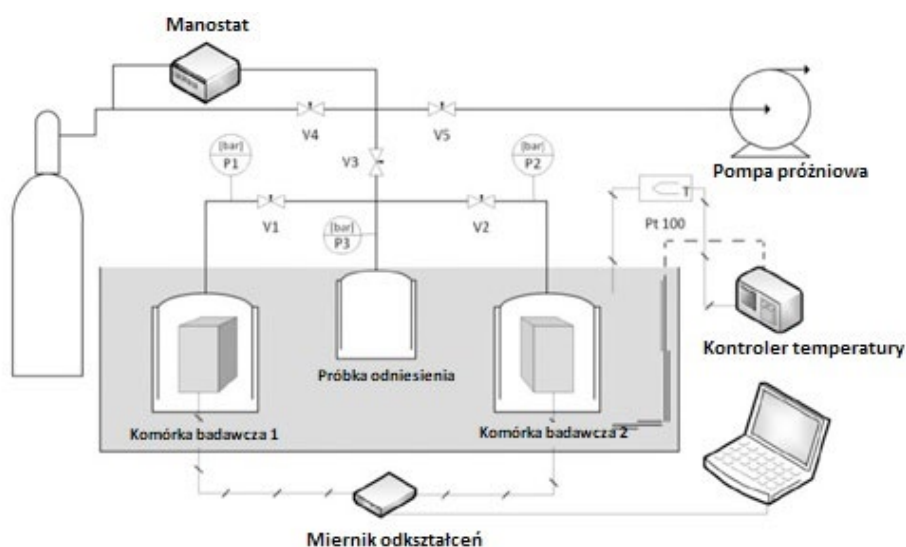
Objaśnienia: Zawartość wilgoci została określona zgodnie z procedurą w normie PN-80/ G-04511, zawartość popiołu ustalono zgodnie z PN-80/G-04512, a zawartość tlenu obliczono jako pozostałość w 100%, biorąc pod uwagę zawartość wilgoci i popiołu.

Źródło: opracowanie własne.

#### 5. Aparatura i metodyka badań

Pomiary przeprowadzono wykorzystując oryginalną aparaturę, zbudowaną na Wydziale Energetyki i Paliw AGH, w Katedrze Chemii Węgla i Nauk o Środowisku. Umożliwia ona rejestrowanie zmian dylatometrycznych na prostopadłościennych kostkach materiału badawczego. W celu utrzymania warunków izotermicznych ampułka pomiarowa została umieszczona w termostacie wodnym. Temperatura pomiaru była kontrolowana przez termoparę TC Pt 100, o dokładności 0,1 K. Ciśnienie w dozowniku mierzone było przetwornikiem ciśnienia S-10 firmy WIKA, którego zakres pomiarowy mieści się w granicach 0–100 bar (klasa dokładności 0.25% BSFL (Best Fit Straight Line)). Ciśnienie panujące wewnątrz ampułki

mierzono przetwornikiem ciśnienia UT-10 firmy WIKA. Zakres pomiarowy wynosił 0–100 bar, a dokładność 0,1%. Aby utrzymać stałe ciśnienie w układzie, wykorzystano manostat ciśnienia absolutnego, skonstruowany w Instytucie Mechaniki Górotworu PAN w Krakowie (Kudasik i in. 2010). Tensometryczny miernik odkształceń wykorzystywany do pomiarów wielkości dylatometrycznych, został również zbudowany w Instytucie Mechaniki Górotworu PAN w Krakowie. Zmiana wymiarów liniowych próbki węgla mierzona była przez tensometry i przetworniki rezystancyjne działające na zasadzie mostka Wheatstona. Zostały one umieszczone zarówno na badanej próbce, jak też na próbce kontrolnej. Wyniki pomiarów zapisywane były w pamięci wewnętrznej urządzenia. Tensometry oporowe zostały umieszczone na przeciwległych ścianach próbki w sposób równoległy i prostopadły do warstwowania badanej próbki węgla kamiennego (rys. 1).



Rysunek 1. Schemat aparatu do pomiaru właściwości dylatometrycznych węgla kamiennego  
Źródło: Baran i in. 2018

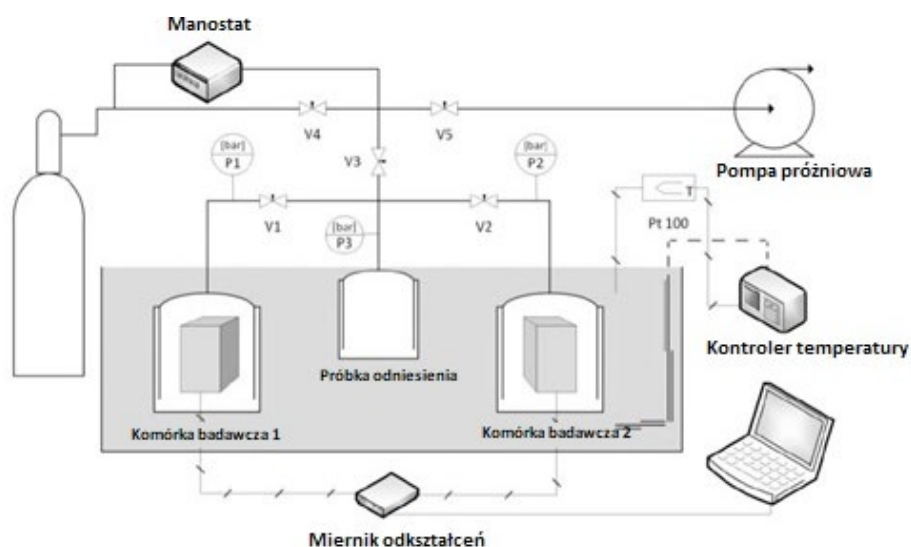
Pomiar zmian dylatometrycznych wymaga początkowo odgazowania całego układu za pomocą turbomolekularnej pompy próżniowej. Odgazowanie jest niezbędne, aby usunąć z powierzchni porowatej struktury próbki zasorbowanych gazów i par. Pomiar kinetyki prowadzone były w dwóch etapach badawczych: w pierwszym zmierzono kinetyki dylatometryczne względem wybranych sorbatów w temperaturze 323 K, poprzez nasycenie ich sorbatem pod stałym ciśnieniem równym 0,5 MPa. Po zakończeniu tego etapu obniżano temperaturę układu, utrzymując wciąż stałe



ciśnienie gazu w układzie. Po uzyskaniu temperatury 298K kontynuowano pomiar rejestrując zmiany wymiarów liniowych próbki.

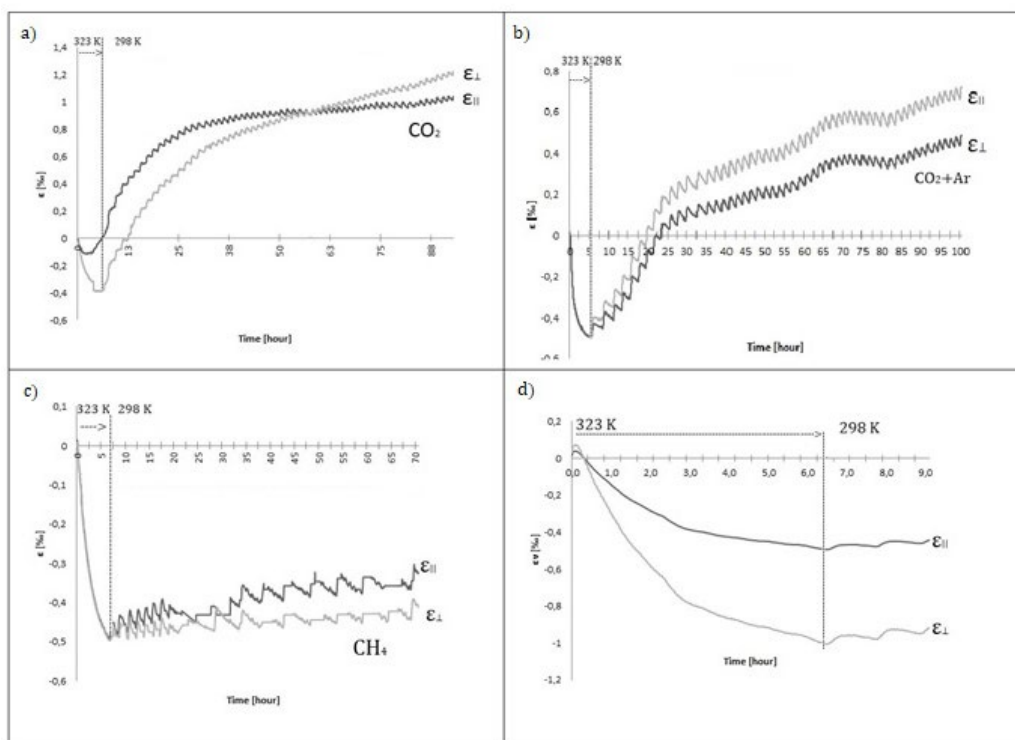
## 6. Wyniki i dyskusja

**W**yniki pomiarów przedstawione zostały w formie kinetyk dylatometrycznych. Na rysunku 2 zestawiono wyniki eksperymentu, przeprowadzone w pierwszym etapie badawczym. W wyniku nasycania odgazowanej próbki sorbatem, następuje jej pęcznienie. Anizotropowa budowa węgla powoduje, że obserwuje się większe zmiany wymiarów liniowych próbki w kierunku prostopadłym do warstw węgla. Największe zmiany wymiarów liniowych obserwuje się dla próbki nasycanej ditlenkiem węgla. Związane jest to z jego najwyższą chłonnością sorpcyjną względem tego sorbatu. Podobne wyniki dla  $\text{CO}_2$  i  $\text{CH}_4$  uzyskano w innych pracach (Ceglarska-Stefańska 1990; Baran i in. 2015; Zarębska i in. 2018). Interesujące wyniki zaobserwowano dla argonu. Kinetyka względem tego sorbatu wskazuje początkowe pęcznienie, natomiast później obserwuje się kontrakcję układu. Dotychczas przeprowadzone badania nie dają możliwości wytłumaczenia tego zjawiska. Wyniki uzyskane dla mieszaniny  $\text{CO}_2$  i Ar (30% Ar i 70%  $\text{CO}_2$ ) wskazują, że przy tym samym ciśnieniu całkowitym mieszaniny pęcznienie węgla było istotnie niższe: 1,2‰ dla czystego ditlenku węgla do 0,6‰ dla mieszaniny tych gazów.



Rysunek 2. Wyniki rozszerzalności węgla kamiennego w atmosferze wybranych gazów  
 a – ditlenek węgla, b – ditlenek węgla i argon, c – metan, d – zestawienie sorbatów; w etapie izotermicznym  
 Źródło: opracowanie własne

Rysunek 3 przedstawia wyniki drugiego etapu badawczego. Dla każdego z pomiarów po pierwszym etapie nasycenia próbki sorbatem w stałej temperaturze i pod stałym ciśnieniem, rozpoczęto rejestrację zmian wymiarów liniowych próbki wywołanych obniżaniem temperatury z 323 do 298 K. We wszystkich przypadkach obserwuje się kontrakcję. Największą kontrakcję uzyskano dla układu węgiel-argon. Dla pozostałych układów poziom kontrakcji jest podobny i następuje wyłącznie w momencie obniżania temperatury. Efekt ten należy wiązać z właściwościami fizycznymi materiału (rozszerzalność temperaturowa). Podobne efekty obserwowano już w innych badaniach (Baran i in. 2018). Po ustaleniu się temperatury zachowanie układów wskazuje już pewne zróżnicowanie. W przypadku  $\text{CO}_2$  i mieszaniny  $\text{CO}_2$  i Ar obserwuje się ponowne pęcznienie materiału. Związane jest to z postępującą sorpcją ditlenku węgla w strukturze węgla. Należy jednak podkreślić, że podobnie jak w temperaturze 323 K mieszanina ditlenku węgla i argonu powoduje znacznie mniejsze pęcznienie próbki. W przypadku czystego Ar kinetyka pokazuje, że po osiągnięciu



Rysunek 3. Wyniki rozszerzalności węgla kamiennego w atmosferze wybranych gazów  
 a – ditlenek węgla, b – ditlenek węgla i argon, c – metan, d – argon; w etapie nieizotermicznym  
 Źródło: opracowanie własne

temperatury 298 K próbka nie zmienia swoich wymiarów. Adsorpcja argonu w badanych temperaturach jest minimalna, można więc wnioskować, że zmniejszenie wymiarów próbki w obecności argonu pod wpływem obniżania temperatury jest tylko efektem właściwości fizycznych materiału. Mniejsza kontrakcja dla pozostałych układów w obszarze kinetycznym od 298 do 323 K jest kompensowana sorpcją metanu lub ditlenku węgla. Porównując otrzymane kinetyki dylatometryczne dla argonu z danymi literaturowymi (Baran i in. 2018) dotyczącymi termicznej ekspansji węgla kamiennego w atmosferze helu, oraz pod działaniem próżni, obserwuje się kurczenie próbki o podobną wartość, wynoszącą około 0,8%. Świadczy to o praktycznym braku sorpcji argonu w tej temperaturze, przez co otrzymany wynik odpowiada jedynie zmianom liniowym wynikającym z rozszerzalności temperaturowej. Dodatek argonu zmienia ciśnienie parcjale  $\text{CO}_2$  w mieszaninie, co przekłada się na zmniejszone pęcznienie układu. Wprowadzanie więc domieszek ditlenku węgla do złoża wydaje się być korzystnym rozwiązaniem z uwagi na bezpieczeństwo jego magazynowania.

## 7. Podsumowanie

**W**ęgiel kamienny, ze względu na swoją mikroporowatą strukturę, jest skałą o potencjalnym zastosowaniu jako magazynu podziemnego gazów. Przeprowadzone badania wskazują zachowanie się układu węgiel-gaz dla różnych sorbatów. Część wyników potwierdza te doniesienia, wskazując różnice w układzie zawierającym domieszki oraz ich brak. Uzyskane wyniki przeprowadzone z użyciem argonu dają nowe możliwości geologicznej sekwestracji ditlenku węgla. Zmniejszenie pęcznienia węgla podczas podziemnego magazynowania  $\text{CO}_2$  w nieeksploatowanych pokładach węgla kamiennego jest zjawiskiem pożądanym, gdyż przekłada się bezpośrednio na możliwości przeprowadzenia takiej koncepcji oraz bezpieczeństwo całej instalacji. Zatlaczanie mieszaniny  $\text{CO}_2$  i argonu może przynieść również pozytywny efekt w procesach intensyfikacji wydobycia metanu (ECBM – Enhanced coal bed methane recovery). Wpływ argonu zahamuje proces pęcznienia wywołany sorpcją ditlenku węgla, przez co nie zostaną zablokowane pory transportowe. Tym samym większa ilość metanu może zostać zdesorbowana i odzyskana. Ze względu na dużą heterogeniczność węgla kamiennego mechanizm sorpcji par i gazów musi być rozpatrywany indywidualnie jako złożony układ i łańcuch zachodzących zjawisk. Uzyskana dzięki przeprowadzonym badaniom wiedza pozwoli poszerzyć dotychczas dostępne dane literaturowe dotyczące tego zagadnienia.

## Literatura

- BARAN P., ZARĘBSKA K. i BUKOWSKA M. 2015. *Expansion of Hard Coal Accompanying the Sorption of Methane and Carbon Dioxide in Isothermal and Non-Isothermal Processes*. Energy and Fuels nr 29, t. 3, s. 1899–1904.
- BARAN P., CZERW K., ZARĘBSKA K., SAMOJEDEN B. i CZUMA N. 2018. *The Influence of Temperature on the Expansion of a Hard Coal-Gas System*. Energies nr 11, t. 10, s. 1–10.
- BENSON S. i SURLLES T. 2006. *Carbon Dioxide Capture and Storage: An Overview With Emphasis on Capture and Storage in Deep Geological Formations*. Proceedings of the IEEE, nr 94, t. 10, s. 1795–1805.
- BOUWMAN E., ANGAMUTHU R., BYERS P., LUTZ M. i SPEK A. 2010. *Electrocatalytic CO<sub>2</sub> Conversion to Oxalate by a Copper Complex*. Science nr 327, s. 313–315.
- BUSCH A., GENSTERBLUM Y., KROOSS B. i LITTKER R. 2004. *Methane and Carbon Dioxide Adsorption & Diffusion Experiments on Coal: Upscaling and Modeling*. International Journal of Coal Geology nr 60, t. 2–4, s. 151–168.
- BUSCH A., GENSTERBLUM Y., KROOSS B. i SIEMONS N. 2006. *Investigation of High-Pressure Selective Adsorption/Desorption Behaviour of CO<sub>2</sub> and CH<sub>4</sub> on Coals: An Experimental Study*. International Journal of Coal Geology nr 66, t. 1–2, s. 53–68.
- CEGLARSKA-STEFAŃSKA G. 1990. *Współzależność procesów sorpcyjnych i dylatometrycznych w układach: węgle kamiennie-para wodna, dwutlenek węgla, metan*. Zeszyty Naukowe AGH, Kraków.
- CHMIELNIAK T. i WÓJCIK K. 2010. *Wychwyt i transport CO<sub>2</sub> ze spalin – efekty energetyczne i analiza ekonomiczna*. Centrum Informacji o Rynku Energii, Kraków.
- CZAPLIŃSKI A. 1994. *Węgiel kamienny*. Wydawnictwa AGH, Kraków.
- FENGHUA A., YU Y., XIANGJUN CH., ZHIQIANG L. i LIYANG L. 2019. *Expansion energy of coal gas for the initiation of coal and gas outbursts*. Fuel nr 235, s. 551–557.
- GIBBINS J. i CHALMERS H. 2008. *Carbon capture and storage*. Energy Policy nr 36, t. 12, s. 4317–4322.
- HERZOG H. 2002. *Carbon Sequestration via Mineral Carbonation: Overview and Assessment*. Massachusetts Institute of Technology, Massachusetts.
- KUDASIK M., SKOCZYLAŚ N., SOBCZYK J. i TOPOLNICKI J. 2010. *Manostat-an accurate gas pressure regulator*. Measurement Science & Technology Vol. 21, No. 8.
- Le QUERE C. 2018. *Global Carbon Budget 2018*. Global Carbon Projects.
- MILEWSKA-DUDA J. 1989. *Węgiel kamienny jako heterogeniczny kopolimer w procesie sorpcji*. Zeszyty Naukowe AGH, Kraków.
- SAMPATHA K., PERERAA M., MATTHAIA S., RANJITH P. i LiDONG Y. 2020. *Modelling of fully-coupled CO<sub>2</sub> diffusion and adsorption-induced coal matrix swelling*. Fuel nr 262.
- SEDJO R. i SOHNGEN B. 2012. *Carbon Sequestration in Forests and Soils*. Annual Review of Resource Economics nr 4, s. 127–144.
- SMIT B., REIMER J., OLDENBURG C. i BOURG I. 2014. *Introduction to Carbon Capture and Sequestration*. Imperial College Press nr 1.
- ZARĘBSKA K., ĆWIK A., CASANOVA I., RAUSIS K. i KOUKOUZAS N. 2018. *Carbonation of high-calcium fly ashes and its potential for carbon dioxide removal in coal fired power plants*. Journal of Cleaner Production nr 202, s. 1026–1034.

Katarzyna CZERW<sup>1</sup>, Magdalena HODOWANY<sup>2</sup>, Jakub SZCZUROWSKI<sup>3</sup>,  
Stanisław KOZIÓŁ<sup>3</sup>

---

## Zastosowanie spektroskopii FTIR do badania efektów chemicznego utleniania węgla

**STRESZCZENIE:** Celem niniejszej pracy jest porównanie dwóch litotypów węgla kamiennego, durynu i wityrnu, pod kątem ich budowy i reaktywności. Sprawdzone ich skłonność do utleniania i oceniono różnice w otrzymanych produktach. Do analizy próbek bazowych oraz utlenionych wykorzystano spektroskopię w podczerwieni (FTIR). Posłużyła ona do zidentyfikowania grup funkcyjnych obecnych w badanym materiale bazowym i wykazania różnic jakościowych ich utlenionej struktury. Tematyka pracy wpisuje się w 13. cel zrównoważonego rozwoju, dotyczy bowiem zrównoważonego zarządzania surowcami naturalnymi i podejmowania działań przeciwdziałających zmianom klimatycznym.

**SŁOWA KLUCZOWE:** węgiel, litotypy, utlenianie, spektroskopia w podczerwieni

## Application of FTIR spectroscopy to examine the effects of chemical oxidation of coal

**ABSTRACT:** The aim of this work is to compare two concentrates of hard coal lithotypes, durain and vitraïne, in terms of their structure and reactivity. Their oxidation properties were investigated and differences in the obtained products were evaluated. Infrared spectroscopy (FTIR) was used to analyze base and oxidized samples. The method was used to identify functional groups present in the studied base materials and to show qualitative differences in their oxidized structure.

**KEYWORDS:** coal, lithotypes, oxidation, infrared spectroscopy

---

<sup>1</sup> Dr inż., AGH Akademia Górniczo-Hutnicza, Wydział Energetyki i Paliw, Katedra Chemii Węgla i Nauk o Środowisku, Kraków, Polska.

<sup>2</sup> Inż., AGH Akademia Górniczo-Hutnicza, Wydział Energetyki i Paliw, Katedra Chemii Węgla i Nauk o Środowisku, Kraków, Polska.

<sup>3</sup> Mgr inż., AGH Akademia Górniczo-Hutnicza, Wydział Energetyki i Paliw, Katedra Chemii Węgla i Nauk o Środowisku, Kraków, Polska.

## 1. Wprowadzenie

**W**ęgiel kamienny zaliczany jest do biolitów – skał osadowych pochodzenia organicznego. Powstawał przez miliony lat na drodze złożonych procesów biologicznych i chemicznych. Różnorodny wkład organiczny mieszał się z minerałami i osadzał w zmieniających się cyklicznie warunkach. Procesy te, wraz z późniejszą diagenезą (konsolidacja osadu), przyczyniły się do heterogenicznej, pasmowej struktury węgla. Na poziomie makroskopowym wyróżnia się cztery podstawowe wydzielenia litograficzne, tak zwane litotypy. W węglach wyżej uwęglonych dzieli się je przez wzgląd na stosunek pasm błyszczących do matowych, teksturę, połysk i zawartość substancji mineralnej. Minimalna grubość, dla której wyróżnia się dany litotyp, musi wynosić co najmniej 3–5 mm (Teng i in. 2017). Makroskopowe składniki zbudowane są z mniejszych, rozróżnianych na poziomie mikroskopowym. Macerały, bo o nich mowa, są podstawowym budulcem węgla kamiennych. Wydzielenie poszczególnych macerałów odbywa się pod mikroskopem na podstawie zdolności refleksyjnej  $R_m^0$  (odbijania światła od powierzchni), barwy i mikroreliefu. Dla węgla kamiennych wyróżniono 3 grupy macerałów: wityrynit, liptynit i inertynit, które dzieli się na kolejne macerały, submacerały i odmiany macerałów (Czapliński 1994).

Litotypy węgla kamiennych to:

- Wityryn (węgiel błyszczący) – jest czarny, błyszczący, często spiekający, kruchy, co wynika z prostopadłego ułożenia szczelin względem uwarstwienia pokładu. Składa się z homogenicznych pasm bogatych w wityrynit (Teng i in. 2017).
- Klaryn (węgiel półbłyszczący) – jest to najbardziej rozpowszechniony litotyp, tworzący najgrubsze warstwy w pokładach. Ma niejednorodną budowę: ułożone naprzemianległe pasemka węgla matowego i błyszczącego, czasem soczewki węgla włóknistego. Szczeliny klarynu wypełnione są kalcytem (węglanem wapnia) (Czapliński 1994).
- Duryn (węgiel matowy) – jest charakterystyczny dla niektórych węgla nisko-uwęglonych. Jest szaro- lub brunatno-czarny, twardy, nie występują w nim spękania poprzeczne. Grubość pasemek w pokładach waha się od kilku milimetrów do kilku decymetrów (Czapliński 1994). Tworzą go głównie macerały grupy inertynit i liptynit.
- Fuzyn (węgiel włóknisty) – na ogół tworzy bardzo cienkie warstwy pomiędzy innymi litotypami (Teng i in. 2017). Cechuje się strukturą włóknistą, przypominającą węgiel drzewny. Jest czarny lub szaroczarny o jedwabistym połysku, miękki, bardzo kruchy i ścieralny (Czapliński 1994).

Litotypy różnią się między sobą właściwościami chemicznymi i fizycznymi. Fuzyn jest bardziej aromatyczny niż pozostałe litotypy. Natomiast właściwości chemiczne

witrynu, klarynu i durynu mogą zmieniać się zależnie od udziału liptynit, witrynit i inerty nitu (Teng i in. 2017).

### 1.1. Chemiczna budowa węgla

Substancję organiczną węgla kopalnego budują pierwiastki o fitogenetycznym pochodzeniu: węgiel (C), wodór (H), tlen (O), azot (N), siarka (S) i fosfor (P). Jeżeli chodzi o budowę strukturalną węgla, to jego podstawą jest szkielet węglowy. Wyznacza on przestrzeń, w której znajdują się inne atomy i grupy atomów, tworzące mostki i rozgałęzienia. Pierwiastek C jest najściślej związany z wodorem. Budowa całego szkieletu oraz powiązanych z nim grup funkcyjnych, zwłaszcza ich uporządkowanie, koreluje ze stopniem uwęglenia paliwa. Zawartość pierwiastka C w węglu wzrasta wraz ze stopniem metamorfizmu od 59% wag. w torfach do 92% wag. w antracycie. Udział wodoru natomiast maleje od około 5% wag. dla torfów do około 3% wag. dla antracytów. Jednak udział atomowy świadczy o dużym udziale tego pierwiastka w budowie substancji organicznej (od ok. 43% do ok. 29%). Zawartość tlenu także maleje wraz ze stopniem metamorfizmu od wartości około 33% wag. do około 2% wag. Azot występuje w węglach w ilościach malejących od około 3% do 1,5% wag. Natomiast zawartość siarki jest różna i zależna od złoża (około 0,3–1,3% wag.), dlatego dla udziału atomowego przyjmuje się ogólną wartość równą 0,16 % atom. (Jasieńko 1995).

### 1.2. Ugrupowania węgla i wodoru

Pierwiastek C występuje w węglu w następujących układach (Teng i in. 2017):

- wysoko skondensowane układy węglowodorowe,
- skondensowane układy heterocykliczne (obecne tlen, azot, siarka),
- nisko skondensowane węglowodory,
- układy alifatyczne.

Stąd wyróżnić można trzy rodzaje ugrupowań węgla i wodoru: ugrupowania alifatyczne  $\text{CH}_{\text{alif}}$  obejmujące grupy  $\text{CH}_2$  i  $\text{CH}$ , również z przyłączonymi grupami hydroksylowymi, ugrupowania aromatyczne  $\text{CH}_a$  i skondensowane aromaty  $\text{C}_a$ . Zmiany udziału  $\text{C}_a$  zachodzą w sposób ciągły w skali postępującego uwęglania. Rosnąca kondensacja aromatów zachodzi kosztem grup  $\text{CH}$ . Następuje spadek udziału części niearomatycznej: mostków alifatycznych, alicyklicznych, tlenowych i wodorowych. Węgle zawierające około 94% pierwiastka C są niemal wyłącznie aromatyczne. Stąd przy opisie stopnia uwęglania istotny jest stosunek węgla do wodoru C/H i stosunek wodoru obecnego w pierścieniach do wodoru całkowitego  $H_{\text{ar}}/H_{\text{całk}}$ , który rośnie

wraz ze stopniem metamorfizmu. Ze względu na wysoką heterogeniczność węgla nie precyzuje się liczby pierścieni aromatycznych tworzących cząsteczkę węgla. Przyjmuje się, że związki aromatyczne mają postać od aliklobenzenów do układów sześciopierścieniowych. Natomiast udział struktur alicyklicznych szacuje się na poziomie 10–25%. Dla węgla niskouwęglonych głównymi strukturami alifatycznymi są grupy metylenowe ( $\text{CH}_2$ ) oraz metylowe ( $\text{CH}_3$ ). Liczba tych grup maleje wraz ze stopniem uwęglania. Najwięcej pierwiastka C zawiera fuzynit, natomiast najmniej jest go w wityrnicie. Zmiany zawartości wodoru zachodzą w kierunku liptynit, wityrnic, inertynit, zgodnie ze wzrostem stosunku wodoru aromatycznego do wodoru alifatycznego ( $\text{H}_{\text{ar}}/\text{H}_{\text{alif}}$ ). Zawartość pierwiastka O jest najwyższa w wityrnicie (Jasieńko 1995).

### 1.3. Ugrupowania tlenu

Tlen w węglu tworzy struktury reaktywne i niereaktywne w postaci grup funkcyjnych, lub jest wbudowany w struktury pierścieniowe. Ugrupowania reaktywne obecne są głównie w węglach niskouwęglonych i zawierają ponad 2/3 tlenu całkowitego. Obejmują one:

- Grupy metoksyłowe ( $\text{OCH}_3$ ) – charakterystyczne dla ligniny; występują w torfach (0,4–2,2%) i węglach brunatnych (0,5–1,1%), zanikają powyżej 81,5% pierwiastka C.
- Grupy karboksylowe ( $\text{COOH}$ ) – występują w węglach brunatnych (do 9%) i niskouwęglonych węglach kamiennych (do 1,5%), zanikają powyżej 83% pierwiastka C; tworzą bezpośrednie połączenia z rdzeniem aromatycznym.
- Grupy hydroksylowe ( $\text{OH}$ ) – są najbardziej charakterystyczne dla węgla kamiennych, zanikają w węglach wysoko uwęglonych; występują głównie w postaci grup fenolowych o charakterze kwasowym i grup znajdujących się na poza płaszczyzną lamel o charakterze zasadowym; w skali uwęglania, stosunek ilości tlenu hydroksylowego do tlenu całkowitego najpierw maleje stopniowo, a później spada gwałtownie, kiedy zaczyna się kondensacja aromatów.
- Grupy karbonyłowe ( $\text{C=O}$ ) – występują w niewielkich ilościach w węglach kamiennych, przede wszystkim niskouwęglonych, a w średnio uwęglonych do 1%, głównie w postaci ugrupowań chinonowych.

Ugrupowania niereaktywne występują we wszystkich typach węgla. Ich dokładna forma występowania nie jest ściśle ustalona. To przede wszystkim wiele grup eterowych. W węglach średnio uwęglonych mogą również występować zasocjowane grupy OH i CO, które w tym przypadku stanowią około 50% tlenu całkowitego pokładu. We wszystkich typach węgla obecne są ugrupowania zawierające tlen w rdzeniu aromatycznym. W węglu znajduje się więcej tlenu w eterach aromatycznych niż alifatycznych. Dla węgla nisko- i średniouwęglonych zawartość takiego tlenu wynosi 3–5%, co



stanowi odpowiednio  $1/3$  i  $1/2$  udziału w tlenie całkowitym. Natomiast w antracytach zawartość tych ugrupowań spada do około 2%, a ich udział w tlenie całkowitym stanowi  $4/5$ . Istnieje również pogląd, że tlen niereaktywny występuje w postaciach wiązań chelatowych między grupami CO i OH. Zawartość tlenu całkowitego w macerałach węgla kamiennego maleje od wityrynytu, przez inertynit, liptynit do fuzynitu (Jasieńko 1995).

#### 1.4. Proces utleniania

Utlenianie jest metodą służącą do badania struktury węgla. Jest to proces, w którym zachodzi adsorpcja tlenu, prowadząca do powstawania produktów pośrednich (nadtlenki, wodorotlenki i inne). Następnie zachodzi dekompozycja i rozpad niestabilnych półproduktów. Procesom towarzyszy wydzielanie się gazów oraz formacja stabilnych grupy funkcyjnych (Zhang i in. 2015). W czasie utleniania substancji aromatycznych powstają głównie kwasy benzenokarboksylowe oraz benzenopolikarboksylowe. Można z tego wnioskować, że – szczególnie w węglach o wyższym stopniu uwęglenia – obecne są pierścienie aromatyczne o dużej liczbie podstawień i kondensacji (Jasieńko 1995). Uogólniając, procesom utleniania towarzyszy wzrost zawartości tlenu funkcyjnego, przy jednoczesnym spadku udziału wodoru alifatycznego (Zhang i in. 2015).

## 2. Metodologia

**B**adaniu poddano koncentraty litotypów węgla kamiennego: durynu (zwany dalej durynem) i wityryny (zwany dalej wityrynem), uzyskane przez manualne rozdzielanie próbki niskouwęglonego węgla kamiennego pochodzącego z kopalni „Sobieski”, z pokładu 207, usytuowanego na głębokości 540 m. Zgodnie z Międzynarodową Klasyfikacją Węgla w Pokładzie (*ECE-UN In Seam Coal Classification*) węgiel ten zalicza się do typu *medium-rank para bituminous D*. Skład petrograficzny oraz refleksyjność wityrynytu (tab. 1) zostały oznaczone przed przystąpieniem do wykonania doświadczenia. Analizy przeprowadzono na Wydziale Geologii, Geofizyki i Ochrony Środowiska Akademii Górniczo-Hutniczej im. Stanisława Staszica w Krakowie, w Katedrze Geologii Żyłowej i Górniczej, za pomocą mikroskopu mineralogicznego AXIOPLAN i reflektometru Axioplan-MPM-400 firmy ZEISS OPTION.

Tabela 1. Właściwości próbek: analiza petrograficzna i refleksyjność wityrytu

| Sygnatura próbki | Wityryt [%] | Lityryt [%] | Inertyryt [%] | Substancja mineralna [%] | Refleksyjność wityrytu [%] |
|------------------|-------------|-------------|---------------|--------------------------|----------------------------|
| Wityryn          | 74,6        | 6           | 13,9          | 5,5                      | 0,51                       |
| Duryrn           | 28,4        | 16,3        | 47,2          | 8,1                      | 0,51                       |

Źródło: opracowanie własne.

Proces chemicznego utleniania prowadzono w temperaturze otoczenia. Dla każdego koncentratu litotypu postępowano w taki sam sposób. Pobrano próbkę o masie 3 g i umieszczono w naczyniu reakcyjnym, posiadającym szczelne zamknięcie z rurką, umożliwiającą odprowadzanie powstających gazów. Następnie zalano ją małą ilością wody destylowanej oraz nadmiarem 20% roztworu perhydrolu (ponad 10 cm<sup>3</sup>). Kontrolnie mierzono temperaturę w przestrzeni reakcyjnej i nie ulegała ona zmianie w czasie doświadczenia. Mieszaninę obserwowano przez około 20 minut. Po tym czasie produkt odsączono, przeniesiono na szalkę i pozostawiono na dwa dni, w celu odparowania cieczy. Wyszuszony materiał zbadano techniką spektroskopii w podczerwieni z wykorzystaniem transformaty Fouriera (FTIR *Fourier Transform Infrared Spectroscopy*) z użyciem aparatu Frontier MIR/FIR Spectrometer, w zakresie liczby falowej 400–4000 cm<sup>-1</sup>. Mieszaninę minimalnej ilości badanego węgla wymieszano ze 100-krotnie większą ilością bromku potasu KBr i poddano pastylkowaniu pod ciśnieniem. Dla każdego koncentratu litotypu wytworzono pastylkę materiału przed i po utlenianiu. Następnie każdą zanalizowano w spektrometrze. Oznaczenia wykonano na Wydziale Energetyki i Paliw AGH w Krakowie.

### 3. Otrzymane wyniki i dyskusja

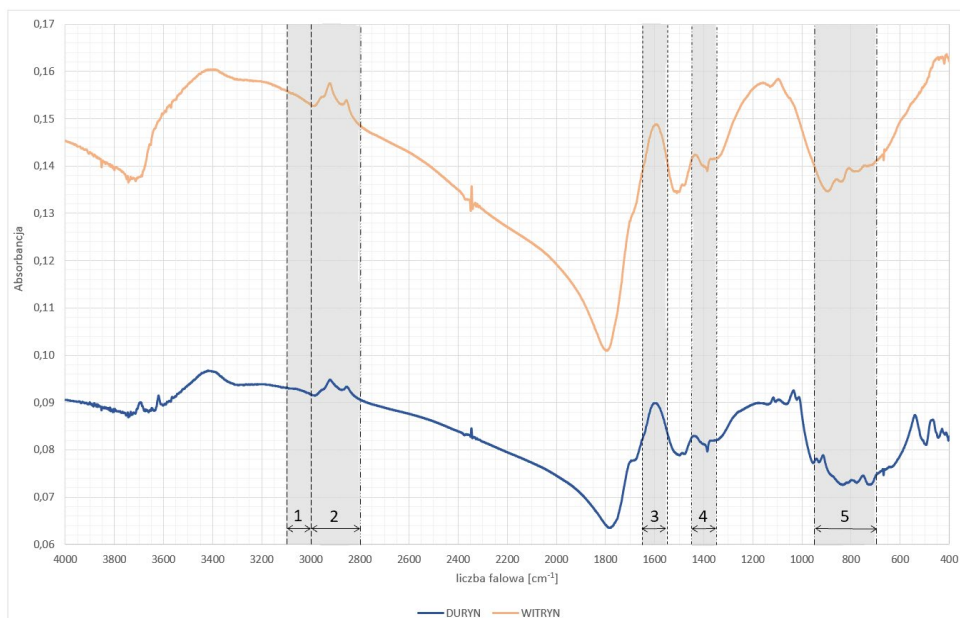
Wyniki badań FTIR dostarczyły informacji na temat budowy węgla w zakresie ugrupowań węgla i wodoru oraz grup tlenowych, umożliwiając ocenę różnic w strukturze i charakterze powierzchni próbek. Przy porównaniu otrzymanych widm absorpcyjnych skupiono się na 5 zakresach absorbancji, ważnych pod kątem prowadzonego doświadczenia (Czapliński 1994; Ibarra i in. 1996; Szczepaniak 1996; Teng i in. 2017; Zhang i in. 2015):

- 1) 3100–3000 cm<sup>-1</sup> odpowiadający drganiom rozciągającym wodoru aromatycznego (CH<sub>ar</sub>),
- 2) 3000–2800 cm<sup>-1</sup> przypadający na drgania rozciągające wodoru alifatycznego (grupy metylowe CH<sub>3</sub> i metylenowe CH<sub>2</sub>),

- 3) 1650–1550  $\text{cm}^{-1}$  odpowiadający drganiom rozciągającym węgla aromatycznego (C=C). W okolicach tego rejonu obserwuje się również pasma ugrupowań tlenowych (C=O),
- 4) 1450–1350  $\text{cm}^{-1}$  będący potwierdzeniem występowania grup alifatycznych  $\text{CH}_{\text{alif}}$  (drgania deformacyjne),
- 5) 900–700  $\text{cm}^{-1}$  dzielący wodór aromatyczny zależnie od ilości podstawników w pierścieniu aromatycznym (drgania deformacyjne).

### 3.1. Porównanie wityrnu i durynu

Bazowy wityrny i duryn nie różnią się znacznie pod względem występujących grup funkcyjnych (rys. 1). Ich widma wskazują jednak na większy stopień kondensacji pierścieni aromatycznych oraz wyższą całkowitą aromatyczność durynu. Świadczy o tym większa intensywność pasm wityrnu dla zakresów 2 i 4 opisujących grupy alifatyczne. Natomiast szerszy pik w rejonie 3 potwierdza większą kondensację węgla aromatycznego w durynie. Wskazuje to wpływ zawartości inertynitu na aromatyczność węgla. Dodatkowo dla durynu, w obrębie tego pasma, lepiej zarysował się pik grup karbonylowych (wyraźniejsze zakrzywienie lewego ramienia piku). Jedyną wyraźną różnicę w składzie obu litotypów wskazuje pik około 1030  $\text{cm}^{-1}$  opisujący

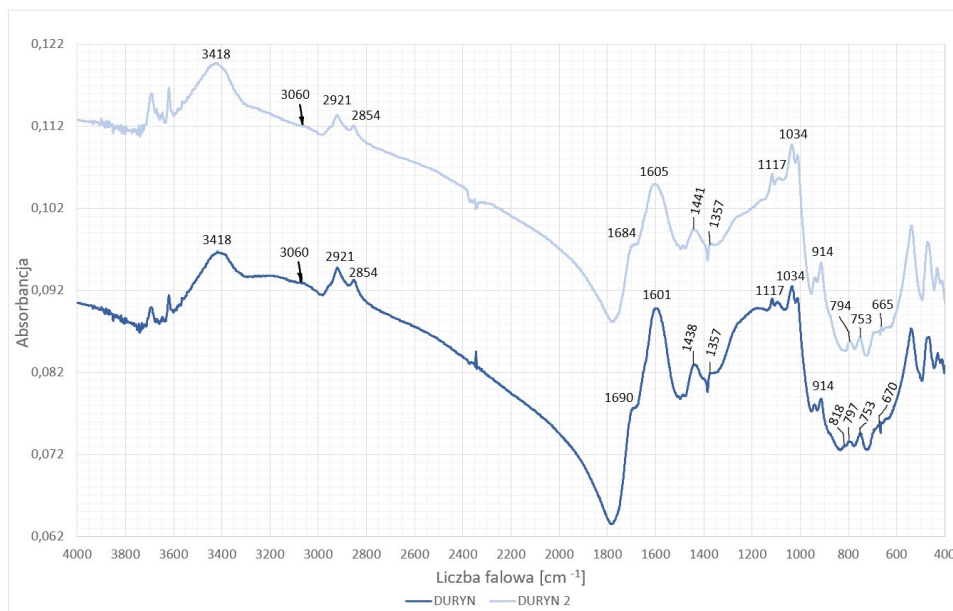


Rysunek 1. Widma FTIR badanych litotypów durynu i wityrnu przed utlenianiem  
Źródło: opracowanie własne

substancją mineralną. Jest on obecny tylko na widmie durynu. Oba litotypy mają prawie nieoznaczalne pasmo wodorów aromatycznych (zakres 1). Występuje natomiast mała różnica co do ilości podstawników pierścienia aromatycznego. Będzie ona bliżej opisana przy analizie poszczególnych litotypów przed i po utlenianiu. Warto zwrócić również uwagę na rejon  $1200\text{--}1060\text{ cm}^{-1}$ , który odpowiada występowaniu grup eterowych. Witryn ma tutaj pasmo bardziej zaokrąglone z dwoma wyraźnymi pikami. Natomiast dla durynu jest ono spłaszczone, a pojawiające się piki są przesunięte i mniej intensywne.

### 3.2. Duryn przed i po utlenianiu

Utlenianie durynu spowodowało spadek ilości grup metylowych i metylenowych, o czym świadczy zmniejszenie intensywności pików  $2921\text{ cm}^{-1}$  i  $2854\text{ cm}^{-1}$  oraz spadek intensywności pasm  $1438\text{ cm}^{-1}$  i  $1357\text{ cm}^{-1}$  (odpowiednio grupy  $\text{CH}_2$  i  $\text{CH}_3$ ) (rys. 2). Stwierdzono większą ilość ugrupowań  $\text{C}=\text{C}_{\text{ar}}$  i  $\text{C}=\text{O}$  dla utlenionego durynu, co obrazuje poszerzony pik  $1605\text{ cm}^{-1}$  (przed utlenianiem  $1601\text{ cm}^{-1}$ ) oraz wyraźniej zarysowane zakrzywienie na jego lewym ramieniu (pik  $1690\text{ cm}^{-1}$  dla bazowego durynu i  $1684\text{ cm}^{-1}$  dla utlenionego). Nieznaczące wybrzuszenie w zakresie  $3600\text{--}3100\text{ cm}^{-1}$  po utlenianiu spłaszczyło się, co świadczy o spadku ilości zasocjowa-

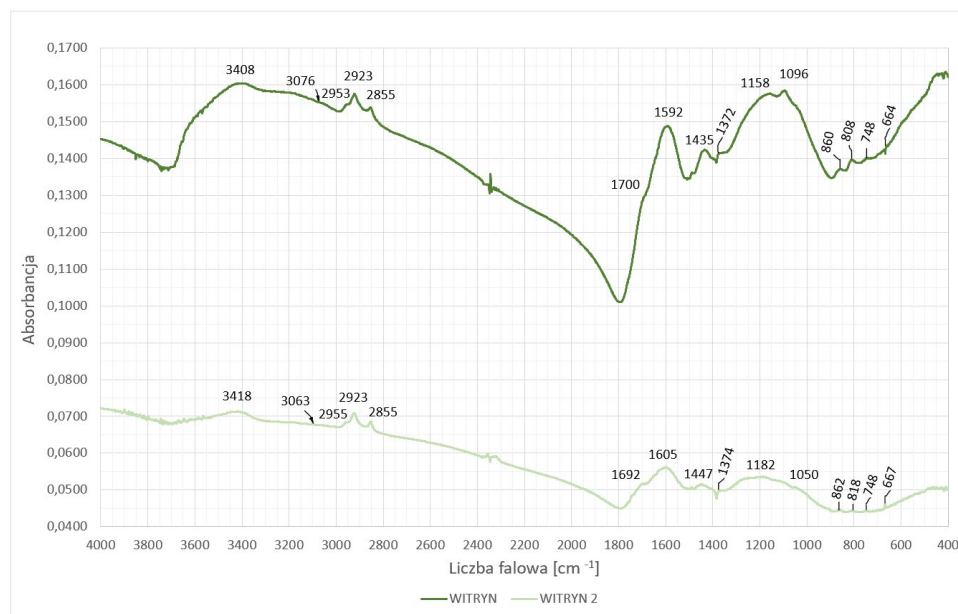


Rysunek 2. Widma FTIR durynu przed utlenianiem (DURYN) i po (DURYN 2)  
Źródło: opracowanie własne

nych grup OH, a w zakresie około 1250–1150  $\text{cm}^{-1}$  o zmniejszeniu udziału eterów aromatycznych. Ugrupowania eterów alifatycznych uległy niewielkim zmianom (piki 1117  $\text{cm}^{-1}$  i niezaznaczony 1095  $\text{cm}^{-1}$ ). Te trzy właściwości dotyczące struktur tlenowych świadczą o wzroście ilości grup karbonylowych i estrowych po utlenieniu durynu. Dodatkowo można wnioskować, że spadła zawartość kwasów karboksylowych aromatycznych, natomiast wzrósł udział kwasów karboksylowych alifatycznych. W zakresie 900–700  $\text{cm}^{-1}$  widać zmiany w ilości podstawników w pierścieniach aromatycznych durynu. Zanika pik 818  $\text{cm}^{-1}$ , odpowiadający dwóm sąsiadującym wodorom w pierścieniu. Natomiast piki 794  $\text{cm}^{-1}$ , 753  $\text{cm}^{-1}$  i 667  $\text{cm}^{-1}$  (odpowiednio: 3, 4 i 5 sąsiadujących ze sobą wodorów) przesuwają się i są intensywniejsze. W czasie utleniania następuje więc zwiększenie ilości wodoru aromatycznego i rozpad rozgałęzień przyłączonych do pierścieni aromatycznych. Pasma przypisane substancji mineralnej (1034  $\text{cm}^{-1}$ ) nie ulega zmianie.

### 3.3. Witryn przed i po utlenianiu

W witrynie zaszły podobne zmiany jak w durynie (rys. 3), są one jednak intensywniejsze. Pokazuje to większą reaktywność witrynu i jego podatność na utlenianie. Zmniejszyła się intensywność pików grup alifatycznych w zakresie drgań rozciągają-



Rysunek 3. Widma FTIR witrynu przed utlenianiem (WITRYN) i po (WITRYN 2)

Źródło: opracowanie własne

cych (piki  $2955\text{ cm}^{-1}$ ,  $2923\text{ cm}^{-1}$  i  $2855\text{ cm}^{-1}$ ) oraz nastąpiło znaczne spłaszczenie pasm drgań zginających ( $1435\text{ cm}^{-1}$  i  $1374\text{ cm}^{-1}$ ). Zwiększył się udział grup karbonylowych oraz nastąpiła kondensacja pierścieni aromatycznych (poszerzenie pasma  $1650\text{--}1550\text{ cm}^{-1}$ ). Spadła również ilość zasocjowanych grup OH (zmniejszenie intensywności w zakresie  $3408\text{ cm}^{-1}$ ). W obszarze grup eterowych zanikają dwa wyraźne piki ( $1158\text{ cm}^{-1}$  i  $1096\text{ cm}^{-1}$ ), jednak powstałe szerokie wybrzuszenie świadczy o obecności tych ugrupowań. Podobnie jest w rejonie wodoru aromatycznego. Nastąpił zanik piku  $808\text{ cm}^{-1}$ , a piki  $860\text{ cm}^{-1}$  (wodór izolowany),  $748\text{ cm}^{-1}$  (4 sąsiadujące wodoru) i  $664\text{ cm}^{-1}$  (5 wodorów w pierścieniu aromatycznym) prawie całkowicie zanikły.

#### 4. Wnioski

Litotypy duryn i witryn nie wykazują znaczącej odmienności pod względem składu grup funkcyjnych. Badana próbka durynu zawiera substancję mineralną oraz ma wyższą kondensację pierścieni aromatycznych niż analizowany witryn. Witryn natomiast zawiera więcej grup alkilowych (zwłaszcza metylowych). Pozostaje to w zgodności z rozpoznanymi właściwościami poszczególnych macerałów i ich korelacją z odpowiednimi właściwościami litotypów. Inertynity mają bardziej stabilną strukturę, dlatego duryn jest bardziej odporny na działanie silnego utleniacza. Witryn natomiast jest bardziej podatny na utlenianie i ulega większym zmianom. W wyniku utleniania nastąpił spadek udziału ugrupowań alifatycznych i zasocjowanych grup hydroksylowych oraz redukcja podstawników w układach aromatycznych, a także wzrost udziału grup karbonylowych i estrowych. Powyższe wyniki pozostają w zgodności z doniesieniami literaturowymi (Ibarra i in. 1996; Jasieńko 1996; Zhang i in. 2015).

#### 5. Znaczenie badań w wymiarze środowiskowym

Samonagrzewanie i w konsekwencji samozapalenie węgla kamiennego jest najczęstszą przyczyną pożarów endogenicznych w kopalniach węgla kamiennego. Zbliżony mechanizm stoi za samozapaleniem węgla na składowiskach tego surowca. W obu przypadkach dochodzi do bezproduktywnej emisji  $\text{CO}_2$ . Problematyka ta jest przedmiotem prac naukowych (np. Garcia-Torrent i in. 2012), obejmujących prognozowanie zagrożenia pożarowego. Badania te wpisują się w koncepcje zrównoważonego zarządzania surowcami naturalnymi i podejmowania działań przeciwdziałających zmianom klimatycznym.

W Polsce badania samozapalności węgla prowadzone są za pomocą dwóch metod. Pierwsza bazuje na normie nr PN-G-04558:1993 i polega na pomiarze temperatury

próbek węgla w strumieniu powietrza o temperaturze 510 K i 463 K. Na tej podstawie wyznaczane są dwa wskaźniki samozapalności oraz energia aktywacji procesu, a węgiel zaliczany jest do jednej z pięciu grup samozapalności. Druga metoda bazuje na wynikach testu adiabatycznego na gazach pożarowych.

Badanie spektroskopowe utlenionego chemicznie węgla mogłoby stanowić przyczynek do opracowania alternatywnej techniki oceny skłonności węgla do samonagrzewania i samozapalenia. W tym celu należałoby przeprowadzić badania na większej liczbie próbek, o znanych wynikach klasycznej oceny tych właściwości, i oszacować, czy istnieje korelacja pomiędzy zmiennością uzyskanych wyników a skłonnością węgla do samonagrzewania i samozapalenia. W przypadku pozytywnego efektu podjętych prac można zoptymalizować procedurę pomiarową i wykonać szersze badania na większej liczbie próbek.

Praca finansowana z subwencji badawczej AGH Akademii Górniczo-Hutniczej im. Stanisława Staszica w Krakowie nr 16.16.210.476.

## Literatura

- CZAPLIŃSKI A. red. 1994. *Węgiel kamienny*. Wydawnictwo AGH, Kraków.
- GARCIA-TORRENT J., RAMIREZ-GOMEZ A., QUEROL-ARAGON E., GRIMA-OLMEDO C. i MEDIC-PEJIC L. 2012. *Determination of the risk of self-ignition of coals and biomass materials*. Journal of Hazardous Materials nr 213–214, s. 230–235.
- IBARRA J.V., MUÑOZ E. i MOLINER R. 1996. *FTIR study of the evolution of coal structure during the coalification process*. Organic Geochemistry t. 24, s. 725–735.
- JASIEŃKO S. red. 1995. *Chemia i fizyka węgla*. Oficyna wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, Wrocław.
- PN-G-04558:1993. *Węgiel kamienny. Oznaczanie wskaźnika samozapalności*.
- SZCZEPANIAK W. 1996. *Metody instrumentalne w analizie chemicznej*. Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa.
- TENG J., MASTALERZ M. i LaBRAUN HAMPTON LB. 2017. *Maceral controls on porosity characteristics of Pennsylvanian high volatile bituminous coal: Example from the Illinois Basin*. International Journal of Coal Geology nr 172, s. 80–94.
- ZHANG W., SHUGUANG J., WANG K., WANG L., XU Y., WU Z., SHAO H., WANG Y. i MIAO M. 2015. *Thermogravimetric Dynamics and FTIR Analysis on Oxidation Properties of Low-Rank Coal at Low and Moderate Temperatures*. International Journal of Coal Preparation and Utilization nr 35, s. 39–50.





## Wykorzystanie odpadów komunalnych do produkcji paliwa alternatywnego z zastosowaniem ekologicznej instalacji, na przykładzie przedsiębiorstwa działającego jako RIPOK

**STRESZCZENIE:** Kształtujący się obecnie model gospodarki cyrkulacyjnej zakłada maksymalne wykorzystanie odpadów, które stają się cennymi zasobami. Regulacje prawne Unii Europejskiej traktują bardzo kompleksowo problematykę odpadów zarówno w skali makro-, jak i mikroekonomicznej. Rozwiązania te mają na celu minimalizowanie, odzysk, ponowne wykorzystanie oraz recykling odpadów. Problem zagospodarowania odpadów komunalnych jest jednym z istotnych kierunków gospodarki o obiegu zamkniętym i dotyczy rozwiązań mających na celu zmniejszenie składowania odpadów tego typu, a także wykorzystanie już istniejących odpadów. Celem pracy jest pokazanie gospodarczego znaczenia stałych paliw wtórnych otrzymywanych z odpadów komunalnych i ich pozyskiwanie, przy jednoczesnym poszanowaniu środowiska naturalnego. W części empirycznej pracy zostało przedstawione rozwiązanie przyjazne środowisku w postaci instalacji pozwalającej na otrzymanie wartościowego kompostu energetycznego ze zmieszanych odpadów komunalnych (w tym biodegradowalnych) w przykładowym przedsiębiorstwie działającym jako RIPOK (Regionalna Instalacja Przetwarzania Odpadów Komunalnych). Prezentowany przykład spełnia założenia gospodarki cyrkulacyjnej: następuje zmniejszenie zużycia surowców naturalnych, odpady komunalne są wykorzystywane do produkcji paliwa, środowisko naturalne nie ulega degradacji, instalacja nie zanieczyszcza bowiem jego komponentów oraz nie generuje żadnych uciążliwości dla otoczenia. Praca wpisuje się w 3., 4., 7. i 12. cel zrównoważonego rozwoju.

**Słowa kluczowe:** zrównoważony rozwój, paliwo alternatywne, odpady komunalne, Regionalna Instalacja Przetwarzania Odpadów Komunalnych

---

<sup>1</sup> Dr, AGH Akademia Górniczo-Hutnicza, Wydział Zarządzania, Kraków, Polska.

## Using the municipal waste for the alternative fuels production on the example of an enterprise operating with pro-ecological installation

**ABSTRACT:** The current circular economy model assumes the maximum use of waste, which are treated as valuable resources. The legal regulations of the European Union treat the problems of waste both in the macro and micro - scale very comprehensively. These solutions are aimed at minimizing, recovering, reusing and recycling waste. The problem of municipal waste management is one of the important directions of the circular economy and concerns solutions aimed at reducing the storage of this type of waste, as well as the use of already created ones. The purpose of research paper is to show the economic importance of alternative fuels obtained from municipal waste, while respecting the natural environment. In the empirical part of work, the environmentally friendly solution was analysed - plant allowing to obtain valuable energy compost from mixed municipal waste (including biodegradable waste) used by an example enterprise operating as Regional Municipal Waste Treatment Facility. The presented example fulfills the assumptions of the circular economy: there is a reduction in the consumption of natural resources, municipal waste is used for alternative fuel production, the natural environment is not degraded, the plant does not pollute its components and does not generate any inconvenience to the environment.

**KEYWORDS:** sustainable development, alternative fuels, municipal waste, Regional Municipal Waste Treatment Facility

### 1. Wprowadzenie

Gminy zobowiązane są podporządkować swoje działania nowym przepisom dotyczącym gospodarki odpadami. Wymagania te w myśl założeń gospodarki cyrkulacyjnej mają ograniczyć masę odpadów komunalnych ulegających biodegradacji, zmniejszając tym samym składowanie oraz stymulując wdrażanie innowacyjnych rozwiązań technologicznych przyjaznych dla środowiska naturalnego. Wygórowane są poziomy recyklingu i działania przygotowujące frakcje: metalu, papieru tworzyw sztucznych do ponownego użycia. Z biegiem czasu będą one coraz większe. Dyrektywy odpadowe Unii Europejskiej wyznaczają do 2025 r. poziom recyklingu opakowań – 65% a do 2030 – 70%. Pakiet odpadowy tworzą dyrektywy: o odpadach (2008/98/WE), w sprawie opakowań i odpadów opakowaniowych (94/62/WE), w sprawie składowania odpadów (1999/31/WE) oraz dyrektywa, która precyzuje wymagania dla systemów Rozszerzonej Odpowiedzialności Producenta (2008/98/WE). Istotne znaczenie i udział w gospodarowaniu odpadami będą więc miały Regionalne Instalacje do Przetwarzania Odpadów Komunalnych. Definiowanie tego typu organizacji zmienia się w porównaniu z początkową regulacją zakresu jej działalności, określoną przez ustawę z dnia 27 kwietnia 2001 r. Prawo ochrony środowiska – art. 143. Obecnie RIPOK to jednostka, która może mieć o wiele szerszy zakres prowadzonej działalności, m.in. może posiadać instalacje innowacyjnego przetwarzania odpadów komunalnych oraz inne dostępne innowacyjne technologie mechaniczno-biologicznego przetwarzania odpadów.

Ustawa z dnia 22 stycznia 2010 r. o zmianie ustawy o odpadach oraz niektórych innych ustaw (Dz.U. Nr 28, poz. 145) wprowadziła zakaz składowania odpadów ulegających biodegradacji selektywnie zebranych, który wszedł w życie 1 stycznia 2013 r. Obowiązek ten zawarto również w art. 122 Ustawy z dnia 14 grudnia 2012 r. o odpadach. Przyczyniło się to do zwiększenia kierowania strumienia tych odpadów do instalacji regionalnych służących do przetwarzania selektywnie zebranych odpadów (PGO 2014). Kolejne zmiany mające na celu ograniczenie składowania różnych frakcji odpadów wprowadziło Rozporządzenie Ministra Gospodarki z 16 lipca 2015 r. w sprawie dopuszczania odpadów do składowania na składowiskach, Dz.U. 2015, poz. 1277. Wymogi obowiązują od 1 stycznia 2016 r. i dotyczą zakazu składowania wysokokalorycznych odpadów (powyżej 6000 kJ/kg s.m.). Kody odpadów to: 190805, 190812, 190814, 191212 oraz odpadów z grupy 20. Celem wdrożenia tego przepisu jest zwiększenie ilości spalanych odpadów, w tym osadów ściekowych i odpadów komunalnych. Dzięki temu możliwe będzie wytworzenie większej ilości energii elektrycznej i ciepła. Kierunki zmian będą postępowały więc w stronę lepszego zagospodarowania odpadów. W dalszej części pracy zostaną poddane analizie rodzaje odpadów komunalnych wykorzystywanych do produkcji paliwa alternatywnego oraz ilości wytwarzanych paliw alternatywnych w Polsce. Przedstawiony zostanie również przykład wykorzystania innowacyjnej metody do produkcji paliw alternatywnych, wdrożonej przez przedsiębiorstwo działające w branży odpadowej jako RIPOK w województwie małopolskim.

### **1.1. Znaczenie odpadów komunalnych w wytwarzaniu paliw alternatywnych**

Odpady komunalne są to odpady wytwarzane w gospodarstwach domowych oraz odpady wytwarzane w handlu detalicznym, przedsiębiorstwach, budynkach biurowych i instytucjach edukacyjnych oraz opieki medycznej i administracji publicznej, o charakterze i składzie podobnym do odpadów wytwarzanych w gospodarstwach domowych (PGO 2014). Skład morfologiczny odpadów komunalnych jest różnorodny. Zawarte są w nich różne frakcje, a ich skład zależy od wielu czynników: demograficznych, ekonomicznych, społecznych i innych. Ma zatem znaczenie kształtowanie się struktury i liczebności populacji, miejsce pochodzenia odpadów (wieś, miasto), gęstość zaludnienia. Do czynników ekonomicznych można zaliczyć zamożność społeczeństwa, popyt na konkretne dobra konsumpcyjne, ich dostępność i charakter. Ważnym czynnikiem są także efekty zmian w polityce krajowej w zakresie zapobiegania i ograniczenia powstawania odpadów, ich przygotowanie do ponownego użycia, recykling, odzysk i unieszkodliwianie. Aspekt społeczny, mający szczególne znaczenie dla zmniejszania ilości odpadów i zwiększający możliwości ich zagospodarowania, to podnoszenie świadomości ekologicznej społeczeństwa.

Część odpadów komunalnych ulega biodegradacji (OUB – odpady ulegające biodegradacji), czyli rozkładowi tlenowemu lub beztlenowemu, przy udziale mikroorganizmów. Do odpadów komunalnych ulegających biodegradacji zalicza się (Rozporządzenie Ministra Środowiska 2014):

- papier i tekturę,
- odzież i tekstylia z materiałów naturalnych,
- odpady z terenów zielonych,
- odpady kuchenne ulegające biodegradacji i ogrodowe,
- drewno i inne,
- substancje ulegające biodegradacji zawierają również odpady wielomateriałowe, oraz tzw. frakcja drobna < 10 mm.

Omawiane w dalszej części pracy przedsiębiorstwo przetwarza biodegradowalne odpady komunalne do produkcji paliwa alternatywnego.

## **1.2. Zagospodarowanie odpadów komunalnych oraz tendencje zmian w ich ilościach**

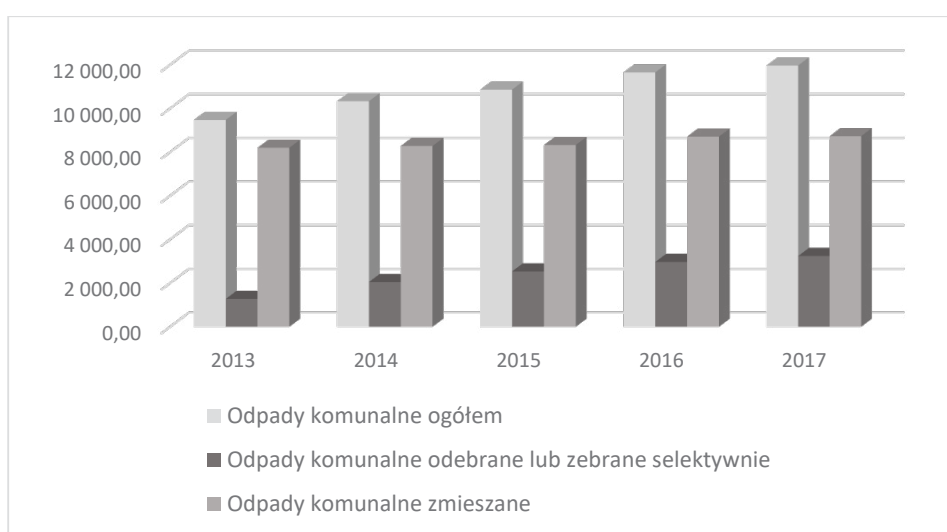
Zagospodarowanie odpadów komunalnych odbywa się z uwzględnieniem hierarchii sposobów postępowania z odpadami. Odpady zmieszane poddawane są procesom: recyklingu, przekształcania termicznego, innym procesom przetwarzania (obróbki biologicznej) i składowaniu (odpady zmieszane trafiają na składowisko po wcześniejszych procesach przetwarzania).

Nowelizacja ustawy o odpadach z 14 grudnia 2012 r. wprowadziła szereg obostrzeń dotyczących zasad postępowania z odpadami. Ustawa z dnia 20 lipca 2018 r. o zmianie ustawy o odpadach oraz niektórych innych ustaw weszła w życie 5 września 2018 r. (Ustawa z dnia 20 lipca 2018). Zmiany obejmują trudniejsze uzyskanie zezwoleń na zbieranie czy przetwarzanie odpadów – uzyskanie takiego zezwolenia będzie wymagało zabezpieczenia roszczeń wynikających np. z ewentualnego pokrycia kosztów usunięcia negatywnych skutków dla środowiska. Takie rozwiązanie ma za zadanie zabezpieczyć samorządy – dzięki nim gminy będą miały odpowiednie środki na podjęcie działań naprawczych i zapobiegawczych. Stąd też bardzo ważną rolę będą spełniać zakłady zagospodarowujące odpady w sposób proekologiczny.

Ilość odpadów zmieszanych objętych recyklingiem w 2016 r. w stosunku do roku 2012 wzrosła czterokrotnie a ilość odpadów przekształconych termicznie zwiększyła się czterdzieści dwa razy. Tak duży wzrost strumienia odpadów kierowanych do przekształcania termicznego spowodowany był uruchomieniem nowych spalarni odpadów komunalnych, które rozpoczęły działalność na przełomie 2015/2016 r. Na wzrost ilości odpadów kierowanych do przekształcania termicznego miało również

wpływ rozporządzenie Ministra Gospodarki z 8 stycznia 2013 r. w sprawie kryteriów oraz procedur dopuszczania odpadów do składowania na składowisku. Wprowadziło ono od 1 stycznia 2016 r. zakaz składowania odpadów po mechanicznej obróbce oraz odpadów komunalnych, dla których ciepło spalania wynosi powyżej 6 MJ/kg. Ilość odpadów komunalnych zmieszanych poddanych obróbce biologicznej wzrosła pięciokrotnie, podczas gdy składowanych spadła aż o 30% (stat.gov.pl 2019).

Na rysunku 1 przedstawiono odpady komunalne wytworzone w Polsce w latach 2013–2017 w tysiącach Mg, w podziale na kategorie.



**Rysunek 1. Odpady komunalne wytworzone w Polsce w latach 2013–2017 w tys. Mg**  
 Źródło: opracowanie własne na podstawie danych <https://stat.gov.pl/obszary-tematyczne/infrastruktura-komunalna-nieruchomosci>

W latach 2013–2016 w Polsce widoczny jest wzrost ilości odpadów komunalnych zebranych selektywnie. Szczególnie widoczna jest różnica w ich ilości między rokiem 2013 a 2014 (60%). Był to skutek nowelizacji ustawy o utrzymaniu czystości i porządku w gminach. W 2015 r. w stosunku do roku 2014 wzrost odpadów zebranych selektywnie wyniósł 23%, a w roku 2016 w stosunku do 2015 sięgnął 17%. W 2017 r. w Polsce zebranych zostało 11 968,7 tys. Mg odpadów komunalnych (wzrost o 2,7% w porównaniu z 2016 r.).

Po wejściu w życie ustawy o utrzymaniu czystości i porządku w gminach odnotowano spadek odpadów zmieszanych w 2013 r. w stosunku do roku 2012 o 4,4%. W latach 2014–2015 ilość odebranych odpadów zmieszanych kształtowała się na podobnym poziomie. W ramach uszczelnienia systemu gospodarki odpadami gminy przeprowadzały kontrole, czy mieszkańcy mają podpisane umowy na odbiór odpa-

dów komunalnych z nieruchomości zamieszkałych i niezamieszkałych. W 2016 r. odnotowano wzrost odpadów zmieszanych w stosunku do roku 2015 o 4,6%. W 2017 r. odpady zmieszane wyniosły 8729,3 tys. Mg. Jest to wzrost o 2% w porównaniu z rokiem poprzednim, kiedy ilość tego typu odpadów wyniosła 8712,1 tys. Mg [stat.gov.pl 2019]. W roku 2018 odpady zmieszane osiągnęły poziom 8877,4, natomiast w 2019 ilość odpadów tego typu wyniosła 8775,3 tys. Mg, co wskazuje na niewielki spadek o 102,1 tys. Mg (GUS 2020).

Jak widać, problem komunalnych odpadów zmieszanych jest znaczący i bardzo ważne jest poszukiwanie odpowiednich rozwiązań w tym obszarze. Udział odpadów zmieszanych w ogólnej ilości odpadów komunalnych z roku na rok jest nadal bardzo wysoki.

## 2. Przykłady paliw alternatywnych pozyskiwanych z odpadów

**W** literaturze przedmiotu występują nieścisłości w nazewnictwie określającym paliwo pozyskiwane z odpadów. Funkcjonują pojęcia takie jak: paliwa zastępcze, paliwa alternatywne, paliwa wtórne z odpadów. Popularnym określeniem tego typu paliwa jest w języku angielskim *Refused Derived Fuel* (RDF). Definicje oraz źródła pochodzenia takiego paliwa dokładnie zostały określone w dokumencie Komisji Europejskiej „Refuse Derived Fuel, current practice and perspectives” (Refuse Derived Fuel 2003). W dokumencie tym znajdują się wytyczne dotyczące paliw pozyskiwanych zarówno ze zmieszanych odpadów komunalnych, jak i odpadów przemysłowych. W tego rodzaju paliwie znajdują się zatem różne frakcje odpadów komunalnych, przemysłowe i handlowe, biomasa, osady ściekowe, a nawet odpady niebezpieczne pochodzące z odpadów przemysłowych. Omawiane paliwa są wykorzystywane do spalania w spalarniach odpadów komunalnych przystosowanych do współspalania paliwa alternatywnego, jak również w jednostkach energetycznych odpowiednich do spalania paliwa alternatywnego spełniających wymogi spalarni. Jednak najczęściej wykorzystywane są w przemyśle cementowym, zastępując częściowo paliwa kopalne.

W sektorze cementowym stosowane są różnorodne podziały paliw alternatywnych. Poniżej znajduje się jeden z nich (Mokrzycki i Uliasz-Bocheńczyk 2009):

- gaz,
- paliwa płynne,
- paliwo stałe solid (opony, odpady drewniane, tworzywa sztuczne).

W procesie spalania produkuje się popiół, który może być również traktowany jako surowiec wtórny wykorzystywany jako jeden z komponentów klinkieru (Mokrzycki i Uliasz-Bocheńczyk 2009).

Przykłady instalacji pirolitycznych przetwarzających odpady i produkujących paliwa to m. in. (Lewandowski i Ryms 2013):

- instalacja recyklingu RDF typu Flasz do bezciśnieniowego przetwarzania palnej frakcji odpadów RDF na olej napędowy lub opałowy;
- instalacja quasi-ciągłego recyklingu opon pozwalająca na otrzymanie biokarbonatu, który można przerobić na handlowy węgiel aktywny;
- technologia ciągłej pirolizy całych opon pozwalająca na rozdział otrzymanego oleju na frakcje (lekką, średnią i ciężką ) oraz aktywację biokarbonatu realizowane w sposób ciągły.

Korzyścią ekologiczną ze współspalania odpadów komunalnych jest oszczędność surowców naturalnych, w szczególności paliw kopalnych wykorzystywanych jako paliwo w przedsiębiorstwach przemysłowych. Zamiast nich wykorzystywane jest paliwo alternatywne powstające z odpadów. Przedsiębiorstwa wykorzystujące tego typu paliwo to głównie cementownie, które zastępują nim węgiel kamienny i mazut. Kolejną korzyścią dla środowiska jest zmniejszenie jego zanieczyszczenia poprzez ograniczenie składowania odpadów komunalnych, które ulegają przeróbce na paliwo alternatywne.

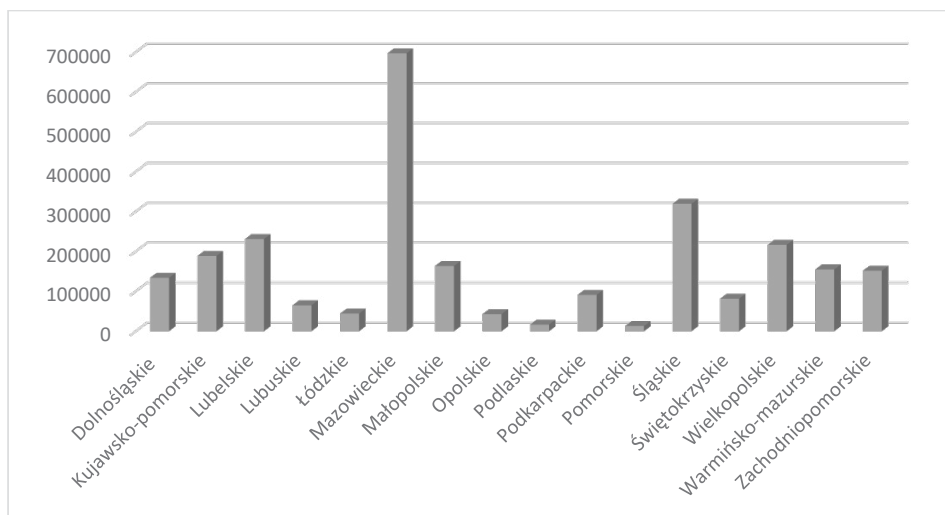
## 2.1. Wytwarzanie paliw alternatywnych w Polsce

W poniższej analizie wzięto pod uwagę paliwo o kodzie 191210, tj. odpady palne (paliwo alternatywne), wytwarzane po sortowaniu odpadów komunalnych.

Według internetowej bazy o odpadach na rynku paliw alternatywnych, produkcja tego typu paliw w Polsce w roku 2016 wyniosła 2 608 958 Mg, zwiększając się w porównaniu do roku 2015 o ponad 25%. Pierwsza trójka producentów zanotowała jeszcze większe wzrosty, i tak: Lekaro +36%, MPO Warszawa +49%, spółki Novago +25%. Wśród pierwszej piętnastki największych producentów paliw 2016 r. nie ma ani jednego podmiotu, który zmniejszyłby ilość wytworzonego paliwa w porównaniu do roku ubiegłego. W 2017 r. ilość wyprodukowanego paliwa RDF ogółem w Polsce wyniosła 2 489 494 Mg. W porównaniu z rokiem 2016 widoczny jest spadek o 119 464 Mg (2,2%) (Internetowa Baza Danych o Odpadach 2018).

Na rysunku 2 przedstawiono ilość wytworzonego paliwa o kodzie 191210 w Polsce w 2016 r. Wykorzystane dane pochodzą z raportów wojewódzkich Urzędów Marszałkowskich. Najwięcej paliwa wytworzono w województwie mazowieckim w ilości 697 046,56 Mg, najmniej natomiast w województwie pomorskim – 12 976,26 Mg. Paliwo alternatywne może przechodzić różnorodną drogę począwszy od zagospodarowania komponentów do produkcji paliwa w przedsiębiorstwie przetwarzającym odpady. Następnie po ponownym przetworzeniu może ono zostać zagospodarowane przez inne przedsiębiorstwo, które ostatecznie wykorzysta ten rodzaj paliwa. Stąd też analizowane ilości mogą dotyczyć dwukrotnie liczonych wielkości tego samego materiału.

## Część 2. Energia ze źródeł pierwotnych i wtórnych



Rysunek 2. Ilości wytworzonego paliwa o kodzie 191210 [w Mg] w 2016 r. w poszczególnych województwach  
Źródło: opracowanie własne na podstawie danych z Internetowej bazy danych o odpadach [http://ibdo.pl/?page\\_id=771](http://ibdo.pl/?page_id=771)

### 3. Przykładowe inwestycje związane z uruchomieniem instalacji pozyskiwania paliwa alternatywnego w RIPOK

**A**nalizowane przedsiębiorstwo działa jako RIPOK w województwie małopolskim. Przedsiębiorstwo przyjmuje odpady z selektywnej zbiórki, które są doczyszczane i ręcznie sortowane. Firma rocznie segreguje około 2000 Mg odpadów pochodzących z selektywnej zbiórki. Grupy odpadów są dzielone na podgrupy. Metale dzielone są na metale kolorowe i żelazne. Tworzywa sztuczne selekcionuje się na: butelki PET przezroczyste, zielone, niebieskie, chemię gospodarczą, folię białą, folię kolorową. Inne pozostałe tworzywa sztuczne są dodawane do paliwa alternatywnego w celu jego uszlachetnienia. Kolejną grupą odpadów jest szkło bezbarwne i szkło kolorowe. Oddzielne grupy odpadów stanowią papier (karton, papier i tektura, papier i gazety) oraz odpady wielomateriałowe.

Omawiane przedsiębiorstwo niejednokrotnie opracowywało i wdrażało technologie wykorzystujące potencjał odpadów komunalnych. Jednym z przykładów jest zastosowanie technologii opartej na wydzieleniu frakcji organicznej ze strumienia odpadów komunalnych oraz otrzymaniu z niej kompostu energetycznego.

Paliwo produkowane jest ze zmieszanych odpadów. Drugim sposobem otrzymania paliwa jest wykorzystanie tzw. gotowego pre-RDF – są to specjalnie przygo-



towane, uprzednio wydzielone odpady o wysokiej kaloryczności, głównie tworzywa sztuczne i guma. Frakcja ta, nazywana nadsitową, jest określana kodem 191212. Frakcja RDF jest natomiast oczyszczana i określa się ją kodem 191210.

Proekologiczna inwestycja analizowanego przedsiębiorstwa obejmuje ulegające biodegradacji odpady gromadzące się w tzw. frakcji podsitowej. Frakcja podsitowa stanowi około 30–60% strumienia zmieszanych odpadów komunalnych, zaś we frakcji podsitowej 40–60% odpadów to odpady ulegające biodegradacji.

Omawiana instalacja oparta na wydzieleniu frakcji organicznej również ma przełożenie na efekt ekonomiczny przedsiębiorstwa. Za przyjęcie odpadów firma otrzymuje od 100 do 500 zł/Mg, w zależności od pochodzenia odpadów. Ponadto firma deklaruje, iż jej moce przerobowe pozwalają na wyprodukowanie z odpadów 24 000 Mg paliwa rocznie. Jest to paliwo wysokiej jakości (mieści się między dwiema najwyższymi klasami paliw pozyskiwanych z odpadów). Głównymi odbiorcami tego produktu są cementownie. Jego parametry zostały określone przez odbiorców paliwa. Poniżej znajduje się ich charakterystyka:

- ciepło spalania: 19–24 MJ/kg,
- wilgotność: 15–25%,
- wartość opałowa: 16–20 MJ/kg,
- zawartość popiołów: 9–15%,
- zawartość siarki: 0,2–0,4%,
- zawartość chloru: 0,3–0,6%.

Celem proekologicznej inwestycji było wdrożenie własnej innowacyjnej technologii produkcji paliwa niekonwencjonalnego (odnawialnego) w postaci kompostu energetycznego. Kompost energetyczny powstaje z wysortowanych z odpadów komunalnych odpadów organicznych (ulegających biodegradacji).

Inwestycja obejmowała budowę hali magazynowo-produkcyjnej, zakup maszyn i urządzeń według specyfikacji przedsiębiorcy oraz zagospodarowanie terenu (utwardzenie – wybetonowanie terenu) (dokumenty i materiały).

Najważniejszym elementem inwestycji jest instalacja pozwalająca na nowy, innowacyjny proces sortowania frakcji podsitowej – uprzydatnianie frakcji podsitowej tak, aby oczyścić tę frakcję z niepożądanych zanieczyszczeń (ziemia, metal, szkło itp.). Jest to istotne, ponieważ w procesie mechanicznego sortowania odpadów dostępne dotychczas technologie pozwalały jedynie na wysortowanie tych frakcji, które mogą zostać wychwycone przez różnego rodzaju sita.

Tymczasem zawarte w odpadach komunalnych (zwłaszcza zmieszanych odpadach komunalnych) odpady ulegające biodegradacji nie są do wychwycenia w dostępnych technologiach w taki sposób, który pozwalałby następnie je zagospodarować. W większości odpady ulegające biodegradacji gromadzą się w tzw. frakcji podsitowej. Kolejny etap procesu to przyspieszony proces biologicznego suszenia wysortowanych odpadów organicznych w reaktorze EWA (lub specjalnych kontene-

rach zakupionych i wykonanych według projektu przedsiębiorstwa). Proces suszenia zastępuje tutaj procesy kompostowania i stabilizacji tlenowej.

Ostatecznie powstaje produkt – kompost energetyczny o charakterze ekologicznym. Paliwo po procesie kompostowania w reaktorze jest stabilne biologicznie i nie wydziela nieprzyjemnych zapachów, jest bowiem pozbawione bakterii i innych mikroorganizmów. Składowaniu nie są poddawane żadne frakcje, ponieważ wszystkie produkty są wykorzystywane. Przedsięwzięcie to jest przyjazne środowisku, ponieważ:

- powstały kompost energetyczny to paliwo odnawialne zastępujące paliwa kopalniane;
- frakcja podsitowa nie jest przekazywana na składowisko, ale w całości zagospodarowywana na cele energetyczne (podstawowy efekt wdrożenia technologii) lub przekazywana do odzysku materiałowego;
- przetwarzanie odpadów w reaktorze EWA i kontenerach przebiega z minimalnymi wymaganiami zużycia energii zewnętrznej;
- podczas pracy instalacji nie powstają ani nie są używane substancje zagrażające środowisku;
- paliwa produkowane z substancji organicznych należą do paliw odnawialnych, ponieważ ich masa formowana jest w procesie fotosyntezy z wody i pochłanianego z atmosfery dwutlenku węgla, co powoduje, że ich spalanie nie przyczynia się do zwiększenia w atmosferze koncentracji cząstek CO<sub>2</sub>. Przy spalaniu tego typu paliw nie pogarsza się stan komponentu środowiska, jakim jest powietrze;
- w wyniku pracy reaktora i kontenerów nie powstaje nadmierny hałas. Z punktu widzenia klasyfikacji źródeł zanieczyszczenia powietrza chodzi o małe źródło;
- z pracującego w optymalnym trybie reaktora uchodzi tylko para wodna oczyszczana w systemie filtrów biologicznych i dwutlenek węgla; reaktor EWA jest wyposażony w filtr biologiczny z korą drzewną. Zużyta kora zostaje przetworzona w bioreaktorze.
- zastosowanie biofiltrów zapewnia dezodoryzację powietrza podprocesowego, eliminując uciążliwości zapachowe;
- produktem ubocznym pracy kontenera jest woda odciekowa, która występuje w dwóch postaciach: woda kondensacyjna i woda ekstraktowa;
- gliceryna odpadowa znajdująca się w wannie do kąpieli z ciekłym medium będzie przemieszczana w obiegu zamkniętym i okresowo uzupełniana.

Wdrożenie innowacyjnej technologii jest odpowiedzią na konieczność stopniowej zamiany paliw kopalnych na paliwa odnawialne. Kompost energetyczny pozyskiwany z odpadów komunalnych jest też tańszą alternatywą dla popularnej biomasy pochodzenia rolniczego. Materiał wykorzystywany do produkcji paliwa alternatywnego w postaci biodegradowalnych odpadów komunalnych jest powszechnie dostępny i odpowiedni dla instalacji wykorzystującej frakcję podsitową. Kolejnym pozytywnym aspektem stosowania analizowanej technologii jest ograniczenie składowania odpa-

dów, co jest obecnie ważnym trendem w krajowej gospodarce odpadami. Stosowana przez przedsiębiorstwo proekologiczna technologia jest nieszkodliwa dla środowiska naturalnego, zmniejsza koszty związane ze składowaniem odpadów, a jednocześnie zrzuca problem zagospodarowania kłopotliwej frakcji podsitowej na przedsiębiorstwo posiadające przydatną instalację do jej wykorzystania. Linia technologiczna do biologicznego przetwarzania odpadów posiada moc przerobową wynoszącą do 12 000 Mg/rok. Do przetwarzania przyjmowane są odpady o kodzie 191212.

## Podsumowanie

**W**edług idei gospodarki cyrkulacyjnej i hierarchii postępowania z odpadami, składowanie odpadów jest najgorszym sposobem ich zagospodarowania. Jedną z możliwości zmniejszenia składowania jest selektywna zbiórka odpadów. Odpady segregowane w taki sposób pozwalają na odzyskanie lepszego surowca. Kolejnym ważnym rozwiązaniem jest zakaz składowania frakcji wysokokalorycznej odpadów (od 1 stycznia 2016 r.). Zmienia się też zakres działalności Regionalnych Instalacji Przetwarzania Odpadów Komunalnych. Dlatego obecnie coraz większe znaczenie będą miały przedsiębiorstwa posiadające instalacje przetwarzające paliwa z odpadów RDF. W Polsce w latach 2015 i 2016 zauważalny był wzrost produkcji paliw alternatywnych ogółem, ponadto żaden z producentów nie zanotował spadków produkcji. Przykładowe przedsiębiorstwo omawiane w pracy reaguje na zmiany w gospodarce odpadami, starając się sprostać potrzebom rynku i wprowadzając nowe rozwiązania dotyczące postępowania z odpadami komunalnymi. Wprowadziło ono autorską metodę pozyskiwania paliwa alternatywnego w postaci kompostu energetycznego z odpadów komunalnych. Innowacyjna metoda zasługuje na uwagę ze względu na uzyskanie produktu ekologicznego i brak powstających oraz użytkowanych podczas przerobu substancji zagrażających środowisku naturalnemu. Nie powstają też znaczące zanieczyszczenia w postaci hałasu czy uciążliwości zapachowych dla otoczenia podczas procesu.

Treści artykułu dotyczą zasad zrównoważonego rozwoju będących priorytetem współczesnego systemu gospodarczego. Spośród 17 celów zrównoważonego rozwoju, postulowanych przez UNDP do 2030 r., w pracy wyróżnić można kilka celów (Sustainable development goals 2020). Cel 3. – zapewnienie wszystkim ludziom, niezależnie od wieku, zdrowego życia i dążenie do zapewnienia dobrostanu. Jednym z zadań celu 3. jest znaczące obniżenie liczby przypadków śmierci i chorób w wyniku działania niebezpiecznych substancji chemicznych oraz skażenia i zanieczyszczenia powietrza, wody i gleby. Stosowana nieszkodliwa dla środowiska technologia nie oddziałuje w negatywny sposób na żaden z komponentów środowiska, a produkt pozyskiwany z odpadów może być przykładem dążenia do spełnienia celu 3. Kolejny cel – 4. to

dobra jakość edukacji. Jednym z zadań tego celu jest: do 2030 r. zapewnić, że wszyscy uczący się nabędą wiedzę i umiejętności potrzebne do promowania zrównoważonego rozwoju, w tym, między innymi, poprzez edukację na rzecz zrównoważonego rozwoju i zrównoważonego stylu życia. Przekazywanie wiedzy o rozwiązaniach proekologicznych stosowanych przez podmioty gospodarujące odpadami oraz promowanie ich również wpisuje się w cel 4. W celu 7. zrównoważonego rozwoju – czysta i dostępna energia, należy zapewnić wszystkim ludziom dostęp do stabilnych, zrównoważonych i nowoczesnych źródeł energii w przystępnej cenie. Wśród zadań tego celu znajdują się między innymi: zapewnienie powszechnego dostępu do nowoczesnych, niezawodnych, przystępnych cenowo usług energetycznych. Do 2030 r. należy znacząco zwiększyć udział odnawialnych źródeł energii w globalnym miksie energetycznym. Paliwo w postaci kompostu energetycznego pozyskiwane z odpadów komunalnych jest paliwem alternatywnym wykorzystywanym w przemyśle. Może ono zastępować w niektórych przedsiębiorstwach paliwa pozyskiwane ze źródeł nieodnawialnych. Przechodzenie na tego typu rozwiązania energetyczne wpisuje się również w cel 12. Mówi on o wypracowywaniu zrównoważonych modeli konsumpcji i produkcji. Do zadań do 2030 r. należą zapewnienie przyjaznego dla środowiska zarządzania chemikaliami i wszystkimi odpadami, zgodnie z ustaleniami międzynarodowymi, oraz znaczące zmniejszenie ich emisji w powietrzu, wodzie i glebie, w ten sposób minimalizując negatywny wpływ na ludzkie życie i środowisko.

## Literatura

- LEWANDOWSKI W. i RYMS M. 2013. *Biopaliwa. Proekologiczne odnawialne źródła energii*. Wydawnictwo WNT, Warszawa, s. 338–341.
- MOKRZYCKI E. i ULIASZ-BOCHEŃCZYK A. 2009. *Alternative fuels Derived From Waste for The Cement Industry*. Wydawnictwo IGSMiE PAN, Kraków.
- Dokumenty i materiały udostępnione przez przedsiębiorstwo**
- GUS 2020. [Online] <https://bdl.stat.gov.pl/BDL/metadane/podgrupy/223?back=True> [Dostęp: 10.08.2020].
- [Online] <http://stat.gov.pl/obszary-tematyczne/srodowisko-energia/srodowisko/zmiana-systemu-gospodarki-odpadami-komunalnymi-w-polsce-w-latach-2012-2016,6,1.html> [Dostęp: 20.06.2019].
- Internetowa Baza Danych o Odpadach; [Online] [http://ibdo.pl/?page\\_id=771](http://ibdo.pl/?page_id=771) [Dostęp: 03.05.2018].
- Plan Gospodarki Odpadami, 2014 UCHWAŁA Nr 217 RADY MINISTRÓW z dnia 24 grudnia 2010 r. w sprawie „Krajowego planu gospodarki odpadami 2014”.
- Refuse Derived Fuel. Current Practice and Perspectives Final Report* 2003. European Commission Directorate. General Environment. (B4 3040/2000/306517/MAR/E3).
- Rozporządzenie Ministra Środowiska z dnia 9 grudnia 2014 r. w sprawie katalogu odpadów. Stat.gov.pl 2019.
- Sustainable Development Goals <https://ungc.org.pl/sdg/sustainable-developoment-goals/> [Dostęp: 09.08.2020].
- Ustawa z dnia 20 lipca 2018 r. o zmianie ustawy o odpadach oraz niektórych innych ustaw weszła w życie dnia 5 września 2018 roku, Dz.U. 2018/poz. 1592.

## Innowacyjna i ekoenergetyczna oczyszczalnia ścieków – projekt technologiczny dla miejskich oczyszczalni komunalnych

**STRESZCZENIE:** Publikacja przedstawia koncepcję innowacyjnej technologii oczyszczalni ścieków, która dzięki nowatorskiej konfiguracji systemu energetycznego oraz dzięki nowoczesnym i wysokosprawnym energetycznie i środowiskowo urządzeniom wykorzystuje energetycznie odpad procesu fermentacji – biogaz. Zastosowano generator skojarzonej produkcji energii elektrycznej i ciepłej oparty na specjalnej konstrukcji silnika gazowego 4-suwowego przystosowanego do zasilania metanem uzyskiwanym z procesu fermentacji ścieków. Ponadto, ciepło odpadowe z generatora wykorzystano do całkowitego odwodnienia osadów ściekowych, które zamiast tradycyjnego uciążliwego odpadu przetwarzają się w oczyszczalni ścieków na wartościowe paliwo stale potencjalnie spalane energetycznie w elektrociepłowni np. węglowej, ze względu na wysoką, porównywalną z węglem 3.–4. klasy jakość energetyczną. Publikacja przedstawia koncepcję technologii innowacyjnej oczyszczalni, a analizy poparte są bilansami energetycznymi. Autor przeprowadził także analizy ekonomiczne kosztów zakupu energii i redukcji tych kosztów w wyniku modernizacji procesu oczyszczania ścieków. Autor dowodzi, iż dzięki eliminacji paliw kopalnych, koniecznych do zasilania tradycyjnej oczyszczalni, uzyskuje się znaczną redukcję kosztów zakupu energii powyżej 80% w skali roku. Niewątpliwym jest także efekt ekologiczny, jakim jest całkowita eliminacja spalania gazu ziemnego, a także znaczna redukcja zużycia prądu, co w polskich warunkach redukuje spalanie węgla w elektrociepłowniach. Niniejsza publikacja jest zgodna z szeregiem celów zrównoważonego rozwoju, bezpośrednio odnosi się do celu 7. „Zapewnić wszystkim dostęp do źródeł stabilnej, zrównoważonej i nowoczesnej energii po przystępnej cenie”. Innowacyjna technologia oczyszczalni ścieków pozwala na odzyskanie energii z procesu transformacji osadów w postaci ciepłej i elektrycznej, a także produkcji paliwa stałego stanowiącego substytut węgla w energetyce zawodowej.

**SŁOWA KLUCZOWE:** gospodarka obiegowa, przemysł energetyczny, środowisko naturalne

---

<sup>1</sup> Dr inż, AGH Akademia Górniczo-Hutnicza, Wydział Zarządzania, Kraków, Polska.

## Innovative and eco-energy wastewater treatment plant – technological project for municipal wastewater treatment plants

**ABSTRACT:** The publication presents the concept of an innovative technology of a wastewater treatment plant, which, thanks to the innovative configuration of the energy system as well as modern and highly energy and environmentally efficient devices, uses productively the waste of the fermentation process - biogas. A generator of combined production of electricity and heat was used, based on a special construction of a 4-stroke gas engine adapted to be powered by methane obtained from the wastewater fermentation process.

In addition, the waste heat from the generator was used for the complete dewatering of sewage sludge, which instead of the traditional troublesome waste is transformed in the sewage treatment plant into valuable solid fuel potentially burned for energy in a combined heat and power plant, e.g. coal-fired due to the high energy quality of 3–4 classes, comparable to coal.

The author presents the concept of an innovative sewage treatment plant technology and supports its analysis with energy balances. The economic analyzes of the costs of energy purchase and the reduction of these costs as a result of the modernization of the wastewater treatment process is presented.

The author proves that thanks to the elimination of fossil fuels necessary to power supply a traditional sewage treatment plant, a significant reduction in energy purchase costs of over 80% per year is achieved.

Undoubtedly, the ecological effect is the complete elimination of natural gas combustion, as well as a significant reduction in electricity consumption, which in Polish conditions reduces coal combustion in combined heat and power plants. This publication topic is consistent with of Sustainable Development Goals but directly relates to Goal 7: "Ensure access to sources of stable, sustainable and modern energy at affordable prices for all". The innovative technology of the sewage treatment plant allows the recovery of energy from the sludge transformation process in the form of heat and electricity, as well as the production of solid fuel, which is a substitute for coal in the power industry.

**KEYWORDS:** circular economy, energy industry, environment

### 1. Wprowadzenie

Oczyszczalnia ścieków, w dobie aktualnych wymagań środowiskowych, jest koniecznym elementem infrastruktury komunalnej. Zbiera odpady ciekłe wytwarzane przez każdy obiekt, w którym przebywają ludzie, tj. gospodarstwa domowe, obiekty usługowe, produkcyjne i rolne. Oczyszczalnie przejmują wszystkie odpady w postaci ciekłej, usuwane kanalizacją ściekową. Woda jest zazwyczaj silnie zanieczyszczona toksycznymi substancjami, głównie produktami pochodnymi przemiany materii, środkami czystości stosowanymi w gospodarstwie domowym i ściekami przemysłowymi. Zadaniem oczyszczalni jest separacja wody i zanieczyszczeń; czystą wodę wprowadza się z powrotem do środowiska, a zanieczyszczenia w postaci suchej masy mogą być poddane procesom odzysku pierwiastków chemicznych i energii, czyli recyklingu. Środowiskową jakość procesów technologicznych oczyszczalni warunkuje czystość rzek, do których wprowadzane są masy odzyskanej czystej wody, drugim elementem jakości jest skład chemiczny osadów oraz poziom ich odwodnienia.

Jak wskazuje M. Gromiec, wprowadzony w 2012 r. nowy paradygmat „NEW” (Nutriety–Energia–Woda) związany jest z odzyskiem substancji biogenych, energii i wody ze ścieków i osadów ściekowych. W konsekwencji oczyszczalnie, działające według tradycyjnego paradygmatu, jakim jest oczyszczanie ścieków, opartego na istniejących przepisach prawnych, zaczynają przekształcać się w zakłady produkcji odzyskiwanych zasobów, w tym produkujących wodę ze ścieków, wodór, bioplastiki i substancje biogenne, szczególnie fosfor. Celem staje się nie tylko zgodna z przepisami poprawa środowiska, ale również generowanie zysków i wynikające z tego korzyści społeczne (Gromiec 2018).

## 2. Ścieki komunalne i ich charakterystyka

**M**iejskie ścieki komunalne powstają głównie w gospodarstwach domowych, ponadto w obiektach komunalnych, usługowych, handlowych oraz produkcyjnych. W konsekwencji ścieki komunalne każdego miasta mają swoją charakterystykę, różniąc się głównie:

- wielkością,
- zawartością wody,
- zmiennością przepływu,
- składem chemicznym,
- aktywnością chemiczną i biologiczną,
- składem w funkcji czasu.

Ścieki odprowadzane są do sieci kanalizacyjnej. Miasta nieposiadające oczyszczalni ścieków odprowadzają ścieki do rzek, zbiorników wodnych, czy morza, w zależności od lokalizacji. Wyniki badań ścieków przeprowadzone przez zespoły w różnych krajach zestawiono w ujęciu tabelarycznym, grupując je w zależności od poziomu koncentracji poszczególnych składników i przypisując im klasy: niską, średnią oraz wysoką, jak przedstawiono w tabeli 1.

Ścieki komunalne charakteryzują się wysoką szkodliwością dla gleby, rzek czy zbiorników wodnych, degradując życie biologiczne i czyniąc wodę niezdatną do konsumpcji. Całkowite straty wywołane zanieczyszczeniem rzek ściekami komunalnymi nie ograniczają się do omawianych powyżej: rzeki nie mogą być wykorzystywane jako ujęcia wody pitnej czy nawadniania, trudne do wyceny są utracone walory rekreacyjne i estetyczne. Konieczna jest redukcja zarówno wielkości, jak i szkodliwości ścieków komunalnych wprowadzanych do środowiska poprzez ich dezaktywację i przetwarzanie w oczyszczalniach ścieków.

Obecnie w oczyszczalniach miejskich stosuje się systemy oparte na procesie fermentacji bakteryjnej ścieków. Najkorzystniejszym środowiskowo rozwiązaniem jest prowadzenie fermentacji w zamkniętych zbiornikach, co eliminuje emisje gazowych produktów fermentacji, głównie metanu, który jest z jednej strony gazem cieplarnianym, z drugiej stanowić może cenne paliwo wykorzystywane w procesie technologicznym oczyszczalni. W tabeli 2 przedstawiono typowe wartości cechujące ścieki, w zestawieniu z produktami fermentacji w krajowych oczyszczalniach ścieków.

Część 2. Energia ze źródeł pierwotnych i wtórnych

Tabela 1. Wyniki badań składu ścieków w badaniach międzynarodowych

| Parametr           | Jednostka    | Przedział wartości     | Limity (Niemcy)<br>zastosowania w rolnictwie |
|--------------------|--------------|------------------------|--|
| Woda               | % /s.s./     | 65-75                  | -  |
| Popiół             | % s.m.       | 30-50                  | -  |
| Wartość kaloryczna | MJ/kg /s.s./ | 1-2 (10-12 przy 85% DM | -  |
| Węgiel             | % daf        | 33-50                  | -  |
| Wodór              | % daf        | 3-4                    | -  |
| Azot               | % daf        | 2-6                    | -  |
| Siarka             | % daf        | 0,5-5,5                | -  |
| Chlor              | % s.m.       | 0,05-0,5               | -  |
| Fosfor             | % s.m.       | 0,2-5,5                | -  |
| Ołów               | mg/kg s.m.   | 95-155                 | 150  |
| Kadm               | mg/kg s.m.   | 2,6-7                  | 1,5  |
| Rtęć               | mg/kg s.m.   | 0,4-4                  | 1  |

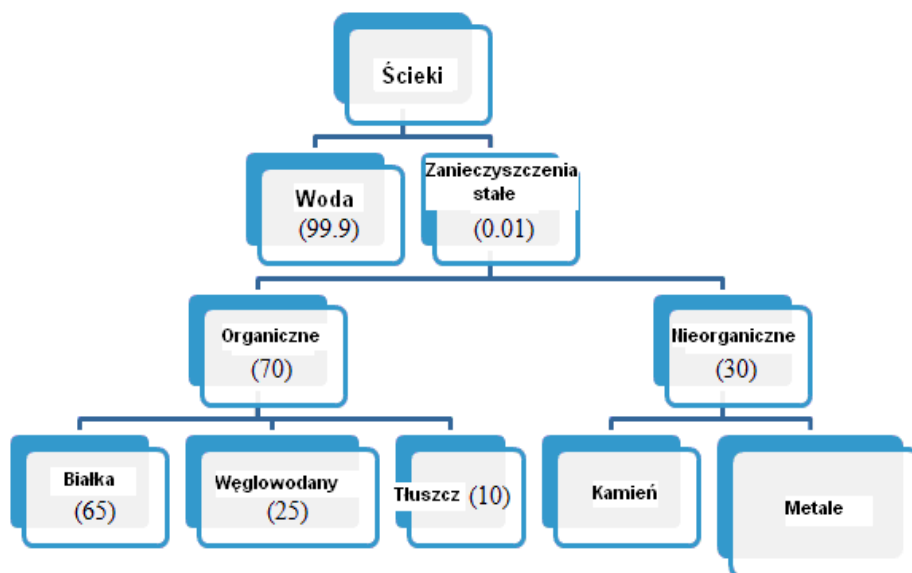
Legenda: s.s. – ścieki surowe, s.m. – sucha masa, daf – sucha masa i bez popiołu  
Źródło: Schnell i in. 2020.

Tabela 2. Wyniki badań składu ścieków oraz produktów technologii oczyszczalni ścieków w badaniach krajowych

| Lp. | Metal ciężki                       | Średnia zawartość | Odchylenie standardowe | Mediana | Min    | Max    |
|-----|------------------------------------|-------------------|------------------------|---------|--------|--------|
| 1.  | Odczyn w roztworze wodnym [% s.m.] | 6,64              | 0,26                   | 6,68    | 6,21   | 6,89   |
| 2.  | Sucha masa [% s.m.]                | 41,03             | 11,72                  | 42,89   | 24,20  | 53,69  |
| 3.  | Substancja organiczna [% s.m.]     | 55,83             | 5,57                   | 55,36   | 49,36  | 63,15  |
| 4.  | Azot ogólny [% s.m.]               | 3,89              | 0,20                   | 4,00    | 3,60   | 4,08   |
| 5.  | Azot amonowy [% s.m.]              | 0,36              | 0,05                   | 0,38    | 0,29   | 0,42   |
| 6.  | Fosfor ogólny [% s.m.]             | 0,46              | 0,14                   | 0,48    | 0,27   | 0,65   |
| 7.  | Wapń [% s.m.]                      | 1,66              | 0,33                   | 1,72    | 1,20   | 2,01   |
| 8.  | Magnez [% s.m.]                    | 0,61              | 0,11                   | 0,58    | 0,46   | 0,75   |
| 9.  | Ołów [mg/kg s.m.]                  | 11,85             | 2,32                   | 11,92   | 8,88   | 14,85  |
| 10. | Kadm [mg/kg s.m.]                  | 1,17              | 0,47                   | 0,98    | 0,77   | 1,96   |
| 11. | Nikiel [mg/kg s.m.]                | 16,12             | 4,41                   | 14,78   | 11,48  | 22,46  |
| 12. | Cynk [mg/kg s.m.]                  | 708,75            | 181,23                 | 621,50  | 558,5  | 987,25 |
| 13. | Miedź [mg/kg s.m.]                 | 126,57            | 20,35                  | 121,24  | 107,69 | 160,36 |
| 14. | Chrom ogólny [mg/kg s.m.]          | 23,82             | 6,64                   | 22,31   | 7,48   | 34,35  |

Źródło: Milik i in. 2016.





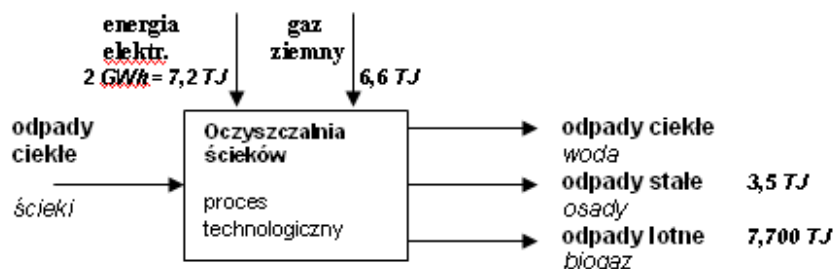
Rysunek 1. Typowy skład ścieków do przetwarzania w oczyszczalni [%]  
Źródło: McCarty i in. 2011

### 3. Gospodarka energią w procesie technologicznym oczyszczalni ścieków

Oczyszczalnię zasila strumień ścieków, które podlegają przetwarzaniu w procesie ich dezaktywacji oraz zmniejszenia masy szkodliwych produktów procesu przetwarzania ścieków wprowadzanych do środowiska. Produktem oczyszczalni są także odpady, jednak charakteryzujące się odmienną od pierwotnego strumienia ścieków postacią fizyczną i chemiczną oraz innymi właściwościami oddziaływania na środowisko.

#### 3.1. Oczyszczalnia ścieków otwartego obiegu

Instalacja technologiczna oczyszczalni przetwarza ścieki na trzy główne rodzaje produktów finalnych stanowiących odpady: wodę, osady oraz gaz pofermentacyjny, które wprowadzone bezpośrednio do środowiska charakteryzują się określoną uciążliwością. Proces technologiczny przetwarzania ścieków komunalnych można przedstawić za pomocą uproszczonego schemat (rys. 2).



Rys. 2. Bilans nośników energii i materii w oczyszczalni ścieków otwartego obiegu  
Źródło: opracowanie własne, obliczenia własne

W oczyszczalni obiegu otwartego biogaz pofermentacyjny trafia wprost do powietrza, co rozpoznać można po specyficznym odorze w otoczeniu oczyszczalni. Oczywiście takie rozwiązania nie mogą być rekomendowane, a niniejsza publikacja omawia alternatywne postulowane technologie prośrodowiskowe. Osady produkowane w dużych ilościach wymagają zagospodarowania, czyli zajęcia określonej przestrzeni, ponadto ze względu na skład chemiczny cechują się szkodliwością dla środowiska, w szczególności w wyniku przenikania do wód gruntowych zawartych w nim pierwiastków (tab. 1). Odpad lotny stanowiący gaz pofermentacyjny cechuje także szkodliwość dla środowiska, związana zasadniczo ze względnie wysoką zawartością metanu, uznanego za gaz cieplarniany o wysokiej aktywności. Woda niewątpliwie stanowiąca największy ilościowo odpad procesu jest odpadem o najniższym stopniu uciążliwości. Spełniająca normy czystości może być kierowana do środowiska (rzeka), może być traktowana jako odpad neutralnego oddziaływania na środowisko. Jeśli woda jest zagospodarowywana, może być traktowana jako produkt.

Niniejszy rozdział poświęcono zagadnieniu energetycznego wykorzystania produktów oczyszczalni ścieków; zarówno biogazu, jak i osuszonych osadów. Do opisu problemu wykorzystano wielkości charakterystyczne dla typowej oczyszczalni ścieków miasta wielkości rzędu 40 tys. mieszkańców. W pracy wykorzystano rzeczywiste dane uzyskane z pomiarów i badań przeprowadzonych pod kierunkiem autora w konkretnej oczyszczalni ścieków zlokalizowanej w południowej Polsce.

### 3.2. Oczyszczalnia jako odbiorca energii elektrycznej i ciepłej

Część oczyszczalni ścieków w Europie jest w całości zasilana w energię i paliwo z sieci zewnętrznych. Mimo dostępności nowoczesnych technologii, takie oczyszczalnie są niestety nadal projektowane i budowane. Jak dowodzą przeprowadzone bi-

lanse materii i energii procesu technologicznego, wyżej wspomniane rodzaje oczyszczalni charakteryzuje silnie ujemny bilans energetyczny, ponieważ konieczne jest zasilanie procesu znaczną ilością energii elektrycznej i ciepłej/zasilanie przez sieć ciepłą lub gazem ziemnym. W omawianej oczyszczalni miejskiej w mieście o populacji 40 tys., zlokalizowanej w południowej Polsce, zanotowano zapotrzebowanie na energię elektryczną ok. 2000 MWh w skali roku\*.

Przyjmując cenę energii elektrycznej w Polsce ok. 1 zł z VAT za 1 kWh, roczne koszty zakupu prądu w okresie eksploatacji wynoszą ok. 2 mln zł. Zapotrzebowanie na energię ciepłą realizowane jest zwykle poprzez przyłączenie do sieci ciepłej lub gazowej. W omawianej oczyszczalni opalanej gazem ziemnym roczne zużycie paliwa w procesie wynosi ok. 180 tys. m<sup>3</sup> w skali roku. Przyjmując cenę gazu 2 zł/m<sup>3</sup> z VAT, otrzymujemy roczny koszt zakupu gazu ziemnego w wysokości 360 tys. zł. Zakładając, iż system energetyczny oczyszczalni nie posiada urządzeń odzysku energii procesu, a korzysta jedynie z zasilania zewnętrznego, konieczny jest zakup dużych ilości nośników energii elektrycznej i gazu ziemnego z sieci. Roczne koszty zakupu prądu i gazu szacuje się łącznie na ok. 2 mln 360 tys. zł brutto.

### 3.3. Ocena potencjału energetycznego produktów odpadowych oczyszczalni

Głównym celem dalszych analiz jest gospodarcze zagospodarowanie odpadów, ograniczając zakres badań do wykorzystania energetycznego. W procesie technologicznym oczyszczalni powstają dwa duże strumienie odpadów energetycznych:

- biogaz z fermentacji ścieków,
- osady o postaci stałej.

Jak wynika z bilansu materii i energii, proces prowadzony w oczyszczalni charakteryzuje silnie ujemny bilans energetyczny, ponieważ konieczne jest zasilanie procesu znaczną ilością energii elektrycznej i gazem ziemnym, jak przedstawiono w tabeli 4.

Przedstawione w tabeli 4 dane wymagają weryfikacji oraz korekty ze względu na okresowe wyłączenie części urządzeń związane z pracami konserwacyjnymi i remontowymi, w szczególności malowania zbiorników. Dalsze analizy prowadzone będą na wielkościach rocznych szacowanych przez autora publikacji.

W wyniku analizy danych oczyszczalni zakłada się, że produkcja biogazu szacuje się na 300 tys. m<sup>3</sup> rocznie. Zakłada się w publikacji, że biogaz zostanie docelowo wykorzystany jako paliwo gazowe do produkcji ciepła w kotłach albo do produkcji ciepła i prądu w generatorze. Osady po przetworzeniu mogą być używane jako paliwo stałe, spalane energetycznie w kotłach ciepłowni lub elektrociepłowni.

\* Badania i obliczenia wykonano w roku 2020, a poziom cen odnosi się do lipca 2020.

Tabela 4. Gospodarka energią w oczyszczalni ścieków

| Miesiąc 2018 | Produkcja [tys. m <sup>3</sup> ] | Zużycie własne tys. [m <sup>3</sup> ] | Zakup gazu tys. [m <sup>3</sup> ] | Zużycie energii elektrycznej [MWh] |
|--------------|----------------------------------|---------------------------------------|-----------------------------------|------------------------------------|
| Styczeń      | 31,8                             | 36,5                                  | 0,3                               | 169,9                              |
| Luty         | 23,6                             | 28,6                                  | 0,13                              | 167,8                              |
| Marzec       | 28,3                             | 32,2                                  |                                   | 187,6                              |
| Kwiecień     | 28,0                             | 25,6                                  |                                   | 181,7                              |
| Maj          | 28,1                             | 18,4                                  |                                   | 164,7                              |
| Czerwiec     | 26,3                             | 16,0                                  |                                   | 150,0                              |
| Lipiec       | 25,3                             | 16,8                                  |                                   | 156,0                              |
| Sierpień     | 7,9                              | 0,4 (malowanie)                       | 5,7                               | 156,9                              |
| Wrzesień     | 9,5                              | 0,4 (malowanie)                       | 7,2                               | 145,0                              |
| Październik  | 31,2                             | 27,7                                  |                                   | 169,0                              |
| Listopad     | 33,0                             | 35,6                                  |                                   | 167,0                              |
| Grudzień (*) | 32,0(*)                          | 36,0 (*)                              | 0,3 (*)                           | 168,0 (*)                          |

grudzień (\*) – brak danych z monitoringu /wartości w tabeli obliczono (M. Drożdż).

Źródło: opracowanie własne na podstawie danych uzyskanych z monitoringu i ewidencji księgowej oczyszczalni.

Omawiane nośniki energii, czyli biogaz z fermentacji osadów oraz przetworzone osady, mogą zostać spalone w instalacjach energetycznych, przez co ulegną degradacji, a jednocześnie spełnią rolę substytutów paliw kopalnych. Docelowo odwodnione osady mogą stanowić substytut węgla, natomiast gaz pofermentacyjny stanowić może substytut gazu ziemnego. W ramach badań opracowano alternatywne koncepcje energetycznego wykorzystania biogazu oraz osadów oczyszczalni ścieków i do tego celu wykonano przez zespół Klubu Wynalazców Kraków laboratoryjne badania ich składu chemicznego oraz kaloryczności.

### 3.4. Badania osadów oczyszczalni ścieków

Przeprowadzone przez autora badania laboratoryjne osadów przedstawiono w tabelach 5 oraz 6 jako wartości uśrednione (poszczególne wyniki badań nie odbiegają od wartości średnich o 5%, maksymalnie 10%). Wyniki badań fizyko-chemicznych osadów podano w tabeli 5. Zauważyć należy wysoki poziom uwodnienia osadów na poziomie 81,6%, które determinuje technologię potencjalnego ich energetyczne-

go wykorzystania. Pozbawienie osadów wody wymaga znacznych ilości energii, co uwzględniono przy opracowaniu koncepcji zmodernizowanej oczyszczalni ścieków w innowacyjnej technologii.

**Tabela 5. Badania podstawowych parametrów fizyko-chemicznych osadów oczyszczalni ścieków**

| Charakterystyka osadów  | Wyniki badań osadów oczyszczalni ścieków      |
|---|---|
| Wilgotność względna   | 81,6%   |
| Zawartość w suchej masie  | pH w H <sub>2</sub> O – 6,6<br>pH w KCl – 6,5 |
| /PEW – przewodność elektryczna właściwa – determinuje ilość soli/ | PEW – 5,1 mS/cm                               |
|   | NO – 4,46%                                    |
|   | CO – 21,48%                                   |
|   | SO – 0,877%                                   |
| Ciężar objętościowy (waga 1 cm <sup>3</sup> odpadów)              | Y0 – 0,88                                     |

Źródło: badania własne autora.

Tabela 6 wskazuje na istotny potencjał różnych pierwiastków w osadach, które stanowią zagrożenie dla środowiska, jak np. rtęć, czy ołów. Spalanie osadów umożliwia odzyskanie tych pierwiastków, które można traktować jako cenne surowce w przemyśle surowcowym.

**Tabela 6. Zawartość całkowita pierwiastków (ppm = mg/kg)**

| Pierwiastek | Na    | Mg    | K     | Ca     | Cr   | Mn  | Fe   | Ni   | Cu   | Zn  | Sr  | Cd  | Pb   | Hg   |
|-------------|-------|-------|-------|--------|------|-----|------|------|------|-----|-----|-----|------|------|
| ppm         | 1 885 | 4 336 | 2 834 | 13 720 | 26,4 | 406 | 8240 | 15,8 | 95,5 | 427 | 9,0 | 3,2 | 32,4 | 1,67 |

Źródło: badania własne autora.

### 3.5. Badania składu chemicznego i energii biogazu oczyszczalni ścieków

Przeprowadzone analizy chemiczne i energetyczne biogazu procesu fermentacji osadów dowodzą względnie stabilnych parametrów składu gazu, o wartościach przedstawionych poniżej:

- około 67% CH<sub>4</sub>,
- około 30% CO<sub>2</sub>,
- około 1–2% H<sub>2</sub>S.

Przedstawione wyniki wskazują dobrą jakość energetyczną biogazu, porównywalną z jakością gazu ziemnego. Dla porównania zawartość metanu ( $\text{CH}_4$ ) w gazie ziemnym wynosi od 82–93%.

#### *Badania energetyczne biogazu*

Autor przeprowadził badania energetyczne biogazu produkowanego w oczyszczalni ścieków, celem oceny możliwości jego zagospodarowania jako paliwa gazowego. Wartość opałowa gazu wynosi około  $5500 \text{ kcal/m}^3$ . Jakość wytwarzanego gazu jest porównywalna jako paliwa do spalania z jakością gazu ziemnego, która jest przyjmowana standardowo ok.  $9000 \text{ kcal/m}^3$ . Zauważyć należy niższą energetyczną jakością biogazu w stosunku do gazu ziemnego, energia zawarta w jednostce produkowanego biogazu stanowi 61% energii zawartej w gazie ziemnym.

#### *Badania energetyczne osadów*

Badania energetyczne przeprowadzono spalając próbkę w warunkach laboratoryjnych. Wcześniej próba została poddana procesowi suszenia w temperaturze  $90^\circ\text{C}$ . Właściwie dobrane tempo procesu suszenia miało na celu zapobieżenie zmianom właściwości energetycznych próby. Otrzymano następujące wyniki badań (tab. 7):

**Tabela 7. Wyniki badań energetycznych osadów oczyszczalni ścieków**

| Parametry energetyczne osadów                           | Wartość badana próbki           |
|---|---------------------------------|
| Zawartość wilgoci w próbce                              | $W_t^r = 80,5\%$                |
| Zawartość popiołu w suchej masie                        | $A^d = 34,1\%$                  |
| Zawartość popiołu w przeliczeniu na stan roboczy próbki | $A^r = 6,6\%$                   |
| Ciepło spalania   | $Q_s^d = 13\,279 \text{ MJ/kg}$ |
| Wartość opałowa   | $Q_i^d = 12\,485 \text{ MJ/kg}$ |
| Wartość opałowa w przeliczeniu na stan roboczy próbki   | $Q_i^r = 2\,435 \text{ MJ/kg}$  |

Źródło: badania własne autora.

#### *Energia osadów oczyszczalni ścieków*

Wielkość odpadów oczyszczalni ścieków szacuje się obecnie na poziomie około  $7000 \text{ Mg}$  rocznie. Zakładając wilgotność odpadów na poziomie 80%, szacuje się, iż w odpadach zawarte jest około  $1400 \text{ Mg}$  suchej masy.

Wartość opałowa odpadów (w suchej masie) wynosi (patrz tab. 7):

$$Q_i^d = 12,485 \text{ MJ/kg, co jest równoważne.}$$

Obliczenie wartości opałowej suchej masy odpadów w ujęciu rocznym:

$$1\,400\,000 \text{ kg/rok} \cdot 3,47 \text{ kWh/kg} = 485\,800 \text{ kWh/rok} = 4858 \text{ MWh/rok} = \\ = 17\,474,8 \text{ GJ/rok}$$

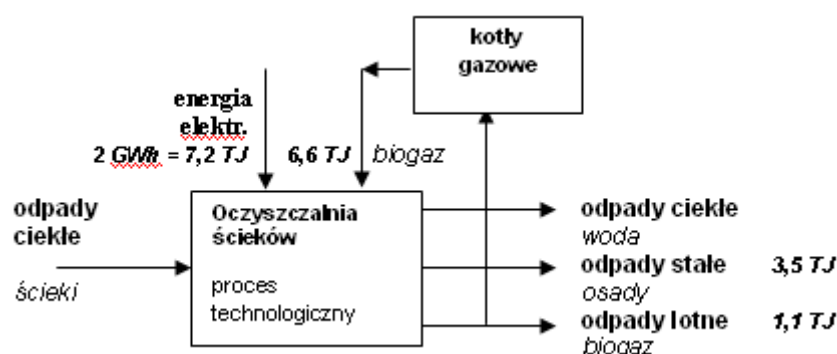
### 3.6. Energetyczne wykorzystanie odpadów w procesie technologicznym oczyszczalni ścieków

W dalszych analizach założono, że celem konwersji jest przetworzenie odpadów na produkty energetyczne. Wysoka wartość opałowa biogazu z fermentacji oraz osadów stałych pozwala na energetyczne wykorzystanie odpadów. Przedstawiono koncepcję pełnego wykorzystania w oparciu o następujące technologie:

1. Energetyczne spalanie biogazu
  - Kotły na biogaz – produkcja ciepła,
  - Silnik na biogaz – produkcja ciepła i prądu;
2. Osuszanie osadów – produkcja paliwa stałego
  - Kotły na biogaz – produkcja ciepła.

Oczyszczalnia wymaga zasilania w ciepło technologiczne do ogrzewania zbiorników fermentacyjnych w stałej temperaturze 35°C. Do ogrzewania można stosować kotły gazowe opalane gazem ziemnym przystosowane do spalania biogazu. Produkowany w oczyszczalni biogaz stanowi dobry substytut gazu ziemnego i może praktycznie w całości go substytuować, co poprawia w sposób zasadniczy bilans energii oczyszczalni. Zapotrzebowanie roczne oczyszczalni na gaz ziemny na potrzeby cieplne procesu wynosi 180 tys. m<sup>3</sup>, co odpowiada ok. 300 tys. m<sup>3</sup> biogazu uwzględniając jego niższą kaloryczność. Poziom produkcji własnej biogazu w oczyszczalni na poziomie 350 tys. m<sup>3</sup> zapewnia możliwość substytucji gazu ziemnego z nadwyżką 50 tys m<sup>3</sup> biogazu.

Zastosowanie omawianej technologii umożliwi całkowitą substytucję gazu ziemnego i redukcję kosztów energii o 360 tys. zł. Redukcja kosztów zakupu gazu sieciowego wyniesie ponad 15%. Niewątpliwie pozytywny jest efekt ekologiczny procesu, w którym wyeliminowano spalanie 300 tys. m<sup>3</sup> gazu ziemnego. Zauważyć należy,



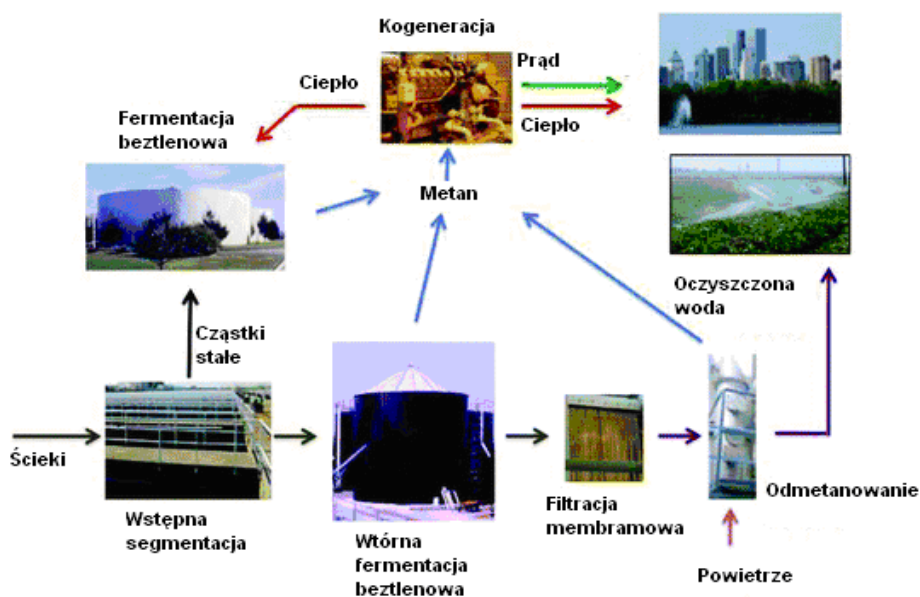
Rysunek 3. Bilans nośników energii materii w oczyszczalni ścieków z kotłami na biogaz

Źródło: Koncepcja technologii oraz obliczenia własne autora

iż nadmiar około 50 tys m<sup>3</sup> biogazu nie został produkcyjnie wykorzystany i jest bezproduktywnie spalany na tzw. świeczce, ten potencjał zostanie uwzględniony w kolejnych koncepcjach modernizacji przedstawionych w niniejszej publikacji.

#### 4. Generator na biogaz – silnik gazowy 4-suwowy do produkcji ciepła i prądu

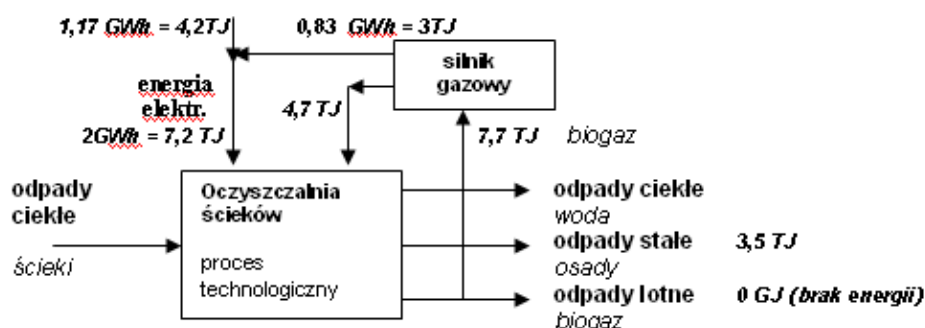
Technologią w optymalnym stopniu wykorzystującą energię biogazu i wpływającą najbardziej korzystnie na bilans energetyczny oczyszczalni jest system produkcji skojarzonej prądu i ciepła przy zastosowaniu generatora elektrycznego sprzężonego z silnikiem 4-suwowym zasilanym biogazem, jak pokazano na rysunku 4 oraz na rysunku 5 (bilans przepływu energii oczyszczalni z kogeneracją).



Rysunek 4. Schemat modelowej oczyszczalni ścieków z kogeneracją ciepła i prądu  
Źródło: McCarty i in. 2011

Zastosowanie silnika gazowego powoduje pełne wykorzystanie biogazu. Ponieważ jednak część jego energii chemicznej podlega transformacji na energię elektryczną występuje w oczyszczalni deficyt ciepła na poziomie około 1,9 TWh. Jednocześnie zauważyć należy, iż produkowana energia elektryczna jest energią o wyższej jakości niż zredukowana energia cieplna.





Rysunek 5. Bilans nośników energii materii w oczyszczalni ścieków z silnikiem na biogaz  
Źródło: Koncepcja technologii oraz obliczenia własne

W koncepcji założono ocieplenie zbiorników fermentacyjnych warstwą izolacji styropianowej zapewniającej redukcję strat energetycznych o ponad 2 MWh rocznie. Obliczono, że silnik wyprodukuje 0,83 GWh energii elektrycznej w skali roku, co umożliwi redukcję zakupu energii elektrycznej z sieci do ilości 1,17 GWh i wartości 1,17 mln zł brutto. Uwzględniając całkowitą redukcję kosztów zakupu energii cieplnej (gaz ziemny) i elektrycznej, otrzymujemy oszczędność zakupu 1,53 mln zł brutto w skali roku. Stanowi to ponad 65% redukcji całkowitych kosztów energii oczyszczalni (obliczenia własne autora).

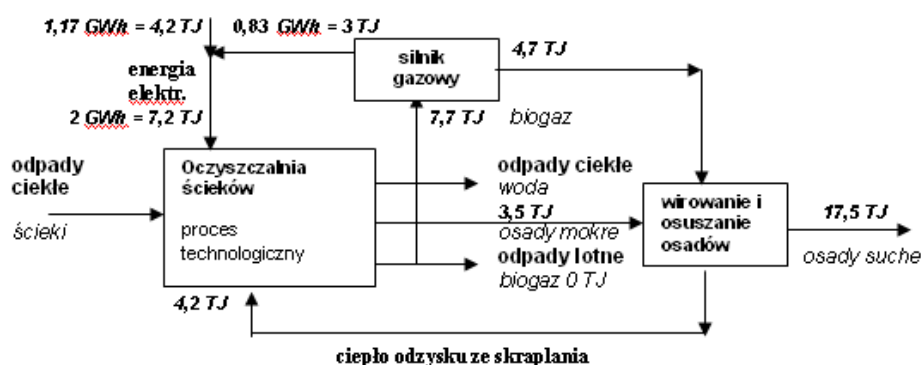
## 5. Technologia oczyszczalni z osuszaniem przetworzonych osadów – produkcja paliwa stałego

Koncepcja technologii została przedstawiona na schemacie (rys. 6). Proces wykorzystuje osady oczyszczalni ścieków w pierwotnej postaci stanowiące typowy odpad. Przeprowadzone analizy składu chemicznego i kaloryczności wskazują na możliwość łatwego ich przetworzenia na paliwo stałe o jakości porównywalnej z węglem. Osady charakteryzują się wysoką zawartością wody, rzędu 80%. Koncepcja zakłada eliminację wody z masy osadów poprzez odwirowanie do ok. 20–25% wody, a następnie osuszanie ciepłem produkowanym przez generator gazowy. Przy sprawności mechanicznej wirowania osadów uwodnionych z zawartości 80% wody do zawartości 25% pozostaje w osadach ok. 1750 ton wody do eliminacji termicznej.

Wytwarzane przez silnik-generator ciepło w ilości 4,7 TJ (dokładnie 4,66 TJ) zapewnia wygrzewanie i odparowanie 1750 Mg osadów o uwodnieniu 25%, zakładając sprawność procesu odparowania 90%, do którego przy sprawności 100% niezbędne

jest ok. 4,2 TJ, a w procesie ogrzewania eliminację poprzez odparowanie wody, uwzględniając ciepło parowania wody 2256 kJ/kg (przy ciśnieniu atmosferycznym tj. 1013 Mbar) (obliczenia własne autora).

Jeśli przetwarzaniu podlega 7000 ton osadów o uwodnieniu 80%, to oznacza, że zawierają 5600 ton wody i 1400 ton suchej masy. Jeśli odwirujemy osady do poziomu 20% wody, to uzyskamy 1750 ton osadów o zawartości 20% wody. Jeśli odwirujemy osady do poziomu 25% wody, to uzyskamy 1866,6 ton osadów o zawartości 25% wody. Przyjmujemy uśrednioną zawartość wody do odparowania na poziomie 1800 ton (obliczenia własne autora).



Rysunek 6. Bilans nośników energii i materii w oczyszczalni ścieków z silnikiem na biogaz  
Źródło: Koncepcja technologii oraz obliczenia własne

Proces suszenia osadów wykorzystuje ciepło silnika gazowego, para z osadów jest kierowana do skraplania na zbiorniki fermentacyjne, gdzie oddaje ciepło skraplania. Zakłada się ok. 90% sprawności procesu odparowanie–skraplanie wody zawartej w osadach, stąd proces fermentacji zasila zredukowana ilość energii cieplnej do poziomu 4,2 TJ rocznie, w wyniku wystąpienia dodatkowych strat energii cieplnej ok. 0,5 TJ rocznie. Celowe jest zwiększenie grubości ocieplenia zbiorników fermentacyjnych w stosunku do koncepcji technologii z silnikiem gazowym, ale bez osuszania osadów.

Finalnie koncepcja zakłada wyprodukowanie w omawianym procesie ok. 1400 ton paliwa o jakości 3–4 klasy węgla kamiennego. Przyjmując aktualną cenę węgla niskiej jakości (miał) za tonę przy wartości opałowej 21 MJ/kg, autor wstępnie oszacował wartość paliwa, jakie stanowi osuszona masa osadów o wartości opałowej 12,5 J/kg z prostej proporcji zawartości energii. Obliczona w ten sposób wartość jednostkowa paliwa wynosi 300 zł/tonę; dla rocznej produkcji suchego paliwa w ilości 1400 ton wartość wynosi 420 tys. zł. Zakładając zatem technologię silnika gazowego wraz z suszeniem osadów, uzyskujemy ok. 55% redukcję kosztów zakupu nośników energii. Całkowita redukcja kosztów zakupu energii powiększona o wartość paliwa sta-

łego osuszonych odpadów 1,95 mln zł. Łączna kwota zakupu energii z sieci dzięki zastosowaniu innowacyjnej technologii mogłaby zostać zredukowana do 410 tys. zł (względniając wartość paliwa stałego osadów) z pierwotnej kwoty 2 mln 360 tys. zł technologii aktualnie stosowanej. Technologia daje potencjał uzyskania ok. 83% redukcji kosztów zakupu energii rocznie, prócz wymiernych korzyści środowiskowych.

## 6. Wnioski

Oczyszczalnia ścieków w systemie energetycznym regionu może prezentować zasadniczo różne technologie. W najgorszym przypadku może stanowić obiekt o wysokim zużyciu energii elektrycznej i ciepłej, przy jednoczesnym wprowadzaniu do środowiska znacznych ilości biogazu stanowiącego odpad procesu fermentacji, a także osadów o postaci stałej. Takie instalacje niestety są jeszcze projektowane, budowane i eksploatowane.

Zasadniczo korzystniejsze rozwiązanie stanowi odzysk biogazu i zasilanie nim kotłów oczyszczalni, co prowadzi do praktycznie całkowitej substytucji paliwa gazowego kupowanego z sieci, koniecznego dla zasilania procesu w energię cieplną.

W pracy przedstawiono najkorzystniejsze z punktu widzenia energetycznego wykorzystanie biogazu do skojarzonej produkcji energii elektrycznej i ciepłej, używanych w procesie technologicznym oczyszczalni. Zastosowano źródło elektrociepłne złożone z generatora elektrycznego sprzężonego z silnikiem 4-suwowym zasilanym biogazem. Technologia zapewnia zatem zarówno praktyczną eliminację zakupu energii ciepłej (lub gazu ziemnego), jak i wytworzenie znacznej ilości energii elektrycznej, co daje ponad 65% redukcji całkowitych rocznych kosztów zakupu energii ciepła.

Oczyszczalnia wytwarza znaczne ilości osadów, które po osuszeniu mogą stanowić substytut węgla kamiennego współspalany w miejskich ciepłowniach z węglem kamiennym. Wartość paliwa stanowiącego osuszone osady stanowi ok. 15% wartości zakupu energii przez oczyszczalnię w skali roku.

Prezentowane analizy dowodzą, iż oczyszczalnia może zredukować koszty zakupu energii o ponad 80% uwzględniając redukcję zużycia energii elektrycznej i ciepłej oraz wartość paliwa stałego w postaci osuszonych osadów. Taką redukcję zapewnia technologia pozyskiwania energii z odpadów procesu przetwarzania odpadów energetycznych: biogazu i osadów stałych. Jak dowodzą przeprowadzone analizy, niezależnie od wysokiego obliczonego potencjału odzysku energii istnieją jeszcze dalsze techniczne rozwiązania pozyskujące energię na potrzeby procesu technologicznego oczyszczalni, w szczególności adaptację zbiorników do potrzeb pozyskania energii słonecznej oraz zastosowanie materiałów wysokiej izolacyjności termicznej dla redukcji utraty energii ciepłej w zbiornikach fermentacyjnych. Omawiane rozwiązania ograniczą dodatkowo zapotrzebowanie instalacji na energię, a zatem podniosą

sprawność energetyczną procesów, wielkość zużycia oraz kosztów zakupu nośników energii i paliw.

Zauważyć należy, iż dzięki modernizacji technologii oczyszczalni ścieków proces zmienił zasadniczo charakter energetyczny, który pierwotnie wymagał zasilania zewnętrznym strumieniem energii elektrycznej i ciepłej łącznie 13,8 TWh, natomiast po modernizacji oczyszczalnia produkuje paliwo stałe o energii 17,5 TWh. Odejmując energię elektryczną pobieraną z sieci wielkości 4,2 TWh, pozostaje wielkość energii netto procesu technologicznego zmodernizowanej oczyszczalni na poziomie 14,3 TWh „produkcji” rocznej, co prowadzi do konkluzji, iż dzięki technologii oczyszczalnia z konsumenta energii staje się jej producentem.

## Literatura

- Asaduzzaman Apu 2018. HANDOUT ON INTRODUCTION TO SEWAGE TREATMENT Dhaka University of Engineering & Technology (DUET), Gazipur Department of Civil Engineering, DUET, Gazipur.
- Ceny węgla 2020; [Online] (<https://kb.pl/porady/ceny-węgla-sprawdz-cennik-sprzedazy-węgla-w-twoim-miescie/>) [Dostęp: 15.07.2020].
- DROŻDŻ M. *Arkusze dla programu oceny stanu i potrzeb modernizacji oczyszczalni ścieków*. Opracowanie własne.
- Emerging Technologies for Wastewater Treatment and In-Plant Wet Weather Management, Tetra Tech, Inc. Fairfax, Virginia, March 2013 [Online] <https://www.epa.gov/sites/production/files/2019-02/documents/emerging-tech-wastewater-treatment-management.pdf> [Dostęp: 15.07.2020].
- GROMIEC M. 2018. *Wpływ regulacji prawnych na rozwój technologii oczyszczania ścieków i zagospodarowania osadów – Zaopatrzenie w wodę, jakość i ochrona wód*; [Online] [http://water.put.poznan.pl/images/fullpapers2018/193\\_Woda\\_2018.pdf](http://water.put.poznan.pl/images/fullpapers2018/193_Woda_2018.pdf) [Dostęp: 15.07.2020].
- GÓRSKI M., GROMIEC M., JAROSZYŃSKI T., JODŁOWSKI A., KRÓLIKOWSKI A., ŁOMOTKOWSKI J. i POSKROBKO B. 2010. *Poradnik dotyczący gospodarki ściekowej w kontekście wykonania krajowego programu oczyszczania ścieków komunalnych*. Krajowy Zarząd Gospodarki Wodnej. Warszawa.
- Ile kosztuje 1 m<sup>3</sup> i 1kWh gazu ziemnego? Ceny gazu w 2020 w Polsce; [Online] <https://zaradnyfinansowo.pl/ceny-gazu/> [Dostęp: 15.07.2020].
- McCARTY P.L., BAE J. i KIM J. 2011. *Domestic Wastewater Treatment as a Net Energy Producer—Can This be Achieved?* <https://pubs.acs.org/doi/10.1021/es2014264#> [Dostęp: 15.07.2020].
- MILIK J., PASELA R., SZYMCZAK M. i CHALAMOŃSKI M. 2016. *Ocena składu fizyczno-chemicznego osadów ściekowych pochodzących z komunalnej oczyszczalni ścieków*. MIDDLE POMERANIAN SCIENTIFIC SOCIETY OF THE ENVIRONMENT PROTECTION. ŚRODKOWO-POMORSKIE TOWARZYSTWO NAUKOWE OCHRONY ŚRODOWISKA. Annual Set The Environment Protection. T. 18. Rocznik Ochrona Środowiska. Uniwersytet Technologiczno-Przyrodniczy, Bydgoszcz.
- Oczyszczalnia Ścieków Gdańsk Wschód. Rozbudowa Oczyszczalni Ścieków Gdańsk Wschód Etap IIb – zagospodarowanie osadów ściekowych. Gdańska Infrastruktura Wodociągowo-Kanalizacyjna Sp. z o.o.; [Online] [http://www.giwk.pl/inwestycje/gdanski-projekt-wodnosciekowy\\_2/oczyszczalnia\\_sciekowa\\_wschod.htm](http://www.giwk.pl/inwestycje/gdanski-projekt-wodnosciekowy_2/oczyszczalnia_sciekowa_wschod.htm) [Dostęp: 15.07.2020].
- SCHNELL M., HORST T. i QUICKER P. 2020. *Thermal treatment of sewage sludge in Germany: A review Unit of Technology of Fuels*. RWTH Aachen University, Wuellnerstr. 2, 52062, Aachen, Germany Journal of Environmental Management 263, 110367.

## **ZAŁĄCZNIK 1. Arkusz dla programu oceny stanu i potrzeb modernizacji oczyszczalni ścieków**

1. Roczna wielkość odbieranych ścieków oczyszczalni [tys. ton].
2. Technologia oczyszczalni:
  - instalacja bez odzysku metanu;
  - fermentacja z odzyskiem metanu (tak, nie);
  - wielkość zbiorników fermentacyjnych [ton, m<sup>3</sup>];
  - wielkość odzyskanego metanu rocznie [tys. m<sup>3</sup>];
  - ilość metanu utylizowanego na tzw. pochodni (bez odzysku energii rocznie) [tys. m<sup>3</sup>, lub %];
  - technologia ogrzewania zbiorników fermentacyjnych:
    - ciepło z ciepłowni (z sieci ciepłowniczej),
    - kotły gazowe (produkcja ciepła),
    - silnik gazowy (produkcja ciepła i prądu);
  - nośnik ciepła zasilania kotłów (jeśli zastosowano):
    - gaz ziemny,
    - gaz ziemny + metan z odzysku z fermentacji oczyszczalni,
    - inne (podać jakie);
  - nośnik dla zasilania silnika gazowego (jeśli zastosowano):
    - gaz ziemny,
    - gaz ziemny + metan z odzysku z fermentacji oczyszczalni,
    - inne (podać jakie paliwo zasila silnik (-i)).
3. Rodzaj klientów oczyszczalni i ich udziału w wielości odbieranych ścieków [tys. ton, lub %]:
  - bloki mieszkalne,
  - domy jedno/dwurodzinne mieszkalne,
  - gospodarstwa rolnicze,
  - przemysł – podać jaki i struktura ilościowa,
  - inne.
4. Stan techniczny oczyszczalni
  - nowa (podać rok budowy),
  - zmodernizowana (podać rok przebudowy)
  - stara nieprzebudowywana (podać rok budowy).
5. Ocena stanu potrzeb inwestycyjnych oczyszczalni
  - nie wymaga przebudowy,
  - może zostać przebudowana, ale po otrzymaniu środków,
  - potrzeba pilnej modernizacji (przebudowy).

6. Ocena stanu technologii oczyszczalni
  - oczyszczalnia prezentuje najnowocześniejszy poziom światowej technologii,
  - oczyszczalnia prezentuje wysoki poziom technologiczny, ale są lepsze rozwiązania,
  - oczyszczalnia jest starej technologii i wymaga przebudowy,
  - oczyszczalnia prezentuje dobry poziom technologiczny, ale są pewne problemy techniczne (podać jakie problemy).
7. Zamierzenia inwestycyjne/czy zamierza się przebudowę oczyszczalni?
  - czy jest zamierzenie/program przebudowy oczyszczalni?
  - jakie elementy/technologie zamierza się wprowadzić?
  - na jakim etapie jest program przebudowy/koncepcja, projekt, faza przetargu – podać, która faza realizacji inwestycji.
8. Potrzeba wsparcia programu inwestycyjnego:
  - potrzebna jest porada specjalistów w zakresie technologicznym,
  - potrzeba opracowania kompletnej dokumentacji technicznej modernizacji,
  - potrzebna jest pomoc w zorganizowaniu środków na przebudowę oczyszczalni,
  - potrzeba oceny ekonomicznej przedsięwzięcia.
9. Ocena stanu zabezpieczenia funduszy na przebudowę/ modernizację oczyszczalni:
  - posiadamy wystarczające środki,
  - nie posiadamy wystarczających środków,
  - wielkość nakładów inwestycyjnych szacuje się na: (podać nakłady w mln zł),
  - potrzebne są środki wystarczające [tys. zł].
10. Roczne koszty całkowite oczyszczalni ścieków w ostatnim roku wyniosły: w tym koszty zakupu poszczególnych nośników energii:
  - energia elektryczna (podać wielkość zakupionej energii oraz koszty roczne),
  - energia cieplna z sieci miejskiej (podać wielkość zakupionej energii oraz koszty roczne),
  - gaz (podać wielkość zakupionego gazu oraz koszty roczne),
  - inne źródło zasilania (podać rodzaje nośników energii, wielkość zakupionej energii oraz koszty roczne).
11. Fotografie obiektu.

Źródło: opracowanie własne autora

Paulina ZIELINKO<sup>1</sup>, Dorota KRAWCZYK<sup>2</sup>

---

## Miesięczny bilans energetyczny płaskiego wodnego kolektora słonecznego w warunkach klimatycznych Polski

**STRESZCZENIE:** Alternatywne źródła energii, takie jak panele słoneczne, pozwalają ich użytkownikom uniezależnić się od dostaw energii z tradycyjnych źródeł. Jednak warunki środowiskowe i promieniowanie słoneczne są różne na świecie, co oznacza, że układy słoneczne nie można uznać za uniwersalne. W przeciwnym razie potencjalne korzyści z instalacji solarnych mogą nie zostać zrealizowane. W pracy przedstawiono wyniki badań systemu z płaskim kolektorem słonecznym do analizy miesięcznego bilansu energetycznego. Jako płyn roboczy zastosowano wodę. Podany w pracy obszar badań koncentrował się głównie na pomiarze temperatury medium na wylocie z kolektora i na stanowisku stacji solarnej w pomieszczeniu technicznym. Rejestrowano również dzienne zużycie energii elektrycznej i odczytywano wskazania liczników ciepła na wlocie i wylocie ze zbiornika. Kierunek badań przedstawionych w niniejszej pracy nawiązuje do rezolucji ONZ 70/1, Agendy 2030. Spośród 17 celów zrównoważonego rozwoju, przyjętych przez wszystkie państwa członkowskie w 2015 r., jeden z nich nawiązuje do niedrogiej i czystej energii. Jest to cel nr 7., którego realizacja wymaga m.in. poprawy efektywności energetycznej i współpracy międzynarodowej w celu łatwiejszego dostępu do czystych technologii. Przeprowadzone badania oraz wstępna analiza wyników mają na celu poprawę efektywności kolektorów słonecznych w północno-wschodniej Polsce, a także są podstawą do przyszłych badań nad modelowym rozwiązaniem oceny bilansu energetycznego w innych regionach klimatycznych.

**SŁOWA KLUCZOWE:** kolektor płaski, bilans energetyczny, energia słoneczna, panele słoneczne.

## Monthly energy balance of a flat water solar collector in Polish climate

**ABSTRACT:** Alternative energy sources such solar panels allow their users to become independent of energy supplies from traditional sources. However, environmental conditions and solar radiation are different around the world, which means

---

<sup>1</sup> Mgr inż., Wydział Budownictwa i Inżynierii Środowiska, Politechnika Białostocka, Białystok, Polska.

<sup>2</sup> Dr hab. inż., prof. PB, Wydział Budownictwa i Inżynierii Środowiska, Politechnika Białostocka, Białystok, Polska.

that solar systems cannot be considered as one-size-fits-all. Otherwise, the potential benefits of solar installations may not be realized. The paper presents the results of the research conducted on the system with flat-plate solar collector to analyze monthly energy balance. Typically water was used as the working fluid. The research area specified in the work focused mainly on measuring the temperature of the medium at the outlet of the collector and in the solar station, in the technical room. The daily consumption of electricity was also recorded and indications of heat meters at the tank inlet and outlet were read. The direction of the research presented in this paper refers to UN Resolution 70/1, Agenda 2030. Of all 17 global goals for sustainable development, adopted by all Member States in 2015, one of them refers to affordable and clean energy. This is the goal No. 7, which requires, among others, to achieve its objectives requires improvement of energy efficiency and international cooperation in order to facilitate access to clean technologies. The conducted research and preliminary analysis of the results are aimed at improving the efficiency of solar collectors in the climate of north-eastern Poland, and are also the basis for future research on a model solution for assessing the energy balance in other climate regions.

**KEYWORDS:** flat plate collector, energy balance, solar energy, solar panels.

## 1. Wprowadzenie

### 1.1. Rozwój kolektorów słonecznych

Sytuacja odnawialnych źródeł energii (OZE) zmienia się obecnie znacząco na rynku globalnym, na którym są wdrażane na dużą skalę. Większość krajów koncentruje się na wykorzystaniu energii odnawialnej w nowych inwestycjach i dąży do wyeliminowania istniejących konwencjonalnych źródeł. Jednym z najczęstszych rodzajów energii, a ponadto wolnym od zanieczyszczeń, jest energia słoneczna. Rynek kolektorów słonecznych w wielu krajach przeżywa okres świetności. Czynniki, które mają znaczący wpływ na rozwój rynków lokalnych, to postęp technologiczny, promieniowanie słoneczne, wsparcie rządu, możliwości lokalnych producentów i wzrost świadomości ekologicznej (Krawczyk 2019; Krawczyk i in. 2018). Od 2000 r. nastąpił znaczny wzrost zużycia ciepła w krajach rozwijających się (ESTIF 2016). W Polsce ostatnio, dzięki programom skoncentrowanym na systemach z odnawialnymi źródłami energii, wielu użytkowników budynków mieszkalnych uzyskało wsparcie finansowe. Niestety nie dzieje się tak w każdym regionie, np. w województwie podlaskim jest niewiele możliwości w tym zakresie w ramach Regionalnego Programu Operacyjnego Województwa Podlaskiego 2014–2020. Przykładowa inwestycja została zrealizowana w Choroszczy nieopodal Białegostoku, gdzie 380 domów wyposażono w kolektory słoneczne. W tym przypadku pomoc to 80% całkowitych kosztów kwalifikowanych (program Europejskiego Funduszu Rozwoju Regionalnego).

Jednym z najczęściej stosowanych alternatywnych urządzeń energetycznych jest kolektor słoneczny, w szczególności kolektor płaski. Znajduje on szerokie zastoso-



wanie w systemach ciepłowniczych do przygotowania ciepłej wody użytkowej (Wiśniewski i in. 2001; Wołoszyn 2000) ze względu na prostą konstrukcję, łatwy montaż i krótki okres zwrotu na dostosowanie większości istniejących instalacji. Instalacja kolektorów słonecznych w nowo budowanych obiektach przynosi więcej korzyści, ponadto w polskim klimacie system taki wymaga dodatkowego źródła energii w okresie jesienno-zimowym (Igliński i in. 2016; Mościcki i in. 2014).

Instalacja słoneczna, znana również jako system grzewczy, przetwarza energię promieniowania słonecznego w użyteczne ciepło. Instalacja składa się z pięciu elementów:

- baterii lub kolektora słonecznego,
- zasobnika ciepłej wody lub zewnętrznego przepływowego wymiennika ciepła,
- zespołu pompowego,
- układu sterującego,
- grupy bezpieczeństwa.

Za pomocą jednostki pompującej ciepło jest transportowane przez czynnik roboczy do wymiennika. Działanie zespołu pompowego jest nadzorowane systemem sterowania, który włącza zespół pompowy, gdy temperatura kolektora będzie powyżej temperatury wody w zbiorniku. Za pomocą wymiennika ciepła, wewnątrz zbiornika podgrzana woda uwalnia ciepło do zbiornika wody, które jest dostarczane do punktów poboru w budynku. W przypadku przekroczenia pojemności akumulacyjnej zbiornika w wyniku intensywnego ogrzewania kolektorów włączane są pompy słoneczne (Zawadzki 2003). W 2015 r. Nikolić i Lukić porównali produkcję energii cieplnej klasycznego płaskiego kolektora (FPC) z płaskim kolektorem słonecznym odbijającym promieniowanie słoneczne również z dolnej powierzchni absorbera (DEFPC). Użyteczna energia cieplna (moc cieplna) panelu DEFPC według autorów jest o 41,79–66,44% wyższa niż w przypadku FPC (Nikolić i Lukić 2015).

Największa część energii promieniowania słonecznego przypada na okres od kwietnia do września, co stanowi około 80% rocznej ilości energii. Sezon zimowy pozwala również na pracę układu słonecznego, który pełni funkcję częściowego zaopatrzenia w ciepło na potrzeby podgrzewania ciepłej wody użytkowej, a czasem nawet w celu wsparcia ogrzewania budynku. W warunkach klimatu środkowoeuropejskiego instalacja słoneczna jest najczęściej projektowanym systemem do pracy przez cały rok, dlatego wymaga prawidłowego działania we wszystkich warunkach pogodowych. Zamarznięcie instalacji solarnej jest możliwe w kilku szczególnych sytuacjach. Statystyki serwisowe częściej wymieniają uszkodzenia kolektorów próżniowych niż płaskich. Aby zapobiec zamarzaniu instalacji, jako środek niezamarzający w polskich warunkach klimatycznych stosuje się glikol, lub system chroniony jest dodatkowym źródłem ciepła, np. grzałką elektryczną.

## 1.2. Energia odnawialna jako narzędzie wspierania zrównoważonego rozwoju

Polska polityka energetyczna, poprzez zasadę spójności i integralności, jest częścią polityki wykonawczej Unii Europejskiej, m.in. pakietu klimatyczno-energetycznego. Odnawialne źródła energii, w tym energia słoneczna, są elementem zwiększającym bezpieczeństwo energetyczne ze względu na ich rozproszony charakter. Ponadto odnawialne źródła energii wspierają realizację większości celów polityki energetycznej kraju, a mianowicie: zwiększenie dywersyfikacji dostaw umożliwiając zmniejszenie zapotrzebowania na importowaną energię, wdrożenie pakietu energetyczno-klimatycznego poprzez redukcję emisji gazów cieplarnianych i pyłu, rozwój konkurencyjności rynków, a także wzrost innowacyjności i przedsiębiorczości kapitału ludzkiego. Ponadto, im bardziej rozpowszechnione będą źródła energii i wykorzystanie regionalnych surowców do ich produkcji, tym większe prawdopodobieństwo zapewnienia lokalnego bezpieczeństwa energetycznego i zmniejszenia strat przesyłowych. OZE są zgodne z koncepcją zrównoważonego rozwoju, w przeciwieństwie do tradycyjnych technologii węglowych.

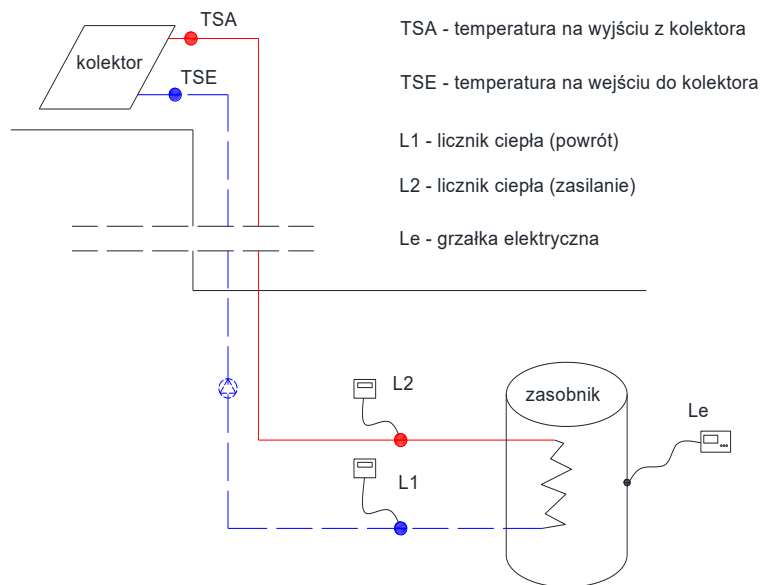
## 2. Stanowisko badawcze

**S**tanowisko badawcze zlokalizowano w piwnicy budynku Politechniki Białostockiej (rys. 1), a instalację solarną na jego dachu. Pomiary przeprowadzono w celu analizy miesięcznego bilansu energetycznego systemu na układzie solarnym z płaskim kolektorem słonecznym w styczniu 2020 r.

Ogólny schemat analizowanego układu wodnego kolektora słonecznego podłączonego do zbiornika pokazano na rysunku 2. Jak widać na schemacie, codzienne pomiary wykonywano w punktach L1 i L2 będących licznikami ciepła, a także w punkcie Le, który jest grzejnikiem elektrycznym. Ponadto rejestrowano co minutę temperaturę wlotową i wylotową kolektora przy próbkowaniu. Układ wykorzystuje wymiennik ciepła z jedną węzownicą i alternatywnym źródłem ciepła w postaci grzałki elektrycznej. W przypadku braku światła słonecznego przy jednoczesnym spadku temperatury w zbiorniku poniżej minimalnej wartości ustawionej na termostacie, grzałka elektryczna włącza się.



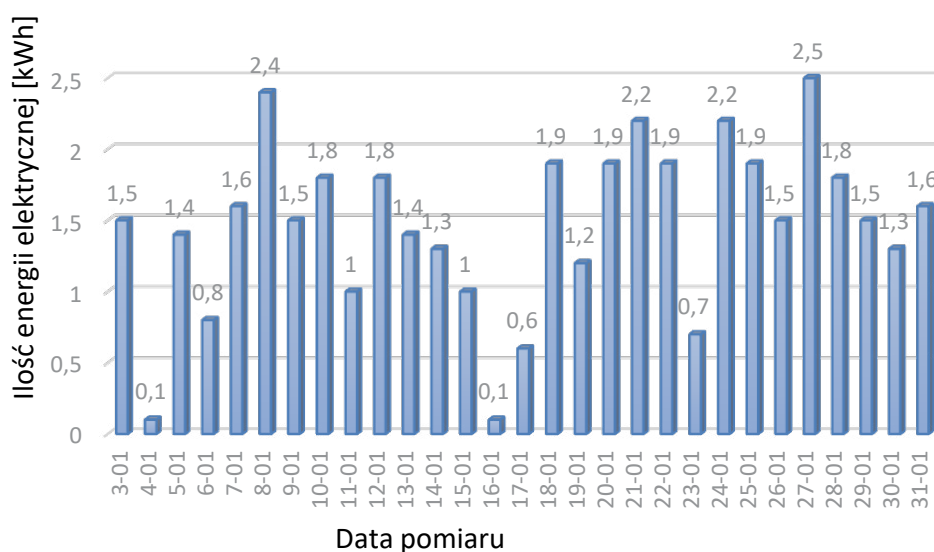
Rysunek 1. Analizowany system solarny  
Źródło: opracowanie własne



Rysunek 2. Schemat stanowiska badawczego  
Źródło: opracowanie własne

### 3. Wyniki

**D**zienne zużycie energii elektrycznej przedstawiono na rysunku 3. Warto zauważyć, że najwyższa wartość przypada na 27 stycznia (2,5 kWh). Ta sama data ma swoje odzwierciedlenie na kolejnym wykresie (rys. 5), gdzie zarejestrowano jedną z najniższych wartości ciepła pozyskanego z kolektora słonecznego.

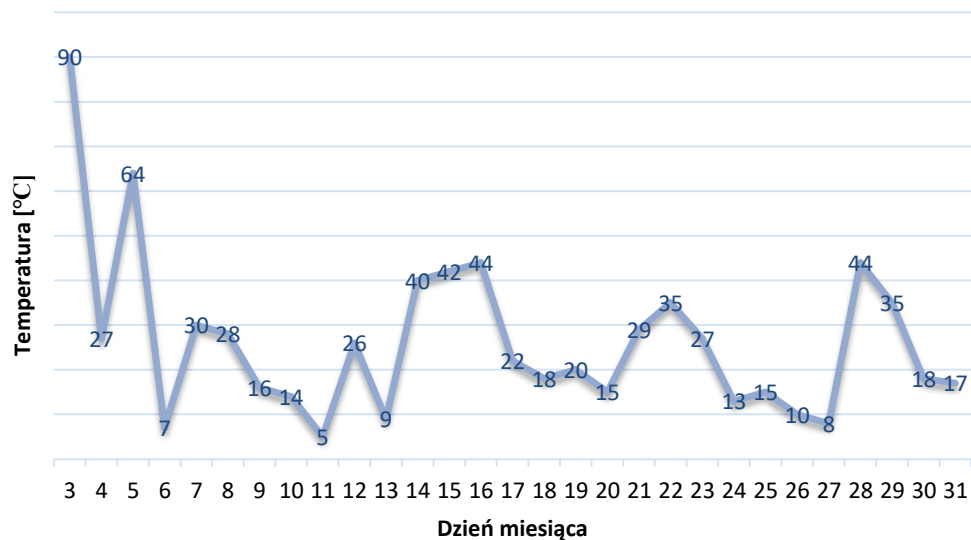


Rysunek 3. Dzielne zużycie energii elektrycznej  
Źródło: opracowanie własne

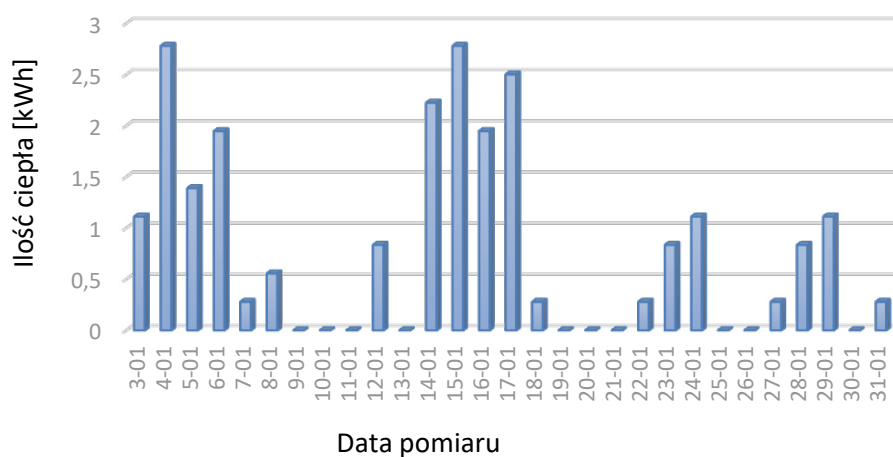
Rysunek 3 pokazuje wartości energii elektrycznej zużywanej przez układ słoneczny każdego dnia w styczniu. Wysokie wartości zużytej energii elektrycznej wskazują, że w tych dniach temperatura na kolektorze słonecznym (rys. 4) była wystarczająco niska, aby grzałka elektryczna mogła się włączyć.

Powyższy rysunek pokazuje rozkład temperatury w godzinach największego promieniowania słonecznego w styczniu. 27 stycznia temperatura kolektora wskazała 8 stopni, co spowodowało niską wartość zmierzoną w punkcie L2 (0,3 kWh).

Miesięczne zużycie energii elektrycznej w styczniu wyniosło 42,4 kWh, przy całkowitym uzysku energii z kolektora 23,4 kWh. Różnica między tymi wartościami pokazuje, ile energii elektrycznej potrzebował dodatkowo system do prawidłowego działania i utrzymania temperatury ciepłej wody na pożądanym poziomie.



Rysunek 4. Temperatura panelu słonecznego  
Źródło: opracowanie własne



Rysunek 5. Dzienny uzysk energii z kolektora  
Źródło: opracowanie własne

## 4. Podsumowanie i wnioski

**W** pracy przeanalizowano układ z kolektorem słonecznym umieszczonym na dachu Politechniki Białostockiej. W analizowanym miesiącu zużycie energii elektrycznej okazało się większe niż ilość ciepła dostarczanego z kolektora. Sama instalacja, niedokładne odczyty, zużycie urządzeń i czujników mogą mieć wpływ na różnicę w odbieranych wartościach. Czynnikiem roboczym zastosowanym w analizowanym układzie słonecznym jest cyrkulacja wody. Aby dokonać szerszej analizy, pomiary należy przeprowadzać przez cały rok ze względu na wpływ klimatu północno-wschodniej Polski. Zapoczątkowane badania są źródłem przyszłej pracy nad poprawą efektywności kolektorów słonecznych nie tylko w klimacie północno-wschodniej Polski.

### Literatura

- ESTIF 2016. European Solar Thermal Industry Federation: *Solar thermal market in Europe*. [Online] <http://www.estif.org/publications/> [Dostęp: 2.01.2019].
- IGLIŃSKI B., CICHOSZ M., KUJAWSKI W. i PLASKACZ-DZIUBA M. 2016. *Helioenergy in Poland – Current state, surveys and prospects* Renewable and Sustainable Energy Reviews 58, s. 862–870.
- KRAWCZYK D.A., ŻUKOWSKI M., RODERO A. i BILINSKIENE R. 2018. *Analysis of the solar collectors installation on the roof of the small public building in Poland, Lithuania and Spain – a case Study*. Proceedings 2(20).
- KRAWCZYK D.A. 2019. *Buildings 2020+. Energy sources*. Publishinh House of Białystok University of Technology, Białystok, January 2019.
- Modernization of individual sources of heat or electricity in Białystok*. European Regional Development Fund Programme.
- MOŚCICKI K. J., NIEDŹWIECKI Ł., OWCZAREK P. i WNUKOWSKI M. 2014. *Commoditization of biomass: dry torrefaction and pelletization – a review*. Journal of Power Technologies 4(94), s. 233–249.
- NIKOLIĆ N. i LUKIĆ N. 2015. *Theoretical and experimental investigation of the thermal performance of a double exposure flat plate solar collector*. Solar Energy 119, s. 100–113.
- Renewable solar energy for improving the cleanliness of Choroszcz Commune*. European Regional Development Fund Programme.
- WIŚNIEWSKI G., GOŁĘBIEWSKI S. i GRYCIUK M. 2001. *Kolektory słoneczne, poradnik wykorzystania energii słonecznej*. COIB, Warszawa.
- WOŁOSZYN M. 2000. *Kolektory słoneczne – wykorzystanie energii słonecznej do przygotowania ciepłej wody użytkowej*. Technika Rolnicza 5, s. 23–26.
- ZAWADZKI M. 2003. *Kolektory słoneczne, pompy ciepła – na tak*. Polska Ekologia, Warszawa.

Agata WITKOWSKA<sup>1</sup>, Bernadetta WĄDOŁOWSKA<sup>1</sup>, Monika POGORZELSKA<sup>1</sup>,  
Dorota Anna KRAWCZYK<sup>2</sup>

---

## Modelowanie wydajności cieplnej systemu ogrzewania podłogowego w budynku mieszkalnym jednorodzinnym

**STRESZCZENIE:** Celem niniejszej pracy jest modelowanie wydajności cieplnej systemu ogrzewania podłogowego w budynku mieszkalnym jednorodzinnym, zlokalizowanym w Białymstoku. Przy użyciu nowoczesnych e-laboratoriów opracowanych w ramach projektu Vipskills wykonano obliczenia instalacji ogrzewania podłogowego, zasilanej za pomocą kotła gazowego lub pompy ciepła. Zarówno wybrane źródła ciepła, jak i sposób ogrzewania pomieszczeń (niskotemperaturowe ogrzewanie płaszczynowe), umożliwiają uzyskanie pożądanej temperatury w budynku. Dla każdego z wybranych źródeł ciepła przyjęto po trzy kombinacje danych wyjściowych takich jak: temperatura zasilania, temperatura poniżej powierzchni grzewczej, grubość warstwy jastrychu oraz rodzaj podłogi. Największy wpływ na wydajność cieplną instalacji ogrzewania podłogowego oraz przepływ masowy czynnika grzewczego miały temperatura zasilania oraz rodzaj pokrycia podłogi. Niezależnie od źródła ciepła, najwyższą wartość wydajności odnotowano przy zastosowaniu nawierzchni z cienkiego parkietu lub grubej warstwy terakoty, najniższą zaś, gdy pokrycie stanowił dywan lub wykładzina dywanowa. W przypadku zmiany temperatury powierzchni grzewczej, wydajność cieplna nie ulegała zmianie. Wraz ze wzrostem grubości warstwy jastrychu wydajność cieplna nieznacznie malała. Przepływ masowy czynnika grzewczego osiągnął wartości odwrotnie proporcjonalne do temperatury poniżej powierzchni grzewczej oraz grubości warstwy jastrychu. W zależności od źródła ciepła, zastosowanie dywanu lub wykładziny dywanowej skutkowało uzyskaniem 36–38% mniejszego przepływu masowego niż w przypadku, gdy podłogę stanowił cienki parkiet lub gruba warstwa terakoty. Na podstawie uzyskanych zależności stworzono modele najbardziej korzystnych rozwiązań, z podziałem na instalację zasilaną z pompy ciepła oraz z kotła gazowego. W przypadku instalacji zasilanej z pompy ciepła, zastosowanie wariantu o najkorzystniejszych parametrach pozwoliło osiągnąć wydajność cieplną na poziomie 56,9 W/m<sup>2</sup>, natomiast dla instalacji zasilanej z kotła gazowego było to 117,2 W/m<sup>2</sup>. Praca wpisuje się w 7. i 13. cel zrównoważonego rozwoju.

**SŁOWA KLUCZOWE:** ogrzewanie podłogowe, źródła ciepła, pompa ciepła, kocioł gazowy

---

<sup>1</sup> Mgr inż., Politechnika Białostocka, Białystok, Polska.

<sup>2</sup> Dr hab. inż., prof. PB, Politechnika Białostocka, Białystok, Polska.

## Modeling of thermal efficiency of underfloor heating system in a single family residential building

**ABSTRACT:** The purpose of this paper is to model the thermal efficiency of underfloor heating system in a single-family residential building, located in Białystok. Using a modern laboratory, developed as a part of the Vipskills (Virtual and Intensive Course Developing Practical Skills of Future Engineers) project, calculations were made for underfloor heating systems powered by a gas boiler or a heat pump. For each of the selected heat sources, three combinations of input data were adopted, such as: supply temperature, temperature below the heating surface, screed layer thickness and floor type. The supply temperature and type of floor covering had the greatest impact on the thermal efficiency of the underfloor heating system and the mass flow of the heating medium. Regardless of the heat source, the highest efficiency was recorded when using thin parquet or thick terracotta layers, the lowest when the covering was a carpet. If the temperature of the heating surface changed, the heat output did not change. As the thickness of the screed layer increased, the thermal efficiency slightly decreased. The mass flow of the heating medium reached values inversely proportional to the temperature below the heating surface and screed layer thickness. Depending on the heat source, the use of a carpet resulted in 36–38% less mass flow than when the floor was a thin parquet or a thick layer of terracotta. Based on the obtained dependencies, a model of the most advantageous solutions was created, with division of the installation fed from a heat pump and a gas boiler. In the case of a system fed from a heat pump, the variant with the best parameters allowed achieving thermal efficiency at the level of 56.9 W/m<sup>2</sup>, while for a system powered from a gas boiler it was 117.2 W/m<sup>2</sup>.

**KEYWORDS:** underfloor heating system, heat sources, heat pump, gas boiler

### 1. Wprowadzenie

W związku z rosnącym zapotrzebowaniem na ogrzewanie pomieszczeń, wynikającym z warunków klimatycznych oraz rosnącej świadomości konsumentów w zakresie oszczędzania energii, rynek ogrzewania podłogowego stale się rozwija. Zaobserwować można silną skłonność do technologii „czystej” energii oraz zwiększoną liczbę inwestycji w rozwój i modernizację istniejących oraz nowo powstałych systemów grzewczych (Gupta i Paranjape 2020).

Ogrzewanie podłogowe należy do grupy niskotemperaturowych systemów grzewczych, umożliwiających zapewnienie maksymalnego komfortu cieplnego przy jednoczesnym zachowaniu niskich kosztów operacyjnych (Roszkowska i in. 2019). Co więcej, według danych opracowanych przez Gupta i Paranjape (Gupta, Paranjape 2020), do 2026 roku rynek ogrzewania podłogowego ma osiągnąć wzrost o ok. 5% w stosunku do roku 2019. Z uwagi na ciągłe dążenie do rozwoju inteligentnych miast oraz szybką industrializację i powiększającą się bazę sektora handlowego, trend na rynku grzewczym skoncentrowany jest przede wszystkim na implementacji zaawansowanych systemów o wysokiej wydajności, cechujących się jednocześnie łatwością montażu i obsługi, energooszczędnością i możliwością szybkiej instalacji w nowych obiektach budowlanych, takich jak ogrzewanie podłogowe.



Basok i in. (Basok i in. 2018) zbadali parametry termiczne systemu ogrzewania podłogowego zamontowanego na sucho, w warunkach rzeczywistych, w pomieszczeniach laboratoryjnych. W badaniu ustalony został wpływ grubości warstwy izolacji cieplnej pod przewodami grzewczymi na zmianę gęstości przepływu ciepła z powierzchni podłogi do powietrza w ogrzewanym pomieszczeniu.

Akmal (Akmal 2016) opisał pojemność i bezwładność cieplną systemu ogrzewania podłogowego zasilanego z pompy ciepła. Opracował model termiczny systemu, oparty na MATLAB/SIMULINK, i przedstawił szczegółowe równania matematyczne. W tym celu wykorzystał pomiary rzeczywiste oraz wyniki uzyskane w sposób eksperymentalny. Model może być wykorzystywany do znajdowania zmian temperatur w budynku, a także oszacowania produkcji energii cieplnej i zużycia energii elektrycznej oraz określenia wielkości mocy chwilowej i współczynników wydajności w skali czasu rzeczywistego.

Rudolf (Rudolf 2018) przedstawił analizę wpływu oporu warstw wykończenia podłóg na ilość ciepła oddawaną do pomieszczenia. W swoim artykule przedstawił obliczenia i symulacje wydajności cieplnej podłogi w zależności od przyjętego wariantu posadzki. Wykazał, iż warstwa składająca się z desek z naturalnego drewna klejonego ma istotny wpływ na gęstość strumienia cieplnego przekazywanego od grzejnika płaszczyznowego do ogrzewanego pomieszczenia.

Ujma (Ujma 2018) oceniła wymagania w zakresie izolacyjności cieplnej podłóg ogrzewanych zgodnie z wymaganiami normowymi, w stosunku do wymagań, jakie kształtują warunki budowlane. Określiła grubość izolacji cieplnej ogrzewanej podłogi, jaką należałoby założyć, kierując się wymaganiami warunków budowlanych. W swojej pracy przeanalizowała również parametry cieplne wybranych podłóg w kontekście komfortu cieplnego.

Pajchrowski i Noskowiak (Pajchrowski i Noskowiak 2018) zbadali przewodność cieplną drewnianych podłóg w kontekście zastosowań systemów ogrzewania podłogowego. W swojej pracy określili oni współczynniki przenikania ciepła przez powłoki budowlane. Ustalili, iż w przypadku ogrzewania podłogowego, warstwy podłóg powinny mieć dobrą przewodność cieplną i niski opór cieplny, oraz że obliczeniowe wartości oporu cieplnego były niższe (bardziej korzystne) niż eksperymentalne.

Wiśnik i Sabiniak (Wiśnik i Sabiniak 2014) udowodnili, że powszechnie wykorzystywane w ogrzewaniu grzejnikowym ozebrowanie okrągłe, które powoduje rozwinięcie powierzchni i zwiększenie ilości oddawanego ciepła do pomieszczenia, w przypadku ogrzewania podłogowego, z punktu widzenia poprawy warunków wymiany ciepła, jest nieuzasadnione.

W niniejszej pracy zbadany został wpływ poszczególnych parametrów instalacji ogrzewania podłogowego na wydajność cieplną systemu oraz na wielkość przepływu masowego czynnika w przewodach grzewczych. Na podstawie uzyskanych zależno-

ści stworzono model najbardziej korzystnych rozwiązań, z podziałem na instalację zasilaną z pompy ciepła oraz z kotła gazowego.

## 2. Zrównoważony rozwój

**S**tosowanie odnawialnych źródeł energii (OZE) do produkcji ciepła bardzo dobrze wpisuje się w myśl agendy na rzecz zrównoważonego rozwoju. Powszechny i równy dostęp do mediów takich jak woda czy energia jest obecnie dla społeczeństwa pewnym wyzwaniem. Sprostanie mu pozwala na zapewnienie odpowiedniego standardu życia, szczególnie na terenach słabiej rozwiniętych gospodarczo. Dzięki zastosowaniu niskoemisyjnych i odnawialnych źródeł ciepła, możliwa jest realizacja dwóch celów zrównoważonego rozwoju, takich jak: 7. – Przystępna i czysta energia oraz 13. – Działania klimatyczne. Odnawialne źródła energii są bez wątpienia przykładem najbardziej zrównoważonych metod pozyskiwania energii. Powszechność, dostępność i niewyczerpalność OZE sprawiają, że z czasem ich potencjał staje się coraz większy. W dzisiejszych czasach, kiedy szczególną uwagę zwracamy zarówno na aspekty ekonomiczne, jak i ekologiczne, czyli stawiamy na zrównoważony rozwój, odnawialne źródła energii, które te wszystkie elementy łączą, są idealną alternatywą dla tradycyjnie pozyskiwanych surowców. Powyższe kwestie sprawiają, iż stosowanie OZE do ogrzewania budynków odgrywa obecnie istotną rolę w wypełnianiu 7. celu zrównoważonego rozwoju.

Stosowanie na szeroką skalę surowców nieodnawialnych powoduje nie tylko stale pogłębiającą się degradację środowiska naturalnego, ale również brak stabilności energetycznej. Odnawialne źródła energii są gwarancją zrównoważonego rozwoju, bezpieczeństwa energetycznego, a także realnym działaniem na rzecz ochrony środowiska.

Zahamowanie dewastacji środowiska naturalnego jest w dużej mierze możliwe dzięki zastąpieniu tradycyjnych źródeł energii jej odnawialnymi nośnikami. Przede wszystkim stosowanie OZE jest pośrednio oszczędzaniem energii, jej racjonalnym wykorzystaniem, a także zwiększeniem efektywności jej zużycia. To wszystko sprawia, że odnawialne źródła energii nie tylko wykorzystują naturalne zasoby środowiska nie powodując ich niszczenia, ale również przyczyniają się do ich ochrony, co z kolei gwarantuje realizację 13. zasady zrównoważonego rozwoju. Rosnąca wśród społeczeństwa świadomość istnienia paliw alternatywnych, którymi można zastąpić konwencjonalne źródła energii sprawia, że coraz częściej po nie sięgamy. Zarówno na dużą skalę, np. budując elektrownie słoneczne czy wiatrowe, jak również na mniejszą, np. stosując odnawialne źródła do produkcji energii i ciepła we własnych domach.

Aby zwiększyć zakres wykorzystywania OZE w codziennym życiu, należy przede wszystkim edukować i pokazywać, jakie korzyści płyną ze stosowania tego typu sys-

temów. W artykule przedstawiono m.in. możliwość zastosowania energii odnawialnej – powietrznej pompy ciepła jako źródła ciepła w budynku.

### 3. Materiały i metody

**A**nalizę przeprowadzono dla budynku mieszkalnego jednorodzinnego, zlokalizowanego w Białymstoku, w IV strefie klimatycznej. Za pomocą nowoczesnych e-laboratoriów, opracowanych w ramach projektu Vipskills, wykonano obliczenia instalacji ogrzewania podłogowego, zasilanej z pompy ciepła lub kotła gazowego (Vipskills). Dla obu źródeł ciepła przyjęto po trzy warianty modyfikacji każdego z parametrów. Zbadano zależność wydajności cieplnej oraz przepływu masowego czynnika grzewczego od: temperatury zasilania, temperatury poniżej powierzchni grzewczej, grubości warstwy jastrychu oraz rodzaju podłogi. Założono powierzchnię grzejnika podłogowego równą 100 m<sup>2</sup>. Podczas wykonywania obliczeń dla poszczególnych parametrów, w przypadku pozostałych przyjęto wartość średnią (wariant II). W tabeli poniżej (tab. 1) zamieszczone zostały dane wyjściowe, niezbędne do wykonania obliczeń.

Tabela 1. Dane wyjściowe do obliczeń

| Parametr                                       | Pompa ciepła |      |      | Kocioł gazowy |      |      |     |
|--|--------------|------|------|---------------|------|------|-----|
|  | Wariant      | I    | II   | III           | I    | II   | III |
| Temperatura zasilania [°C]                     |              | 40   |      |               | 55   |      |     |
| Temperatura poniżej powierzchni grzewczej [°C] | 0            | 8    | 20   | 0             | 8    | 20   |     |
| Grubość warstwy jastrychu [cm]                 | 4,5          | 5    | 6    | 4,5           | 5    | 6    |     |
| Rodzaj podłogi [m <sup>2</sup> K/W]            | 0,05         | 0,10 | 0,15 | 0,05          | 0,10 | 0,15 |     |

Źródło: opracowanie własne.

### 4. Analiza wyników

**W** poniższych tabelach (tab. 2–5) i na wykresach (rys. 1–7), przedstawione zostały wyniki obliczeń oraz zależności wydajności cieplnej i przepływu masowego czynnika grzewczego od poszczególnych parametrów.

#### 4.1. Temperatura zasilania

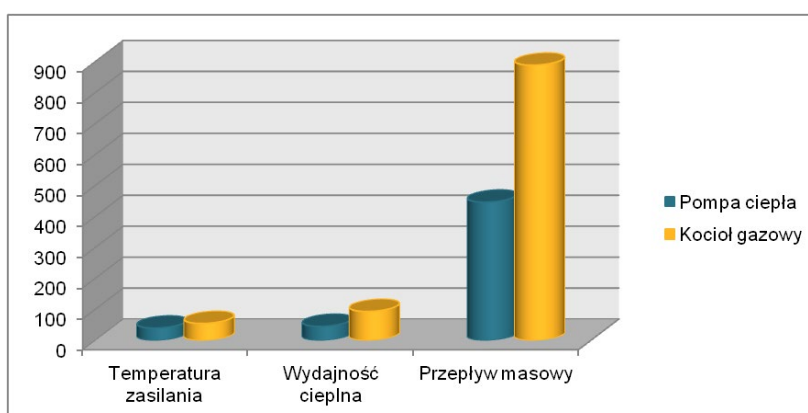
W tabeli 2 przedstawiono wyniki obliczeń badanych wskaźników, w zależności od temperatury zasilania.

Tabela 2. Wyniki obliczeń wydajności cieplnej i przepływu masowego w zależności od temperatury zasilania

| Parametr                              | Pompa ciepła | Kocioł gazowy |
|---------------------------------------|--------------|---------------|
| Temperatura zasilania [°C]            | 40           | 55            |
| Wydajność cieplna [W/m <sup>2</sup> ] | 45,5         | 93,8          |
| Przepływ masowy [kg/h]                | 446,8        | 889,3         |

Źródło: opracowanie własne.

Wydajność cieplna ogrzewania podłogowego zasilanego pompą ciepła osiągnęła wartość 45,5 W/m<sup>2</sup>, natomiast przepływ masowy 446,8 kg/h. Przy założeniu instalacji zasilanej z kotła gazowego wydajność cieplna wynosiła 93,8 W/m<sup>2</sup>, a przepływ masowy 889,3 kg/h. Po dokonaniu analizy zauważyć można, iż temperatura zasilania wywiera znaczny wpływ na wydajność cieplną instalacji ogrzewania podłogowego i przepływ masowy czynnika w przewodach. W przypadku pompy ciepła, temperaturę zasilania przyjęto na poziomie 40°C, natomiast dla kotła gazowego 55°C. Różnica tych wartości spowodowała, iż wydajność cieplna instalacji zasilanej z kotła gazowego jest ponad 2-krotnie wyższa niż uzyskana przy zastosowaniu pompy ciepła. Analogicznie przepływ masowy czynnika grzewczego osiągnął wartość blisko 2-krotnie niższą. Wyniki obliczeń przedstawione zostały w sposób graficzny na rysunku 1.



Rysunek 1. Porównanie wydajności cieplnej i przepływu masowego w zależności od temperatury zasilania

Źródło: opracowanie własne

## 4.2. Temperatura poniżej powierzchni grzewczej

W tabeli 3 przedstawiono wyniki obliczeń wydajności cieplnej i przepływu masowego, w zależności od temperatury poniżej powierzchni grzewczej. Zarówno dla pompy ciepła, jak i kotła gazowego, przyjęto następujące temperatury:

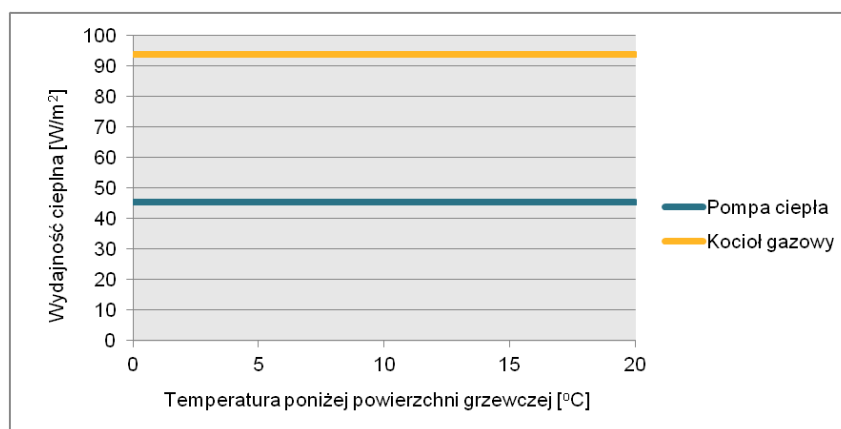
- 0°C odpowiadające sytuacji, gdy przewody umieszczone są w podłodze na gruncie;
- 8°C odpowiadające sytuacji, gdy przewody umieszczone są w stropie nad nieogrzewaną piwnicą;
- 20°C odpowiadające sytuacji, gdy przewody umieszczone są w stropie nad pomieszczeniem nieogrzewanym.

Tabela 3. Wyniki obliczeń wydajności cieplnej i przepływu masowego w zależności od temperatury poniżej powierzchni grzewczej

| Parametr                                 | Pompa ciepła |       |       | Kocioł gazowy |       |       |
|--|--------------|-------|-------|---------------|-------|-------|
|  | 0            | 8     | 20    | 0             | 8     | 20    |
| Temp. poniżej powierzchni grzewczej [°C] | 0            | 8     | 20    | 0             | 8     | 20    |
| Wydajność cieplna [W/m <sup>2</sup> ]    | 45,5         | 45,5  | 45,5  | 93,8          | 93,8  | 93,8  |
| Przepływ masowy [kg/h]                   | 466,5        | 446,8 | 417,4 | 908,9         | 889,3 | 859,8 |

Źródło: opracowanie własne.

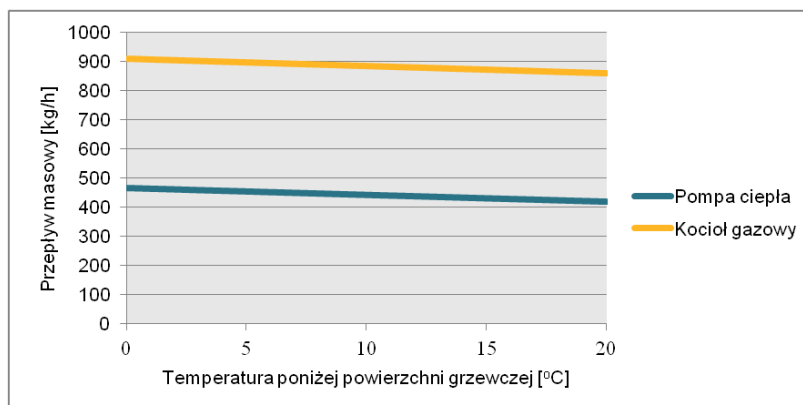
Wydajność cieplna instalacji ogrzewania podłogowego zasilanego pompą ciepła osiągnęła wartość 45,5 W/m<sup>2</sup>, natomiast w przypadku kotła gazowego było to 93,8 W/m<sup>2</sup>. Przepływ masowy czynnika grzewczego w przypadku pompy ciepła osiągnął wartości od 417,4 do 466,5 kg/h, przy czym wartość uzyskana dla temperatury 20°C była o ponad 4% wyższa niż w przypadku 8°C oraz ok. 12% niż dla 0°C. Na rysunku 2 przedstawiono zależność wydajności cieplnej od temperatury poniżej powierzchni grzewczej.



Rysunek 2. Porównanie wydajności cieplnej i przepływu masowego w zależności od temperatury poniżej powierzchni grzewczej

Źródło: opracowanie własne

Niezależnie od zastosowanego źródła ciepła, temperatura poniżej powierzchni grzewczej nie miała wpływu na wydajność cieplną instalacji – dla trzech wariantów temperatur utrzymała się na takim samym poziomie. Na rysunku 3 przedstawiono zależność przepływu masowego czynnika grzewczego od temperatury poniżej powierzchni grzewczej.



Rysunek 3. Porównanie przepływu masowego czynnika grzewczego, w zależności od temperatury poniżej powierzchni grzewczej

Źródło: opracowanie własne

Zarówno w przypadku instalacji ogrzewania podłogowego zasilanej pompą ciepła, jak i zasilanej kotłem gazowym, przepływ masowy czynnika grzewczego nieznacznie spadał wraz ze wzrostem temperatury poniżej powierzchni grzewczej. Oznacza to, iż przepływ masowy jest odwrotnie proporcjonalny do temperatury poniżej powierzchni grzewczej.

### 4.3. Grubość warstwy jastrychu

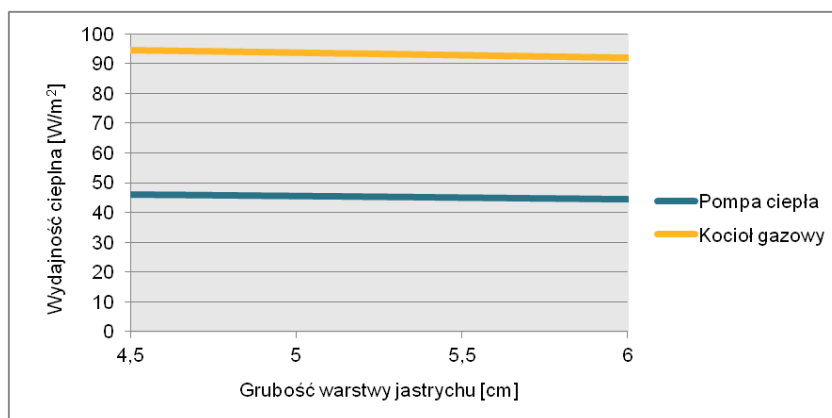
W tabeli 4 przedstawiono wyniki obliczeń wydajności cieplnej i przepływu masowego, w zależności od grubości warstwy jastrychu.

Tabela 4. Wyniki obliczeń wydajności cieplnej i przepływu masowego w zależności od grubości warstwy jastrychu

| Parametr                       | Pompa ciepła |       |       | Kocioł gazowy |       |       |
|--------------------------------|--------------|-------|-------|---------------|-------|-------|
|                                | 4,5          | 5     | 6     | 4,5           | 5     | 6     |
| Grubość warstwy jastrychu [cm] |              |       |       |               |       |       |
| Wydajność cieplna [ $W/m^2$ ]  | 45,9         | 45,5  | 44,6  | 94,7          | 93,8  | 91,9  |
| Przepływ masowy [kg/h]         | 450,2        | 446,8 | 439,4 | 896,2         | 889,3 | 874,0 |

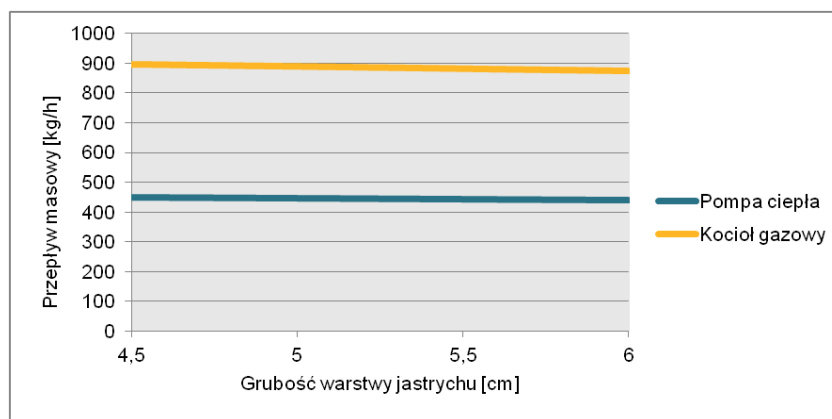
Źródło: opracowanie własne.

Wydajność cieplna instalacji ogrzewania podłogowego zasilanego pompą ciepła osiągnęła wartość  $45,9 \text{ W/m}^2$ , natomiast w przypadku kotła gazowego było to  $94,7 \text{ W/m}^2$ . Przepływ masowy czynnika grzewczego w przypadku pompy ciepła osiągnął wartości od 439,4 do 450,2 kg/h. Na rysunkach 4 i 5 przedstawiono zależności wydajności cieplnej i przepływu masowego od grubości warstwy jastrychu.



Rysunek 4. Porównanie wydajności cieplnej systemu ogrzewania podłogowego, w zależności od grubości warstwy jastrychu

Źródło: opracowanie własne



Rysunek 5. Porównanie przepływu masowego czynnika grzewczego, w zależności od grubości warstwy jastrychu

Źródło: opracowanie własne

Grubość warstwy jastrychu wpływa negatywnie na wydajność cieplną, jak również na przepływ masowy. Im grubsza warstwa jastrychu, tym niższe są oba para-

metry. Wylewka piaskowo-cementowa, zwana potocznie jastrychem, ma porowatą strukturę, przez co jest słabym przewodnikiem ciepła. Minimalna grubość wylewki, tak aby nie dochodziło do kruszenia i pęknięcia, wynosi 4,5 cm powyżej rurek grzewczych. Przy takiej grubości sprawność systemu ogrzewania jest najwyższa. Istotnym czynnikiem jest również jakość wykonanego jastrychu. Gęsty jastrych, dobrze dogęszczony w trakcie wykonania, jest lepszym przewodnikiem ciepła. Ważne jest również, aby użyty do wykonania jastrychu piasek był atestowany, miał odpowiednią krzywą przesiewu oraz aby zastosowany cement był odpowiedniej klasy i miał odpowiednią ilość dodatków chemicznych.

#### 4.4. Rodzaj podłogi

W tabeli 5 przedstawiono wyniki obliczeń wydajności cieplnej i przepływu masowego, w zależności od rodzaju podłogi. W obliczeniach przyjęto trzy rodzaje podłóg: cienki parkiet lub gruba terakota (0,05 m<sup>2</sup>K/W), gruby parkiet (0,10 m<sup>2</sup>K/W) oraz dywan lub wykładzina dywanowa (0,15 m<sup>2</sup>K/W).

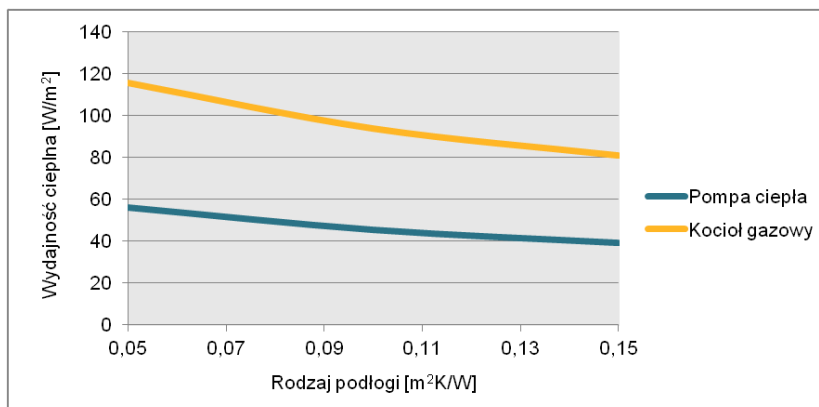
Tabela 5. Wyniki obliczeń wydajności cieplnej i przepływu masowego w zależności od rodzaju podłogi

| Parametr   | Pompa ciepła |       |       | Kocioł gazowy |       |       |
|--|--------------|-------|-------|---------------|-------|-------|
|  | 0,05         | 0,10  | 0,15  | 0,05          | 0,10  | 0,15  |
| Opór cieplny wykładziny podłogi [m <sup>2</sup> K/W] | 0,05         | 0,10  | 0,15  | 0,05          | 0,10  | 0,15  |
| Wydajność cieplna [W/m <sup>2</sup> ]                | 56,1         | 45,5  | 39,3  | 115,6         | 93,8  | 80,9  |
| Przepływ masowy [kg/h]                               | 537,0        | 446,8 | 394,2 | 1075          | 889,3 | 780,9 |

Źródło: opracowanie własne.

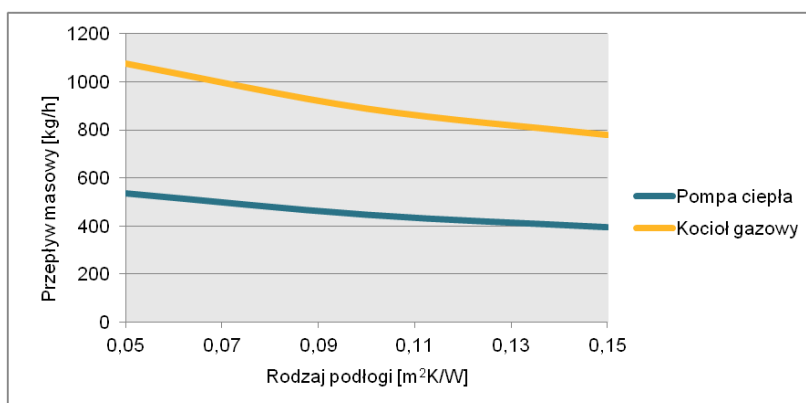
Rodzaj podłogi wpływa znacząco na wydajność cieplną i przepływ masowy. Jak przedstawiają rysunki 6 i 7, zdecydowanie najkorzystniejszym wykończeniem posadzki przy ogrzewaniu podłogowym jest cienki parkiet lub gruba terakota. Do najczęściej stosowanej terakoty należą płytki ceramiczne, gres oraz kamień naturalny. Są to materiały odporne na podwyższoną temperaturę i jej zmiany, a ponadto dobrze przewodzą ciepło. Mniej korzystne jest wykończenie posadzki parkietem drewnianym, szczególnie tym o znacznej grubości. Wynika to przede wszystkim ze słabszej przewodności ciepła drewna. W przypadku zastosowania paneli drewnianych istotne jest, aby parkiet układać jako posadzkę pływającą oraz aby panele posiadały odpowiednie atesty do stosowania przy ogrzewaniu podłogowym. Chodzi tu przede wszystkim o wysoką temperaturę podłogi, która może powodować emisję klejów i lakierów stosowanych do produkcji paneli. Najmniej korzystnym rozwiązaniem, a jednocześnie niezalecanym, jest zastosowanie dywanu lub wykładziny dywanowej jako warstwy wykończenia podłogi, gdyż znacząco obniża to wydajność cieplną i przepływ masowy.





Rysunek 6. Porównanie wydajności cieplnej systemu ogrzewania podłogowego, w zależności od rodzaju podłogi

Źródło: opracowanie własne



Rysunek 7. Porównanie przepływu masowego czynnika grzewczego, w zależności od rodzaju podłogi

Źródło: opracowanie własne

#### 4.5. Modele graficzne

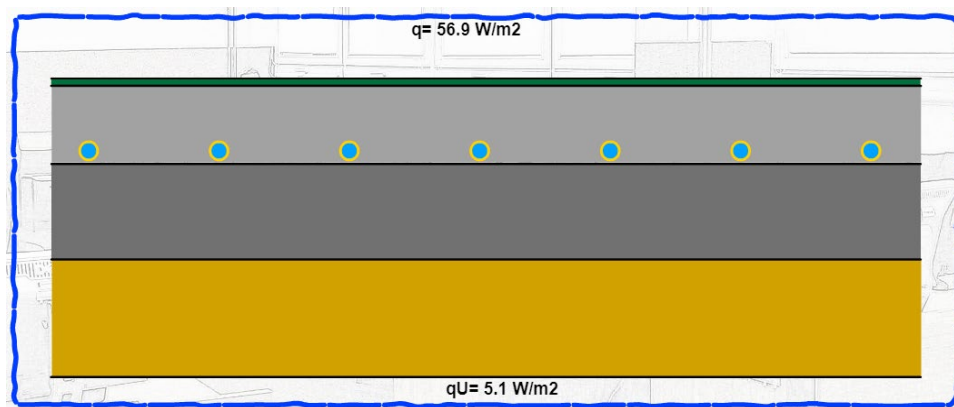
Po dokonaniu dogłębnej analizy uzyskanych zależności, stworzone zostały modele graficzne rozwiązań najbardziej korzystnych, z podziałem na źródła ciepła. W obu przypadkach najkorzystniejszym okazało się zastosowanie wariantu o najwyższej temperaturze poniżej powierzchni grzewczej i najmniejszej grubości warstwy jastrychu, zakładające podłogę z warstwy cienkiego parkietu lub grubej terakoty. Poniżej przedstawiono szczegółowe wartości omawianych parametrów dla instalacji z pompą ciepła oraz kotłem gazowym.

## 4.6. Pompa ciepła

Parametry najbardziej korzystnego rozwiązania:

- temperatura zasilania: 40°C,
- temperatura poniżej powierzchni grzewczej: 20°C,
- grubość warstwy jastrychu: 4,5 cm,
- rodzaj podłogi: cienki parkiet, gruba terakota 0,05 m<sup>2</sup>K/W.

Na rysunku 8 przedstawiono model graficzny najbardziej korzystnego rozwiązania stworzony dla instalacji ogrzewania podłogowego zasilanej za pomocą pompy ciepła.



Rysunek 8. Model graficzny najbardziej korzystnego rozwiązania instalacji ogrzewania podłogowego zasilanej pompą ciepła

Źródło: opracowanie własne na podstawie: Vipskills

Przy zastosowaniu najbardziej korzystnego rozwiązania, wydajność cieplna instalacji zasilanej z pompy ciepła wynosiła 56,9 W/m<sup>2</sup> i była jedynie o 1,4% wyższa od wartości jaką można uzyskać stosując wariant, zakładający pokrycie podłogi w postaci cienkiego parkietu lub grubej terakoty, przy jednoczesnym założeniu wartości średniej (wariant II) pozostałych parametrów. Wynika z tego, iż oprócz temperatury zasilania, największy wpływ na wydajność cieplną ma rodzaj podłogi.

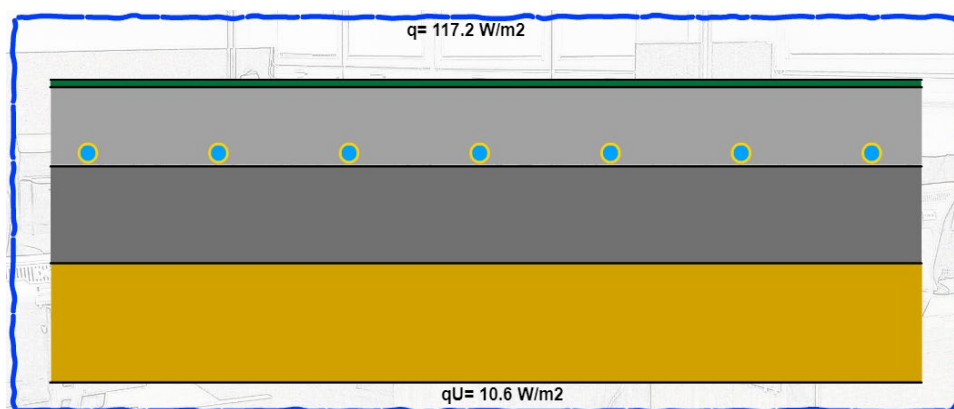
## 4.7. Kocioł gazowy

Parametry najbardziej korzystnego rozwiązania:

- temperatura zasilania: 55°C,
- temperatura poniżej powierzchni grzewczej: 20°C,

- grubość warstwy jastrychu: 4,5 cm,
- rodzaj podłogi: cienki parkiet, gruba terakota  $0,05 \text{ m}^2\text{K/W}$ .

Na rysunku 9 przedstawiono model graficzny obejmujący przekrój przez warstwy ogrzewania podłogowego w przypadku najbardziej korzystnego wariantu instalacji zasilanej za pomocą kotła gazowego.



Rysunek 9. Model graficzny najbardziej korzystnego rozwiązania instalacji ogrzewania podłogowego zasilanej kotłem gazowym

Źródło: opracowanie własne na podstawie: Vipskills

Zastosowanie najbardziej korzystnego rozwiązania instalacji zasilanej z kotła gazowego pozwoliło osiągnąć wydajność cieplną na poziomie  $117,2 \text{ W/m}^2$ . Również w tym przypadku była to wartość jedynie o 1,4% wyższa od wydajności, jaką można uzyskać stosując wariant zakładający pokrycie podłogi w postaci cienkiego parkietu lub grubej terakoty, przy założeniu wartości średniej pozostałych parametrów. Analogicznie, oprócz temperatury zasilania, największy wpływ na wydajność cieplną instalacji zasilanej z kotła gazowego ma rodzaj podłogi.

## 5. Wnioski

**N**ajwiększy wpływ na wydajność cieplną instalacji ogrzewania podłogowego oraz przepływ masowy czynnika grzewczego miały temperatura zasilania oraz rodzaj pokrycia podłogi. Niezależnie od źródła ciepła, najwyższą wartość wydajności odnotowano przy zastosowaniu nawierzchni z cienkiego parkietu lub grubej warstwy terakoty, najniższą zaś, gdy pokrycie stanowił dywan lub wykładzina dywanowa. W przypadku zmiany temperatury powierzchni grzewczej wydajność cieplna nie ulegała zmianie. Wraz ze wzrostem grubości warstwy jastrychu wydaj-

ność cieplna nieznacznie malała. Przepływ masowy czynnika grzewczego osiągnął wartości odwrotnie proporcjonalne do temperatury poniżej powierzchni grzewczej oraz grubości warstwy jastrychu. W zależności od źródła ciepła, zastosowanie dywanu lub wykładziny dywanowej skutkowało uzyskaniem 36–38% mniejszego przepływu masowego niż w przypadku, gdy podłogę stanowił cienki parkiet lub gruba warstwa terakoty.

### Literatura

- AKMAL M. 2016. *Modeling and Simulation of Underfloor Heating System Supplied from Heat Pump*. International Journal of Simulation: Systems, Science & Technology nr 17(35), s. 28.1–28.9.
- BASOK B., TKACHENKO M., NEDBAILO A. i BOZHKO I. 2018. *Research into energy efficiency of the underfloor heating system, assembler dry*. Technology Audit and Production Reserves nr 3/1(41), s. 52–57.
- GUPTA A. i PARANJAPE N. 2020. *Underfloor Heating Market Share 2020–2026: Industry Size Report*. Global Market Insights.
- PAJCHROWSKI G. i NOSKOWIAK A. 2018. *Thermal conductivity of Wooden floors in the context of underfloor heating system applications*. Drewno: prace naukowe, doniesienia, komunikaty nr 61(202), s. 145–152.
- ROSZKOWSKA P., MAGNUSZEWSKA M. i Krawczyk D.A. 2019. *Virtual laboratories in engineering analysis*. Series of Monographs ISMO: Energy nr 39, s. 19–24.
- RUDOLF J. 2018. *Energooszczędność podłóg w systemie wodnego ogrzewania podłogowego*. Materiały Budowlane nr 12, s. 49–52.
- UJMA A. 2018. *Analiza wybranych parametrów cieplnych podłóg nieogrzewanych i ogrzewanych*. Izolacje nr 11/12, r. 23, s. 49–52.
- Vipskills tools [2016-1-PL01-KA203-026152] stworzone w ramach Virtual and Intensive Course Developing Practical Skills of Future Engineers. Projekt realizowany w ramach programu Erasmus+ [Online] <http://vipskills.pb.edu.pl/results> [Dostęp: 20.06.2020].
- WIŚNIK K. i SABINIĄK H.G. 2014. *Zastosowanie okrągłego ożebrowania rur grzewczych w ogrzewaniu podłogowym*. Interdyscyplinarne zagadnienia w inżynierii i ochronie środowiska nr 4, s. 957–964.

## Monitoring jakości powietrza jako pierwszy krok w walce z niską emisją na obszarach uzdrowiskowych

**STRESZCZENIE:** W pracy przedstawiono analizę monitoringu jakości powietrza prowadzonego w małopolskich uzdrowiskach w latach 2002–2018. Uzyskane wyniki wykazały, że na obszarze omawianych uzdrowisk nie był prowadzony stały monitoring jakości powietrza pod względem stężeń pyłu PM10 czy B(a)P. Ponadto, dla uzdrowiska Rabka-Zdrój analiza została poszerzona o pomiary stężeń pyłu PM10 wykonywane za pomocą dwóch urządzeń niereferencyjnych tzw. czujników niskokosztowych, które porównano z wynikami opartymi na metodyce referencyjnej. Wyniki badań pokazały, że urządzenia nie spełniły wymogów dotyczących jakości pomiarów powietrza. Rozszerzona niepewność pomiarowa dla pomiarów ciągłych była większa niż 25% wartości progowej ( $50 \mu\text{g}/\text{dm}^3$ ) w przypadku obu sensorów. Badania podejmowane w niniejszej pracy wpisują się w 3., 7. oraz 13. cel zrównoważonego rozwoju.

**SŁOWA KLUCZOWE:** monitoring jakości powietrza, niska emisja, uzdrowiska, Rabka-Zdrój

## Air quality monitoring as the first step in actions restricting low emission in the health resort areas

**ABSTRACT:** The paper presents the analysis of air quality monitoring carried out in Małopolska health resorts in the years 2002–2018. The obtained results show that in the area of health resorts, there was no continuous monitoring of air quality in terms of PM10 dust and B(a)P. Furthermore, for the Rabka-Zdrój health resort, the analysis was extended by PM10 dust concentration measurements using two non-reference types of equipment, the so-called low-cost sensors that compared to the results based on a reference method. The research results showed that low-cost sensors did not meet the requirements for the quality of air measurements. The extended measurement uncertainty for continuous

---

<sup>1</sup> Mgr inż., AGH Akademia Górniczo-Hutnicza, Wydział Geologii, Geofizyki i Ochrony Środowiska, Katedra Surowców Energetycznych, Kraków, Polska.

<sup>2</sup> Prof. dr hab. inż., AGH Akademia Górniczo-Hutnicza, Wydział Geologii, Geofizyki i Ochrony Środowiska, Katedra Surowców Energetycznych, Kraków, Polska.

measurements was more than 25% of the limit value ( $50 \mu\text{g}/\text{dm}^3$ ) for both sensors. The research undertaken in this paper is in line with the goals of sustainable development, such as good health and well-being affordable and clean energy and climate action.

**KEYWORDS:** air quality monitoring, low emission, health resorts, Rabka-Zdrój

## 1. Wprowadzenie

**M**onitoring jakości powietrza jest jednym z głównych zadań Państwowego Monitoringu Środowiska realizowanego przez Główny Inspektorat Ochrony Środowiska (GIOŚ). Głównym celem monitoringu jakości powietrza jest pozyskiwanie, gromadzenie i analiza danych w zakresie stężeń zanieczyszczeń powietrza (GIOŚ 2020). Na ich podstawie dokonuje się oceny stanu jakości powietrza w Polsce. Informacje dostarczane w ramach monitoringu jakości powietrza są także istotne w kontekście oceny skuteczności realizacji działań podejmowanych na rzecz ochrony powietrza w danym obszarze.

Monitoring jakości powietrza odgrywa kluczową rolę w codziennym życiu społeczeństwa, które jest szczególnie narażone na negatywne skutki oddziaływania zanieczyszczeń powietrza. Polska od wielu lat boryka się ze złym stanem jakości powietrza. Każdego roku w wielu regionach Polski notuje się przekraczanie dopuszczalnych normy stężeń zanieczyszczeń takich jak pyły zawieszone: PM10 i PM 2.5, benzo(a)piren (B(a)P), a także w mniejszej skali dwutlenek azotu ( $\text{NO}_2$ ) czy dwutlenek siarki ( $\text{SO}_2$ ) (GIOŚ 2019). Wysokie stężenia zanieczyszczeń występują głównie w sezonie grzewczym, który zazwyczaj trwa od października do marca. Jak podaje Europejska Agencja Środowiska (EEA), podstawową przyczyną wysokich stężeń pyłów PM10, PM2.5 czy B(a)P w Europie jest nieefektywne spalanie paliw stałych niskiej jakości w gospodarstwach domowych (EEA 2019). Fakt ten jest także ściśle związany z występowaniem zjawiska niskiej emisji, które należy rozumieć jako emisję produktów spalania paliw stałych, płynnych i gazowych do atmosfery ze źródeł emisji znajdujących się na wysokości nie większej niż 40 m (Kaczmarczyk 2015).

Problem dotyczący złego stanu jakości powietrza nie omija obszarów uzdrowiskowych, które stanowią integralną część opieki zdrowotnej w Polsce. Podstawowa działalność obszarów uzdrowiskowych opiera się m.in. na wykorzystaniu właściwości naturalnych surowców leczniczych oraz właściwości leczniczych klimatu i mikroklimatu. Jednakże wiele uzdrowisk zмага się z problemem dotyczącym niespełniania stawianych im wymogów środowiskowych, w tym pod względem jakości powietrza, co potwierdziły wyniki kontroli przeprowadzonej przez Najwyższą Izbę Kontroli w 2016 r. (NIK 2016).

Małopolska jest drugim województwem pod względem liczby miejscowości, którym nadano status uzdrowiska. Dodatkowo jej wyżynno-górskie ukształtowanie te-

renu oraz niekorzystne warunki meteorologiczne (inwersja temperatury, słabe wiatry z wysokim udziałem cisz atmosferycznych) potęgują występowanie niskiej emisji. Dlatego też jednym z głównych celów pracy jest analiza monitoringu jakości powietrza prowadzonego na obszarach uzdrowiskowych w województwie małopolskim, ze szczególnym uwzględnieniem uzdrowiska Rabka-Zdrój.

Istotną kwestią jest również sposób i przyjęta metodyka przeprowadzania pomiarów jakości powietrza. Należy podkreślić, że pomiary wykonywane w stacjach GIOŚ monitoringu jakości powietrza odbywają się za pomocą metody grawimetrycznej, inaczej zwanej metodą referencyjną, oraz metody automatycznej, która jest równoważna do referencyjnej. Jednakże coraz popularniejsze w Polsce staje się powszechne wykorzystanie przez osoby indywidualne, stowarzyszenia oraz lokalne samorządy tzw. czujników niskokosztowych do pomiarów zanieczyszczeń powietrza. W związku z tym w niniejszej pracy podjęto także analizę porównawczą wyników prezentowanych przez czujniki niskokosztowe zlokalizowane w Rabce-Zdroju oraz stację GIOŚ, która wykonuje pomiary w oparciu o metodę referencyjną.

### **1.1. Podejmowane badania w kontekście zrównoważonego rozwoju**

Badania podejmowane w niniejszej pracy wpisują się w trzy podstawowe cele zrównoważonego rozwoju tj. Dobre zdrowie i jakość życia, Czysta i dostępna energia oraz Działania w dziedzinie klimatu. Monitoring jakości powietrza jest pierwszym krokiem do wyznaczenia działań naprawczych związanych z ochroną powietrza. Jest również głównym czynnikiem, który warunkuje ocenę i weryfikację skuteczności wprowadzonych działań. Podstawowym elementem ograniczenia niskiej emisji i poprawy stanu jakości powietrza w Polsce jest eliminacja urządzeń grzewczych na paliwa stałe i zastąpienie ich alternatywnymi źródłami energii. Wykorzystanie tzw. czystych technologii prowadzi do zredukowania stopnia degradacji środowiska naturalnego oraz minimalizacji negatywnych skutków zanieczyszczeń powietrza na zdrowie i jakość życia ludzi. W ten sposób realizowana jest istotna zasada zrównoważonego rozwoju, którego podstawę stanowi środowisko naturalne, działania mające na celu poprawę stanu jakości powietrza są narzędziem, a komfort i jakość życia społeczeństwa jest celem, który należy osiągnąć. Zachowanie odpowiedniej równowagi wszystkich wymienionych czynników jest niezwykle istotne i bez wykorzystania tego pierwszego elementu, jakim jest monitoring jakości powietrza, nie byłoby możliwe.

## 2. Charakterystyka obszaru badań

**W**ojewództwo małopolskie zlokalizowane jest w południowej części Polski i zajmuje powierzchnię ponad 15 tys. km<sup>2</sup>. Zgodnie z podziałem fizyczno-geograficznym według Kondrackiego (2002), w województwie małopolskim możemy wyróżnić dwie prowincje: Wyżyny Polskie i Karpaty Zachodnie z Podkarpaciem. Ukształtowanie terenu w województwie ma charakter wyżynny i górski, a ponad 30% obszaru cechuje położenie powyżej 500 m n.p.m. Na analizowanym obszarze znajduje się dziewięć uzdrowisk, z czego jedno nizinne, trzy podgórskie i pięć górskich (rys. 1).



Rysunek 1. Lokalizacja miejscowości, którym nadano status uzdrowiska  
Źródło: opracowanie własne na podstawie: Ministerstwo Zdrowia 2020; CODGiK 2020

Pod względem bioklimatycznym wszystkie uzdrowiska poza Swoszowicami (Region Świętokrzysko-małopolski) należą do Regionu Karpackiego (Błażejczyk i Kunert 2011). Na podstawie tabeli 1 oraz (Kozłowska-Szczęsna i in. 2002; Paczyński, Sadurski 2007; GUS 2011; Kuchcik i in. 2013; Porwiesz 2013) przedstawiono krótką charakterystykę poszczególnych uzdrowisk.

*Rabka-Zdrój* – jest uzdrowiskiem górskim zlokalizowanym w Kotlinie Rabczańskiej. Posiada złoża naturalnych surowców leczniczych w postaci wód chlorkowych typu



Cl-Na, Br, J, (B), (Fe). Średnia roczna temperatura powietrza oraz suma opadów wynoszą odpowiednio 6,5°C i 894 mm. Łączna liczba godzin ze słońcem w ciągu roku wynosi 1645 h. Średnia roczna prędkość wiatru wynosi 1,5 m/s. W uzdrowisku leczy się m.in. choroby górnych i dolnych dróg oddechowych, reumatologiczne i kardiologiczne.

*Swozowice* – uzdrowisko nizinne, jedyne w Polsce działające na obszarze dużej aglomeracji miejskiej. Obszar ten charakteryzuje się występowaniem siarczkowych wód leczniczych typu  $SO_4-HCO_3-Ca-Mg$ ,  $H_2S$  o mineralizacji pomiędzy 2,4 g/dm<sup>3</sup> a 2,8 g/dm<sup>3</sup>. Średnia roczna temperatura powietrza wynosi 8,3°C. Wartość usłonecznienia oscyluje w granicach 1391 h, a średnia prędkość wiatru wynosi 2,5 m/s.

*Szczawnica* – uzdrowisko górskie zlokalizowane na południowych zboczach doliny Grajcarka, pomiędzy pasmami górskimi Beskidu Sądeckiego i Pienin. Charakteryzuje się występowaniem szczaw chlorkowych ( $HCO_3-(Cl)-Na-(Ca)$ ,  $CO_2$ , (Br), (J), B) o mineralizacji 1–27,1 g/dm<sup>3</sup>. Średnia roczna suma opadów atmosferycznych wynosi 832 mm. Średnia roczna temperatura powietrza sięga 6,5°C. Średnia prędkość wiatru oscyluje w granicach 2,1 m/s. Uzdrowisko specjalizuje się w leczeniu schorzeń układu oddechowego i ruchowego, m.in. chorób reumatycznych i ortopedyczno-urazowych.

Tabela 1. Główne kierunki lecznictwa w małopolskich uzdrowiskach

| Kierunki lecznictwa uzdrowiskowego    | Krynica-Zdrój | Muszyna | Piwniczna-Zdrój | Rabka-Zdrój | Swozowice | Szczawnica | Wapienne | Wysowa-Zdrój | Żegiestów-Zdrój |
|---------------------------------------|---------------|---------|-----------------|-------------|-----------|------------|----------|--------------|-----------------|
| Choroby ortopedyczno-urazowe          |               |         |                 |             |           |            |          |              |                 |
| Choroby reumatologiczne               |               |         |                 |             |           |            |          |              |                 |
| Choroby układu nerwowego              |               |         |                 |             |           |            |          |              |                 |
| Choroby kardiologiczne i nadciśnienie |               |         |                 |             |           |            |          |              |                 |
| Choroby górnych dróg oddechowych      |               |         |                 |             |           |            |          |              |                 |
| Choroby dolnych dróg oddechowych      |               |         |                 |             |           |            |          |              |                 |
| Choroby układu trawienia              |               |         |                 |             |           |            |          |              |                 |
| Cukrzyca                              |               |         |                 |             |           |            |          |              |                 |
| Otyłość                               |               |         |                 |             |           |            |          |              |                 |
| Choroby endokrynologiczne             |               |         |                 |             |           |            |          |              |                 |
| Osteoporoza                           |               |         |                 |             |           |            |          |              |                 |
| Choroby skóry                         |               |         |                 |             |           |            |          |              |                 |
| Choroby kobiece                       |               |         |                 |             |           |            |          |              |                 |
| Choroby nerek i dróg moczowych        |               |         |                 |             |           |            |          |              |                 |
| Choroby krwi i układu krwiotwórczego  |               |         |                 |             |           |            |          |              |                 |

Źródło: opracowanie własne na podstawie: Ministerstwo Zdrowia 2020.

*Piwniczna-Zdrój* – uzdrowisko podgórskie usytuowane w Dolinie Popradu, uważane za zagłębie rozlewnicze wód mineralnych w Polsce (Rajchel 2009). Eksploatowane wody są szczawami zwykłymi typu  $\text{HCO}_3\text{-(Ca)-(Mg)-(Na)}$ ,  $\text{CO}_2$ , (Fe), (B). Głównymi profilami leczniczymi są choroby dolnych i górnych dróg oddechowych, układu trawienia i reumatologiczne. Średnia roczna suma opadów jest równa 805 mm, a średnia dobowa temperatura powietrza wynosi  $6,9^\circ\text{C}$ .

*Krynica-Zdrój* – uzdrowisko górskie położone we wschodniej części Beskidu Sądeckiego w Dolinie Popradu. W Krynicy-Zdroju szczególnym typem szczaw chlorkowych jest woda „Zuber” charakteryzująca się wysoką mineralizacją i dużą zawartością sodu oraz wodorowęglanów ( $\text{HCO}_3\text{-Na}$ ,  $\text{CO}_2$ , (J), (Br), (B)). Średnia roczna temperatura powietrza wynosi  $5,8^\circ\text{C}$ , a wartość usłonecznienia jest na poziomie 1444 h w roku. Suma opadów atmosferycznych jest równa 819 mm. Leczy się tu m.in. choroby nerek i dróg moczowych oraz krwi i układu krwiotwórczego.

*Żegiestów-Zdrój* – uzdrowisko górskie położone w Dolinie Popradu. Naturalnymi surowcami leczniczymi są szczawy typu  $\text{HCO}_3\text{-(Ca)-(Mg)-(Na)}$ ,  $\text{CO}_2$ , (Fe), (B) wykorzystywane w leczeniu chorób reumatologicznych, układu trawienia, nerek i dróg moczowych. Analiza warunków termicznych uzdrowiska wykazała, że średnia dobową temperatura powietrza wynosi  $6,3^\circ\text{C}$ , a łączna liczba godzin ze słońce w ciągu roku jest równa 1154 h. Roczna suma opadów sięga 797 mm, natomiast średnia prędkość wiatru kształtuje się na poziomie 1,9 m/s.

*Muszyna* – malownicze uzdrowisko podgórskie położone w Beskidzie Sądeckim. Podstawowym walorem uzdrowiska jest występowanie rozmaitych szczaw ( $\text{HCO}_3\text{-(Ca)-(Mg)-(Na)}$ ,  $\text{CO}_2$ , (Fe), (Br), (J), (B)), które wykorzystywane są w lecznictwie uzdrowiskowym chorób endokrynologicznych czy górnych dróg oddechowych. Średnia roczna temperatura powietrza wynosi  $6,2^\circ\text{C}$ , z kolei roczna suma opadów jest na poziomie 736 mm. Średnia prędkość wiatru wynosi 1,8 m/s, a średnie usłonecznienie jest równe 1339 h.

*Wysowa-Zdrój* – uzdrowisko górskie zlokalizowane w Beskidzie Niskim w Dolinie Ropy. Posiada zasoby cennych wód leczniczych Franciszek ( $\text{HCO}_3\text{-Cl-Na}$ , Br, J, B), Henryk ( $\text{HCO}_3\text{-Cl-Na}$ , B), Józef ( $\text{HCO}_3\text{-Cl-Na}$ , Fe), które mają bardzo szerokie zastosowanie w leczeniu wielu chorób i schorzeń. Wysowa Zdrój charakteryzuje się wysoką średnią roczną prędkością wiatru 4,1 m/s. Średnia roczna suma opadów jest równa 823 mm, a średnia dobowa temperatura powietrza wynosi  $5,7^\circ\text{C}$ .

*Wapienne* – niewielkie uzdrowisko podgórskie położone w rejonie Beskidu Niskiego. Rejon ten słynie z zasobów siarczkowych wód leczniczych typu  $\text{HCO}_3\text{-Ca-Mg-(Na)}$ ,  $\text{H}_2\text{S}$  oraz złóż torfowych na północno-zachodnim stoku Kamiennej Góry. Naturalne surowce lecznicze wykorzystywane są w leczeniu chorób reumatologicznych oraz ortopedyczno-urazowych. Średnia roczna temperatura powietrza wynosi  $5,6^\circ\text{C}$ .

### 3. Materiały i metody

**A**nalizę stanu jakości powietrza przeprowadzono w oparciu o wyniki pomiarów oraz statystyki uzyskane z Banku danych pomiarowych (GIOŚ 2020a) w latach 2002–2018. W założonym przedziale czasu, monitoring jakości powietrza był prowadzony w sześciu uzdrowiskach. Stacje pomiarowe monitorowały stężenia zanieczyszczeń pyłu PM10, B(a)P, NO<sub>2</sub>, SO<sub>2</sub> (tab. 2). Monitoring jakości powietrza prowadzony na poszczególnych stacjach pomiarowych odbywał się za pomocą

**Tabela 2. Wykaz stacji pomiarowych Głównego Inspektoratu Ochrony Środowiska zlokalizowanych na obszarach uzdrowiskowych w latach 2002–2018**

| Lp. | Nazwa uzdrowiska | Rodzaj zanieczyszczenia                                   | Typ pomiaru* | Lata pomiaru |
|-----|------------------|---|--------------|--------------|
| 1.  | Krynica-Zdrój    | NO <sub>2</sub> , PM10, SO <sub>2</sub>                   | A            | 2009         |
|     |                  | NO <sub>2</sub> , NO <sub>x</sub> , PM10, SO <sub>2</sub> | A            | 2010         |
|     |                  | NO <sub>2</sub> , SO <sub>2</sub>                         | M            | 2004–2008    |
| 2.  | Muszyna          | B(a)P, PM10   | M            | 2017         |
|     |                  | B(a)P, PM10   | M            | 2016         |
|     |                  | SO <sub>2</sub>   | A            | 2016         |
|     |                  | NO <sub>2</sub> , SO <sub>2</sub>                         | M            | 2003–2009    |
|     |                  | B(a)P, PM10   | M            | 2018         |
| 3.  | Piwniczna        | NO <sub>2</sub> , SO <sub>2</sub>                         | M            | 2004–2005    |
|     |                  | B(a)P, PM10   | M            | 2016         |
|     |                  | SO <sub>2</sub>   | A            | 2016         |
| 4.  | Rabka-Zdrój      | B(a)P, PM10   | M            | 2017         |
|     |                  | B(a)P, PM10   | M            | 2014         |
|     |                  | SO <sub>2</sub>   | A            | 2014         |
|     |                  | NO <sub>2</sub> , PM10, SO <sub>2</sub>                   | A            | 2009         |
|     |                  | NO <sub>2</sub> , SO <sub>2</sub>                         | M            | 2004–2007    |
| 5.  | Swoszowice       | Brak monitoringu jakości powietrza                        |              |              |
| 6.  | Szczawnica       | B(a)P, PM10   | M            | 2015         |
|     |                  | SO <sub>2</sub>   | A            | 2015         |
| 7.  | Wapienne         | Brak monitoringu jakości powietrza                        |              |              |
| 8.  | Wysowa-Zdrój     | NO <sub>2</sub>   | M            | 2003         |
|     |                  | SO <sub>2</sub>   | M            | 2003–2004    |
| 9.  | Żegiestów-Zdrój  | Brak monitoringu jakości powietrza                        |              |              |

Objaśnienia: \* A – pomiary wykonywane metodą automatyczną; M – pomiary wykonywane metodą manualną.

Źródło: opracowanie własne na podstawie: GIOŚ 2020a.

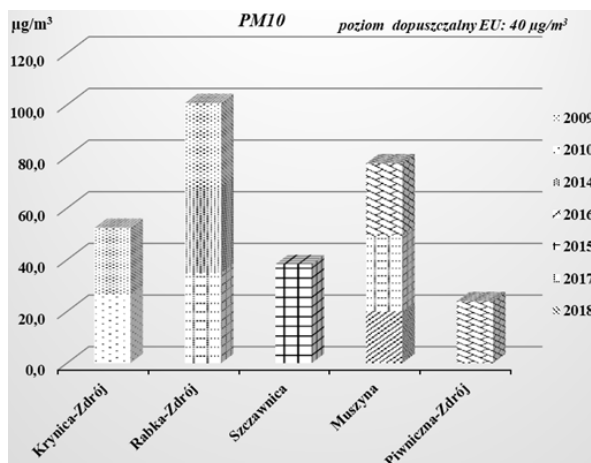
metody grawimetrycznej (manualnej), która jest metodą referencyjną pomiaru zanieczyszczeń powietrza, oraz metody automatycznej, która posiada wykazaną równoważność względem metodyki referencyjnej. Analizę jakości powietrza w małopolskich uzdrowiskach dokonano w oparciu o poziomy dopuszczalne zanieczyszczeń w powietrzu ze względu na ochronę zdrowia ludzi i ochronę roślin (Dz. Urz. UE L 152 z 11.06.2008, Dz.Urz. UE L 23 z 26.01.2005, Dz.U. 2018 r., poz. 1119). Uzyskane wyniki odniesiono także do wytycznych Światowej Organizacji Zdrowia (WHO) dotyczących jakości powietrza (WHO 2005). Dodatkowo, uwzględniono także dopuszczalne częstości przekraczania poziomu dopuszczalnego w roku kalendarzowym dla pyłu PM<sub>10</sub>, NO<sub>2</sub> i SO<sub>2</sub>.

Z uwagi na coraz większą popularność, jaką zyskują czujniki niskokosztowe w Polsce, wykonano charakterystykę porównawczą wyników badań uzyskanych z urządzeń, których działanie oparte jest na metodzie niereferencyjnej (CM), w odniesieniu do pomiarów wykonywanych metodą referencyjną (RM). Do przeprowadzenia analizy wykorzystano dane pochodzące z dwóch różnych czujników niskokosztowych oraz dane pomiarowe ze stacji GIOŚ zainstalowanych w tej samej lokalizacji na terenie Rabki-Zdroju. Pozyskane dane zawierały serię 61 ciągłych pomiarów średniodobowych stężeń pyłu PM<sub>10</sub> pochodzących z sezonu jesienno-zimowego w 2017 r. Dla każdego z sensorów przeprowadzono kalibrację w oparciu o arkusz wyznaczania zgodności *Orthogonal regression and equivalence test utility* opracowany przez *Dutch Institute for Public Health and the Environment (RVIM)* oraz wyznaczono rozszerzoną niepewność pomiaru.

## 4. Wyniki

Większości analizowanych miejscowości pomiar stężenia pyłu PM<sub>10</sub> prowadzony był w sposób okresowy, dla poszczególnych lat lub jednego roku kalendarzowego. Jedynie w uzdrowisku Muszyna w latach 2016–2018 prowadzony był ciągły monitoring stężenia pyłu PM<sub>10</sub>. Z wyników przedstawionych na rysunku 2 wynika, że żadne uzdrowisko nie przekroczyło dopuszczalnej wartości średniorocznego stężenia pyłu PM<sub>10</sub> – na poziomie 40 µg/dm<sup>3</sup>, zgodnie z normą Unii Europejskiej (UE). Jednakże analizując dane pod kątem wytycznych Światowej Organizacji Zdrowia (WHO), według której graniczna wartość średniorocznego stężenia pyłu PM<sub>10</sub> wynosi 20 µg/dm<sup>3</sup>, jedynie uzdrowisko Muszyna w 2018 r. spełniło to kryterium. Najwyższe średnioroczne stężenia pyłu PM<sub>10</sub> notowane były w Szczawnicy 38,3 µg/dm<sup>3</sup> w 2015 r. oraz na terenie Rabki-Zdroju: 34,8 µg/dm<sup>3</sup> (2017), 33,5 µg/dm<sup>3</sup> (2014) i 32,4 µg/dm<sup>3</sup> (2009).

Ponadto, we wszystkich omawianych uzdrowiskach odnotowano przekroczenia średniodobowego stężenia pyłu PM<sub>10</sub> (>50 µg/dm<sup>3</sup>). Uzdrowisko Muszyna oraz Rab-



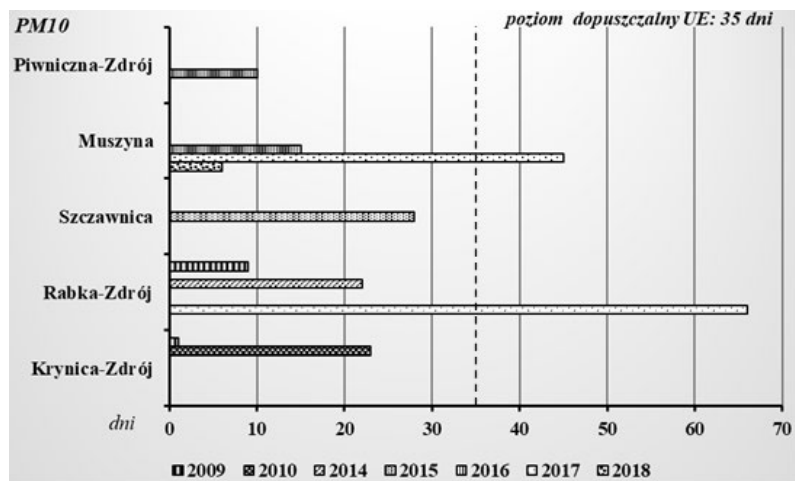
Rysunek 2. Średnioroczne stężenie pyłu PM10 w małopolskich uzdrowiskach  
Źródło: opracowanie własne na podstawie: GIOŚ 2020a

ka-Zdrój w 2017 r. przekroczyły odpowiednio o 10 i 31 dni dopuszczalną częstość przekroczeń – 35 dni w roku kalendarzowym (rys. 3). Najwyższe dobowe stężenie PM10 odnotowano w 2017 r. w Muszynie ( $235,7 \mu\text{g}/\text{dm}^3$ ) oraz Rabce-Zdroju ( $196 \mu\text{g}/\text{dm}^3$ ). Przekroczenia dobowego stężenia pyłu PM10 w powietrzu występują głównie w okresie od października do marca, który jednocześnie jest sezonem grzewczym w Polsce. Najwyższa liczba dni z przekroczeniem granicznej wartości dla pyłu PM10 wystąpiła w okresie styczeń–luty, dla uzdrowisk Muszyna i Rabka-Zdrój w 2017 r. wyniosła odpowiednio 31 dni oraz 39 dni.

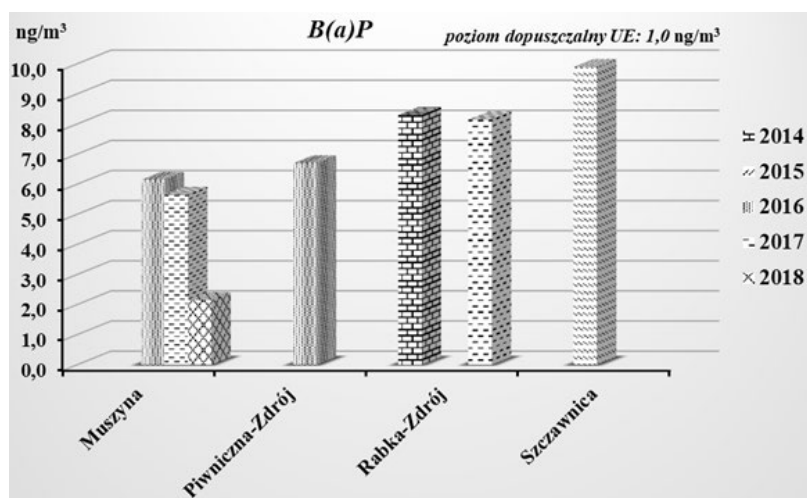
Monitoring jakości powietrza pod względem stężenia rakotwórczego B(a)P w powietrzu wykazał, że żadne z analizowanych uzdrowisk w latach 2014–2018 nie spełniło standardów UE dla średniorocznego stężenia B(a)P ( $1 \text{ ng}/\text{dm}^3$ ). Na terenie uzdrowiska Szczawnica wartość graniczna stężenia B(a)P została przekroczona prawie dziesięciokrotnie w 2015 r., w Rabce-Zdroju ośmiokrotnie w 2014 i 2017 r., natomiast w Muszynie i Piwnicznej-Zdroju sześciokrotnie w 2016 r. (rys. 4).

Wysokie stężenie B(a)P, podobnie jak w przypadku pyłu PM10, występuje w sezonie jesienno-zimowym. Jest to związane z wykorzystaniem paliw stałych do celów grzewczych oraz przygotowania ciepłej wody użytkowej. Dodatkowo, niekorzystne warunki meteorologiczne, tj. inwersja temperatury czy niskie prędkości wiatru, powodują gromadzenie się zanieczyszczeń w przyziemnej warstwie atmosfery. Głównym źródłem pochodzenia wielopierścieniowych węglowodorów aromatycznych (WWA), do których zaliczamy B(a)P, jest emisja z gospodarstw domowych na poziomie aż 96% osiągnięta w 2018 r. w Polsce (KOBiZE, IOŚ-PIB 2020).

Na obszarze poligonu badawczego najdłużej wykonywane były pomiary stężenia  $\text{NO}_2$  i  $\text{SO}_2$ . W uzdrowiskach Muszyna i Krynica-Zdrój stały monitoring zanieczyszczeń



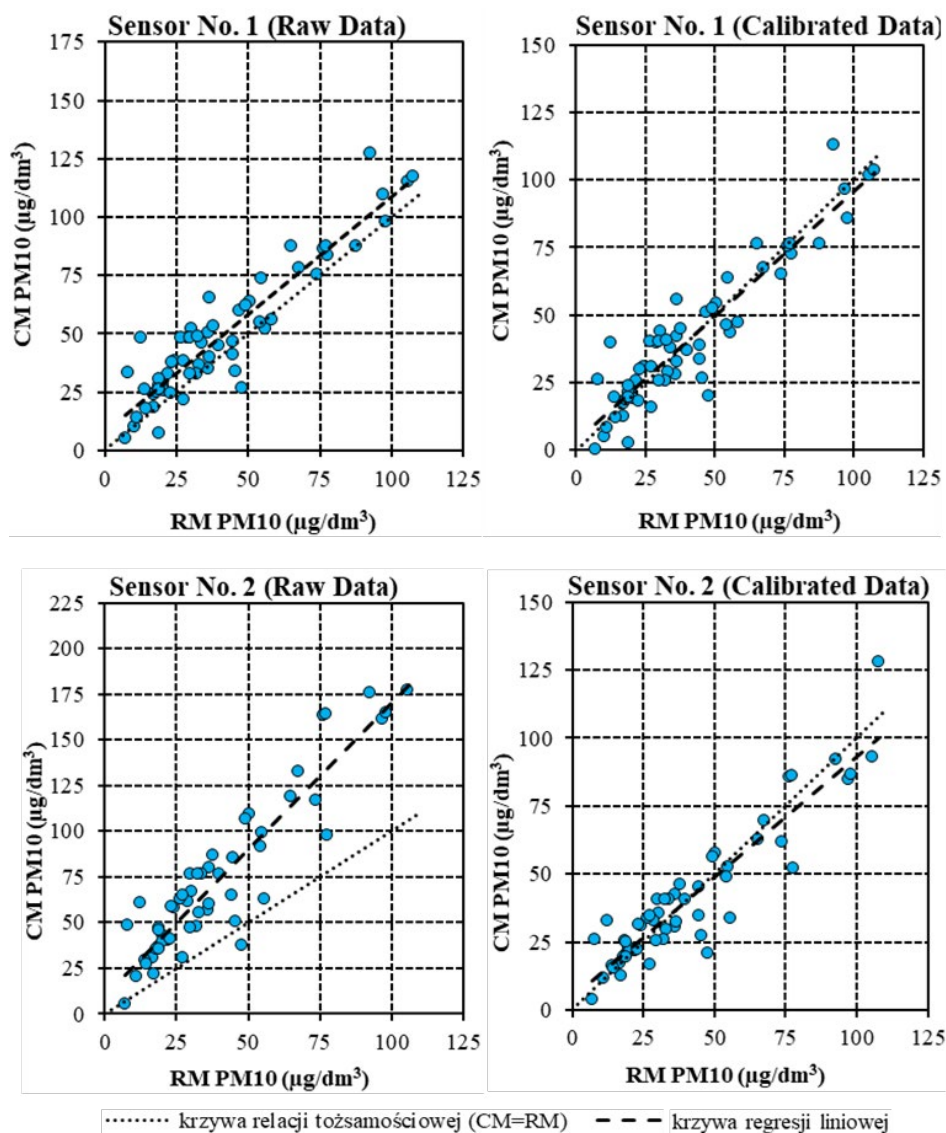
Rysunek 3. Liczba dni z przekroczeniem dobowego stężenia pyłu PM10  
Źródło: opracowanie własne na podstawie: GIOŚ 2020



Rysunek 4. Średnioroczne stężenie B(a)P w małopolskich uzdrowiskach  
Źródło: opracowanie własne na podstawie: GIOŚ 2020

prowadzono przez siedem lat, natomiast w Rabce Zdroju przez pięć lat – z roczną przerwą w 2008 r. (tab. 2). Średnioroczne stężenia NO<sub>2</sub> wahały się pomiędzy 7,9 µg/dm<sup>3</sup> a 17,0 µg/dm<sup>3</sup>. Z kolei średnie stężenie SO<sub>2</sub> wynosiło od 0,8 µg/dm<sup>3</sup> do 13,0 µg/dm<sup>3</sup>. W latach 2002–2018 żadne uzdrowisko nie przekroczyło wartości granicznej UE oraz WHO pod względem stężenia NO<sub>2</sub> i SO<sub>2</sub> oraz częstości przekraczania poziomu dopuszczalnego w roku kalendarzowym.

W przypadku zestawienia średnich wartości PM10 uzyskanych w okresie jesienno-zimowym w 2017 r. z urządzenia referencyjnego oraz czujników niskokosztowych, można zaobserwować, że Sensor nr 1 wykazuje mniejsze zróżnicowanie w stosunku do metody referencyjnej niż Sensor nr 2 (rys. 5). Dane surowe uzyskane z Sensora nr 2



Rysunek 5. Krzywe korelacji wyznaczone dla wartości pyłu PM10 mierzonych przez testowany sensor (CM) a metodyką referencyjną (RM)

Źródło: opracowanie własne na podstawie: GIOŚ 2020 oraz danych z czujników niskokosztowych



prezentują zdecydowanie zawyżone wartości pomiarów w stosunku do metodyki referencyjnej. Obserwuje się zależność, że im wyższe stężenie pyłu PM10, tym wartości z Sensora nr 2 są bardziej zawyżone, w niektórych przypadkach nawet dwukrotnie. Pomiary wykonane przy użyciu Sensora nr 1 wykazały, że 15% danych jest zaniżonych w porównaniu z metodyką referencyjną. Analiza porównawcza wykonana dla dwóch czujników niskokosztowych wykazała, że żadne urządzenie nie spełniło wymagań dotyczących jakości pomiarów powietrza. Rozszerzona niepewność pomiarowa dla pomiarów ciągłych była większa niż 25% wartości progowej ( $50 \mu\text{g}/\text{dm}^3$ ) w przypadku obu sensorów, zarówno przed, jak i po kalibracji. Jednakże skalibrowanie danych pozwoliło analizowanym urządzeniom spełnić kryterium niepewności dla badań okresowych, które wynosi 50% wartości progowej. Ponadto, liczba przekroczeń dopuszczalnych dziennych wartości PM10 wykrywana przez czujniki niskokosztowe jest zdecydowanie wyższa niż uzyskana przy zastosowaniu metodyki referencyjnej.

## 5. Podsumowanie i wnioski

**P**rzeprowadzona analiza monitoringu jakości powietrza w małopolskich uzdrowiskach wykazała, że w żadnym z omawianych uzdrowisk nie jest prowadzony stały monitoring w zakresie pomiaru stężeń wszystkich omawianych zanieczyszczeń. Wyróżnić można jednak obszary, dla których prowadzono ciągły pomiar przez kilka lat: Muszyna, Krynica-Zdrój – przez siedem lat pomiar stężenia  $\text{NO}_2$  i  $\text{SO}_2$ ; Muszyna – przez trzy lata pomiar stężenia pyłu PM10 i B(a)P. Dane przedstawione w pracy pokazują, że w małopolskich uzdrowiskach występuje problem przekraczania dopuszczalnych stężeń zanieczyszczeń, co w głównej mierze spowodowane jest wykorzystaniem paliw stałych, często słabej jakości, do celów grzewczych w gospodarstwach domowych. Wyniki badań porównawczych urządzeń niskokosztowych przeznaczonych do pomiaru stężenia pyłu PM10 wykazały, że w każdym analizowanym przypadku żadne urządzenie nie spełniło wymagań rozszerzonej niepewności względnej dla metody zgodnej z referencyjną. W związku z tym, dane otrzymane z czujników niskokosztowych mogą jedynie stanowić informację o przybliżonym stężeniu zanieczyszczeń.

Obszary uzdrowiskowe stanowią integralny element służby zdrowia, których działalność opiera się m. in. na wykorzystaniu właściwości naturalnych surowców leczniczych oraz właściwości leczniczych klimatu. Dlatego też stały monitoring jakości powietrza na obszarach uzdrowiskowych jest jednym z pierwszych kroków, które należy podjąć w walce z niską emisją. Zastosowanie stałego pomiaru zanieczyszczeń umożliwiłoby bieżącą i szczegółową ocenę jakości powietrza w uzdrowiskach. Dodatkowo, pozwoliłoby na odpowiednie dostosowanie i wdrażanie działań naprawczych.



Co więcej, stały monitoringi zanieczyszczeń powietrza zapewniły każdej miejscowości uzdrowiskowej ocenę skuteczności realizowanych działań na rzecz ochrony powietrza oraz spełnienie wymogów środowiskowych stawianych uzdrowiskom pod względem oceny stanu sanitarnego powietrza.

Praca naukowa finansowana ze środków budżetowych na naukę w latach 2017–2021 jako projekt badawczy w ramach programu „Diamentowy Grant” (Nr DI2016 003946).

## Literatura

- BŁAŻEJCZYK K. i KUNERT A. 2011. *Bioklimatyczne uwarunkowania rekreacji i turystyki w Polsce*. Monografie 13, IGiPZ PAN, Warszawa.
- CODGiK 2020. *Dane geodezyjne i kartograficzne*. [Online] <http://www.gugik.gov.pl/pzgik/dane-udostepniane-bez-oplat> [Dostęp: 19.05.2020].
- Dyrektywa Parlamentu Europejskiego i Rady 2004/107/WE z dnia 15 grudnia 2004 r. w sprawie arsenu, kadmu, niklu, rtęci i wielopierścieniowych węglowodorów aromatycznych w otaczającym powietrzu (Dz.Urz. UE L 23 z 26.01.2005).
- Dyrektywa Parlamentu Europejskiego i Rady 2008/50/WE z dnia 21 maja 2008 roku w sprawie jakości powietrza i czystszej powietrza dla Europy (Dz. Urz. UE L 152 z 11.06.2008).
- EEA 2019: *Air quality in Europe – 2019 Report No. 10/2019*. [Online] <https://www.eea.europa.eu/publications/air-quality-in-europe-2019> [Dostęp 16.05.2020].
- GIOŚ 2019: *Pięcioletnia ocena jakości powietrza w strefach w Polsce*. [Online] <http://powietrze.gios.gov.pl/pjp/maps/air/quality/type/W> [Dostęp 16.05.2020].
- GIOŚ 2020. *Strategiczny program państwowego monitoringu środowiska na lata 2020–2025*. [Online] <http://www.gios.gov.pl/pl/stan-srodowiska/pms> [Dostęp: 16.05.2020].
- GIOŚ 2020a. *Bank danych pomiarowych*. [Online] <https://powietrze.gios.gov.pl/pjp/archives> [Dostęp 27.05.2020].
- GUS 2011. *Lecznictwo uzdrowiskowe w Polsce w latach 2000–2010*. [Online] <http://www.stat.gov.pl> [Dostęp 20.05.2020].
- KACZMARCZYK M. red. 2015. *Niska emisja: od przyczyn występowania do sposobów eliminacji*. Geosystem Burek, Kotyza S. C., Kraków.
- KOBiZE, IOŚ-PIB 2020. *Krajowy bilans emisji SO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub>, CO, NH<sub>3</sub>, NMLZO, pyłów, metali ciężkich i TZO za lata 1990–2018. Raport syntetyczny*. [Online] <https://www.kobize.pl/pl/fileCategory/id/16/krajowa-inwentaryzacja-emisji> [Dostęp 16.06.2020].
- KONDRACKI J. 2002. *Geografia regionalna Polski*. Wyd. Naukowe PWN, Warszawa.
- KOZŁOWSKA-SZCZĘSNA T., BŁAŻEJCZYK K., KRAWCZYK B. i LIMANÓWKA D. 2002. *Bioklimat uzdrowisk polskich i możliwości jego wykorzystania w lecznictwie*. Monografie IGiPZ PAN, 3, Warszawa.
- KUCHCIK M., BŁAŻEJCZYK K., SZMYD J., MILEWSKI P., BŁAŻEJCZYK A. i BARANOWSKI J. 2013. *Potencjał leczniczy klimatu Polski*. IGiPZ PAN, Wyd. Akademickie Sedno, Warszawa.
- MATUSZKO A. i MATUSZKO D. 2014. *Prognoza oddziaływania na środowisko do miejscowego planu zagospodarowania przestrzennego dla strefy „A” ochrony uzdrowiskowej uzdrowiska Rabka-Zdrój*. Kraków.
- Ministerstwo Zdrowia 2020. *Lecznictwo uzdrowiskowe*. [Online] <https://www.gov.pl/web/zdrowie/lecznictwo-uzdrowiskowe> [Dostęp 19.05.2020].
- NIK 2016. *Spełnienie wymogów określonych dla uzdrowisk*. [Online] <https://www.nik.gov.pl/plik/id,12663,vp,15061.pdf> [Dostęp 18.05.2020].

## Część 2. Energia ze źródeł pierwotnych i wtórnych

---

- PACZYŃSKI B. i SADURSKI A. red. 2007. *Hydrogeologia regionalna Polski*. Tom II, Wody mineralne, lecznicze i termalne oraz kopalniane. Warszawa, Państwowy Instytut Geologiczny.
- PORWISZ B. 2013. *Szlakiem wód leczniczych i termalnych w Małopolsce*. Departament Środowiska Urzędu Marszałkowskiego Województwa Małopolskiego, Wyd. „Compass”, Kraków.
- RAJCHEL L. 2009. *Zagłębie rozlewni wód mineralnych w Dolinie Popradu*. *Geologia* t. 35, z. 2/1, s. 279–288.
- Rozporządzenie Ministra Środowiska RMŚ z dnia 8 czerwca 2018 r. w sprawie dokonywania oceny poziomów substancji w powietrzu (Dz.U. 2018 r., poz. 1119).\*
- WHO 2005. *Air Quality Guidelines. Global update 2005*. WHO Regional Office for Europe, Copenhagen.

Mariusz ADAMSKI<sup>1</sup>, Maksim REBMAN<sup>2</sup>

---

## Akumulacja ciepła w systemach wentylacyjnych budynków

**STRESZCZENIE:** W artykule omówiono zagadnienia związane z budynkami o niemal zerowym zużyciu energii (nZEB). Zaprezentowano, jak na przestrzeni lat wzrastają wymagania ochrony cieplnej budynków. Wskazano, że zmniejszenie zużycia ciepła przez budynki wymaga nie tylko poprawy izolacyjności przegród, ale także stosowania nowych rozwiązań. Podano sposoby akumulacji ciepła. Przedstawiono przykład budynku z instalacją wentylacyjną nawiewno-wywiewną wyposażoną w powietrzne kolektory słoneczne, rekuperator oraz akumulator ciepła. Zamieszczono wyniki badań na modelu budynku z zastosowaniem wodnego roztworu soli głauberskiej do akumulowania ciepła. Praca wpisuje się w 11. i 12. cel zrównoważonego rozwoju.

**SŁOWA KLUCZOWE:** sól głauberska, wentylacja, kolektor słoneczny

## Heat accumulation in ventilation systems of buildings

**ABSTRACT:** Issues related to nearly zero-energy buildings were discussed. It was presented how the requirements for thermal protection of buildings have been increasing over the years. It was indicated that reducing heat consumption by buildings requires not only improvement of the insulation of partitions, but also the use of new solutions. The methods of heat accumulation are given. An example of a building with a supply and exhaust ventilation system equipped with solar air collectors, a recuperator and a heat accumulator is presented. The results of tests on a building model with the use of a water solution of Glauber's salt for heat accumulation are presented. The work is part of the 11<sup>th</sup> and 12<sup>th</sup> goals of sustainable development.

**KEYWORDS:** Glauber's salt, ventilation, solar collector

---

<sup>1</sup> Dr hab. inż., prof. PB, Politechnika Białostocka, Białystok, Polska.

<sup>2</sup> Mgr inż., Politechnika Lwowska, Lwów, Ukraina.

## 1. Wprowadzenie

### 1.1. Zużycie ciepła i zyski cieplne budynków

Celem pracy jest prezentacja budynku nZEB wykorzystującego do zmniejszenia zużycia energii cieplnej na ogrzewanie budynku energią słoneczną, instalację wentylacyjną oraz akumulację jego ciepła. W dobowym cyklu nadwyżki ciepła uzyskane w powietrznych kolektorach słonecznych mają być przekazane do akumulatorów ciepła. Założenia takiego rozwiązania podano w publikacji (Zhelykh i in. 2019).

W wyniku poprawy standardów budownictwa i zaostrzenia wymagań ochrony cieplnej budynków, poprawy izolacyjności przegród w budynkach nowo wznoszonych oraz docieplania przegród w budynkach istniejących maleje jednostkowe zużycie ciepła na ogrzanie 1 m<sup>2</sup> mieszkania. Orientacyjne zakresy liczbowe dla budynków mieszkalnych są następujące (Adamski i Rynkowski 2015):

- do 1966 r.: 240–350 kWh/m<sup>2</sup>/sezon;
- w latach 1967–1985: 240–280 kWh/m<sup>2</sup>/sezon;
- w latach 1986–1992: 160–200 kWh/m<sup>2</sup>/sezon;
- w latach 1993–1997: 120–160 kWh/m<sup>2</sup>/sezon;
- od 1998 r. od 90 do 120 kWh /m<sup>2</sup>/sezon;
- budynki w standardzie NF 40: <40 kWh/m<sup>2</sup>/sezon;
- budynki w standardzie NF 15: <15 kWh/m<sup>2</sup>/sezon;

W miarę zmniejszania ilości ciepła na ogrzanie budynku zwiększa się udział zysków ciepła od urządzeń, oświetlenia, a także od ludzi.

Nadal jednak duża część budynków charakteryzuje się niezadowalającą efektywnością energetyczną. Zdaniem Komisji Europejskiej nowe budynki powinny być zeroenergetyczne. Poprawa efektywności energetycznej budynków ma więc istotne znaczenie dla energetyki oraz dla samych użytkowników. Pierwsza dyrektywa dotycząca poprawy efektywności energetycznej i etykietowania energetycznego została opublikowana 16 grudnia 2002 r. (dyrektywa 2002/91/WE Parlamentu Europejskiego i Rady w sprawie charakterystyki energetycznej budynków) została zmieniona na Dyrektywę 2010/30/UE Parlamentu Europejskiego i Rady Unii Europejskiej z dnia 19 maja 2010 r. w sprawie charakterystyki energetycznej budynków (EPBD).

Dyrektywa Parlamentu Europejskiego i Rady Unii Europejskiej 2018/844 z dnia 30 maja 2018r. zmienia dyrektywę 2010/31/UE w sprawie charakterystyki energetycznej budynków i dyrektywę 2012/27/UE w sprawie efektywności energetycznej oraz stwierdza, że Unia Europejska jest zaangażowana w działania na rzecz rozwijania zrównoważonego, konkurencyjnego, bezpiecznego i niskoemisyjnego systemu energetycznego. Unia energetyczna i ramy polityki klimatyczno-energetycznej do 2030 r. ustanawiają ambitne zobowiązania Unii do:

- dalszej redukcji emisji gazów cieplarnianych o co najmniej 40% do 2030 r. w porównaniu z 1990 r.,
- zwiększenia udziału energii ze źródeł odnawialnych w zużyciu energii,
- uzyskania oszczędności energii zgodnie z poziomem ambicji Unii,
- wzmocnienia bezpieczeństwa energetycznego, konkurencyjności i zrównoważonego rozwoju Europy.

W Dyrektywie zwrócono uwagę, aby środki służące poprawie charakterystyki energetycznej budynków nie koncentrowały się wyłącznie na przegrodach zewnętrznych. Należy mieć na uwadze wszystkie istotne elementy i systemy techniczne budynku, w tym elementy pasywne. Są one wykorzystywane w technikach pasywnych i służą ograniczeniu zapotrzebowania na energię do celów ogrzewania lub chłodzenia oraz zużycia energii na potrzeby oświetlenia i wentylacji. Tym samym poprawiają komfort cieplny i wizualny. Innowacje i nowe technologie stosowane w budynkach wspomagają ogólną dekarbonizację gospodarki.

W Dyrektywie zdefiniowano system techniczny budynku jako urządzenia techniczne do ogrzewania pomieszczeń, chłodzenia, wentylacji, ciepłej wody użytkowej, wbudowanego oświetlenia, systemów automatyki i sterowania w budynku, wytwarzania energii elektrycznej na miejscu lub kombinację takich systemów, w tym wykorzystujących energię ze źródeł odnawialnych.

Norma PN-EN ISO 52000-1:2017-10 ustala systematyczną, obszerną i modułową strukturę oceny energetycznych właściwości użytkowych nowych i istniejących budynków w podejściu holistycznym. Jest stosowana do oceny całkowitego wykorzystania energii w budynku przez pomiar lub obliczenie oraz kalkulację energetycznych właściwości użytkowych w pojęciu energii pierwotnej lub innych mierników związanych z energią. Norma ta uwzględnia szczególne możliwości i ograniczenia do różnych zastosowań, takich jak: projekt budynku, nowo zbudowane budynki i istniejące budynki w fazie zamieszkania, jak również remontu.

## 1.2. Akumulacja ciepła

Substancja kumulująca ciepło powinna być trwała i nie zmieniać właściwości w czasie, mieć dużą jednostkową (odniesioną do masy lub objętości) pojemność cieplną oraz dużą wartość współczynnika wyrównywania temperatury, oraz być niedroga i bezpieczna. Znane są następujące możliwości akumulacji ciepła jako:

- ciepła związanego z masą akumulatora,
- ciepła utajonego przemiany fazowej – materiały PCM,
- ciepła chemicznych reakcji egzo- i endotermicznych,
- ciepła rozpuszczania i krystalizacji.

Materiały zmiennofazowe (PCM, ang. *phase change materials*) wkomponowane w różny sposób w strukturę budynku zwiększają jego pojemność (bezwładność) cieplną. Duża pojemność cieplna konstrukcji budynku umożliwia przechowanie okresowych nadwyżek energii na czas okresowego zwiększenia zapotrzebowania na ciepło w cyklu dobowym. Materiały zmiennofazowe dzieli się na dwie grupy: organiczne i nieorganiczne. W innej klasyfikacji wprowadza się podział na substancje jednorodne, mieszaniny oraz mieszaniny eutektyczne.

Zaletą zmiennofazowych materiałów organicznych (Jaworski 2009) jest stabilność w wielu cyklach topnienia–zestalania oraz zestalania bez przechłodeń. Węglowodory nasycone mają bardzo wysokie ciepło przemiany fazowej – rzędu 250 kJ/kg. Są to jednak substancje stosunkowo drogie i używane jako materiały PCM tylko w szczególnych zastosowaniach (ale nie budowlanych, gdzie konieczne są duże ilości materiału). Kwasy tłuszczowe, estry oraz ich mieszaniny mają znacznie niższe pojemności cieplne (poniżej 200 kJ/kg). Przemiany fazowe występują też w szerszym zakresie temperatury, co nie jest korzystne, ponieważ wymaga większych zmian temperatury otoczenia. Wśród wad materiałów organicznych należy wymienić: bardzo niską przewodność cieplną (0,15–0,30 W/m/K), dużą rozszerzalność objętościową w procesie topnienia oraz palność.

Substancje zmiennofazowe nieorganiczne to przede wszystkim sole, ich hydraty oraz mieszaniny eutektyczne. Charakteryzują się one bardzo wysokim ciepłem topnienia (znacznie powyżej 200 kJ/kg) oraz wąskim zakresem temperatury przemiany fazowej – pochłaniają i uwalniają ciepło przemiany fazowej przy niewielkich zmianach temperatury, wynoszących 2–3°C. Mają też wyższe (w stosunku do organicznych) wartości przewodności cieplnej, są również niepalne. Materiały nieorganiczne mają dwie poważne wady: przy zestalaniu występują często kilkunastostopniowe przechłody, są również niestabilne w procesach przemian fazowych (dotyczy to hydratów, które ulegają całkowitej segregacji na sól i wodę często już po kilku cyklach topnienie–zestalanie). Wysoka pojemność cieplna hydratów uzasadnia działania mające na celu usunięcie tych wad przez zastosowanie dodatków przyspieszających krystalizację i stabilizujących.

Mała przewodność cieplna i zbyt słabe przekazywanie ciepła podczas odzyskiwania energii są zidentyfikowane jako główne bariery hamujące stosowanie materiału zmiennofazowego (PCM).

PCM można laminować w jednej warstwie i stosować jako element budowlany – np. wewnętrzną okładzinę ścienną. Dwa zintegrowane systemy płyt kartonowo-gipsowych PCM oceniono numerycznie (Darkwa i Kim 2004), a wyniki pokazały przewagę laminowanego systemu płyt ściennych PCM nad innymi rozwiązaniami z zastosowaniem PCM pod względem zwiększonej wydajności termicznej i szybkiego przenikania ciepła przy niewielkich wahaniami temperatury. Na przykład maksymalne chwilowe zwiększenie uzyskanego strumienia ciepła było od 20 do 50 pro-

cent wyższe podczas procesu przemiany fazowej, przy około 18 procentach większej zdolności magazynowania i uwalniania ciepła.

Przeprowadzono oceny doświadczalne (Darkwa i Kim 2005) wytworzonych próbek płyt gipsowo-kartonowych laminowanych i losowo wybranych rozwiązań z zastosowaniem PCM i porównano je z wynikami numerycznymi. Analiza wykazała, że płyta gipsowo-kartonowa laminowana PCM zachowuje się lepiej termicznie. Chociaż wystąpiło maksymalnie 3% odchylenie średniego wyniku eksperymentu od wartości liczbowych, laminowana płyta PCM osiągnęła około 55% procesu przemiany fazowej w porównaniu z 48% dla losowo rozmieszczonej próbki płyt kartonowo-gipsowych. Próbka płyty laminowanej uwalniała również o około 27% więcej ciepła. Biorąc pod uwagę warunki eksperymentalne i założenia, doświadczenie dowiodło, że możliwe jest opracowanie techniki laminowanego PCM w celu ulepszenia i zminimalizowania wielowymiarowego przenoszenia ciepła w systemach suchej zabudowy.

Interesujące są efekty stosowania nanocząstek  $\text{SiO}_2$  (Far i in. 2020). Badania pokazały, że pojemność cieplna wzrosła o 19%, a lepkość wzrosła o 94%. Zgodnie z literaturą (Sharma i in. 2016) lepkość maleje, gdy nanocząstki mają wysoki współczynnik kształtu (np. strukturę podobną do pręta) przy wysokich stężeniach. Sole mogą tworzyć dendrytyczne nanostruktury w pobliżu nanocząstek, które mogą zwiększać efektywną pojemność cieplną mieszaniny. Tworzenie się nanostruktur dendrytycznych soli można zakłócić poprzez zdyspergowanie niewielkiego stężenia NaOH (0,03% wag.). Po zdyspergowaniu niewielkiej ilości NaOH w nanocieczach pojemność cieplna zmalała, a lepkość zmniejszyła się.

Obserwuje się ponadto korozyjne działanie soli na materiały budowlane i metale. Nie można więc bezpośrednio ich mieszać z materiałami budowlanymi, a dobór materiału na zasobniki ciepła wymaga specjalnej uwagi.

Do badań wybrano sól glauberską (tab. 1) ze względu na jej dostępność i dobre właściwości kumulacji ciepła i temperaturę krystalizacji. Jako akumulator wykorzystuje się pojemność cieplną roztworu oraz ciepło krystalizacji soli glauberskiej. W procesie krystalizacji soli ciepło jest oddawane powietrzu opływającemu pojemniki z roztworem soli w sposób wymuszony, i nawiewane instalacją wentylacyjną do pomieszczeń.

### 1.3. Powietrzne kolektory słoneczne

Powietrzne kolektory współpracują z systemem wentylacyjnym budynku. W odróżnieniu od kolektorów wodnych nie są zagrożone zamarznięciem. W określonych warunkach może jednak sporadycznie wykraplać się w nich para wodna, a nawet tworzyć się szron.

Tabela 1. Materiały stosowane do kumulacji ciepła

| Parametr   |                                | Materiał kumulujący |          |              |          |            |
|--|--------------------------------|---------------------|----------|--------------|----------|------------|
|  |                                | kamień              | woda     | sól Glaubera |          | parafina   |
|  |                                |                     |          | stan stały   | ciecz    | stan stały |
| Gęstość  | kg/m <sup>3</sup>              | 1 600               | 1 000    | 1 450        | 1 330    | 786        |
| Pojemność cieplna  | kJ/kg/K                        | 0,84                | 4,2      | 1,92         | 3,26     | 2,89       |
| Objętościowa pojemność cieplna   | kJ/m <sup>3</sup> /K           | 1 344               | 4 200    | 2 784        | 4 200    | 2 272      |
| Masa materiału wymaganego do akumulacji 1 GJ ciepła dla $\Delta T = 20^{\circ}\text{C}$                  | kg                             | 59 500              | 11 900   | 26 042       | 15 337   | 17 301     |
| Porównywalna masa materiału w stosunku do masy wody  | kg/kg                          | 5                   | 1        | 2,19         | 1,29     | 1,45       |
| Objętość materiału wymaganego do akumulacji 1 GJ ciepła dla $\Delta T = 20^{\circ}\text{C}$              | m <sup>3</sup>                 | 37,2                | 11,9     | 17,96        | 11,53    | 22,01      |
| Porównywalna objętość materiału wymaganego do akumulacji 1 GJ ciepła dla $\Delta T = 20^{\circ}\text{C}$ | m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup> | 3,125               | 1        | 1,51         | 1        | 1,85       |
| Przewodność cieplna $\lambda$  | W/mK                           | 0,45                | 0,6      | 1,85s        | 1,74c    | 0,5s       |
| Współczynnik wyrównywania temperatury $a$  | m <sup>2</sup> /s              | 0,000334            | 0,000143 | 0,000665     | 0,000401 | 0,00022    |

Źródło: opracowanie na podstawie: Zhelykh i in. 2019.

Zoptymalizowany płaski kolektor o nowej konstrukcji jest używany w średnio-temperaturowym systemie solarnym (Gao i in. 2020). Przetestowano wydajność termiczną i wykonalność w praktycznych zastosowaniach w regionie o czterech różnych porach roku i bardzo wysokich wymaganiach dotyczących ogrzewania i chłodzenia, a także dużego udziału promieniowania rozproszonego.

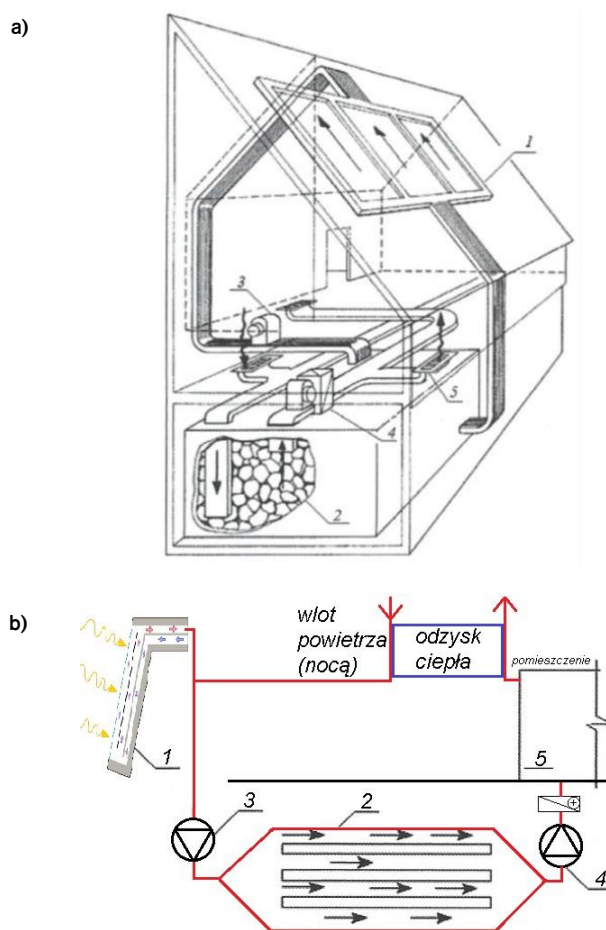
Interesującą konstrukcją jest połączenie powietrznego kolektora słonecznego z podłożem, które kumuluje ciepło. Zoptymalizowano parametr wymiarowy żeber prostokątnych (Xu i in. 2020) oraz przeanalizowano proces wymiany ciepła powietrza i PCM w kolektorze za pomocą symulacji numerycznej i eksperymentu. W symulacji przeanalizowano zmiany temperatury PCM i powietrza, aby zapewnić strukturę kolektora o najlepszych parametrach wymiany ciepła. W eksperymencie zbadano średnią temperaturę PCM, temperaturę powietrza wylotowego oraz sprawność odbioru ciepła w różnych warunkach pracy, warunki egzotermiczne i niekorzystne wa-



runki pracy, aby lepiej zrozumieć charakterystykę pracy i charakterystykę wymiany ciepła kolektora słonecznego z zasobnikiem energii.

## 2. Instalacja wentylacyjna z akumulacją ciepła

**B**udynek z instalacją wentylacyjną z regeneratorem ciepła i kolektorami słonecznymi przedstawiono na rysunku 1a. Instalację wentylacyjną wyposażono w rekuperator ciepła. Schemat takiej instalacji przedstawia rysunek 1b.



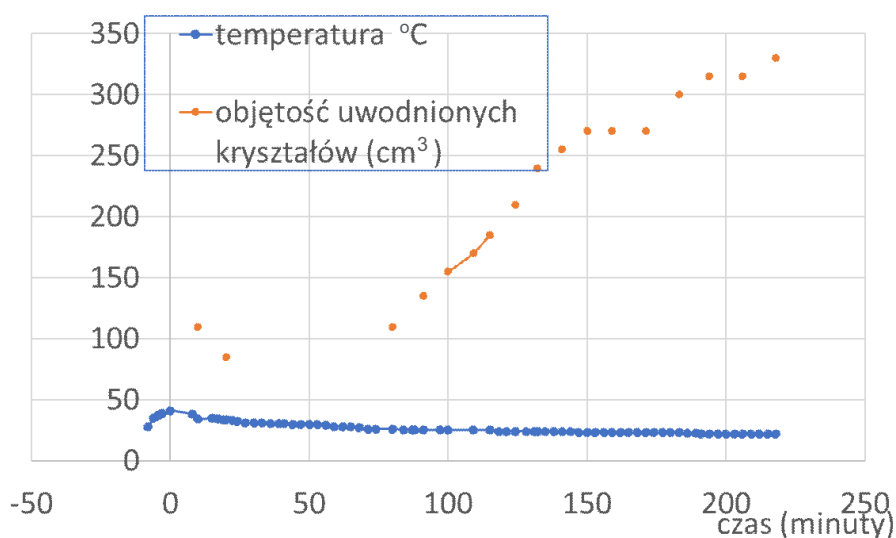
**Rysunek 1. Dom z ogrzewaniem słonecznym i akumulatorem ciepła**  
**Objaśnienia:** 1 – powietrzny kolektor słoneczny, 2 – akumulator ciepła z kamieni polnych, 3 – wentylator,  
 4 – wentylator z dogrzewaniem powietrza, 5 – nawiew ciepłego powietrza do pomieszczenia  
**Źródło:** opracowanie własne na podstawie: Zhelykh i in. 2019

### 3. Wyniki pomiarów

Zbudowano prostopadłościenny model budynku. Mierzono obniżanie się temperatury wewnątrz modelu oraz objętość wytrąconych kryształów soli. Stwierdzono:

- 80 minuta: 26°C, 110 cm<sup>3</sup> kryształów
- 220 minuta: 22°C, 330 cm<sup>3</sup> kryształów

Obserwowano przystanki wzrostu objętości kryształów po 150 i 200 minutach pomiarów. Wyniki pomiarów przedstawiono na rysunku 2.



Rysunek 2. Zmiana temperatury oraz objętości uwodnionych kryształów w czasie  
Źródło: pomiary własne

Temperatura roztworu w trakcie eksperymentu nie przekroczyła 40°C. Ze względu na obserwowaną objętość wytrąconych z roztworu kryształów soli, można wyróżnić następujące etapy eksperymentu:

- wstępna sedymentacja kryształów,
- wzrost objętości kryształów,
- nieznaczne zmniejszenie objętości kryształów (od 150 minuty),
- ponowny wzrost objętości kryształów,
- zatrzymanie wzrostu, a nawet niewielkie zmniejszenie objętości,
- wzrost objętości kryształów.

Temperatura roztworu była stała lub nieznacznie malała.

## 4. Wnioski

**B**adane właściwości cieplne roztworu soli glauberskiej potwierdzają celowość jej stosowania do akumulacji ciepła wentylacyjnego. Ilość akumulowanego ciepła zależy od objętości roztworu soli. Istotne jest tu również uzyskanie możliwie dużej powierzchni wymiany ciepła oraz warunków wymiany ciepła w konwekcji wymuszonej.

### Literatura

- ADAMSKI M. i RYNKOWSKI P. 2015. *Należność za ogrzewanie mieszkania odpowiadająca zużyciu ciepła*. Administrator nr 11, s. 26–29. [Online] [https://www.researchgate.net/publication/299355306\\_Nalezosc\\_za\\_ogrzewanie\\_mieszkania\\_odpowiadajaca\\_zuzyciu\\_ciepla](https://www.researchgate.net/publication/299355306_Nalezosc_za_ogrzewanie_mieszkania_odpowiadajaca_zuzyciu_ciepla) [Dostęp: 31.07.2020].
- DARKWA K. i KIM J.S. 2004. *Heat transfer in neuron composite laminated phase-change drywall*. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part A – Journal of Power and Energy 218(A2), s. 83–88.
- DARKWA K. i KIM J.S. 2005. *Dynamics of energy storage in phase change drywall systems*. International Journal of Energy Research 29(4), s. 335–343.
- FAR B., MUJTABA S.M., YOUSOF R. i SHIN N.D. 2020. *Investigation of heat capacity and viscosity enhancements of binary carbonate salt mixture with SiO<sub>2</sub> nanoparticles*. International Journal of Heat and Mass Transfer 156, August 2020.
- GAO D., GAO G., CAO J., ZHONG S., REN X., DABWAN Y.N., HU M., JIAO D., KWAN T.H. i PEI G. 2020. *Experimental and numerical analysis of an efficiently optimized evacuated flat plate solar collector under medium temperature*. Applied Energy 269.
- JAWORSKI M. 2009. *Jak zwiększyć efektywność energetyczną budynków? Wykorzystanie materiałów zmiennofazowych (PCM)*. Izolacje nr 4. [Online] <http://www.izolacje.com.pl/artukul/id1017,-jak-zwiekszyc-efektywnosc-energetyczna-budynkow> [Dostęp: 31.07.2020].
- SHARMA A.K., TIWARI A.K. i DIXIT A.R. 2016. *Rheological behaviour of nanofluids: a review*. Renewable Sustainable Energy Reviews 53, s. 779–791.
- XU B., XU J. i CHEN Z. 2020. *Heat transfer study in solar collector with energy storage*. International Journal of Heat and Mass Transfer 156, 119778.
- ZHELYKH V., VOZNYAK O., KOZAK K. i KAPALO P. 2019. *Akumulácia tepla v solárnych vykurovacích systémoch*. Plynár, Vodár, Kúrenár, Klimatizácia 1, s. 8–9.



## **CZĘŚĆ 3.**

### **Technologie odzysku surowców z odpadów i innowacyjne rozwiązania**



Grzegorz PALKA<sup>1</sup>, Weronika KIERES<sup>2</sup>, Karolina ŁUCZAK-ZELEK<sup>3</sup>,  
Monika PARTYKA<sup>4</sup>

---

## Własne laboratorium badawcze w aspekcie podnoszenia innowacyjności przedsiębiorstwa

**STRESZCZENIE:** Jednym z kluczowych celów rozwojowych jest wzrost innowacyjności gospodarki. Możliwe jest to przy wykorzystaniu koncepcji rozwoju związanych z gospodarką opartą na wiedzy oraz odpowiednim zarządzaniem wiedzą i umiejętnościami. Rozwój przedsiębiorstwa musi więc skupiać się również na wykorzystaniu możliwości, jakie dają nowoczesne technologie, opracowywaniu nowatorskich rozwiązań oraz odpowiednim rozwoju kompetencji, umożliwiającym podnoszenie kwalifikacji personelu. Celem opracowania jest ocena – z wykorzystaniem analizy SWOT oraz analizy AHP – możliwości wzrostu innowacyjnego przedsiębiorstwa usługowego poprzez utworzenie i utrzymanie własnego laboratorium badawczego. Działanie takie wpisuje się w cele zrównoważonego rozwoju, jakimi są przede wszystkim promowanie stabilnego i zrównoważonego wzrostu gospodarczego wraz z zapewnieniem produktywnego zatrudnienia oraz godnej pracy, a także wspieranie innowacyjności i budowanie stabilnej infrastruktury. Praca wpisuje się zarówno w 9., jak i 12. cel zrównoważonego rozwoju, jej tematyka odnosi się bowiem zarówno do innowacyjności, przemysłu i infrastruktury, jak i do odpowiedzialnej konsumpcji i produkcji.

**SŁOWA KLUCZOWE:** laboratorium, gospodarka obiegu zamkniętego, innowacyjność, badania, rozwój

## Own laboratory in the aspect of increasing the innovativeness

**ABSTRACT:** One of the key development goals of economy is innovativeness increasing. This is possible with the use of development concepts related to the knowledge-based economy and appropriate knowledge & skills management. Therefore, the development of the enterprise must also focus on the use of opportunities offered by technologies, development of innovative solutions and development of staff qualifications. The aim of the study is to assess – using SWOT and AHP analysis – the growth potential of an innovative service enterprise by creating and maintaining its own

---

<sup>1</sup> Mgr inż., Unimetal Rec Sp. z o.o. Sp. komandytowa, Trzebinia, Polska; Unimetal Recycling Sp. z o.o., Trzebinia, Polska.

<sup>2</sup> Mgr inż., Unimetal Recycling Sp. z o.o., Trzebinia, Polska.

<sup>3</sup> Mgr inż., Unimetal Rec Sp. z o.o. Sp. komandytowa, Trzebinia, Polska.

<sup>4</sup> Dr inż., Unimetal Rec Sp. z o.o. Sp. komandytowa, Trzebinia, Polska; Unimetal Recycling Sp. z o.o., Trzebinia, Polska.

analytical laboratory. This is in line with the goals of sustainable development, which are promoting stable and sustainable economic growth along with ensuring productive employment and decent work, as well as supporting innovation and building a stable infrastructure. The work corresponds both the 9<sup>th</sup> and 12<sup>th</sup> goals of sustainable development, subject relates to innovation, industry and infrastructure, as well as responsible consumption and production.

**KEYWORDS:** laboratory, circular economy, innovativeness, research, development

## 1. Wprowadzenie

### 1.1. Charakterystyka przedsiębiorstwa

**U**nimetal Recycling Sp. z o.o. (Unimetal Recycling, UMR) jest przedsiębiorstwem zajmującym się skupem oraz recyklingiem zużytych katalizatorów samochodowych. Siedziba przedsiębiorstwa mieści się w województwie małopolskim, w Trzebini, a zakład przetwórczy zlokalizowany jest w nowoczesnym budynku, w przestrzeni uprzednio określonej jako Specjalna Strefa Ekonomiczna.

UMR zajmuje się od prawie 20 lat skupem i recyklingiem katalizatorów samochodowych, nieustannie rozwijając możliwości technologiczne, a także wykorzystując najnowsze osiągnięcia nauki i techniki. Oferta handlowa przedsiębiorstwa skierowana jest do zainteresowanych klientów zarówno z kraju, jak i z zagranicy, tak hurtowych, jak i detalicznych, którym w ramach współpracy i kooperacji gwarantowana jest kompleksowa obsługa, począwszy od pomocy w transporcie katalizatorów, po pełną obsługę finansowo-księgową. W kontaktach z kontrahentami zachowywana jest transparentność wszystkich etapów, niejednokrotnie związana z bezpośrednim uczestnictwem zainteresowanego (przy zachowaniu odpowiednich zasad bezpieczeństwa oraz poufności i ochrony interesów pozostałych klientów), zarówno w procesach homogenizacji materiału, jak i badań laboratoryjnych.

Unimetal Recycling jest przedsiębiorstwem dbającym o swój rozwój, poszukującym nieustannie nowych wyzwań, a także w sposób dynamiczny nowych możliwości, zarówno w kontaktach z klientami, jak i na rynkach w działalności oraz rozwoju pracowników. Dogodna lokalizacja, w połączeniu z przyjętą strategią prowadzenia działalności, pozwala dążyć do zdobycia miejsca lidera wśród recyklerów katalizatorów w Polsce, a także umacniania pozycji na rynkach europejskich.

### 1.2. Monolit ceramiczny i pierwiastki szlachetne

Katalizator, w najprostszym układzie, składa się z płaszcza ze stali nierdzewnej, izolacji cieplnej oraz monolitu, tj. wkładu ceramicznego w formie plastra mio-



du pokrytego metalami szlachetnymi, tj. platyną, palladem czy rodem. Metale te są substancjami katalitycznymi biorącymi udział w reakcjach chemicznych z tlenkami emitowanymi z układu wydechowego pojazdu, doprowadzając do ich transformacji w związki w mniejszym stopniu lub w ogóle nieuciążliwe dla środowiska. Katalizatory są więc częścią układu wydechowego wszystkich współczesnych samochodów osobowych, ciężarowych oraz niektórych urządzeń przemysłowych, spełniając funkcję pozasilnikowego systemu zmniejszania ilości szkodliwych składników spalin (Do-brzyńska i in. 2019).

Działalność przedsiębiorstwa skupia się na pozyskiwaniu monolitu ceramicznego ze zużytych katalizatorów samochodowych. Monolit ceramiczny, stanowiący wnętrze katalizatora, zawiera pierwiastki szlachetne o kluczowym znaczeniu dla gospodarki światowej – pallad, rod i platynę (Blizzard 2018). Ich odzyskiwanie jest nie tylko aspektem finansowym, związanym z bezpośrednią działalnością przedsiębiorstwa (jednym z podstawowych założeń prowadzenia firmy jest osiągnięcie zysku), ale także wpisuje się w działalność proekologiczną oraz tworzenie gospodarki obiegu zamkniętego. Dzięki zastosowaniu procesu odzysku możliwe jest znaczne zredukowanie zagrożeń środowiskowych oraz zapobieganie problemom wyczerpywania zasobów. Według powszechnie dostępnych danych, dla uzyskania 1 kg platyny wystarczy poddać recyklingowi około 300 katalizatorów, co zapobiega wydobyciu i przerobieniu 150 Mg rudy i 400 Mg skały płonnej na głębokości 1000 m p.p.t. (Fornalczyk i Saternus 2011).

## 2. Innowacyjność i innowacje

Jednym z kluczowych celów rozwojowych jest wzrost innowacyjności gospodarki. Samo pojęcie innowacji określa tworzenie czegoś nowego (*innovare* – <https://educalingo.com/pl/dic-it/innovare>). Teorię, opartą na innowacjach, wprowadził po raz pierwszy do problematyki zarządzania austriacki ekonomista Joseph Schumpeter. Określił on przedsiębiorcę jako podmiot, który zaburza stan równowagi na rynku poprzez wprowadzanie nowości w celu poszukiwania nadzwyczajnego zysku. Innowacją w tym ujęciu może być zarówno wprowadzenie na rynek zupełnie nowego produktu lub usługi, ale również zmiana istniejącego produktu poprzez poprawę jego jakości i użyteczności. Zgodnie z podejściem Schumpetera za innowacje uważa się także m.in. wprowadzenie nowoczesnych technologii, znalezienie i rozwój nowych rynków zbytu, jak również stosowanie nowych form organizacji firmy, zarówno w ujęciu wewnętrznym, jak i w kooperacji pomiędzy firmami (Gruszecki 2002; Kaliszczak 2011; Pomykański 2001). Z kolei wg Petera F. Druckera „innowacja jest szczególnym narzędziem przedsiębiorców, za pomocą którego ze zmiany czynią oni okazję do podjęcia nowej działalności gospodarczej lub świadczenia nowych usług”, a więc nie musi mieć nawet wymiaru materialnego (Drucker 1992; Gruszecki 2002).

Zgodnie z określeniami stosowanymi w literaturze, sama innowacyjność jest stosunkowo trudnym do zdefiniowania, wielowymiarowym pojęciem. Innowacje mogą być rozumiane jako wprowadzenie nowości w organizacji, produktach, procesach, technologii, organizacji produkcji, dostępie do nowego rynku zbytu, ale mogą być też rozumiane jako pierwsze handlowe wprowadzenie (zastosowanie) nowego produktu, procesu, systemu lub urządzenia. Działalność innowacyjna to więc działania o różnym charakterze, których celem jest opracowanie i wdrożenie nowych lub ulepszonych wyrobów i procesów, przy czym są one nowe przynajmniej ze względu na wprowadzające je przedsiębiorstwo.

Innowacyjność może być zatem jednym z wyznaczników procesów transformacji i rozwoju, a same innowacje postrzegane jako priorytetowe źródło konkurencyjności, wzrostu gospodarczego oraz zatrudnienia (Tomaka i Cyran 2010). Rozwój przedsiębiorstwa musi więc skupiać się na wykorzystaniu możliwości, jakie dają nowoczesne technologie, opracowywaniu nowatorskich rozwiązań oraz odpowiednim rozwojem kompetencji, umożliwiającym podnoszenie kwalifikacji personelu, przy wykorzystaniu koncepcji rozwoju związanych z gospodarką opartą na wiedzy oraz na odpowiednim zarządzaniu wiedzą i umiejętnościami. Innowatyka jest terminem zawierającym tematykę dotyczącą najnowszej rzeczywistości społeczno-ekonomicznej, baz danych i otwartych granic, a same innowacje są swoistym paliwem dla postępu i rozwoju (Jasieński 2014). Nowoczesne przedsiębiorstwo (oraz zarządzający nim) musi w sposób umiejętny animować zachowania pracowników, umożliwiając kreatywne myślenie oraz pobudzając do kreatywnego podejścia w rozwiązywaniu problemów. Sprzyjają temu przede wszystkim odpowiednie działania organizacyjne, ale również propagowanie edukacji, a także dzielenie się informacjami, doświadczeniami i wiedzą (Jasieński 2014).

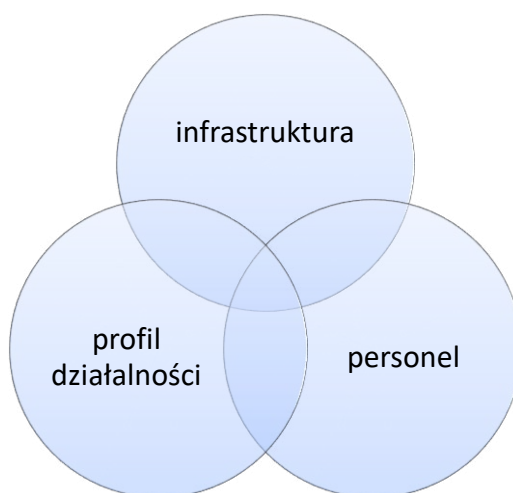
### 3. Innowacyjność nowoczesnego przedsiębiorstwa

**W** kontekście działalności Unimetal Recycling oraz wykorzystywanych rozwiązań i strategii, pojawia się pytanie o sposób wzrostu innowacyjności przedsiębiorstwa, które z założenia bazuje na innowacyjnych rozwiązaniach, technologii, wpisując swoją działalność w szeroko pojętą eko-innowatykę, łącznie z silnym naciskiem na społeczną odpowiedzialność w zakresie edukacji ekologicznej.

Jednym z pomysłów, już zrealizowanych, był plan utworzenia laboratorium analitycznego, ściśle powiązanego z procesem produkcyjnym, wykonującego analizy zawartości pierwiastków w monolicie ceramicznym z katalizatorów, z wykorzystaniem techniki fluorescencji promieniowania rentgenowskiego (XRF).

Utworzenie laboratorium umożliwiło wzrost pozycji przedsiębiorstwa na rynku, a w porównaniu ze standardowymi organizacjami skupu odpadów było znaczącym przedsięwzięciem. Pozwoliło nie tylko na wzrost pozycji na rynku, ale jej umocnienie, stanowiąc jednocześnie znaczne ułatwienie w niektórych kontaktach z kontrahentami. Ponadto umożliwiło pracę nad dalszą strategią rozwojową firmy.

Zdobyte doświadczenie pozwoliło na stosunkowo proste zdefiniowanie aspektów związanych z powołaniem własnego laboratorium, a także pogrupowanie ich w trzy główne obszary (rys. 1) wzajemnie się przenikające i niemożące funkcjonować w oderwaniu od siebie, a powiązania międzyobszarowe charakteryzują się silnym oddziaływaniem na siebie w taki sposób, że zmiana strategii i decyzji w jednym z nich pociąga za sobą konieczność zmian w kolejnym z obszarów.



Rysunek 1. Trzy główne obszary wpływające na podejmowane decyzje  
Źródło: opracowanie własne

Możliwość uruchomienia działalności laboratoryjnej z jednej strony wymaga zapewnienia stosownej infrastruktury, umożliwiającej prowadzenie badań, a z drugiej – zatrudnienia odpowiednio wykwalifikowanego personelu ze względu na stopień skomplikowania prowadzonych badań. Konieczne jest też opracowanie właściwego profilu projektowanego przedsięwzięcia, łącznie z określeniem zakresu prowadzonej działalności badawczej, tzn. czy wyłącznie dla zabezpieczenia potrzeb własnych przedsiębiorstwa, czy również z możliwościami eksplorowania rynku i świadczeniem badań usługowych. Przenikanie tych zakresów oraz ich wzajemne zależności to ciąg logicznych skojarzeń, opartych na zadawaniu kolejnych pytań „co będzie niezbędne, jeśli zostanie podjęta taka, a nie inna decyzja”?

W trakcie rozważań wzięto pod uwagę różne scenariusze, dokonano analizy mocnych i słabych stron każdej z hipotetycznych wersji (analiza SWOT), a następnie z wybranych trzech potencjalnych scenariuszy, na podstawie analizy AHP (*Analytic Hierarchy Proces* – metoda hierarchicznej analizy problemu, zaproponowana w latach siedemdziesiątych XX wieku przez T.L. Saaty’ego (Saaty 1990)), wybrano koncepcję powołania i utworzenia niezależnego laboratorium. Koncepcja ta zakładała reorganizację dostępnej powierzchni (przy zagospodarowaniu dotychczas niewykorzystywanej najwyższej kondygnacji budynku) oraz zapewnienie odpowiednich przestrzeni do badań laboratoryjnych. Powołano i zorganizowano nowe laboratorium, wyodrębniając je jako osobną jednostkę w strukturach przedsiębiorstwa. Określono, że będzie to laboratorium wyposażone w nowoczesny, wyspecjalizowany sprzęt pomiarowy (m.in. wykorzystujący techniki chromatograficzne oraz spektralne). Doprecyzowano również, że będzie to przestrzeń, w której zatrudnienie znajdzie wyspecjalizowany personel o interdyscyplinarnych kompetencjach, umożliwiających nie tylko wykonywanie oznaczeń zawartości pierwiastków w monolicie ceramicznym z katalizatorów samochodowych, ale także na wykonywanie szerokiego spektrum badań i analiz na potrzeby klientów zewnętrznych.

### 3.1. Mierniki innowacyjności

Współczesne przedsiębiorstwo powinno być nieustannie uczącą się organizacją, która bazuje na wykorzystaniu wiedzy oraz zarządzaniu kompetencjami (Litwa 2017). Pojawia się pytanie o sposób dokonywania pomiaru stopnia innowacyjności przedsiębiorstwa i o to, co jest głównym wyznacznikiem poziomu innowacyjności firmy. Koncepcje zarządzania bazują bowiem w dużej mierze na wykorzystaniu różnego rodzaju mierników, aby umożliwić określenie spełniania założonych celów zgodnie z ogólną teorią, że zarządzać można tylko tym, co jest mierzalne, a także tylko to, co jest mierzalne, może zostać wykonane oraz z faktem, że struktura i zakres wskaźników wpływają na zachowanie pracowników (Klingebiel 1997). Sama innowacyjność jest procesem dynamicznym i ciągłym, a pomiar parametrów dynamicznych, zgodnie ze wskazaniem literaturowymi, jest zagadnieniem bardziej skomplikowanym, niż w przypadku procesów statycznych (Keressens van Drongelen i Bilderbeek 1999). Uważa się, że poziom innowacyjności staje się czynnikiem odpowiedzialnym za efektywność prowadzonej działalności, a także warunkującym perspektywę dalszego rozwoju, zwłaszcza w kontekście zmieniającej się rzeczywistości oraz konieczności szybkiego dostosowywania się do zachodzących zmian. Mimo wzrostu w ostatnich latach zainteresowania problematyką innowacji, w przedsiębiorstwach indywidualnych oraz gospodarce krajowej i światowej, a także licznych doniesień literaturowych, widoczna jest

wyraźna trudność w precyzyjnym określeniu mierników i wskaźników poziomu innowacyjności.

Oceny innowacyjności można dokonywać na dwóch płaszczyznach, bazując na wskaźnikach bezpośrednich lub pośrednich. Z uwagi na trudności w jednoznacznym określeniu wskaźników w formie numerycznej, bardzo często stosuje się też techniki opisowe, służące do lepszego i bardziej precyzyjnego odzwierciedlenia meritum stosowanych wskaźników. Nie ma jednak jednoznacznego kryterium wskazującego na stopień innowacyjności przedsiębiorstwa. Wyznaczyć można pewne grupy indikatorów, które będą determinantą innowacyjności firmy, np. takie wskaźniki, jak (IUS 2013; Bielski 2000; Pomykański 2001):

- zasoby ludzkie,
- system badawczo-rozwojowy,
- zasoby finansowe,
- inwestycje,
- współpraca i przedsiębiorczość,
- kapitał intelektualny,
- liczba patentów zgłoszonych przez daną firmę,
- liczba publikacji naukowych,
- liczba nowych produktów,
- wzrost przychodów lub udziału w rynku,
- zwiększona zyskowność wynikająca bezpośrednio lub pośrednio z działań o charakterze innowacyjnym.

Korzystając z danych literaturowych, które wskazują sposoby pomiaru i propozycje mierników innowacyjności przedsiębiorstw, wybrano do analizy 6 wskaźników – w oparciu o potencjał innowacyjny (zatrudnienie wyspecjalizowanego personelu, zakup wyspecjalizowanej aparatury badawczej oraz wzrost wydatków na szkolenia), innowacyjne procesy (liczba pracowników zaangażowanych w te procesy oraz liczba prowadzonych innowacyjnych projektów w ciągu roku), a także efekty innowacyjnych procesów (wprowadzenie systemu zarządzania i zapewniania jakości oraz liczba publikacji pracowników). Na podstawie własnych danych dokonano analizy oraz obliczenia wartości wzrostu danego wskaźnika w stosunku do wartości pierwotnej, czyli przed powołaniem i uruchomieniem nowego laboratorium. Dzięki analizie zaobserwowano zdecydowany wzrost aktywności innowacyjnej (a tym samym innowacyjności przedsiębiorstwa), co przedstawiono w tabeli 1.

Dodatkowym aspektem, mającym wpływ na wzrost innowacyjności przedsiębiorstwa Unimetal Recycling, jest także udział wśród młodszego pokolenia promowania wiedzy, łącznie z możliwością udostępnienia (na określonych zasadach) laboratorium do celów naukowo-poznawczych, a także szeroko zakrojonej współpracy ze szkołami średnimi o profilu chemicznym i laboratoryjnym oraz uczelniami wyższymi. Współpraca taka jest stosunkowo nowym pomysłem w działalności laboratorium

Tabela 1. Mierniki aktywności innowacyjnej

| Cecha                         | Opis (miernik ilościowy)   | Przyrost wartości (względem stanu początkowego – przed powołaniem laboratorium)                                   |
|-------------------------------|--|---|
| Potencjał innowacyjny         | zatrudnienie wyspecjalizowanego personelu                                  | z tytułem magistra inżyniera: +4<br>ze stopniem doktora: +1   |
|                               | zakup wyspecjalizowanej aparatury badawczej                                | nabycie specjalistycznych urządzeń analitycznych<br>ICP-MS: +1<br>HPLC (różne systemy detekcji): +2<br>GC-FID: +1 |
|                               | wzrost wydatków na szkolenia (wyrażone w ilości szkoleń specjalistycznych) | udział w konferencjach naukowych: +2<br>udział w szkoleniach: +20   |
| Procesy innowacyjne           | liczba pracowników zaangażowanych w procesy innowacyjne                    | zatrudnionych pracowników: +5   |
|                               | liczba prowadzonych projektów innowacyjnych w ciągu roku                   | opracowanie nowych metodyk: +15   |
| Efekty procesów innowacyjnych | wprowadzenie systemu zarządzania i zapewniania jakości                     | wprowadzony system zarządzania jakością zgodnie z wytycznymi GMP oraz normy PN-EN ISO/IEC-17025:2018              |
|                               | liczba publikacji pracowników  | opublikowanych pozycji: +4  |

Źródło: opracowanie własne na podstawie danych własnych przedsiębiorstwa.

(choć pojawiała się poprzednio w działalności UMR, w obszarze produkcyjnym), ale również ten miernik w przyszłości może zostać wykorzystany do pomiaru oraz oceny aktywności innowacyjnej przedsiębiorstwa.

## 4. Wnioski

**O** konkurencyjnej pozycji przedsiębiorstwa w dużej mierze decyduje umiejętność tworzenia i szybkiego wdrażania rozwiązań technologicznych oraz organizacyjnych. Ta zdolność do szybkiego reagowania w warunkach zmienności otoczenia (VUCA) wiąże się z innowacyjnym myśleniem. Również aspekt wykorzystania nowych możliwości technologicznych może być powiązany z definicją innowacyjności, rozumianej jako zdolność do tworzenia i wdrażania, a także komercjalizacji rozwiązań, procesów technologicznych, a w przypadku laboratorium – nowoczesnych metodyk badawczych. Nie bez znaczenia jest również interdyscyplinarność zespołu analitycznego, umiejętnie łączącego wiedzę akademicką ze znajomością praktyczną

specjalistycznych technik, wykorzystywanych w pracy laboratoryjnej, oraz umiejętnościami technologicznymi i znajomością procesów produkcyjnych. Takie połączenie umożliwia nie tylko skuteczne rozwiązywanie problemów analitycznych, ale niejednokrotnie umożliwia także wsparcie klientów w ich działalności oraz w prowadzonych przez nich procesach technologicznych lub przetwórczych.

W odniesieniu do przedsiębiorstwa zajmującego się przetwórstwem odpadów, powołanie laboratorium badawczego wyposażonego w nowoczesne urządzenia pomiarowo-badawcze, z pewnością można mówić o znacznym podniesieniu wartości i innowacyjności przedsiębiorstwa. Ponieważ o sukcesie projektów innowacyjnych w dużej mierze mówić można w momencie pojawienia się sukcesów finansowych (Koch 2004), podkreślić należy, że laboratorium wykonując oznaczenia komercyjne, osiąga również przychody z działalności badawczej i wdrożeniowej nowych rozwiązań analitycznych.

Aspekt wykorzystania nowych możliwości w przedsiębiorstwie Unimetal Recycling Sp. z o.o. w Trzebini jest więc w jak największym stopniu powiązany z szeroką definicją innowacyjności, rozumianej jako zdolność do tworzenia i wdrażania, a także komercjalizacji rozwiązań, w przypadku laboratorium – nowoczesnych metodyk badawczych.

## Literatura

- BIELSKI I. 2000. *Przebieg i uwarunkowania procesów innowacyjnych*. Biblioteka Menedżera i Służby Pracowniczej, Bydgoszcz.
- BLIZZARD J. red. 2018. *Materials innovation for the global circular economy and sustainable society*. European Materials Research Society, Strasbourg.
- DOBRYŃSKA E., SZEWCZYŃSKA M., POŚNIAK M. i WOŹNICA A. 2019. *Ograniczanie emisji szkodliwych substancji chemicznych i cząstek stałych podczas pracy silników wysokoprężnych*. Materiały informacyjne Centralny Instytut Ochrony Pracy – Państwowy Instytut Badawczy.
- DRUCKER P. 1992. *Innowacja i przedsiębiorczość. Praktyka i zasady*. Państwowe Wydawnictwo Ekonomiczne, Warszawa.
- FORNALCZYK A. i SATERNUS M. 2011. *Porównanie metod odzysku platyny ze zużytych katalizatorów samochodowych*. Rudy i Metale Nieżelazne nr 5, t. 56, s. 259–265.
- GRUSZECKI T. 2002. *Współczesne teorie przedsiębiorstwa*. Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa. [Online] <https://educalingo.com/pl/dic-it/innovare> [Dostęp: 10.05.2020].
- IUS 2013. *Innovation Union Scoreboard*. European Commission, <http://ec.europa.eu>.
- JASIEŃSKI M. red. 2014. *Innowatyka – nowy horyzont. Innowacyjność naukowców, przedsiębiorców, menedżerów i urzędników*. Centrum Innowatyki Wyższa Szkoła Biznesu – National-Louis University, Nowy Sącz.
- KALISZCZAK L. 2011. *Schumpeterowska teoria przedsiębiorczości i jej współczesne implikacje*. Wydawnictwo Uniwersytetu Ekonomicznego we Wrocławiu, Wrocław.
- KERSSENS van DRONGELEN I.C. i BILDERBEEK J. 1999. *R&D performance measurement: more than choosing a set of metrics*. R&D Management 29(1), s. 35–46.
- KLINGEBIEL N. 1997. *Performance Measurement-Systeme*. Das Wirtschaftsstudium 26(7), s. 655–663.

### Część 3. Technologie odzysku surowców z odpadów i innowacyjne rozwiązania

---

- KOCH J. 2004. *Innowacje siłą napędową rozwoju*. Mat. Konf. Naukowo-Technicznej Jakość, innowacyjność i transfer technologii w rozwoju przedsiębiorstw, Kraków.
- LITWA P. 2017. *Pomiar stopnia innowacyjności przedsiębiorstwa przy wykorzystaniu balanced scorecard*, Studia i Prace WNEIZ US nr 48/3, s. 3–13.
- POMYKALSKI A. 2001. *Zarządzanie innowacjami*. Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa.
- SAATY T.L. 1990. *How to make a decision: The Analytic Hierarchy Process*. European Journal of Operational Research 48, s. 9–26.
- TOMAKA A. i CYRAN K. 2010. *Innowacyjność przedsiębiorstw jako kluczowy element konkurencyjności polskiej gospodarki*. Finansowy Kwartalnik Internetowy „e-Finanse” 3(6), s. 26–46.



Weronika URBAŃSKA<sup>1</sup>, Agnieszka SOBIANOWSKA-TUREK<sup>1</sup>  
Katarzyna GRUDNIEWSKA<sup>2</sup>

---

## Możliwości odzysku metali z roztworów po ługowaniu odpadów chemicznych źródeł energii metodami flotacji jonowej

**STRESZCZENIE:** Chemiczne źródła energii służą do zasilania różnorodnych, popularnych urządzeń elektrycznych i elektro-  
nicznych, co wpływa na rosnącą ilość tej grupy odpadów. Zużyte baterie i akumulatory przenośne należy poddawać  
recyklingowi ze względu na występujące w nich substancje i materiały, które niewłaściwie zagospodarowane, mogą  
być zagrożeniem dla środowiska. Odpady bateryjne są przede wszystkim źródłem cennych metali, m.in. Zn i Mn, które  
mogą zostać odzyskane. Odzyskiwanie metali ze zużytych baterii wpisuje się w cele i zadania zrównoważonego rozwoju,  
albowiem pozwala m.in. na rozsądne gospodarowanie surowcami naturalnymi oraz istotnie wpływa na obniżenie ilości  
generowanych odpadów niebezpiecznych. Do efektywnych hydrometalurgicznych metod ich selektywnego odzysku moż-  
na zaliczyć flotację jonową będącą przedmiotem wielu różnych badań laboratoryjnych. W niniejszej publikacji dokonano  
szczegółowego przeglądu literaturowego i omówiono wyniki prac badawczych z zakresu możliwości odzysku metali  
z roztworów po ługowaniu proszku baterijnego z wykorzystaniem metody flotacji jonowej, gdzie kolektory stanowiły  
różne związki chemiczne. Praca wpisuje się w 12. cel zrównoważonego rozwoju.

**SŁOWA KLUCZOWE:** flotacja jonowa, odzysk metali, zużyte chemiczne źródła energii

## Possibilities of metals recovery from solutions after leaching of spent chemical energy sources by ion flotation methods

**ABSTRACT:** Chemical energy sources are used to power a variety of popular electrical and electronic devices, which affects  
the constantly growing amount of this group of waste. Spent portable batteries and accumulators should be recycled  
due to the substances and materials contained in them, which, if improperly used, may pose a threat to the natural  
environment. Waste batteries are primarily a source of valuable metals, including Zn and Mn, which can be successfully

---

<sup>1</sup> Dr inż., Politechnika Wrocławska, Katedra Inżynierii Ochrony Środowiska, Wrocław, Polska.

<sup>2</sup> Dr inż., Politechnika Wrocławska, Katedra Chemii Analitycznej i Metalurgii Chemicznej, Wrocław, Polska.

recovered. Recovery of metals from spent batteries is a part of the goals and tasks of sustainable development because it allows, among others, reasonable management of natural resources and significantly reduces the amount of hazardous waste generated. Effective hydrometallurgical methods of their selective recovery include ionic flotation, which is the subject of many different laboratory research. In this publication, a detailed review of the literature and discussion on the results of research on the possibility of recovering metals from solutions after leaching of battery powder using the ion flotation method, where the collectors were different chemical compounds were presented.

**KEYWORDS:** ionic flotation, metal recovery, spent chemical energy sources

## 1. Wprowadzenie

**D**ynamiczny rozwój nowych technologii i wielu gałęzi przemysłu doprowadził do wzrostu świadomości o zagrożeniach ekologicznych. W związku z coraz większą emisją zanieczyszczeń i w trosce o zrównoważony ekologiczny rozwój, kraje wysokorozwinięte nakładają coraz bardziej restrykcyjne regulacje prawne zawierające informacje o składzie, ilości, metodzie składowania, jak i przetwarzania powstałych strumieni odpadów. Dotyczy to szczególnie odpadów niebezpiecznych, które z uwagi na zawartość szkodliwych dla środowiska i człowieka związków chemicznych nie mogą być gromadzone na składowisku odpadów komunalnych. Zarówno względy ekologiczne, jak i ekonomiczne oraz wciąż wzrastające ubożenie zasobów rud polimetalicznych, wymagają znalezienia nowych surowców metalonośnych w miejscach nieeksploatowanych i trudnodostępnych, lub udoskonalania stosowanych technik odzysku metali ze źródeł wtórnych. Niewątpliwie było to powodem wzrostu zainteresowania odzyskiem metali ze zużytych odpadów elektrycznych i elektronicznych (Li i in. 2013; Polań i in. 2018; Kohl i in. 2018; Zabłocka-Malicka i in. 2018), baterii i akumulatorów (Innocenzi i in. 2017; Li i in. 2018; Dutta i in. 2018; Petranikova i in. 2018; Urbańska 2020) oraz katalizatorów samochodowych (Dong i in. 2015).

Głównymi zaletami przetwarzania wymienionych odpadów jest z jednej strony odzyskanie cennych surowców metalicznych, natomiast z drugiej zapobieganie wprowadzaniu toksycznych jonów metali do środowiska. Są efektywne, przemysłowe metody przerobu zużytych baterii i akumulatorów (Sobianowska-Turek 2018), jednak z uwagi na nieustannie zmieniający się skład ilościowo-jakościowy strumienia omawianych odpadów poszukuje się nowych, innowacyjnych, modułowych i ekologicznych technologii, charakteryzujących się wysokim i selektywnym odzyskiem metali przy niskim nakładzie kosztów (Dominguez-Benetton i in. 2018; Mylarappa i in. 2017; Torkaman i in. 2017). Takimi w nieodległej przyszłości mogą być metody flotacji jonowej.

## 2. Przenośne chemiczne źródła energii

Z danych zebranych z Raportów o funkcjonowaniu gospodarki bateriami i akumulatorami oraz zużytymi bateriami i akumulatorami publikowanych corocznie przez Głównego Inspektora Ochrony Środowiska (GIOŚ 2020) wynika, że na przestrzeni dziewięciu lat sprawozdawczych 2010–2018 wprowadzono do obrotu na polski rynek łącznie 995 133 Mg baterii i akumulatorów. Ogniwa przenośne stanowiły 10,5% (104 698 Mg), 66,7% samochodowe – (663 573 Mg) i przemysłowe 22,8% (226 862 Mg).

Zgodnie z Załącznikiem numer 2 do Ustawy z dnia 24 kwietnia 2009 r., baterie i akumulatory przenośne to baterie jednoogniowe typu AA i AAA, które są przeznaczone do używania w przenośnych telefonach i komputerach, bezprzewodowych elektronarzędziach, zabawkach i sprzęcie gospodarstwa domowego, przeznaczonych do używania w gospodarstwach domowych. Są to też inne baterie i akumulatory, niewymienione powyżej, które mogą być bez trudności przenoszone oraz nie są bateriami i akumulatorami samochodowymi oraz przemysłowymi. Z danych umieszczonych w Raportach GIOŚ wynika, że w latach 2010–2018 wprowadzono na polski rynek 104 698 Mg baterii i akumulatorów przenośnych, w tym 59,9% to ogniwa cynkowe (Zn-C, Zn-Mn, Zn-Air), 31,6% ogniwa inne, 3,8% ogniwa niklowo-kadmowe, 3,0% ogniwa ołowiowe, 1,6% ogniwa guzikowe niezawierające rtęci i 0,1% ogniwa guzikowe zawierające rtęć. Porównując dane z 2010 r. do 2018 r. z danymi umieszczonymi na stronach Urzędu Statystycznego Unii Europejskiej (Eurostat 2020), można wywnioskować, że baterie i akumulatory przenośne wprowadzone przez Polskę na rynek w ilości 91 359 Mg w analizowanych latach stanowiły 5,3% wszystkich ogniw tego typu wprowadzonych na rynek europejski, czyli 1 714 000 Mg.

Tak duża masa wprowadzonych na rynek ogniw przenośnych, głównie cynkowych, skutkuje tym, iż pomimo zwiększającego się corocznie rynku ogniw litowo-jonowych do punktów zbiórki trafiają przede wszystkim zużyte cynkowe chemiczne źródła energii, które należy poddać recyklingowi prowadzącemu do selektywnego odzysku wszystkich metali, tj. Mn, Zn, Fe, Cr, Al, K, Na, Pb, Ni, Cd, Co, Cu, Ca i Mg (Sobianowska-Turek 2014).

Wiodącą zasadą polityki ekologicznej państwa jest przyjęta w Konstytucji RP zasada zrównoważonego rozwoju. Państwo w swojej polityce ekologicznej uwzględnia tworzenie warunków równoważenia rozwoju kraju i harmonizowania z celami ochrony środowiska celów gospodarczych i społecznych. Temat omawiany w niniejszym artykule wpisuje się w cel nr 12: Odpowiedzialna konsumpcja i produkcja (zadania: 12.2. „Do 2030 roku zapewnić zrównoważone zarządzanie i efektywne zużycie zasobów naturalnych”; 12.5. „Do 2030 roku istotnie obniżyć poziom generowania odpadów poprzez prewencję, redukcję, recykling i ponowne użycie”). Udoskonalanie i tworzenie nowych, innowacyjnych metod recyklingu odpadów, w tym zużytych

baterii i akumulatorów, jest obecnie kluczowym działaniem w zakresie spełniania tego celu zrównoważonego rozwoju ze względu na odzyskiwanie cennych surowców w nich zawartych i możliwość ich ponownego wykorzystania, bez potrzeby korzystania z wyczerpujących się zasobów naturalnych.

### 3. Flotacja jonowa

**F**lotacja jonowa jest metodą pianową wykorzystującą te same prawa i specyficzne właściwości adsorpcyjne i elektryczne piany – substancji powierzchniowo-czynnej o dużej powierzchni międzyfazowej w układzie gaz/ciecz. Dodanie ich do kolumny kolektora powoduje powstanie połączeń z frakcjonowaną substancją (jon-kolektor) i wynoszenie jej na pęcherzykach powietrza do tworzącej się na powierzchni roztworu piany. Proces flotacji jonowej jest metodą skuteczną w odniesieniu do roztworów wodnych o bardzo niskich stężeniach (poniżej  $10^{-4}$  M), co umożliwia zastosowanie jej zarówno do wydzielania metali z surowców, jak i do usuwania szkodliwych metali z wód oraz ścieków przemysłowych, a także radioaktywnych (Walkowiak 1985; Maciejewski 2004).

Rozwijające się na przełomie ostatnich kilkudziesięciu lat metody hydrometalurgiczne, stosowane do przerobu ubogich rud i koncentratów, mogą być z dużą skutecznością wykorzystywane do odzysku metali ze źródeł wtórnych (odpadowych) (Jha i in. 2016). Metody flotacyjne, wchodzące w zakres procesów hydrometalurgicznych, ze względu na aspekty ekonomiczne i środowiskowe mogą być alternatywną metodą odzysku jonów metali ze źródeł wtórnych, wymagających unieszkodliwiania oraz pozyskania cennych składników (Grudniewska i in. 2009/2010). Szczególnie ważne jest to, że flotacja jonowa może być zastosowana przy silnie rozcieńczonych roztworach wodnych oraz wykazuje wysoki selektywny stopień wydzielenia poszczególnych jonów metali ze względu na zastosowanie nowych kolektorów, zdolnych do wiązania określonych składników roztworów (Maciejewski i in. 2009; Grudniewska 2012).

Pomimo licznych badań dotyczących flotacji jonowej, kinetyka i mechanizm procesu nie zostały jeszcze szczegółowo zbadane. Przeprowadzone dotychczas prace badawcze dowodzą, że metoda posiada potencjał i wiele możliwości zastosowań (Lemlich 2012). Odzysk jonów metali cynku(II) i manganu(II) z roztworów po kwaśnym nieredukcyjnym ługowaniu czarnej masy bateryjnej ze zużytych baterii cynkowo-węglowych (Zn-C) i cynkowo-manganowych (Zn-Mn) w procesie flotacji jonowej z wykorzystaniem kwasów m-dodecylofosforowy oraz m-tetradecylofosforowy w roli kolektorów jest nowym obszarem rozważań.

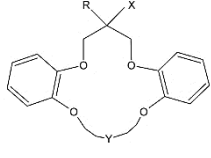
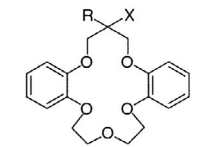
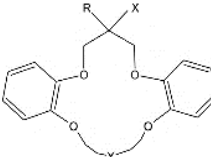
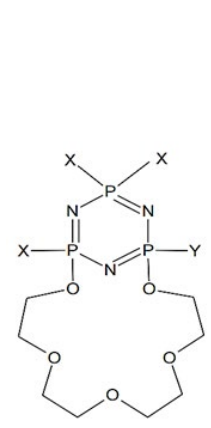
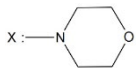
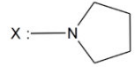
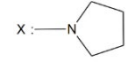
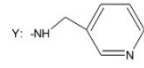
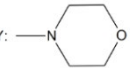
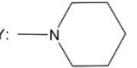
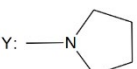
Podstawą do podjęcia rozszerzonego przeglądu literatury była praca Sobianowskiej-Turek i wsp. (2016) dotycząca wykorzystania metod flotacyjnych (flotacji jonowej i flotoekstrakcji) do odzysku jonów  $Zn^{2+}$  i  $Mn^{2+}$  z modelowych oraz rzeczywi-

stych rozcieńczonych roztworów wodnych po kwaśnym nieredukcyjnym ługowaniu czarnej masy bateryjnej powstałej po obróbce mechanicznej strumienia odpadów bateryjnych Zn-C oraz Zn-Mn gromadzonych w polskich punktach selektywnej zbiórki odpadów niebezpiecznych. Autorzy użyli w badaniach w roli kolektorów jonizowalne etery lariatowe (tab. 1). W procesach flotacyjnych zastosowali makrocykliczne związki organiczne o koronie: DB22C7, różniące się między sobą grupą lipofilową (1,2,3), DB19C6 (4), DB16C5 (5) i DB19C6 (6,7), różniące się grupą kwasową. Proces flotacji jonowej przeprowadzony był w temperaturze otoczenia, przy różnym odczynie roztworu (wartości pH: 1,5, 2,0 i 5,0), z zastosowaniem eteru p-1,1,3,3-tetrametylobutylofenyloowo polietyleno glikolowego (Tritonu X-100) jako środka spieniającego. Autorzy pracy (Sobianowska-Turek i in. 2016) wykazali, że flotacja jonowa z roztworu o pH równym 5.0 i przy zastosowaniu kolektora 2 i 3, wykazywała większe stopnie wydzielenia jonów metali cynku(II) i manganu(II) niż proces flotoekstrakcji. Stwierdzili także, że zastosowanie kolektora 2 i 3 w procesie flotacji jonowej pozwala na osiągnięcie 98% stopnia wydzielenia jonów  $Zn^{2+}$  i  $Mn^{2+}$  z badanych roztworów.

Badania nad zastosowaniem eterów lariatowych w celu wydzielania jonów cynku(II) i kadmu(II) z roztworów wodnych w procesie flotacji jonowych prowadziła także Ulewicz i wsp. (2003a; 2003b; 2006). Zaprezentowane w ich publikacji (Ulewicz i in. 2003b) wyniki pozwoliły autorom określić wpływ wielkości luki koronowej jonizowalnych eterów lariatowych (numery 8–12 w tabeli 1) na selektywność flotacji jonowej jonów cynku(II) i kadmu(II). Przedstawili również wyniki wpływu zmienności struktury kolektorów (rodzaj grupy kwasowej i lipofilowej), ich stężenia i pH roztworu na efektywność wydzielenia jonów metali. Kationy kadmu(II) i cynku(II) odzyskano z rozcieńczonych roztworów wodnych z wysoką skutecznością, w obecności niejonowego środka spieniającego 29 (tab. 2). Przedstawione wyniki wykazały, że w pewnych warunkach monoetylowe etery będące pochodnymi kwasu fosfonowego wykazują wysoką selektywność flotacji jonów kadmu(II) i cynku(II). Ulewicz i wsp. (2003a, 2003b, 2006) wykazali również istotny wpływ obecności i rodzaju grup lipofilowych i kwasowych, stężenia kolektora i odczynu roztworu na efektywność i selektywność na procesy flotacji jonowej.

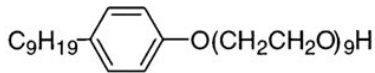
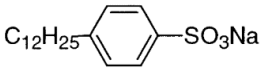
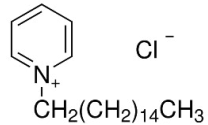
W kolejnych badaniach (Ulewicz i in. 2006) określili skuteczność i wpływ zastosowania nowych kolektorów dibenzoeterów lariatowych (13–21 o strukturach przedstawionych w tabeli 1), w obecności tego samego niejonowego środka spieniającego, jak w publikacji (2003b) o strukturze 29 (tab. 2). W procesie określili możliwość wydzielenia jonów cynku(II) oraz kadmu(II) znajdujących się w roztworze wodnym w stężeniu  $1,0 \cdot 10^{-5}$  M. W badaniach wyznaczyli także wpływ zmiany rozmiaru wnęki koronowej eterów DB13C4, DB16C5, DB19C6 na efektywność wydzielenia jonów cynku(II) i kadmu(II). Wykazali tym samym istotny wpływ zmienności strukturalnej eterów, stężenia kolektorów i pH na skuteczność wydzielania jonów cynku(II) i kadmu(II). Autorzy wskazali równocześnie, iż na procesy flotacji

Tabela 1. Kolektory stosowane w procesie flotacji jonowej cynku(II) i kadmu(II) w cytowanych pracach

| Wz <span>ó</span> r strukturalny  | Nr   | -R                               | -X   | -Y-   |  |
|---|--|----------------------------------|--|---|--|
|    | 1  | -C <sub>4</sub> H <sub>9</sub>   | -O(CH <sub>2</sub> ) <sub>3</sub> SO <sub>3</sub> Na                                   | -(CH <sub>2</sub> ) <sub>2</sub> O(CH <sub>2</sub> ) <sub>2</sub> O(CH <sub>2</sub> ) <sub>2</sub> O(CH <sub>2</sub> ) <sub>2</sub> - |  |
|   | 2  | -C <sub>7</sub> H <sub>15</sub>  |  |   |  |
|   | 3  | -C <sub>10</sub> H <sub>21</sub> |  |   |  |
|   | 4  | -C <sub>7</sub> H <sub>15</sub>  |  |   | -(CH <sub>2</sub> ) <sub>2</sub> O(CH <sub>2</sub> ) <sub>2</sub> O(CH <sub>2</sub> ) <sub>2</sub> - |
|   | 5  |                                  |  |   | -(CH <sub>2</sub> ) <sub>2</sub> O(CH <sub>2</sub> ) <sub>2</sub> -                                  |
|   | 6  |                                  |  |   | -CH <sub>2</sub> CONHSO <sub>2</sub> CF <sub>3</sub>   |
|   | 7  |                                  |  |   | -OCH <sub>2</sub> COOH   |
|    | 8  | -H                               | -O(CH <sub>2</sub> ) <sub>3</sub> SO <sub>3</sub> Na                                   | -   |  |
|   | 9  | -C <sub>3</sub> H <sub>7</sub>   | -O(CH <sub>2</sub> ) <sub>3</sub> SO <sub>3</sub> Na                                   | -   |  |
|   | 10   | -C <sub>10</sub> H <sub>21</sub> | -O(CH <sub>2</sub> ) <sub>3</sub> SO <sub>3</sub> Na                                   | -   |  |
|   | 11   | -C <sub>10</sub> H <sub>21</sub> | -OCH <sub>2</sub> CO <sub>2</sub> H  | -   |  |
|   | 12   | -C <sub>4</sub> H <sub>9</sub>   | OCH <sub>2</sub> PO(OH)(OC <sub>2</sub> H <sub>5</sub> )                               | -   |  |
|   |  | 13                               | -C <sub>10</sub> H <sub>21</sub>   | -OCH <sub>2</sub> COOH  | -(CH <sub>2</sub> ) <sub>2</sub> -   |
| 14  |  | -C <sub>10</sub> H <sub>21</sub> | -O(CH <sub>2</sub> ) <sub>3</sub> SO <sub>3</sub> Na                                   | -(CH <sub>2</sub> ) <sub>2</sub> O(CH <sub>2</sub> ) <sub>2</sub> -   |  |
| 15  |  | -C <sub>3</sub> H <sub>7</sub>   | -O(CH <sub>2</sub> ) <sub>3</sub> SO <sub>3</sub> Na                                   | -(CH <sub>2</sub> ) <sub>2</sub> O(CH <sub>2</sub> ) <sub>2</sub> -   |  |
| 16  |  | -H                               | -O(CH <sub>2</sub> ) <sub>3</sub> SO <sub>3</sub> Na                                   | -(CH <sub>2</sub> ) <sub>2</sub> O(CH <sub>2</sub> ) <sub>2</sub> -   |  |
| 17  |  | -C <sub>4</sub> H <sub>9</sub>   | -OCH <sub>2</sub> COOH   | -(CH <sub>2</sub> ) <sub>2</sub> O(CH <sub>2</sub> ) <sub>2</sub> -   |  |
| 18  |  | -H                               | -OCH <sub>2</sub> PO(OH)(OC <sub>2</sub> H <sub>5</sub> )                              | -(CH <sub>2</sub> ) <sub>2</sub> O(CH <sub>2</sub> ) <sub>2</sub> -   |  |
| 19  |  | -CH <sub>3</sub>                 | -OCH <sub>2</sub> COOH   | (CH <sub>2</sub> ) <sub>2</sub> O(CH <sub>2</sub> ) <sub>2</sub> O(CH <sub>2</sub> ) <sub>2</sub>                                     |  |
| 20  |  | -C <sub>2</sub> H <sub>5</sub>   | -OCH <sub>2</sub> COOH   | -(CH <sub>2</sub> ) <sub>2</sub> O(CH <sub>2</sub> ) <sub>2</sub> O(CH <sub>2</sub> ) <sub>2</sub> -                                  |  |
| 21  |  | -C <sub>3</sub> H <sub>7</sub>   | -OCH <sub>2</sub> COOH   | -(CH <sub>2</sub> ) <sub>2</sub> O(CH <sub>2</sub> ) <sub>2</sub> O(CH <sub>2</sub> ) <sub>2</sub> -                                  |  |
|  |  | 22                               | -  | X:   | -NH(CH <sub>2</sub> ) <sub>3</sub> OH  |
|   | 23   | -                                | X:  | -NH(CH <sub>2</sub> ) <sub>3</sub> OH   |  |
|   | 24   | -                                | X:  | Y:   |  |
|   | 25   | -                                |  | -O(CH <sub>2</sub> CH <sub>2</sub> O) <sub>3</sub> CH <sub>3</sub>  |  |
|   | 26   | -                                |  | X = Y:    |  |
|   | 27   | -                                |  | X = Y:    |  |
|   | 28   | -                                |  | X = Y:    |  |

Źródło: opracowanie wlasne na podstawie: Sobianowska-Turek i in. 2016; Ulewicz i in. 2003a, 2003b, 2006.

Tabela 2. Dodatkowe związki stosowane w flotacji jonów cynku(II) i kadmu(II) w cytowanych pracach

| Wzór strukturalny   | Nr | Function           |
|---|----|--------------------|
|  | 29 | środek spieniający |
|  | 30 | kolektor anionowy  |
|  | 31 | kolektor kationowy |

Źródło: opracowanie własne na podstawie: Ulewicz i in. 2003b, 2006; Kozłowski i in. 2000.

jonowych omawianych kationów metali z roztworów wodnych, znaczący wpływ ma obecność kationów metali alkalicznych (litu, sodu i potasu). W efekcie stwierdzili, że stopień wydzielenia badanych jonów wzrasta wraz ze wzrostem wartości pH, a zmniejsza się wraz ze wzrostem stężenia kationów metali alkalicznych w roztworze wodnym.

W kolejnej pracy (Ulewicz i in. 2003a) przeprowadzili proces flotacyjnego wydzielenia kationów cynku(II) i kadmu(II) z rozcieńczonych roztworów wodnych z wykorzystaniem eterów lariatowych typu difosfoza-16-korona-6 o wzorach 22–28 (tab. 1) oraz niejonowego środka spieniającego o numerze 29 (tab. 2). W badaniach tych autorzy wykazali wpływ rodzaju grup występujących w strukturze cząsteczki eteru na selektywność i efektywności flotacji jonowej kationów cynku(II) oraz kadmu(II). Stwierdzili także istotny wpływ obecnych w roztworze jonów metali alkalicznych (litu i sodu) na stopień wydzielenia jonów kadmu(II), oraz że wzrasta on wraz ze wzrostem wartości pH, a zmniejsza się ze wzrostem stężenia kationów metali alkalicznych. Ponadto wskazali zależność selektywności wydzielenia jonów cynku(II) i kadmu(II) od pH roztworu oraz charakteru hydrofilowo lipofilowego grup znajdujących się w strukturze badanych eterów.

Badania nad odzyskiem jonów cynku(II) i kadmu(II) z roztworów wodnych zawierających równomolową mieszaninę obu kationów przeprowadził Kozłowski i wsp. (2000). Autorzy porównali skuteczność flotacji jonowej przy zastosowaniu polimerowych membran. Eksperymenty przeprowadzono w chlorkowych roztworach wodnych z zastosowaniem kolektorów o stężeniach początkowych  $1,0 \cdot 10^{-5}$  M. W roli kolektorów użyto anionowego środka powierzchniowo czynnego (dodecylo-benzenosulfonianu sodu o strukturze 30 i kationowego środka powierzchniowo czynnego w postaci chlorku cetylopirydyniowego o strukturze 31 (tab. 2). Ostatecznie stwier-

dzono, że zastosowanie kationowego związku powierzchniowo czynnego powoduje wzrost selektywności flotacji jonów kadmu(II) i cynku(II) wraz ze wzrostem stężenia jonów chlorkowych.

Badaniem możliwości wydzielenia jonów cynku(II) i srebra(I) przy zastosowaniu jonogennych anionowych i kationowych związków powierzchniowo czynnych w procesie flotacji jonowej rozcieńczonych roztworów wodnych zajmował się także Charewicz i wsp. (1999). Kolektorami anionowymi użytymi w procesie były dodecylosiarczan sodu i tetradecylosiarczan amonu, a kolektorem kationowym był chlorek cetylopirydyniowego. Wyniki wykazały dużo większe powinowactwo kationów cynku(II) do kolektorów anionowych niż kationów srebra(I). Autorzy wykazali, że jony cynku(II) i srebra(I) mogą być wydzielone ze słabo kwaśnych rozcieńczonych roztworów wodnych. Jednocześnie wskazali, że oddzielenie obu badanych jonów metalu jest możliwe z roztworów zawierających tiosiarczanowe lub tiocyjanianowe ligandy. Dla pierwszego ligandu, przy całkowitym stężeniu  $3,0 \cdot 10^{-6}$  M, jony srebra(I) występują w postaci mieszaniny  $[\text{Ag}(\text{S}_2\text{O}_3)]^-$  i  $[\text{Ag}(\text{S}_2\text{O}_3)_2]^{3-}$ , podczas gdy kationy cynku(II) pozostają w fazie wodnej jako prosty dwuwartościowy kation. Natomiast częściowe rozdzielanie jonów cynku(II) i srebra(I) otrzymano w obecności ligandów cyjankowych  $\text{CN}^-$  w zakresie stężeń  $2,5 \cdot 10^{-4}$  do  $1,0 \cdot 10^{-3}$  M, gdzie jony cynku występowały w formach anionów  $[\text{Zn}(\text{CN})_3]^-$  i  $[\text{Zn}(\text{CN})_4]^{2-}$ , a stopień wydzielenia wyniósł 92–98% i był wyższy niż anionów  $[\text{Ag}(\text{CN})_2]^-$ , który wyniósł 73–82%.

Natomiast Jurkiewicz (1990) oceniał skuteczność stosowania w roli kolektorów: chlorku, bromku, jodku i tiocyjanianu cetylotrimetyloaminy do wydzielenia złożonych form jonów cynku w postaci anionów z roztworów wodnych w procesie flotacji jonowej. Autor wykazał wzrost wydzielenia kationów cynku w zależności od zastosowanego kolektora, przy uwzględnieniu charakteru ligandów:  $\text{Zn}(\text{Cl})_4^{2-} < \text{Zn}(\text{Br})_4^{2-} < \text{Zn}(\text{SCN})_4^{2-} \leq \text{Zn}(\text{I})_4^{2-}$ . Wskazał również, że w obecności kwasów ilość kompleksów cynk-tiocyjanian zmniejsza się wraz z rodzajem kwasu w następującej kolejności:  $\text{HClO}_4 < \text{H}_3\text{PO}_4 < \text{HCl} < \text{H}_2\text{SO}_4 < \text{bez kwasu}$ , oraz że napięcie powierzchniowe miedzi przy oddzielaniu form jonów cynku zmniejsza się wraz ze wzrostem stężenia bromku lub chlorku, a zwiększa wraz ze wzrostem stężenia jodku i tiocyjanianu (zmiany te zachodzą w podanej zależności:  $\text{Br}^- < \text{Cl}^- < \text{SCN}^- < \text{I}^-$ ). Ponadto pomiary w obecności różnych metali i tiocyjanianu pokazują sekwencję napięcia powierzchniowego dla jonów w kolejności:  $\text{Co} < \text{Zn} < \text{Cd}$ . Autor przedstawia na podstawie analizy oddziaływań w ośrodku, w którym oddzielana jest piana, interpretację skuteczności usuwania kompleksu cynku, jak również zmian w zjawiskach powierzchniowych.

Polat i Erdogan (2007) przeprowadzali proces flotacji w celu zbadania skuteczności usuwania jonów metali ciężkich, takich jak miedź(II), cynk(II), chrom(III) i srebro(I) z wód odpadowych. W celu określenia optymalnych warunków procesu badali takie parametry jak: pH, rodzaj kolektora, wpływ obecności speniacza oraz szybkość przepływu powietrza przez układ. W roli kolektorów zastosowano sól sodową siar-



czanu dodecyłu i bromek heksadecylotrimetyloamoniowy. Natomiast jako spieniacza użyto roztworu metylo-izobutyloketonu w etanolu. Stwierdzono, że nie jest możliwe znalezienie optymalnych warunków koncentracji badanych jonów metali na poziomie 90% z wód odpadowych.

Badania nad wydzielaniem kationów cynku i manganu z równomolowej mieszaniny jonów: cynku(II), manganu(II), kobaltu(II), żelaza(III) i chromu(III) prowadził Walkowiak (1991). Wykazał, że stosowanie w roli kolektorów anionowych dodecylsulfonianu sodu oraz dodecylbenzenosulfonianu do wydzielenia wyżej wymienionych jonów w obecności innych metali w roztworze wodnym wpływa na wzrost efektywności w szeregu:  $Mn^{2+} < Zn^{2+} < Co^{2+} < Fe^{3+} < Cr^{3+}$ . Dodatkowo autor wykazał, że lepiej będą się wydzielać kationy trójwartościowe, z uwagi na większe powinowactwo do kolektora anionowego, które wzrasta wraz ze wzrostem potencjału jonowego kationu.

## 4. Wnioski

Pomimo iż strumień przenośnych chemicznych źródeł energii dynamicznie się zmienia i prawdopodobnie w perspektywie najbliższych kilkunastu lat dominować w nim będą ogniwa litowo-jonowe, należy pamiętać, że ogniwa cynkowe wciąż będą musiały być poddawane skutecznemu recyklingowi. W efekcie należy odzyskiwać metale o bardzo wysokiej czystości zarówno ze względów technologicznych, jak i handlowych. Mogą to zagwarantować dobrze zaprojektowane procesy jednostkowe, m.in. z wykorzystaniem flotacji jonowej.

## Literatura

- CHAREWICZ W. i HOLAWIECKA B.A. 1999. *Selective flotation of zinc(II) and silver(I) ions from dilute aqueous solutions*. Sep. Sci. Technol. 34, s. 2447–2460.
- DOMINGUEZ-BENETTON X., VARIA J.C., POZO G., MODIN O., HEIJNE A.T., FRANSAER J. i RABAEY K. 2018. *Metal recovery by microbial electro-metallurgy*. Progr. Mater. Sci. 94, s. 435–461.
- DONG H., ZHAO J., CHEN J., WU Y. i LI B. 2015. *Recovery of platinum group metals from spent catalysts*. A review. I. J. Miner. Process. 145, s. 108–113.
- DUTTA T., KIM K.-H., DEEP A., SZULEJKO J.E., VELLINGIRI K., KUMAR S., KWON E.E. i YUN S.-T. 2018. *Recovery of nanomaterials from battery and electronic wastes: A new paradigm of environmental waste management*. Renew. Sustain. Energy Rev. 82, s. 3694–3704.
- Eurostat 2020. [Online] <https://ec.europa.eu/eurostat> [Dostęp: 30.06.2020].
- GIOŚ 2020. Główny Inspektorat Ochrony Środowiska (GIOŚ); [Online] <http://www.gios.gov.pl/pl/gospodarka-odpadami/baterie-i-akumulatory> [Dostęp: 30.06.2020].
- GRUDNIEWSKA K.L. 2012. *Ion flotation  $Cs^+$ ,  $Sr^{2+}$ ,  $Ba^{2+}$  and  $Co^{2+}$  ion flotation from dilute aqueous solutions with macrocyclic compounds*. Wrocław University of Technology.

- GRUDNIEWSKA K.L., WALKOWIAK W. i KOZŁOWSKI C. 2009/2010. *Principles and applications of solvent sublation – a review*. *Ars Separatoria Acta* 7, s. 23–38.
- INNOCENZI V., IPPOLITO N.M., MICHELIS I.D. i PRISCANOLARO M. 2017. *A review of the processes and lab-scale techniques for the treatment of spent rechargeable NiMH batteries*. *J. Power Sources* 362, s. 202–2018.
- JHA M.K., KUMARI A., PANDA R., KUMAR J.R., YOO K. i LEE J.Y. 2016. *Review on hydrometallurgical recovery of rare earth metals*. *Hydrometallurgy* 165, s. 2–26.
- JURKIEWICZ K. 1990. *The removal of zinc from solutions by foam separation, I. Foam separation of complex zinc anions*. *J. Miner. Process.* 28, s. 173–187.
- Konstytucja Rzeczypospolitej Polskiej z dnia 2 kwietnia 1997 r.
- KOHL C.A. i GOMES L.P. 2018. *Physical and chemical characterization and recycling potential of desktop computer waste, without screen*. *J. Clean. Prod.* 148, s. 1041–1051.
- KOZŁOWSKI C.A., ULEWICZ M. i WALKOWIAK W. 2000. *Separation of zinc and cadmium ions from aqueous chloride solutions by ion flotation and liquid membranes*. *Physicochem. Probl. Miner. Process.* 34, s. 141–151.
- LEMLICH R. 2012. *Adsorptive Bubble Separation Techniques*. Elsevier.
- LI J., BRENDE N., LOPEZ N., LIU L., ZHAO N., YU K. i ZHENG L. 2013. *Regional or global WEEE recycling. Where to go?* *Waste Manage.* 33, s. 923–934.
- LI L., ZHANG X., XUE Q., FAN E., WU F. i CHEN R. 2018. *Economical recycling process for spent lithium-ion batteries and macro- and micro-scale mechanistic study*. *J. Power Sources* 377, s. 70–79.
- MACIEJEWSKI P. 2004. *Selektywne wydzielenie cezu(I), strontu(II), baru(II) i ołowiu(II) metodą flotacji jonowej z zastosowaniem jonizowalnych eterów lariatowych*. Rozprawa doktorska.
- MACIEJEWSKI P., ROBAK W., ULEWICZ M. i GRUDNIEWSKA K.L. 2009. *Removal of radioisotopes from waste water after “dirty bomb” decontamination*. *Physicochem. Probl. Miner. Process.* 43, s. 65–72.
- MYLARAPPA M., VENKATA LAKSHMI V., VISHNU MAHESH K.R., NAGASWARUPA H.P., PRASHANTHA S.C., SHRAVANA KUMARA K.N., SIDDESWARA D.M.K. i RAGNOVENDRA N. 2017. *Resource Recovery and Material Characterization of Metals from Waste Li-ion Batteries by an Eco-Friendly Leaching Agent*. *Materials Today: Proceedings* 4, s. 12215–12222.
- PETRANIKOVA M., EBIN B., MIKHAILOVA S., STEENARI B.-M. i EKBERG C. 2018. *Investigation of the effects of thermal treatment on the leachability of Zn and Mn from discarded alkaline and ZnC batteries*. *J. Clean. Prod.* 170, s. 1195–1205.
- POLAT H. i ERDOGAN D. 2007. *Heavy metal removal from waste waters by ion flotation*. *J. Hazard. Mater.* 148, s. 267–273.
- POLAT O., CAPRAZ O. i GUNGOR A. 2018. *Modelling of WEEE recycling operation planning under uncertainty*. *J. Clean. Prod.* 180, s. 769–779.
- SOBIANOWSKA-TUREK A. 2014. *Electrochemical evaluation of manganese reducers – recovery of Mn from Zn-Mn and Zn-C battery waste*. *J. Power Sources* 270, s. 668–674.
- SOBIANOWSKA-TUREK A., ULEWICZ M. i SOBIANOWSKA K.L. 2016. *Ion flotation and solvent sublation of zinc(II) and manganese(II) in the presence of proton-ionizable lariat ethers*. *Physicochem. Probl. Miner. Process.* 52, s. 1048–1060.
- SOBIANOWSKA-TUREK A. 2018. *Hydrometallurgical recovery of metals: Ce, La, Co, Fe, Mn, Ni and Zn from the stream of used Ni-MH cells*. *Waste Manage.* 71, s. 213–219.
- TORKAMAN R., ASADOLLAHZADEH M., TORAB-MOSTAEDI M. i MARAGHEH M.G. 2017. *Recovery of cobalt from spent lithium ion batteries by using acidic and basic extractants in solvent extraction process*. *Sep. Purif. Technol.* 186, s. 318–325.
- ULEWICZ M., WALKOWIAK W. i BARTSCH R.A. 2006. *Ion flotation of zinc(II) and cadmium(II) with proton-ionizable lariat ethers – effect of cavity size*. *Sep. Purif. Technol.* 48, s. 264–269.
- ULEWICZ M., WALKOWIAK W., BRANDT K. i PORWOLIC-COMBERLIK I. 2003a. *Ion flotation of zinc(II) and cadmium(II) in the presence of side-armed diphosphaza-16-crown-6-ether*. *Sep. Sci. Technol.* 38, s. 633–645.

- ULEWICZ M., WALKOWIAK W., JANG Y., KIM S.J. i BARTSCH R.A. 2003b: *Ion flotation of cadmium(II) and zinc(II) in the presence of proton-ionizable lariat ethers*. Anal. Chem. 75, s. 2276–2279.
- URBAŃSKA W. 2020. *Recovery of Co, Li, and Ni from Spent Li-Ion Batteries by the Inorganic and/or Organic Reducer Assisted Leaching Method*. Minerals 10, s. 555.
- Ustawa z dnia 24 kwietnia 2009 r. o bateriach i akumulatorach (Dz.U. 2019 poz. 521).
- WALKOWIAK W. 1985. *Mechanizm selektywnej flotacji jonów metali*. Prace Naukowe Instytutu Chemii Nieorganicznej i Metalurgii Pierwiastków Rzadkich Politechniki Wrocławskiej.
- WALKOWIAK W. 1991. *Mechanism of selective ion flotation. 1. Selective flotation of transition metal cations*. Sep. Sci. Technol. 26, s. 559–568.
- ZABŁOCKA-MALICKA M., SZCZEPANIAK W., RUTKOWSKI P., OCHROMOWICZ K., LEŚNIEWICZ A. i CHĘC-MANOWSKI J. 2018. *Decomposition of the ISA-card under steam for valorized polymetallic raw material*. J. Anal. Appl. Pyrolysis 130, s. 256–268.



Aleksander IWASZCZUK<sup>1</sup>

---

## Odpady z biogazowni rolniczej jako surowiec do produkcji nawozów

**STRESZCZENIE:** Idea gospodarki o obiegu zamkniętym bezpośrednio związana z realizacją polityki zrównoważonego rozwoju, jest nastawiona na maksymalne wykorzystanie zasobów, przy minimalnym tworzeniu odpadów, poprzez powtórne ich wykorzystanie. Jednym z takich rozwiązań jest zgazowanie odpadów w biogazowniach dla pozyskania gazu na cele gospodarcze. Biogazownie są najczęściej instalowane przy oczyszczalniach ścieków, składowiskach odpadów i gospodarstwach rolnych, a ich zaletą jest to, że technologia bazuje na naturalnym procesie biochemicznym, niewymagającym wykorzystania substancji chemicznych. Celem prezentowanych badań jest analiza korzyści z budowy biogazowni rolniczych, związanych z nią zagrożeń dla inwestora oraz możliwości wykorzystania odpadów z procesu wytwarzania biogazu. Praca wpisuje się w 3. i 12. cel zrównoważonego rozwoju.

**SŁOWA KLUCZOWE:** biogazownia, odpady, biogaz, pulpa pofermentacyjna, nawozy rolnicze, gospodarka o obiegu zamkniętym

## Wastes from an agricultural biogas plant as a raw material for the production of fertilizers

**ABSTRACT:** The idea of a circular economy, directly related to the implementation of the sustainable development policy, is focused on the maximum use of resources with minimal waste generation through their reuse. One of such solutions is gasification of waste in biogas plants in order to obtain gas for economic purposes. Biogas plants are most often installed near sewage treatment plants, landfills and farms, and their advantage is that the technology is based on a natural biochemical process that does not require the use of chemicals. The aim of the presented research is to analyze the benefits of building agricultural biogas plants, the related risks for the investor and the possibility of using waste from the biogas production process. The work is related to the 3<sup>rd</sup> and 12<sup>th</sup> goals of sustainable development.

**KEYWORDS:** biogas plant, waste, biogas, digestate pulp, agricultural fertilizers, circular economy

---

<sup>1</sup> Dr, Politechnika Krakowska, Kolegium Nauk Społecznych, Kraków, Polska.

## 1. Wprowadzenie

**R**olnictwo to jedna ze strategicznych branż w każdej gospodarce, która jest głównym dostawcą pożywienia dla mieszkańców kraju. Celem ekonomicznym uprawy roślin jest uzyskanie wysokich plonów, przy ograniczonych nakładach. Ważne jest także zachowanie odpowiedniej jakości i żyzności gleby (która będzie wykorzystywana w kolejnych cyklach produkcyjnych). Zbyt intensywnie prowadzone uprawy prowadzą do utraty mikro- i makroelementów w glebie i obniżenia wielkości zbiorów. Dlatego coraz istotniejsze jest zagadnienie związane z nawożeniem gleby, rodzajem nawozów oraz poszukiwaniem najlepszych rozwiązań, z uwzględnieniem wpływu na środowisko i maksymalne wykorzystanie zasobów.

Efektywne wykorzystanie zasobów gospodarczych wiąże się z zagospodarowaniem powstających w różnych procesach produkcyjnych odpadów. Jednym z nich jest pulpa pofermentacyjna, będąca produktem ubocznym procesu fermentacji metanowej odpadów w biogazowniach rolniczych. Celem pracy jest zbadanie pozytywnych efektów i zagrożeń związanych z funkcjonowaniem biogazowni oraz wykorzystania w gospodarce powstających odpadów. Aby zrealizować postawiony cel, przeanalizowano literaturę przedmiotu, akty prawne oraz dane statystyczne.

## 2. Produkcja energii w biogazowniach rolniczych w Polsce

**W** ustawie o odnawialnych źródłach energii (z dnia 20 lutego 2015 r. z późn. zm.) biogaz rolniczy zdefiniowano jako „gaz otrzymywany w procesie fermentacji metanowej surowców rolniczych, produktów ubocznych rolnictwa, płynnych lub stałych odchodów zwierzęcych, produktów ubocznych, odpadów lub pozostałości z przetwórstwa produktów pochodzenia rolniczego lub biomasy leśnej, lub biomasy roślinnej zebranej z terenów innych niż zaewidencjonowane jako rolne lub leśne, z wyłączeniem biogazu pozyskanego z surowców pochodzących ze składowisk odpadów, a także oczyszczalni ścieków, w tym zakładowych oczyszczalni ścieków z przetwórstwa rolno-spożywczego, w których nie jest prowadzony rozdział ścieków przemysłowych od pozostałych rodzajów osadów i ścieków” (Ustawa 2015). Jest to nowa definicja, która obowiązuje od 1 stycznia 2020 r.

Biogaz rolniczy wytwarzany jest w biogazowniach składających się z kompleksu obiektów budowlanych przystosowanych do zamiany substratów organicznych w biogaz (jest to w 40–85% metan, w 16–48% dwutlenek węgla i w 0,6–7,5% azot) oraz poferment będący cennym nawozem (Biogaz 2012).

W 2016 r. najczęściej do produkcji biogazu rolniczego wykorzystano: gnojowicę, pozostałości z owoców i warzyw, wywar pogorzelniany, kiszonkę z kukurydzy, wyśładki, osady technologiczne z przemysłu rolno-spożywczego, odpady z przemysłu

mleczarskiego i obornik (Gradziuk 2017). W latach 2018 i 2019 udziały poszczególnych surowców przedstawia tabela 1.

Tabela 1. Surowce wykorzystane do produkcji biogazu rolniczego w I półroczu 2018 i 2019 r.

| Surowce  | 2018      |        | 2019      |        |
|--|-----------|--------|-----------|--------|
|  | Mg        | %      | Mg        | %      |
| Pozostałości z warzyw i owoców                     | 380 101   | 31,06  | 400 796   | 32,21  |
| Gnojowica  | 361 747   | 29,56  | 346 057   | 27,81  |
| Kiszonka z kukurydzy                               | 254 931   | 20,83  | 204 820   | 16,46  |
| Odpady z przetwórstwa spożywczego                  | 81 399    | 6,65   | 119 303   | 9,59   |
| Osady technologiczne z przemysłu rolno-spożywczego | 90 933    | 7,43   | 91 505    | 7,35   |
| Przeterminowana żywność                            | 32 380    | 2,65   | 41 721    | 3,35   |
| Odpady poubojowe                                   | 22 250    | 1,82   | 40 214    | 3,23   |
| Łącznie  | 1 223 741 | 100,00 | 1 244 416 | 100,00 |

Źródło: Ryłski 2019.

Jak widać (tab. 1), wzrósł udział: odpadów z przetwarzania warzyw i owoców; odpadów z przetwórstwa spożywczego; przeterminowanej żywności i odpadów poubojowych. Niepokój powinna budzić rosnąca tendencja marnowania żywności.

Według informacji z Krajowego Ośrodka Wsparcia Rolnictwa (KOWR), w I półroczu 2019 r. z 1,93 mln Mg surowców otrzymano 148,84 mln m<sup>3</sup> biogazu rolniczego. 88,10% surowców stanowiły odpady, a 11,90% – uprawy celowe (Ryłski 2019).

Uwzględniając ilości biogazu produkowanego z analizowanych odpadów, można uznać, że biogazownie rolnicze mogą być ważnym elementem krajowej polityki energetycznej, realizowanej na obszarach wiejskich, na których prowadzone są produkcja rolna i hodowla (uprawa roślin użytkowych, hodowla zwierząt) oraz gospodarka leśna. Szacowany potencjał surowcowy na tych terenach pozwala na wyprodukowanie około 5 mld m<sup>3</sup>/rok biogazu rolniczego o parametrach gazu ziemnego wysokometanowego (Piwowar i Dzikuć 2013). W Polsce na koniec 2018 r., według Urzędu Regulacji Energetyki, funkcjonowało 95 biogazowni rolniczych o łącznej mocy ponad 102 MW, które wyprodukowały ponad 567 tys. MWh energii (tab. 2).

Analiza danych zaprezentowanych w tabeli 2 wskazała, że biogazownie rolnicze zbudowano we wszystkich województwach, jednak najwięcej w zachodniopomorskim, wielkopolskim, warmińsko-mazurskim i dolnośląskim. Natomiast pod względem wielkości produkcji energii w 2018 r. prym wiodły województwa pomorskie, zachodniopomorskie i warmińsko-mazurskie, w których wyprodukowano energii z biogazu ponad 20-krotnie więcej niż w świętokrzyskim.

Tabela 2. Liczba biogazowni rolniczych, ich moc i produkcja energii elektrycznej w 2018 r.

| Lp. | Województwo         | Biogazownie rolnicze |          |                         |
|-----|---------------------|----------------------|----------|-------------------------|
|     |                     | liczba               | moc [MW] | produkcja energii [MWh] |
| 1   | Pomorskie           | 9                    | 10,159   | 79 996,491              |
| 2   | Zachodniopomorskie  | 13                   | 12,690   | 72 311,543              |
| 3   | Warmińsko-Mazurskie | 10                   | 9,606    | 69 043,861              |
| 4   | Lubelskie           | 7                    | 9,859    | 55 906,743              |
| 5   | Wielkopolskie       | 11                   | 10,678   | 54 105,624              |
| 6   | Kujawsko-Pomorskie  | 6                    | 7,991    | 49 974,044              |
| 7   | Łódzkie             | 4                    | 5,057    | 35 943,210              |
| 8   | Dolnośląskie        | 10                   | 9,410    | 33 808,488              |
| 9   | Podlaskie           | 9                    | 7,596    | 30 189,763              |
| 10  | Mazowieckie         | 6                    | 6,819    | 24 181,135              |
| 11  | Lubuskie            | 4                    | 2,792    | 18 366,557              |
| 12  | Śląskie             | 2                    | 1,596    | 11 638,826              |
| 13  | Podkarpackie        | 3                    | 2,498    | 11 067,572              |
| 14  | Małopolskie         | 2                    | 1,150    | 9 555,870               |
| 15  | Opolskie            | 1                    | 2,000    | 7 604,988               |
| 16  | Świętokrzyskie      | 1                    | 0,800    | 3 403,420               |
|     | Łącznie             | 95                   | 102,688  | 567 099,135             |

Źródło: Opracowanie na podstawie: Pismo 2019.

Jeśli chodzi o instalacje produkujące biogaz rolniczy, to według danych opublikowanych na portalu internetowym magazynu Biomasa (stan na 16 maja 2019 r.) w Polsce działało 120 instalacji. Umieszczono je na pierwszej na rynku mapie instalacji biogazowych, przygotowanej przez Biomass Media Group. Na mapie uwzględniono także katalog operatorów oferujących technologie, urządzenia i komponenty oraz usługi dla sektora biogazowego. Mapa obrazuje więc aktualny stan sektora w kraju i uwzględnia wszystkie działające instalacje zgłoszone do rejestru wytwórców biogazu rolniczego prowadzonego przez Krajowy Ośrodek Wsparcia Rolnictwa (KOWR) oraz 19 mikroinstalacji pracujących przy gospodarstwach rolniczych w całej Polsce (magazynbiomasa.pl).

Należy dodać, że „organem odpowiedzialnym za prowadzenie rejestru wytwórców biogazu rolniczego jest Dyrektor Generalny KOWR. Według tej organizacji (informacja 21 lipca 2020 r.), liczba biogazowni rolniczych na terenie Polski od 2018 r. nie uległa zmianie i nadal wynosi 95 (www.kowr.gov.pl).



### 3. Biogazownia – korzyści dla gospodarki i społeczeństwa

**B**iogazownia służy do produkcji biogazu z roślin i ich pozostałości, odchodów zwierzęcych i innych odpadów. Może być zainstalowana w gospodarstwach rolnych, przy oczyszczalniach ścieków i składowiskach odpadów. W zależności od typu substratu, jaki jest wykorzystywany w procesie produkcji, zalicza się je do biogazowni rolniczych lub innych. Dla substratów wykorzystywanych przez biogazownie rolnicze muszą to być wyłącznie surowce organiczne. W związku z tym odpady z produkcji biogazu rolniczego mogą być wykorzystane do produkcji nawozów polepszających jakość gleb i zwiększających wielkość uzyskanych plonów, co przyniesie kolejne korzyści gospodarcze.

Główną zaletą biogazowni jest to, że proces produkcji gazu jest naturalnym procesem biochemicznym, tzn. nie wymaga stosowania dodatkowych substancji chemicznych. Poza tym, zgazowanie odpadów ogranicza ilość emitowanych do atmosfery gazów cieplarnianych (m.in. metanu i tlenku azotu), które powstałyby w procesie naturalnego ich rozkładu. Można więc dostrzec w tym potrójną korzyść dla środowiska.

Po pierwsze, uzyskany w sposób kontrolowany biogaz może być wykorzystany do produkcji energii cieplnej i elektrycznej (w procesie jego spalania) lub jako paliwo silnikowe do napędu pojazdów. Wobec tego biogaz można uznać za niewyczerpalne (odnawialne) źródło energii.

Po drugie, zagospodarowane odpady zmniejszają ich ogólną ilość, która mogłaby trafić na składowiska. W ten sposób ogranicza się stopień skażenia gleby i wody, co jest bardzo istotne dla społeczności zamieszkującej obszary w pobliżu miejsc, gdzie takie odpady powstają. Dodatkowo, mieszkańcy okolicznych miejscowości mogą korzystać z możliwości zatrudnienia w biogazowniach (zwłaszcza przy wysokim bezrobociu) oraz z produktów ich działalności (energii i/lub gazu po cenach preferencyjnych).

Po trzecie, odpad z działalności biogazowni rolniczej (tzw. poferment) może posłużyć do nawożenia gleby w uprawach rolnych, leśnych, szkółkach drzew i krzewów itp.

### 4. Zagrożenia związane z budową i eksploatacją biogazowni

**B**udowa biogazowni, podobnie jak każdego innego zakładu produkcyjnego, wiąże się z szeregiem zagrożeń, które należy brać pod uwagę przy jej planowaniu. Przed podjęciem decyzji o budowie należy oszacować koszty inwestycji i skonfrontować z planowanymi dochodami, uwzględniając koszt pozyskania kapitału inwestycyjnego, planowany okres jego zwrotu i wartość pieniądza w czasie. Przy obliczeniach okresu i stopy zwrotu inwestor powinien uwzględnić również sezonowość dostaw substratu (np. w zimie, kiedy produkcja rolno-spożywcza spada). Poza

tym konieczne jest uwzględnienie innych czynników rynkowych i pozarynkowych, np. okresowo powtarzających się kryzysów ekonomicznych, zmian polityczno-gospodarczych i prawno-regulacyjnych.

Ponieważ docelowym produktem powstającym w biogazowni jest łatwopalny gaz, należy podjąć działania prewencyjne mające zabezpieczyć przed jego niekontrolowanym wybuchem – w sposób fizyczny (odpowiednio przygotowane procedury i narzędzia) i ekonomiczny (ubezpieczenia). Niestety pozyskany biogaz nie jest produktem idealnie czystym, może zatem spowodować uszkodzenia części metalowych instalacji i doprowadzić do ich awarii. Jest to niebezpieczne nie tylko dla urządzeń i budowli, lecz przede wszystkim dla pracowników zakładu i okolicznych mieszkańców. Tego typu zagrożenie powinno być z wyprzedzeniem uwzględnione, zarówno w technologii, jak i w budowie zakładu produkcyjnego oraz jego zabezpieczeniach.

Ponieważ biogazownie budowane są głównie w pobliżu miejsc powstawania substratów, cała branża może borykać się z problemem rozproszenia produkcji po małych zakładach, co nie sprzyja przemysłowemu wykorzystaniu wyprodukowanego gazu. Pojawić się więc może problem ze znalezieniem odbiorców biogazu.

W zasobach masowego przekazu często można znaleźć informacje o tym, że mieszkańcy nie akceptują budowy nowych zakładów produkujących biogaz, w obawie przed uciążliwością zapachową takiego sąsiedztwa. Zatem planując ich budowę, trzeba liczyć się z ryzykiem braku akceptacji i protestami miejscowej społeczności. Aby do tego nie doszło, warto z wyprzedzeniem dostarczyć mieszkańcom niezbędnych informacji z wiarygodnego źródła, a następnie przeprowadzić szeroko zakrojone konsultacje społeczne.

Nie można też zakładać, że strumień substratów będzie nieprzerwany, zapewniający ciągłość produkcji i uzyskiwanie stałych dochodów. Należy liczyć się z sezonowością, a nawet sporadycznym zmniejszeniem dostaw, np. z powodu klęski żywiołowej. Wydawałoby się, że rozwiązaniem problemu mogłyby być tanie uprawy monokulturowe (stosowane w praktyce). Jednak tego typu rozwiązanie nie jest korzystne ani dla gleby (wyjałowienie), ani dla całej gospodarki (konkurencja dla produkcji żywności). Ciągłości produkcji i osiągnięciu zakładanych korzyści mogą zagrozić również problemy natury logistycznej.

## 5. Poferment – produkt uboczny produkcji biogazu i nawóz

**P**rodukt ubocznym (odpadem organicznym) procesu wytwarzania biogazu jest pulpa pofermentacyjna (tzw. osad pofermentacyjny, poferment, masa lub substancja pofermentacyjna). „Jej ilość odpowiada w przybliżeniu masie substratów wykorzystanych w procesie fermentacji. W niektórych biogazowniach masa pofermentu może być mniejsza, jeżeli część cieczy technologicznej jest zawracana

jako woda procesowa do komór fermentacyjnych. Ilość pofermentu to kilkadziesiąt tysięcy Mg rocznie, w zależności od wielkości biogazowni” (Kowalczyk-Juško 2014). Przykładowa biogazownia o mocy 500 kW produkuje ponad 10 000 Mg osadu pofermentacyjnego rocznie (Al Seadi i Lukehurst 2012).

Wiadomo jednak, że „odpady organiczne mogą być wartościowym i stosunkowo tanim źródłem składników pokarmowych niezbędnych roślinie, jak również mogą korzystnie wpływać na niektóre właściwości gleby. Bezpośredni, pozytywny wpływ odpadów organicznych został stwierdzony w wielu badaniach” (Odlare i in. 2008). Z tego względu, bogata w składniki organiczne pulpa pofermentacyjna, w połączeniu z innymi dodatkami, może być środkiem do wzbogacenia gleb pod uprawy roślin, ponieważ w trakcie procesu fermentacji substraty wyjściowe podlegają tylko niewielkim stratom nawozowym (Jędrzak 2008). Zapewni to nie tylko dostarczenie glebom niezbędnych biogenów, ale także pozwoli uzyskać dodatkowy przychód biogazowni za sprzedane substraty. Należy przy tym pamiętać, że do wykorzystania pofermentu jako nawozu rolniczego powinien on spełniać szereg wymogów zawartych w Rozporządzeniu Ministra Środowiska w sprawie odzysku R10 (Rozporządzenie 2011).

Jeśli chodzi o właściwości chemiczne pulpy pofermentacyjnej, zawiera ona dużą ilość azotu, jak również inne makro- i mikroelementy niezbędne dla wzrostu roślin. Co więcej, frakcje organiczne zawarte w pulpie wpływają na poprawę biologicznych, chemicznych i fizycznych właściwości gleby (Marciniak 2014). Dlatego podstawowym kierunkiem zagospodarowania pulpy powinno być nawożenie upraw rolnych, tym bardziej, że w Polsce dominują gleby lekkie, o niskim pH (gleby kwaśne i silnie kwaśne), które charakteryzują się niską zdolnością sorpcji składników pokarmowych oraz małą retencją wodną. Wymagają więc dodatkowego nawożenia (Szymańska 2013).

Mimo że poferment może być wykorzystywany jako nawóz bez dodatkowej obróbki, z zachowaniem obowiązujących wymogów prawnych, to większość biogazowni stosuje separację na frakcje ciekłą i stałą. Ciekłą frakcję można rozlewać na polach z zachowaniem warunków procesu R10, natomiast stałą, po uzyskaniu certyfikatu, biogazownie sprzedają jako gotowy produkt – nawóz.

Nawozy produkowane z wykorzystaniem pofermentu mogą być wykorzystywane przez rolników wielkoobszarowych, w leśnictwie i ogrodnictwie, a także w szkółkach roślin, drzew i krzewów. Jednak, niezależnie od sposobu ich wykorzystania, muszą spełniać pewne wymogi nakładane przez ustawodawcę, m.in. dotyczące zawartości poszczególnych składników nawozowych oraz zanieczyszczeń (tab. 3).

Ponieważ ilość odpadów organicznych ciągle rośnie, a możliwości ich wykorzystania do nawożenia są ograniczone, poszukuje się innych sposobów zagospodarowania pulpy pofermentacyjnej. Jednym z nich jest jej użycie do produkcji pelletu grzewczego na cele paliwowe.

Tabela 3. Minimalna zawartość składników nawozowych i maksymalna zawartość zanieczyszczeń w nawozach organicznych i organiczno-mineralnych

| Składnik                                       | Nawóz organiczny w postaci stałej | Nawóz organiczny w postaci płynnej | Zanieczyszczenie | Maksymalna zawartość [mg/kg] |
|--|-----------------------------------|------------------------------------|------------------|------------------------------|
| Substancja organiczna [% s.m.]                 | 30                                | -                                  | kadm             | 5                            |
| Azot [%]                                       | 0,3                               | 0,08                               | chrom            | 100                          |
| Fosfor [jako % P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> ] | 0,2                               | 0,05                               | nikiel           | 60                           |
| Potas [jako % K <sub>2</sub> O]                | 0,2                               | 0,12                               | ołów             | 140                          |
|  |                                   |                                    | rtęć             | 2                            |

Źródło: Rozporządzenie 2008.

## Podsumowanie

**W**dobie wzrostu zapotrzebowania na energię oraz realizacji polityki energetycznej nastawionej na dywersyfikację źródeł energii i zwiększenie udziału czystej energii, biogazownie są istotną alternatywą i jednocześnie uzupełnieniem dla innych źródeł energii. Z drugiej strony, polityka zrównoważonego rozwoju i koncepcja gospodarki cyrkulacyjnej wymuszają na władzach krajów członkowskich UE tworzenie takich warunków, aby maksymalnie wykorzystywać potencjał surowcowy, jakim kraj dysponuje. Budowa różnego typu biogazowni jest w tym względzie rozwiązaniem niemal idealnym, łączącym ideę bezpieczeństwa energetycznego ze zrównoważonym rozwojem. Przynoszą one wiele korzyści gospodarce, gdyż służą pełnemu wykorzystaniu zasobów (produkując energię elektryczną i ciepłą) i chronią środowisko przed nagromadzeniem odpadów oraz dodatkową emisją gazów cieplarnianych.

W warunkach zmian klimatycznych jest to o tyle ważne, że każdy kraj powinien dbać o redukcję odpadów i zmniejszenie negatywnego wpływu na środowisko. Biogazownie rolnicze są wyjątkowe pod tym względem, gdyż przynoszą dodatkową korzyść w postaci dostarczenia nawozów dla upraw rolnych, ogrodnictwa i leśnictwa.

## Literatura

- Al SEADI T. i LUKEHURST C. 2012. *Quality management of digestate from biogas plants used as fertilizer*. IEA Bioenergy. [Online] [https://www.iea-biogas.net/files/daten-redaktion/download/publi-task37/digestate\\_quality\\_web\\_new.pdf](https://www.iea-biogas.net/files/daten-redaktion/download/publi-task37/digestate_quality_web_new.pdf) [Dostęp: 7.08.2020].
- Biogaz rolniczy odnawialne źródło energii – teoria i praktyczne zastosowanie*. 2012, pod red. Witolda Podkówki, Powszechnie Wydawnictwo Rolnicze i Leśne. Warszawa.

- GRADZIUK P. 2017. *Potencjał i prognozy wykorzystania biogazu rolniczego w Polsce*. Roczniki Naukowe Stowarzyszenia Ekonomistów Rolnictwa i Agrobiznesu 19(3), s. 64–70.
- JĘDRCAK A. 2008. *Biologiczne przetwarzanie odpadów*. Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa.
- KOWALCZYK-JUŚKO A. 2014. *Masa pofermentacyjna – odpad czy nawóz?* Referat zaprezentowany na XII Konferencji „Odnawialne Źródła Energii” w Płońsku, 20 listopada; [Online] [http://biblio.modr.mazowsze.pl/Biblioteka/Ekologia/Alina\\_Kowalczyk\\_Jusko.pdf](http://biblio.modr.mazowsze.pl/Biblioteka/Ekologia/Alina_Kowalczyk_Jusko.pdf) [Dostęp: 7.08.2020].
- MARCINIAK A. 2014. *Możliwości zagospodarowania odpadu pofermentacyjnego z biogazowni*, *Studia Ecologiae et Bioethicae UKSW* 12(2), s. 123–133.
- ODLARE M., PELL. M i SVENSSON K. 2008. *Changes in soil chemical and microbiological properties during 4 years of application of various organic residues*. *Waste Management* 28, s. 1246–1553.
- Pismo DSK-WKS.056.32.2019.IRŚ. 2019. Urząd Regulacji Energetyki, 21.03.2019.
- PIWOWAR A. i DZIKUĆ M. 2013. *Charakterystyka podmiotów zajmujących się wytwarzaniem biogazu rolniczego w Polsce*. *Journal of Agrobusiness and Rural Development* nr 1(27), s. 207–217.
- Rozporządzenie Ministra Rolnictwa i Rozwoju Wsi z dnia 18 czerwca 2008 r. w sprawie wykonania niektórych przepisów o nawozach i nawożeniu (Dz.U. Nr 119, poz. 765).
- Rozporządzenie Ministra Środowiska z dnia 5 kwietnia 2011 r. w sprawie odzysku R10 (Dz.U.2011 nr 86 poz. 476).
- RYLSKI W. 2019: *Zmiana definicji biogazu rolniczego – proces weryfikacji surowców wykorzystywanych do produkcji biogazu rolniczego*. Warszawa; [Online] <http://www.kowr.gov.pl/uploads/pliki/oze/szkolenia> [Dostęp: 8.08.2020].
- Szymańska M. 2013: *Masa pofermentacyjna – uciążliwy odpad czy przydatny nawóz?* [Online] <http://www.farmer.pl/produkcja-roslinna/nawozy/masa-pofermentacyjna-uciazliwy-odpad-czy-przydatny-nawoz,43062.html> [Dostęp: 8.08.2020].
- Ustawa o odnawialnych źródłach energii, z dnia 20 lutego 2015 r. z późn. zm.  
[Online] [www.kowr.gov.pl/odnawialne-zrodla-energii/biogaz-rolniczy/wytworcy-biogazu-rolniczego/rejestr-wytworcow-biogazu-rolniczego](http://www.kowr.gov.pl/odnawialne-zrodla-energii/biogaz-rolniczy/wytworcy-biogazu-rolniczego/rejestr-wytworcow-biogazu-rolniczego) [Dostęp: 7.08.2020].
- [Online] [www.magazynbiomasa.pl/mapa-biogazowni-rolniczych-w-polsce-sprawdz-koniecznie/](http://www.magazynbiomasa.pl/mapa-biogazowni-rolniczych-w-polsce-sprawdz-koniecznie/) [Dostęp: 8.08.2020].



Weronika ROGOWSKA<sup>1</sup>, Elżbieta SKORBIŁOWICZ<sup>2</sup>, Mirosław SKORBIŁOWICZ<sup>2</sup>

---

## Oczyszczalnie ścieków jako źródło mikroplastiku w środowisku wodnym

**STRESZCZENIE:** Mikroplastik ma szczególne znaczenie w modelu gospodarki o obiegu zamkniętym ze względu na niebezpieczeństwa, jakie stanowi dla zdrowia ludzi i środowiska. Zrównoważony rozwój zakłada wzięcie odpowiedzialności za zanieczyszczenia poprzez redukcję emisji oraz naprawę dotychczasowych skutków oraz ograniczenie zagrożenia w przyszłości. Praca ma charakter przeglądowy, a jej celem jest scharakteryzowanie źródeł i dróg mikroplastiku w oczyszczalniach ścieków. Duża część mikroplastiku znajdującego się w ściekach pochodzi z gospodarstw domowych, ale można go łączyć również z emisjami związanymi z transportem czy przemysłem. Badania przeprowadzone w różnych oczyszczalniach na całym świecie sugerują, że dominujące znaczenie w redukcji plastikowych drobin mają procesy obróbki pierwotnej – usuwanie tłuszczów oraz sedimentacja, jednak procesy drugo- i trzeciorzędowe również mają znaczenie dla końcowego efektu oczyszczania. Należy wziąć też pod uwagę kierunki wykorzystywania osadów ściekowych ze względu na wysokie prawdopodobieństwo zawierania plastikowych mikrodrobin, które mogą być z łatwością uwalniane z nich do środowiska, a tam stanowić zagrożenie dla ekosystemów.

**SŁOWA KLUCZOWE:** mikroplastik, oczyszczalnie ścieków, źródła mikroplastiku w środowisku

## Wastewater treatment plants as a source of microplastics in the aquatic

**ABSTRACT:** Microplastics are particularly important in a closed-loop economic model because of the risks they pose to human health and the environment. Sustainable development involves taking responsibility for pollution by reducing emissions and repairing the effects to date and reducing future risks. The paper aim is to characterize the sources and pathways of microplastics in sewage treatment plants. A large part of the microplastic found in sewage comes from households, but it can also be related to emissions from transport or industry. Research carried out at various wastewater

---

<sup>1</sup> Inż., Katedra Technologii w Inżynierii Środowiska, Wydział Budownictwa i Nauk o Środowisku, Politechnika Białostocka, Białystok, Polska.

<sup>2</sup> Dr hab. inż., prof. PB, Katedra Technologii w Inżynierii Środowiska, Wydział Budownictwa i Nauk o Środowisku, Politechnika Białostocka, Białystok, Polska.

treatment plants around the world suggests that primary treatment processes - grease removal and sedimentation are predominant in reducing plastic particles. Importantly, secondary and tertiary processing influence the final treatment effect. The use of sewage sludge may contain tons of microplastics, which can easily migrate into the environment, where they pose a threat to ecosystems.

**KEYWORDS:** microplastic, wastewater treatment plants, sources of microplastics

## 1. Wprowadzenie

Produkcja tworzyw sztucznych w 2017 r. osiągnęła blisko 350 mln Mg, natomiast w roku kolejnym ponad 10 mln Mg więcej (Plastics Europe 2019), co nie do końca pokrywa się z ideą zrównoważonego rozwoju. Swoją powszechność zawdzięczają one wielu cechom, które pożądane są zarówno przez konsumentów, jak i producentów – charakteryzują się wysokim stosunkiem wytrzymałości do masy, sztywnością i ciągliwością, odpornością na korozję, obojętnością biologiczną, wysoką izolacją termiczną i elektryczną, nietoksycznością oraz wyjątkową trwałością w porównaniu z materiałami konkurencyjnymi (Andrady i Neal 2009). Niski koszt produkcji, lekkość oraz zdolność do stanowienia bariery dla tlenu i wilgoci przyczyniły się do wykorzystania tworzyw sztucznych jako surowca opakowaniowego, wypierając w znacznym stopniu materiały takie jak szkło, metal i papier (Andrady 2011). Trwałość tworzyw sztucznych, niezrównoważone użytkowanie, problem z zagospodarowaniem oraz ich ogromna popularność sprawiają jednak, że gromadzą się one w środowisku (van Wezel i in. 2016).

Obecność mikroplastiku, czyli drobin tworzyw sztucznych o średnicach mniejszych niż 5 mm, ma szczególne znaczenie dla środowisk wodnych ze względu na zagrożenia, jakie mogą stanowić. Wykazują bowiem zdolność do gromadzenia hydrofobowych trwałych zanieczyszczeń organicznych (POP), takich jak PCB, PAH, DDT i HCH z wody i atmosfery na powierzchni cząstek (Hidalgo-Ruz i in. 2012; Zhang i in. 2015; Zhan i in. 2016; Hermsen i in. 2018). Niektóre z zanieczyszczeń obserwowanych w mikrodrobinach obejmują również WWA, węglowodory ropopochodne, pestycydy chloroorganiczne, polibromowane difenyloetery, alkilofenole i BPA (Mathalon i Hill 2014). Obecność plastikowych drobin odnotowano na wybrzeżach wszystkich kontynentów, na wyspach subantarktycznych, Arktyce, a nawet w siedliskach głębinowych (Eerkes-Medrano i in. 2015). W literaturze dostępnych jest wiele doniesień na temat mikroplastiku w ekosystemach słodkowodnych jezior (Yuan i in. 2019; Ballent i in. 2016; Sruthy i Ramasamy 2017), rzek (Wang i in. 2017; Klein i in. 2015; Rodrigues i in. 2018), także wiele badań wykonano w środowisku morskim (Zobkov i Esiukova 2017; Lenz i in. 2017). Analizowane jest także występowanie mikroplastiku na terenach zurbanizowanych, gdzie głównym źródłem mikrodrobin są oczyszczalnie ścieków. Drobin mikroplastiku stanowią przede wszystkim włókna i fragmenty wielkości < 2 mm.



Redukcja mikroplastiku w oczyszczalniach ścieków jest zagadnieniem wpisującym się w dwa cele zrównoważonego rozwoju, tj. zapewnienie wzorców zrównoważonej konsumpcji i produkcji (cel 12.), jak również w ochronę oceanów, mórz i zasobów morskich oraz wykorzystywanie ich w sposób zrównoważony (cel 14.). Pojawienie się plastikowych drobin jest uciążliwe nie tylko dla środowiska, ale również stanowi problem polityczny, który odzwierciedla się w rosnącym zaniepokojeniu obywateli UE. Komisja Europejska w 2015 r. przyjęła plan działania mający na celu stymulację przechodzenia państw członkowskich na gospodarkę o obiegu zamkniętym. Działania wskazywane przez dokument mają na celu tworzenie warunków do zamknięcia pętli w cyklu życia produktu, rozpoczynając od produkcji, poprzez konsumpcję, po gospodarkę odpadami i rynek surowców wtórnych. Tworzywa sztuczne są wymienione jako jeden z pięciu priorytetów. Strategia dla tworzyw sztucznych ogłoszona w pakiecie dotyczącym gospodarki obiegowej została przyjęta 16 stycznia 2018 r. i zawiera szeroki zakres środków legislacyjnych i pozalegisacyjnych. Środki te dzielą się na cztery grupy: 1) poprawa ekonomiki i jakości recyklingu tworzyw sztucznych; 2) ograniczenie ilości odpadów z tworzyw sztucznych; 3) wspieranie innowacji i inwestycji w kierunku rozwiązań o charakterze zbieżnym z ideą zrównoważonego rozwoju; oraz 4) zastosowanie działań o charakterze globalnym (European Commission's Scientific Advice Mechanism 2018). Zrozumienie losów mikroplastików, ze szczególnym uwzględnieniem ekotoksykologii i wpływu na zdrowie ludzkie, ma dominujące znaczenie, stając się punktem odniesienia i istotnym narzędziem dla decydentów w sprawach ochrony środowiska i zdrowia. Gospodarka o obiegu zamkniętym stawia na biopolimery i polimery biodegradowalne, które są odzyskiwane i ponownie przetwarzane. Rozszerzona odpowiedzialność producenta jest mechanizmem polityki, który tworzy te systemy, z zamiarem złagodzenia rzeczywistych kosztów ekonomicznych, społecznych i środowiskowych związanych z odpadami. W systemie tym zanieczyszczenia plastikiem, zarówno w rozmiarach mikro, jak i makro, stanowią problem priorytetowy, determinując wdrażanie systemów skupiających się na kontroli zużywanych materiałów. Zero odpadów to ideał gospodarki o obiegu zamkniętym, w której wychwytywanie odpadów i ich magazynowanie staje się zbędne na rzecz racjonalnego wykorzystania i ponownego zagospodarowania odpadu, który staje się surowcem. Głównymi rozwiązaniami mającymi rozwiązać problem mikroplastików w środowisku są identyfikacja i kwantyfikacja naziemnych źródeł mikroplastików, prowadzenie polityki w zakresie praw własności intelektualnej oraz opracowanie nowych rozwiązań biznesowych. Rozwiązania te przyczynią się do zmian w zakresie użyteczności tworzyw sztucznych w społeczeństwie oraz do bardziej racjonalnego zakończenia ich eksploatacji, w którym to przypadku sprawiedliwość środowiskowa i społeczna są zintegrowane z pełnym kosztem tworzyw sztucznych (Wagner i Lambert 2018).

Praca ma charakter przeglądowy, a jej celem jest scharakteryzowanie źródeł i dróg mikroplastiku w oczyszczalniach ścieków.

## 2. Źródła mikroplastiku w oczyszczalniach ścieków

Obecnie polimerami, które stanowią 90% produktów z tworzyw sztucznych, są polietylen o niskiej i wysokiej gęstości, polipropylen, polichlorek winylu, polistyren i politereftalan etylenu (lub poliester). W konsekwencji większość zanieczyszczeń uwalnianych do środowiska składa się z tych polimerów (Ziajahromi i in. 2016). Wśród najpopularniejszych rodzajów tworzyw sztucznych trafiających do oczyszczalni ścieków znajdują się polietylen, polimetakrylan metylu, politetrafluoroetylen, polipropylen, nylon i politereftalan etylenu (Raju i in. 2018). Tworzywa sztuczne wprowadzane do oczyszczalni w większości przypadków różnią się od tych, które są powszechnie usuwane z kanalizacji burzowej, plaż, oceanów oraz środowisk słodkowodnych. Podstawowe źródła mikroplastiku w tych miejscach określa się jako pochodzące głównie z wyrzucanych opakowań konsumenckich (pojemników, toreb, butelek) oraz odpadów przemysłowych. W środowisku otwartym tworzywa te ulegają fotodegradacji wywołanej promieniowaniem UV oraz mechanicznej erozji, która prowadzi do kruchości i pęknięcia. Procesy te są odpowiedzialne za postępujący rozkład uwolnionych do środowiska tworzyw sztucznych, jednak w większości przypadków są nieobecne podczas oczyszczania ścieków (Carr i in. 2016).

Kosmetyki i środki higieny osobistej zawierają mikroplastik, który został użyty jako zamiennik naturalnych materiałów złuszczejących, np. pumeksu czy płatków owsianych. Plastikowe drobiny mają zastosowanie w produkcji środków do mycia rąk, mydeł, past do zębów, szamponów i peelingów do twarzy. Około 93% mikrokulek obecnych w kosmetykach to polietylen, ale mogą być także produkowane z polipropylenu, polimetakrylanu metylu czy nylonu (Napper i in. 2015). Plastikowe mikrodrobiny w kosmetykach stanowią nawet do 10% masy produktu i liczone są w tysiącach mikropererek na gram środka (Lassen i in. 2015). Pasta do zębów jest produktem, który może zawierać do 1,8% (wagowo) mikroplastiku, a jej jednorazowe, typowe zastosowanie może uwalniać około 4000 drobin polietylenu (Carr i in. 2016). Masa polietylenowych mikrokulek stosowanych w produktach higieny osobistej, przypadająca na jedną osobę dla ludności Stanów Zjednoczonych, przewidywana była na około 2,4 mg dziennie, co oznaczało, że populacja USA mogła emitować w ten sposób 263 tony mikrodobin polietylenu rocznie (Gouin i in. 2011). Jednakże na dzień dzisiejszy sprzedaż produktów kosmetycznych zawierających celowo dodawane mikroplastikowe drobiny jest zabroniona w Stanach Zjednoczonych, Kanadzie, Australii i kilku państwach europejskich. Więcej krajów prawdopodobnie przyjmie podobne zakazy, wykluczając w ten sposób jedno ze źródeł tego typu zanieczyszczeń (Yurtsever i Yurtsever 2019).

Pranie materiałów syntetycznych w pralniach przemysłowych i gospodarstwach domowych tworzy mikroplastik poprzez ścieranie i utratę włókien, które są na-

stępnie odprowadzane do oczyszczalni ścieków (Browne i in. 2011; Boucher i Friot, 2017). Fakt, że kolorowe włókna są głównym rodzajem mikroplastiku w zakładach przetwarzania ścieków oznacza, że ścieki komunalne mogą częściowo odpowiadać za emisję drobin o tym kształcie, ponieważ barwienie jest bardziej prawdopodobne w przypadku plastikowych produktów konsumenckich, niż odnośnie do sieci rybackich lub lin (Wang i in. 2017). Wtórny mikroplastik jako włókna z prania odzieży syntetycznej, wykonanej głównie z poliestru, akrylu i poliamidu, może osiągać ilości większe niż 100 elementów na litr ścieków (Eerkes-Medrano i in. 2015). Badanie Browne i in. (2011) wykazało, że pojedynczy element odzieży syntetycznej może uwolnić więcej niż 1900 włókien na jedno pranie, które następnie mogą trafiać do środowiska morskiego w przypadku niewłaściwego oczyszczenia i odprowadzania ścieków. Morskie siedliska w pobliżu miejsc zrzutu nieczystości zawierają proporcje mikroplastikowych włókien poliestrowych i akrylowych przypominające te stosowane w produkcji odzieży syntetycznej. Mikrodrobiny znalezione w wodzie z prania tekstyliów są zrzucane z powierzchni tkaniny oraz z jej ciętych krawędzi. Tekstylia działają zarówno jako generator mikroplastiku, ale także jako jego nośnik (Jönsson i in. 2018). Carney Almroth i in. (2018) donoszą, że luźne materiały, podobnie jak zużyte tkaniny, emitują więcej włókien mikroplastikowych, w porównaniu do przędzy mocno splecionej, a te mogą utrzymywać się w całym łańcuchu pokarmowym, od zooplanktonu, kończąc na dużych zwierzętach, takich jak wieloryby (Boucher i Friot, 2017).

Spływy z kanalizacji deszczowej mogą zawierać tworzywa sztuczne takie jak fragmenty zużywających się opon, odpady pochodzące z pojazdów lub pozostałości farb do znakowania dróg (Horton i in. 2017). Co ważne, silne opady zwiększają objętość wód burzowych, ale także mają wpływ na ilość mikroplastiku kierowanego do kanalizacji deszczowej, ponieważ wzmagają siłę spływu, dzięki której cząstki drobin tworzyw sztucznych zmywają się z utwardzonych powierzchni, co prowadzi do transportu większej ilości zanieczyszczeń wraz z wodą burzową do odbiornika (Magnusson 2016).

### 3. Mikroplastik w oczyszczalniach ścieków

**M**ikroplastik w oczyszczalniach ścieków jest wykrywany zarówno w dopływie, jak i w ściekach oczyszczonych. Różnorodność i ilość plastikowych drobin obecnych w ściekach jest determinowana czynnikami takimi jak wielkość obsługiwanej populacji, tym, czy woda deszczowa dostaje się do oczyszczalni ścieków, prędkości przepływu i charakterystyki filtracji oczyszczalni (Mason i in. 2016). Badania wykazały, że w strumieniu ścieków ilość mikroplastiku może sięgać od  $10^4$  do  $10^5$  drobin/ $m^3$  (Estahbanati i Fahrenfeld 2016). Niecałkowite jego usunięcie

skutkuje emisją do środowiska. Objętości zanieczyszczeń przetwarzanych codziennie przez oczyszczalnie są bardzo wysokie, stąd też zrzuty plastikowych drobin mogą być bardzo wysokie. Sprawia to, że technologia oczyszczania musi być ukierunkowana na usuwanie mikroplastiku.

Oczyszczanie pierwotne ma na celu usuwanie tłuszczów oraz większych stałych zanieczyszczeń dopływających wraz ze ściekami (Mason i in. 2016). Obróbka wstępna i pierwotna jest szczególnie efektywna wobec drobin o dużych rozmiarach (Hidayaturrahman i in. 2019). Mikroplastiki w postaci fragmentów i włókien, głównie te, które unoszą się na powierzchni, są usuwane podczas odtłuszczenia i sedymentacji (Carr i in. 2016). Duża wyporność drobin sprzyja usuwaniu w procesach odtłuszczenia, ze względu na osiadanie ich na powierzchni tłuszczów (Sun i in. 2019). Badanie przeprowadzone przez Hidayaturrahman i Lee (2019) pokazuje, że wstępne i wtórne etapy oczyszczania są w stanie zmniejszyć ilość mikroplastiku od 75 do blisko 92%. Talvitie i in. (2015) donoszą, że mikroplastik w postaci włókien w największym stopniu usuwany jest na drodze sedymentacji w oczyszczaniu pierwotnym, chociaż w dalszych etapach, procesy trzeciorzędowe także mają wpływ na redukcję jego liczby, z kolei drobin w kształcie fragmentów w większości są usuwane w trakcie sedymentacji wtórnej.

Na etapie oczyszczania biologicznego osady lub bakteryjne polimery pozakomórkowe w zbiornikach napowietrzania mogą pomagać w gromadzeniu się drobin plastiku, które następnie ulegają osadzeniu się w zbiorniku do wtórnego oczyszczania. Ponadto, substancje chemiczne takie jak siarczan żelaza lub inne środki opóźniające flokulację, stosowane podczas wtórnego oczyszczania, mogą mieć pozytywny wpływ na usuwanie mikrodrobin tworzyw sztucznych, ponieważ mogą powodować one zbieranie się zawieszonych cząstek stałych, tworząc kłaczkę (Sun i in. 2019). Hongprasith i in. (2020) podają, że znaczna redukcja ilości mikroplastiku w zbiornikach napowietrzających z osadem czynnym może wynikać z właściwości hydrofobowych drobin, powodując ich przenoszenie z fazy wodnej do osadu poprzez przyklepanie się do mikroorganizmów lub materii organicznej. Biofilm powstający na drobinach mikroplastiku może działać zwilżająco lub modyfikować właściwości powierzchni hydrofobowych fragmentów polietylenu oraz zmieniać względne gęstości cząstek. Neutralnie pływające cząstki są bardziej podatne na ucieczkę zarówno w procesach odtłuszczenia, jak i sedymentacji, zatem prawdopodobne jest, że tworzenie się biofilmów na powierzchniach może być odpowiedzialne za redukcję co najmniej części mikroplastiku (Carr i in. 2016). Li i in. (2018) dowodzą, że różne procesy biologicznego oczyszczania ścieków w różnym stopniu usuwają mikroplastik, a niektóre parametry pracy oczyszczalni mają istotny wpływ na jego koncentrację. Na efektywność usuwania plastikowych drobin wpływ mogą mieć różne czasy retencji hydraulicznej, czas retencji osadu oraz jego wydajność. Co więcej, zastosowanie różnych metod odwadniania osadów skutkuje różną efektywnością usuwania plastikowych drobin – na

przykład podczas wirowania osadu część mikroplastiku o niskiej gęstości może być uwalniana z powrotem do wody, powodując, że odwadniane tym sposobem osady zawierają jego mniejsze ilości.

Eliminacja mikroplastiku podczas obróbki trzeciorzędowej zależy przede wszystkim od stosowanej technologii, ale także rodzaju dopływających drobin (Gatidou i in. 2018). Mason i in. (2016) sugerują, że procesy oczyszczania trzeciorzędowego, takie jak mikrofiltracja membranowa, mikrofiltracja z ciągłym wypływem wstecznym z podwójnym piaskiem (CBUDS) czy pospieszne filtry piaskowe nie gwarantują braku plastikowych mikrokulek w ściekach, z drugiej strony natomiast Talvitie i in. (2017) podają, że MBR jest w stanie zredukować do 99,9% plastikowych drobin, natomiast pospieszne filtry piaskowe 97%, a filtry tarczowe od 40 do 98,5%. Z kolei Hidayaturrahman i Lee (2019) donoszą, że pospieszna filtracja piaskowa może zredukować ilość plastikowych drobin o prawie 75%, membranowe filtry tarczowe o blisko 80%, natomiast technologia ozonowania o około 90%. Ponadto autorzy donoszą, że zastosowanie koagulantu na bazie glinu w obróbce trzeciorzędowej sprawdza się przy usuwaniu mikroplastiku, jednak należy wziąć pod uwagę, że jego zbyt wysokie dawki obniżają skuteczność procesu. Co więcej, obserwowana jest dodatnia zależność pomiędzy ilością mikroplastiku a skutecznością jego usuwania. Carr i in. (2016) sugerują brak pozytywnego wpływu filtrów grawitacyjnych na redukcję ilości mikroplastiku oraz że zrzuty ścieków z oczyszczalni stosujących procesy drugo- i trzeciorzędowe mogą przyczyniać się tylko w minimalnym stopniu do transportu plastikowych drobin do oceanów i powierzchniowych środowisk wodno-ściekowych.

Na ogół wysoka skuteczność oczyszczalni ścieków w usuwaniu mikroplastiku z fazy wodnej wiąże się z kumulowaniem go w dużym stopniu w osadach ściekowych – niezależnie od reżimów oczyszczania z czasem mogą wystąpić konsekwencje gromadzenia się mikroplastiku w ekosystemach lądowych, słodkowodnych czy morskich. Zastosowane procesy oczyszczania oraz parametry pracy oczyszczalni mają znaczący wpływ na jakość osadów lub ich ilość, a tym samym na uwalnianie do środowisk naturalnych (Li i in. 2018). Mikrodrobiny znajdujące się w osadach ściekowych mogą pochodzić między innymi z odcieków pralek oraz środków higieny, takich jak pasty do zębów, mydła czy peelingi (Corradini 2019). W Europie i Ameryce Północnej około 50% osadów ściekowych jest przetwarzanych do rolniczego wykorzystania. Na podstawie danych krajowych dotyczących powierzchni gospodarstw rolnych, liczby ludności i losu osadów ściekowych i stosując szeroki, ale zachowawczy zakres niepewności, Nizzetto i in. (2016) szacują, że od 125 do 850 Mg mikroplastiku/million mieszkańców jest dodawanych rocznie do europejskich gleb rolniczych poprzez bezpośrednie zastosowanie osadów ściekowych lub jako przetworzone biosolidy. Mikroplastik w kształcie włókien znaleziono na lądzie 15 lat po aplikacji osadów, a także dowodzi się pionowej translokacji drobin przez glebę (Mahon i in. 2016).

## 4. Wnioski

**P**roblem zanieczyszczenia środowiska tworzywami sztucznymi ma charakter globalny i z roku na rok stanowi coraz większy priorytet, szczególnie w gospodarce nastawionej na zrównoważony rozwój. Plastikowe drobiny są odnajdywane w praktycznie każdym ekosystemie na świecie, jednak najwięcej mikroplastiku występuje na terenach zurbanizowanych, gdzie to właśnie oczyszczalnie ścieków reprezentują jedną ze ścieżek przedostawania się mikrodrobin do środowiska wodnego. Zawartości mikroplastiku w ściekach są stosunkowo niskie, jednak ze względu na fakt, że oczyszczalnie codziennie przetwarzają miliony litrów zanieczyszczeń, zrzuty plastikowych drobin mogą być niekiedy bardzo wysokie, co sprawia, że technologia oczyszczania musi być ukierunkowana na jego usuwanie. Badania przeprowadzane w różnych oczyszczalniach na całym świecie sugerują, że dominujące znaczenie w redukcji plastikowych drobin mają procesy obróbki pierwotnej – usuwanie tłuszczów oraz sedymentacja, jednak również procesy drugo- i trzeciorzędowe mają wpływ na ostateczny efekt oczyszczania. Konieczne są przyszłe badania w celu głębszego zbadania dystrybucji, usuwania i uwalniania mikroplastiku przez oczyszczalnie ścieków do środowiska wodnego, biorąc pod uwagę powiązania między fizycznym oraz chemicznym zachowaniem tych zanieczyszczeń i wydajnością różnych etapów oczyszczania. Należy wziąć pod uwagę kierunki wykorzystywania osadów ściekowych, ze względu na wysokie prawdopodobieństwo zawierania plastikowych mikrodrobin, które mogą być z łatwością uwalniane z nich do środowisk lądowych i wodnych, a tam stanowić zagrożenie dla ekosystemów, szczególnie ze względu na możliwość stanowienia medium transportowego dla zanieczyszczeń chemicznych. Monitorowanie ma kluczowe znaczenie dla oceny skuteczności działań podjętych w celu skutecznego zmniejszenia ilości mikroplastiku w środowisku.

Badania przeprowadzono w ramach projektu badawczego nr WZ/WBiŚ/8/2019 na Politechnice Białostockiej i finansowanego z dotacji udzielonej przez Ministra Nauki i Szkolnictwa Wyższego.

## Literatura

- ANDRADY A.L. 2011. *Microplastics in the Marine Environment*. Marine Pollution Bulletin nr 62, t. 8, s. 1596–1605.
- ANDRADY A.L. i NEAL M.A. 2009. *Applications and Societal Benefits of Plastics*. Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences nr 364, t. 1526, s. 1977–1984.
- BALLENT A., CORCORAN P.L., MADDEN O., HELM P.A. i LONGSTAFFE F.J. 2016. *Sources and Sinks of Microplastics in Canadian Lake Ontario Nearshore, Tributary and Beach Sediments*. Marine Pollution Bulletin nr 110, t. 1, s. 383–395.
- BOUCHER J. i FRIOT D. 2017. *Primary Microplastics in the Oceans: a Global Evaluation of Sources*. International Union for Conservation of Nature. Gland, Switzerland.

- BROWNE M.A., CRUMP P., NIVEN S.J., TEUTEN E., TONKIN A., GALLOWAY T. i THOMPSON R. 2011. *Accumulation of Microplastic on Shorelines Worldwide: Sources and Sinks*. Environmental Science & Technology nr 45, t. 21, s. 9175–9179.
- CARNEY ALMROTH B.M., ÅSTRÖM L., ROSLUND S., PETERSSON H., JOHANSSON M. i PERSSON N.K. 2018. *Quantifying Shedding of Synthetic Fibers from Textiles; a Source of Microplastics Released into the Environment*. Environmental Science and Pollution Research nr 25, t. 2, s. 1191–1199.
- CARR S.A., LIU J. i TESORO A.G. 2016. *Transport and fate of microplastic particles in wastewater treatment plants*. Water Research nr 91, s. 174–182.
- CORRADINI F., MEZA P., EGUILUZ R., CASADO F., HUERTA-LWANGA E. i GEISSEN V. 2019. *Evidence of Microplastic Accumulation in Agricultural Soils from Sewage Sludge Disposal*. Science of The Total Environment nr 671, s. 411–420.
- EERKES-MEDRANO D., THOMPSON R.C. i ALDRIDGE D.C. 2015. *Microplastics in Freshwater Systems: a Review of the Emerging Threats, Identification of Knowledge Gaps and Prioritisation of Research Needs*. Water Research nr 75, s. 63–82.
- ESTAHBANATI S. i FAHRENFELD N.L. 2016. *Influence of Wastewater Treatment Plant Discharges on Microplastic Concentrations in Surface Water*. Chemosphere nr 162, s. 277–284.
- European Commission's Scientific Advice Mechanism 2018, *Microplastic Pollution The Policy Context*, s. 1–68.
- GATIDOU G., ARVANITI O. S. i STASINAKIS A. S. 2018. *Review on the occurrence and fate of microplastics in Sewage Treatment Plants*. Journal of Hazardous Materials nr 367, s. 504–512.
- GOUIN T., ROCHE N., LOHMANN R. i HODGES G. 2011. *A Thermodynamic Approach for Assessing the Environmental Exposure of Chemicals Absorbed to Microplastic*. Environmental Science & Technology nr 4, s. 1466–1472.
- HERMSEN E., MINTENIG S.M., BESSELING E. i KOELMANS A.A. 2018. *Quality Criteria for the Analysis of Microplastic in Biota Samples: a Critical Review*. Environmental Science & Technology nr 52, t. 18, s. 10230–10240.
- HIDALGO-RUZ V., GUTOW L., THOMPSON R.C. i THIEL M. 2012. *Microplastics in the marine environment: a review of the methods used for identification and quantification*. Environmental Science and Technology nr 46, t. 6, s. 3060–3075.
- HIDAYATURRAHMAN H. i LEE T.-G. 2019. *A study on characteristics of microplastic in wastewater of South Korea: Identification, quantification, and fate of microplastics during treatment process*. Marine Pollution Bulletin nr 146, s. 696–702.
- HIDAYATURRAHMAN H., LEE T.-G. i KWON H.-J. 2019. *Microplastics in Wastewater Treatment Plants WWTPs : a Review*. Journal of Korean Society of Water Science and Technology nr 27, t. 5, s. 71–79.
- HONGPRASITH, N., KITTIMETHAWONG, C., LERTLUKSANAPORN, R., EAMCHOTCHAWALIT T., KITTIPONGVIS-ES S. i LOHWACHARIN J. 2020. *IR microspectroscopic identification of microplastics in municipal wastewater treatment plants*. Environmental Science and Pollution Research nr 27, s. 18557–18564.
- HORTON A.A., WALTON A., SPURGEON D.J., LAHIVE E. i SVENDSEN C. 2017. *Microplastics in Freshwater and Terrestrial Environments: Evaluating the Current Understanding to Identify the Knowledge Gaps and Future Research Priorities*. Science of The Total Environment nr 586, s. 127–141.
- JÖNSSON C., LEVENSTAM ARTURIN O., HANNING A.C., LANDIN R., HOLMSTRÖM E. i ROOS S. 2018. *Microplastics Shedding from Textiles—Developing Analytical Method for Measurement of Shed Material Representing Release during Domestic Washing*. Sustainability nr 10, t. 7, s. 2457–2473.
- KLEIN S., WORCH E. i KNEPPER T.P. 2015. *Occurrence and Spatial Distribution of Microplastics in River Shore Sediments of the Rhine-Main Area in Germany*. Environmental Science & Technology nr 49, t. 10, s. 6070–6076.
- LASSEN C., HANSEN S.F., MAGNUSSON K., NOREN F., HARTMANN N.I.B., JENSEN P.R., NIELSEN T.G. i BRINCH A. 2015. *Microplastics: occurrence, effects and sources of releases to the environment in Denmark*. The Danish Environmental Protection Agency.



- LEE H., SHIM W.J. i KWON J.H. 2014. *Sorption Capacity of Plastic Debris for Hydrophobic Organic Chemicals*. Science of The Total Environment nr 470-471, s. 1545-1552.
- LENZ R., ENDERS K., BEER S., SØRENSEN T.K. i STEDMON C.A. 2016. *Analysis of Microplastic in the Stomachs of Herring and Cod from the North Sea and Baltic Sea*. DTU Aqua National Institute of Aquatic Resources.
- LI X., CHEN L., MEI Q., DONG B., DAI X., DING G. i ZENG E.Y. 2018. *Microplastics in sewage sludge from the wastewater treatment plants in China*. Water Research nr 42, s. 75-82.
- MAGNUSSON K., ELIASSON K., FRÅNE A., HAIKONEN K., HULTÉN J., OLSHAMMAR M., STADMARK J. i VOISIN A. 2016. *Swedish Sources and Pathways for Microplastics to the Marine Environment*. Swedish Environmental Protection Agency.
- MAHON A. M., O'CONNELL B., HEALY M. G., O'CONNOR I., OFFICER R., NASH R. i MORRISON L. 2016. *Microplastics in Sewage Sludge: Effects of Treatment*. Environmental Science & Technology nr 51, t. 2, s. 810-818.
- Mason S.A., Garneau D., Sutton R., Chu Y., Ehmann K., Barnes J., Fink P., Papazissimos D. i Rogers D.L. 2016. *Microplastic Pollution Is Widely Detected in US Municipal Wastewater Treatment Plant Effluent*. Environmental Pollution nr 218, s. 1045-1054.
- MATHALON A. i HILL P. 2014. *Microplastic Fibers in the Intertidal Ecosystem Surrounding Halifax Harbor, Nova Scotia*. Marine Pollution Bulletin nr 81, t. 1, s. 69-79.
- NAPPER I.E., BAKIR A., ROWLAND S.J. i THOMPSON R.C. 2015. *Characterisation, Quantity and Sorptive Properties of Microplastics Extracted from Cosmetics*. Marine Pollution Bulletin nr 99, t. 1-2, s. 178-185.
- NIZZETTO L., FUTTER M. i LANGAAS S. 2016. *Are Agricultural Soils Dumps for Microplastics of Urban Origin?* Environmental Science & Technology nr 50, t. 20, s. 10777-10779.
- PlasticsEurope Association of Plastics Manufacturers 2019. *Plastics – the Facts 2016. An analysis of European plastics production, demand and waste data*.
- RAJU S., CARBERY M., KUTTYKATTIL A., SENATHIRAJAH K., SUBASHCHANDRABOSE S.R., EVANS G. i THAVAMANI P. 2018. *Transport and Fate of Microplastics in Wastewater Treatment Plants: Implications to Environmental Health*. Reviews in Environmental Science and Bio/Technology nr 17, t. 4, s. 637-653.
- RODRIGUES M.O., ABRANTES N., GONÇALVES F.J.M., NOGUEIRA H., MARQUES J.C. i GONÇALVES A.M.M. 2018. *Spatial and Temporal Distribution of Microplastics in Water and Sediments of a Freshwater System Antuã River, Portugal*. Science of The Total Environment nr 633, s. 1549-1559.
- SRUTHY S. i RAMASAMY E.V. 2017. *Microplastic Pollution in Vembanad Lake, Kerala, India: The First Report of Microplastics in Lake and Estuarine Sediments in India*. Environmental Pollution nr 222, s. 315-322.
- SUN J., DAI X., WANG Q., van LOOSDRECHT M.C.M. i NI B.-J. 2019. *Microplastics in wastewater treatment plants: Detection, occurrence and removal*. Water Research nr 152, s. 21-37.
- TALVITIE J., HEINONEN M., PÄÄKKÖNEN J.-P., VAHTERA E., MIKOLA A., SETÄLÄ O. i VAHALA R. 2015. *Do Wastewater Treatment Plants Act as a Potential Point Source of Microplastics? Preliminary Study in the Coastal Gulf of Finland, Baltic Sea*. Water Science and Technology nr 72, t. 9, s. 1495-1504.
- TALVITIE J., MIKOLA A., KOISTINEN A. i SETÄLÄ O. 2017. *Solutions to microplastic pollution – Removal of microplastics from wastewater effluent with advanced wastewater treatment technologies*. Water Research nr 123, s. 401-407.
- van WEZEL A., CARIS I. i KOOLS S.A.E 2016. *Release of Primary Microplastics from Consumer Products to Wastewater in the Netherlands*. Environmental Toxicology and Chemistry nr 35, t. 7, s. 1627-1631.
- WAGNER M. i LAMBERT S. red. 2018. *Freshwater Microplastics Emerging Environmental Contaminants?* Springer, Cham.
- WANG F., WONG C.S., CHEN D., LU X., WANG F. i ZENG E.Y. 2018. *Interaction of Toxic Chemicals with Microplastics: a Critical Review*. Water Research nr 139, s. 208-219.



- WANG J., PENG J., TAN Z., GAO Y., ZHAN Z., CHEN Q. i CAI L. 2017. *Microplastics in the Surface Sediments from the Beijiang River Littoral Zone: Composition, Abundance, Surface Textures and Interaction with Heavy Metals*. Chemosphere nr 171, 248–258.
- WANG W. i WANG J. 2018. *Comparative Evaluation of Sorption Kinetics and Isotherms of Pyrene onto Microplastics*. Chemosphere nr 193, s. 567–573.
- YUAN W., LIU X., WANG W., DI M. i WANG J. 2019. *Microplastic Abundance, Distribution and Composition in Water, Sediments, and Wild Fish from Poyang Lake, China*. Ecotoxicology and Environmental Safety nr 170, s. 180–187.
- YURTSEVER M. i YURTSEVER U. 2019. *Use of a Convolutional Neural Network for the Classification of Microbeads in Urban Wastewater*. Chemosphere nr 216, s. 271–280.
- ZHAN Z., WANG J., PENG J., XIE Q., HUANG Y. i GAO Y. 2016. *Sorption of 3,3',4,4' - Tetrachlorobiphenyl by Microplastics: a Case Study of Polypropylene*. Marine Pollution Bulletin nr 110, t. 1, s. 559–563.
- ZHANG W., MA X., ZHANG Z., WANG Y., WANG J., WANG J. i MA D. 2015. *Persistent Organic Pollutants Carried on Plastic Resin Pellets from Two Beaches in China*. Marine Pollution Bulletin nr 99, t. 1–2, s. 28–34.
- ZIAJAHROMI S., NEALE P.A. i LEUSCH F.D.L. 2016. *Wastewater Treatment Plant Effluent as a Source of Microplastics: Review of the Fate, Chemical Interactions and Potential Risks to Aquatic Organisms*. Water Science and Technology nr 10, t. 74, s. 2253–2269.
- ZOBKOV M. i ESIUKOVA E. 2017. *Microplastics in Baltic Bottom Sediments: Quantification Procedures and First Results*. Marine Pollution Bulletin nr 114, t. 2, s. 724–732.



## Analiza nanocząstek wybranych tworzyw sztucznych

**STRESZCZENIE:** Przemiany industrialne w ostatnich 50 latach miały duży wpływ na gospodarkę ekologiczną na świecie. Pojawienie się tworzyw sztucznych przyczyniło się do ich masowego wykorzystania w życiu codziennym każdego człowieka. Niestety brak odpowiednich technologii przerobu tych materiałów stał się przyczyną zanieczyszczenia środowiska przez cząstki tworzyw sztucznych. Łańcuchy polimerowe ulegają bowiem uszkodzeniu pod wpływem wielu czynników środowiskowych, wytwarzając przy tym cząstki o wielkości poniżej 250 nanometrów. W pracy opisano antropogeniczne metody powstawania nanocząstek, sposób ich przedostawania się do atmosfery, w której mogą przemieszczać się na wielkie odległości ze względu na swoje parametry fizyczne. Celem pracy było zbadanie możliwości otrzymania nanocząstek wybranych tworzyw sztucznych (tj. polistyrenu, polietylenu i politereftalanu etylenu), które są najczęściej wykorzystywane w przemyśle. Źródłem polistyrenu były profile styropianowe służące do amortyzacji urządzeń AGD, źródłem polietylenu nowe woreczki foliowe, a źródłem politereftalanu etylenu butelki wykonane z tego tworzywa. Pierwszym etapem wytwarzania nanocząstek było rozdrobnienie zgromadzonych butelek, woreczków foliowych i styropianu do możliwie jak najmniejszych rozmiarów, za pomocą młyna tnącego. Kolejnym etapem było rozdrabnianie otrzymanego materiału w młynie planetarno-kulowym, a następnie homogenizacja w homogenizatorze. Rozkład wielkości otrzymanych cząstek dla wybranych tworzyw zbadano metodą DLS (ang. Dynamic Light Scattering). Cel pracy został osiągnięty – w wyniku rozdrabniania i homogenizacji udało się otrzymać nanocząstki wybranych tworzyw sztucznych. Uzyskano następujące średnie wielkości dla poszczególnych materiałów: politereftalanu etylenu (PET) 214,81 nm, polietylenu (PE) 205,14 nm, polistyrenu (PS) 196,18 nm. Artykuł wpisuje się w 9. i 12. cel zrównoważonego rozwoju.

**SŁOWA KLUCZOWE:** nanocząstki, polimery, DLS

## Analysis of the nanoparticles of synthetic materials

**ABSTRACT:** Industrial changes in the last 50 years have had a big impact on the global economy. The appearance of plastics has contributed to their mass use in everyday life of every human being. Unfortunately, the lack of appropriate processing technologies for these materials has contributed to environmental pollution by plastic particles. Polymer chains are damaged by many environmental factors, producing particles smaller than 250 nanometers. The work

---

<sup>1</sup> Mgr, Katolicki Uniwersytet Lubelski Jana Pawła II, Wydział Nauk Inżynieryjno-Technicznych, Instytut Inżynierii Materiałowej, Katedra Inżynierii Powierzchni, Stalowa Wola, Polska.

<sup>2</sup> Dr inż., Politechnika Lubelska, Wydział Budownictwa i Architektury, Katedra Geotechniki, Lublin, Polska.

describes anthropogenic methods of nanoparticles formation, the way they get into the atmosphere in which they can travel great distances due to their physical parameters. The aim of the work was to investigate the possibility of obtaining nanoparticles of selected plastics (i.e. polystyrene, polyethylene and polyethylene terephthalate), which are most often used in industry. The source of polystyrene were polystyrene profiles used for the amortization of household appliances, a source of polyethylene, new plastic bags, and a source of polyethylene terephthalate bottles made of this plastic. The first stage in the production of nanoparticles was the fragmentation of accumulated bottles, plastic bags and polystyrene to the smallest possible size, using a cutting mill. The next stage was the comminution of the obtained material in a planetary ball mill, followed by homogenization in a homogenizer. The size distribution of the obtained particles for selected materials was examined by the DLS (Dynamic Light Scattering) method. The aim of the work was achieved – as a result of grinding and homogenization, nanoparticles of selected plastics were obtained. The following average sizes for individual materials were obtained: polyethylene terephthalate (PET) 214.81 nm, polyethylene (PE) 205.14 nm, polystyrene (PS) 196.18 nm.

**KEYWORDS:** nanoparticles, polymers, DLS

## 1. Wprowadzenie

### 1.1. Nanotechnologie i nanocząstki a zrównoważony rozwój

**N**anotechnologia to prawdopodobnie najdynamiczniej rozwijająca się dziedzina inżynierii materiałowej, która dotyczy struktury na poziomie nanometrów. Nanotechnologia definiowana jest jako wytwarzanie elementów materii i/lub formowanie ich morfologii w skali od 1 do 100 nm. Ten umowny przedział metryczny często nie znajduje potwierdzenia w praktyce. Dlatego przyjęto jeszcze drugi składnik definicji nanotechnologii. Odnosi się on do zjawisk fizykochemicznych i mówi, że nanotechnologia wykorzystuje nietypowe właściwości substancji, pojawiające się dopiero po osiągnięciu krytycznej wielkości ziarna lub wydzielen, grubości warstwy, rozmiaru cząstek. Oczywiście, wielkość krytyczna danego elementu struktury jest różna w przypadku różnych właściwości fizykochemicznych. Niemniej jednak, aby być w zgodzie z pierwszym kryterium definicji nanotechnologii, powinna się mieścić w przedziale od 1 do 100 nm. Nanotechnologia to obszar inżynierii materiałowej, znanym tym, że rozmiar i morfologia elementów struktury mogą mieć większy wpływ na właściwości substancji niż jej skład chemiczny. Efekt ten nazywany jest często efektem nanoskali (Kelsal i in. 2008, Langauer-Le-wowicka i Pawlas 2014).

Rozpatrując kwestie związane z wpływem nanotechnologii na środowisko, należy podkreślić, że wzrost zainteresowania wykorzystaniem różnorodnych nanomateriałów w technologii, przemyśle, medycynie i życiu codziennym skutkuje zwiększeniem ich produkcji, a w konsekwencji – emisji do środowiska naturalnego. Ze względu na liczne doniesienia o negatywnym wpływie nanocząstek na komórki drobnoustrojów, roślin i zwierząt, niezbędna jest ocena ich oddziaływania na środowisko. Jest to

szczególnie istotne w przypadku nowo syntetyzowanych produktów, mogących znaleźć potencjalne zastosowanie w przemyśle czy gospodarce.

W ostatnich latach dużym zainteresowaniem naukowców cieszą się nanotechnologie i ich produkty, czyli nanocząstki. Nanocząstki to jednak nie tylko korzyści, ale również pewne ryzyko, zarówno dla człowieka, jak i całego środowiska naturalnego. Małe rozmiary oraz duży stosunek powierzchni do objętości pozwalają na wręcz niezauważalne przez człowieka pokonywanie barier ustrojowych. Wchłaniane są jedną z trzech głównych dróg: przez skórę, płuca oraz przewód pokarmowy. Po wnikięciu do organizmu nanocząstki mogą swobodnie w nim krążyć, wchodzić w interakcje z układami biologicznymi, a nawet wnikać do pojedynczych komórek, unikając przy tym fagocytozy. Różne rodzaje nanocząstek mogą gromadzić się w pęcherzykach lipidowych, fibroblastach, jądrze komórkowym, mitochondriach lub makrofagach. Badania toksykologiczne dowiodły, że nanocząstki mogą być cytotoksyczne, neurotoksyczne, genotoksyczne czy ekotoksyczne. Większość zanieczyszczeń dostających się do organizmu jest niszczone albo neutralizowana przez makrofagi, czyli komórki obronne organizmu. Niestety nanocząstki są wyjątkowo mało podatne na ten proces. Choć mechanizmy oddziaływania nanocząstek na ludzki organizm i środowisko naturalne nie zostały jeszcze do końca poznane, a aktualny stan wiedzy na temat toksyczności nanocząstek jest wciąż bardzo ubogi, zgodnie z oficjalnym stanowiskiem Komisji Europejskiej nie należy hamować rozwoju nanotechnologii, lecz należy dołożyć wszelkich starań, aby projektowaniu nowych nanomateriałów towarzyszyła kompleksowa ocena zagrożeń. Zwłaszcza że nanoprodukty to nie tylko leka, odporna na zabrudzenie odzież, samoczyszczące się powierzchnie szklane czy nowoczesne regenerująco-odżywcze kosmetyki, ale to także szansa na produkcję sztucznych włókien nerwowych, nanomarkerów kontrastowych dla nieinwazyjnych zabiegów medycznych czy wreszcie przełom w leczeniu wielu schorzeń, takich jak choroba Alzheimera, choroby nowotworowe, jaskra itp. Wśród licznych korzyści należy pamiętać, że narażenie na nanocząstki może stać się poważnym zagrożeniem. Wobec gwałtownego rozwoju nanotechnologii należy zadbać o wypracowanie właściwych kryteriów szacowania ryzyka, które zabezpieczą przed potencjalnym szkodliwym działaniem wynikającym ze specyficznych właściwości substancji w postaci nanocząstek (Kelsal i in. 2008; Langauer-Lewowicka i Pawlas 2014; Nowack i Bucheli 2007).

## 2. Charakterystyka wykorzystanych polimerów

**P**olimerem nazywa się określony związek chemiczny, który został zbudowany z powtarzających się jednostek chemicznych o identycznej strukturze, powiązanych ze sobą odpowiednimi wiązaniami chemicznymi. Jednostki chemiczne

tworzące polimer nazywane są merami lub jednostkami strukturalnymi. Mer jako podstawowa cząstka budująca polimer jest jednostką konstytucyjną tego obiektu, posiadającą powtarzalne grupy odpowiednich atomów. Mer wielokrotnie się powtarzając, tworzy łańcuch chemiczny o dużej długości. Połączone ze sobą mery tworzą związek wielkocząsteczkowy, który po osiągnięciu odpowiedniej długości przekształca się w makrocząsteczkę polimeru. Rozbicie polimerów na nanocząstki w środowisku naturalnym najczęściej zachodzi na drodze rozkładu przez promienie UV pochodzące z promieniowania słonecznego lub poprzez antropogeniczne rozdrabnianie i utylizację polimerów w sposób nieodpowiedni dla ich przeznaczenia.

## 2.1. Polietylen PE

Polietylen jest najczęściej stosowany do produkcji opakowań jednorazowych (np. woreczków foliowych), które do tej pory były nieodłącznym elementem każdego zakupu. Czym jest zatem PE? Jest to związek z grupy poliolefin (związki te wytwarzane są z obróbki ropy naftowej), czyli polimerów, które w swojej budowie zawierają tylko węgiel i wodór. W tym przypadku jest to wiązanie  $\text{CH}_2=\text{CH}_2$ . Nie jest to jednakże jeden materiał, lecz grupa materiałów o różnych zastosowaniach. Związek ten został wynaleziony przez niemieckiego naukowca Hansa von Pechmana w 1898 roku, a technologia masowej produkcji tego polimeru powstała w latach trzydziestych XX wieku. W zależności od gęstości wytwarzanego polietylenu możemy wyróżnić:

- LDPE – Low Density PE – polietylen o niskiej gęstości; jest miękki, bezbarwny i elastyczny oraz jest obojętny fizjologicznie i przepuszczalny dla gazów. Jest elastyczny w bardzo niskich temperaturach oraz podatny na zgrzewanie, jednakże jest mało odporny na wyższe temperatury.
- HDPE – High Density PE – polietylen o wysokiej gęstości; jest mlecznobiały, posiada wyższą odporność na czynniki fizyczne i ciśnieniowe niż LDPE, lecz posiada mniejszą odporność na ujemne temperatury, w których to staje się kruchy.

Polietylen niskiej gęstości stosuje się najczęściej jako materiał opakowaniowy jednokrotnego użytku, przez co jego duże ilości zaśmiecają środowisko naturalne. Nierozważne pozostawianie torebek foliowych w miejscach do tego nieprzeznaczonych powoduje zanieczyszczenia gleby i powietrza nanocząstkami PE, z którymi spotykamy się codziennie, nie zdając sobie z tego sprawy. Z HDPE jest inaczej, gdyż ze względu na jego dużą gęstość możliwe jest ponowne przetopienie i wykorzystanie go w innych celach. Nanocząstki mogą jednak powstać podczas obróbki mechanicznej elementów powstałych z HDPE, co może być szkodliwe dla pracowników wielu branż stykających się z tym materiałem (Łaskowiec i Michalik 2002).

## 2.2. Polistyren PS

Polistyren, podobnie jak polietylen, należy do grupy poliolefin wytwarzanych z przetwórstwa ropy naftowej. Wzór jego meru to  $\text{CH}_2=\text{CH}-\text{C}_6\text{H}_5$ . Jest to polimer termoplastyczny o kruchej strukturze, wysokiej twardości, bezbarwny i mało elastyczny. W połączeniu z odpowiednimi dodatkami może być kolorowy, a dzięki mniejszej temperaturze mięknięcia i lepkości od polietylenu nadaje się do wytwarzania natryskowego skomplikowanych kształtów. W porównaniu do pozostałych poliolefin ma mniejszą odporność chemiczną, więc nie stosuje się go do przechowywania żywności. Najpowszechniej znaną formą polistyrenu jest forma spieniona zwana styropianem. Styropian otrzymuje się poprzez gwałtowne ogrzanie granulek polistyrenu w obecności speniacza w postaci n-pentanu i izopentanu (Czarnecki 2011).

Polistyren w postaci styropianu stosowany jest szeroko w budownictwie. Co dziennie wiele ton odpadów powstaje z niezucyżtego styropianu i zalega na składowiskach. Duża część odpadów pojawia się w środowisku w postaci pyłów powstałych z cięcia styropianu na mniejsze elementy. Z uwagi na fakt, że styropian jest tworzywem bardzo lekkim, zarówno kulki styropianowe, jak i mikro- i nanocząstki powstałe podczas cięcia w prosty sposób transportowane są na duże odległości poprzez wiatr. Nieodpowiedni sposób docinania styropianu skutkuje chmurą nanocząstek, które mogą dostać się do płuc pracowników pracujących przy dociepleniach budynków mieszkalnych.

## 2.3. Poli(tereftalan etylenu)

Poli(tereftalan etylenu (PET)  $(\text{C}_{10}\text{H}_8\text{O}_4)_n$ ) jest termoplastycznym polimerem z rodziny poliestrów wykorzystywanych do produkcji sztucznych włókien oraz opakowań napojów bezalkoholowych. PET wytwarza się dwiema podstawowymi metodami: z tereftalanu dimetylu (proces DMT) i z kwasu tereftalowego (proces TA).

Niezaprzeczalną zaletą tworzyw z poli(tereftalanu etylenu) jest ich trwałość i łatwość włączenia zużytych materiałów w proces recyklingu. Z drugiej jednak strony, odejście od szkła na korzyść jednorazowych opakowań PET w przemyśle spożywczym przyczyniło się do dużej ilości odpadów z PET. Problem ten występuje głównie w krajach nisko rozwiniętych, gdzie wytworzenie PET i jego eksploatacja jest znacznie tańsza niż przetwarzanie i recykling tego tworzywa. W Europie również jest pewna ilość niezagospodarowana odpadów z PET, lecz większość jest ponownie przetwarzana.

Nanocząstki poli(tereftalanu etylenu) powstają głównie podczas rozdrabniania tego materiału i to nie tylko w postaci butelek czy opakowań, ale także ubrań, ze względu na masowe wykorzystanie poliestrów w branży odzieżowej.

### 3. Sposoby wytwarzania nanocząstek

**N**anocząstki są strukturami mało skomplikowanymi pod względem budowy przestrzennej, jednakże sposoby ich wytwarzania nie należą do czynności ani łatwych, ani prostych. W obecnych czasach bardzo dużo dziedzin nauki i techniki poszukuje sposobów wykorzystania nanocząstek, aby poprawić właściwości już znanych substancji i tworzyw. Z tego powodu naukowcy starają się tworzyć cząstki spełniające ich wysokie wymagania co do struktury przestrzennej oraz wytrzymałości, a także prostoty aplikacji nanocząstek w wybrane obszary nauki.

Istnieją dwie główne techniki tworzenia struktur o wielkości nieprzekraczającej 100–200 nm. Podstawową techniką sprowadzania materiału do tych rozmiarów jest technika nazywana *top-down*. Proces ten opiera się na mechanicznej obróbce materiału w celu zmniejszenia wielkości cząstek poprzez mielenie, cięcie, szlifowanie, lub poprzez reakcje chemiczne powodujące rozpad danej substancji. Mechaniczne metody rozdrabniania nie pozwalają na zejście poniżej wielkości 150 nm w przypadku plastików ze względu na ich cechy fizyczne. Nanopolimery nie zawsze będą posiadać wszystkie wymiary poniżej 200 nm ze względu na trudności w rozdrabnianiu takich substancji. Materiały posiadające ziarna krystaliczne mogą być rozdrobnione nawet do wielkości poniżej 100 nm w każdej przestrzeni. Metoda *top-down* jest wieloetapowa i wymaga sporej ilości czasu koniecznego do wytworzenia nanocząstek. Mechaniczna obróbka substancji w celu osiągnięcia struktur w zakresie nano została opracowana przez człowieka jako metoda antropogenicznego wytwarzania tych obiektów (Czarnecki 2011).

Kolejna metoda otrzymywania nanocząstek pochodzi „z natury” i nazywana jest metodą *bottom up*, czyli „z dołu do góry”. Metoda ta polega na tworzeniu cząstek wprost z ich części składowych, poprzez reakcje chemiczne i fizykochemiczne. Reakcje i procesy zachodzące w metodzie *bottom up* są odwrotnością procesów zachodzących w metodzie *top-down*. Tutaj zamiast niszczyć w celu tworzenia nanocząstek, buduje się je od zera. Metoda *bottom up* pozwala na dokładne zaprojektowanie wielkości cząstek potrzebnych do wybranych aplikacji. Metoda ta jest obecnie szeroko stosowana w biotechnologii oraz w farmacji, przy aplikacji niektórych substancji precyzyjnie w dane miejsca (Kelsal i in. 2008; Langauer-Lewowicka i Pawlas 2014).

Mielenie i rozdrabnianie substancji wykorzystuje się w celu analizy substancji wielkocząsteczkowych, które nie mogą być wytworzone w inny sposób, niż tylko poprzez pomniejszanie rozmiaru obiektu. Wytwarzanie poprzez budowanie ma na celu otrzymanie zaprojektowanych nanocząstek do wybranych zastosowań. Wytwarzane są głównie metale, ferromagnetyty oraz związki węglowe.

W pracy zastosowano metodę *top down* jako odpowiednik naturalnych i antropogenicznych procesów wytwarzania nanocząstek w środowisku. Metoda ta odwo-



rowuje wytwarzanie realnego zanieczyszczenia nanocząstkami polimerów nie tylko powietrza, ale także gleby oraz wody.

## 4. Część doświadczalna

### 4.1. Metodyka wytwarzania nanocząstek polimerów

**W**ytworzenie nanocząstek jest procesem bardzo żmudnym i złożonym ze względu na bardzo małe rozmiary poszczególnych cząstek. Eksperymenty rozpoczęto od wytworzenia makrocząstek, następnie otrzymano mikrocząstki i finalnie nanocząstki. Jako źródło polistyrenu wykorzystano profile styropianowe służące do amortyzacji urządzeń AGD, źródłem polietylenu były nowe worki foliowe, a źródłem politereftaranu etylenu były butelki wykonane z PET.

### 4.2. Mielenie w młynie tnącym

Pierwszym etapem wytwarzania nanocząstek jest rozdrobnienie zgromadzonego materiału w postaci butelek, worków foliowych i styropianu do możliwie jak najmniejszych form przy udziale młyna tnącego. Mechanizm działania młyna tnącego polega na cięciu materiału na mniejsze kawałki, za pomocą zamocowanych ostrzy. Ostrza te posiadają przeciwstrze, które blokuje materiał pozwalając na rozdrobnienie. Metoda ta umożliwiła osiągnięcie rozmiarów obiektów na poziomie kilku mikrometrów, jednakże brak szczelności pojemnika zbiorczego powoduje powstanie chmury cząsteczkowej w pomieszczeniu i duże zapylenie powietrza mikro- i nanocząstkami mogącymi powstać w tym procesie.

### 4.3. Mielenie w młynie planetarno-kulowym

Kolejnym etapem rozdrabniania struktur było mielenie w młynie planetarno-kulowym. Zasada działania młyna planetarno-kulowego opiera się na ruchu kołowym i sile odśrodkowej działającej wewnątrz misy mielącej. Misa wykonana została z agatu tak jak i 25 kulek mielących o średnicy 5 mm. Materiał końcowy z młyna tnącego przeniesiono w postaci suchej do misy mielącej. Mielenie trwało minutę przy obrotach 400 obr/min. Otrzymane cząstki przeniesiono do szczelnych próbek z korkiem za pomocą szpatułki.

#### 4.4. Rozdrabnianie homogenizacyjne

Ostatnim etapem rozdrabniania było rozdrabnianie homogenizacyjne w celu rozbicia flokuł tworzących się po rozdrobnieniu w młynie kulowym. Homogenizacja była prowadzona w obecności surfaktantu – dodecylosiarczanu sodu (SDS). Surfaktant wspomagał rozrywanie flokuł nanocząstek w celu wyodrębnienia pojedynczych cząstek. Homogenizator pracował z nożem podwójnym, przy 32 500 obr/min.

#### 4.5. Filtrowanie

Jako ostatni proces przed analizą jakościową otrzymanej zawiesiny wykonane zostało filtrowanie cieczy w celu oddzielenia struktur nano od struktur mikro. W tym celu zastosowano filtry strzykawkowe o średnicy porów wynoszących 200 nm. Tak otrzymany roztwór nanocząstek w wodzie destylowanej został poddany pomiarom rozkładu wielkości cząstek w analizatorze DLS.

#### 4.6. Pomiar wielkości cząstek metodą DLS

Metoda DLS (ang. *Dynamic Light Scattering*) jest metodą analityczną polegającą na dynamicznym rozpraszaniu światła. Pozwala ona na pomiar cząstek w zakresie 0,5–10 000 nm. Wiązka lasera padająca na próbkę oddziałuje z nią i wytwarza promieniowanie rozproszone zbierane następnie przez detektor. Pomiary tą metodą nie powodują zniszczenia próbki ani zmian strukturalnych w próbce. Najczęściej metodę DLS stosuje się do pomiaru wielkości cząstek w fazie ciekłej.

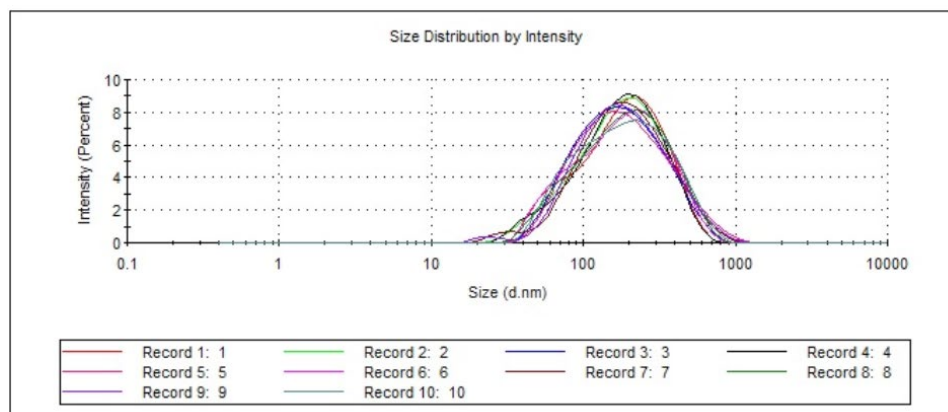
Każdy roztwór został wykonany tuż przed analizą, co pozwala na najdokładniejsze odzwierciedlenie zawartości próbek. Oznaczenie rozkładu wielkości cząstek wykonano za pomocą analizatora DLS Zetasizer Nano ZS firmy Malvern. Dla każdego materiału badawczego wykonano po 10 pomiarów. Pomiary przeprowadzono w temperaturze 25°C, stosując wodę destylowaną jako fazę rozpraszającą, pod kątem 173°, przy długości fali 633 nm. Pozostałe parametry pomiaru: lepkość 0,887 cP, współczynnik załamania światła  $RI = 1,330$ .

## 4.7. Wyniki badań

Tabela 1. Rozkład wielkości cząstek dla PET

| Poli(tereftalan etylenu) |                           |       |                           |       |                           |
|--------------------------|---------------------------|-------|---------------------------|-------|---------------------------|
| Pik 1                    | Procent powierzchni 1 [%] | Pik 2 | Procent powierzchni 2 [%] | Pik 3 | Procent powierzchni 3 [%] |
| 208,3                    | 100                       | 0     | 0                         | 0     | 0                         |
| 202,3                    | 100                       | 0     | 0                         | 0     | 0                         |
| 205                      | 100                       | 0     | 0                         | 0     | 0                         |
| 203,9                    | 100                       | 0     | 0                         | 0     | 0                         |
| 224,8                    | 100                       | 0     | 0                         | 0     | 0                         |
| 213,4                    | 100                       | 0     | 0                         | 0     | 0                         |
| 224,6                    | 97,4                      | 30,5  | 2,6                       | 0     | 0                         |
| 220,6                    | 100                       | 0     | 0                         | 0     | 0                         |
| 223,4                    | 98,7                      | 24,98 | 1,3                       | 0     | 0                         |
| 221,8                    | 100                       | 0     | 0                         | 0     | 0                         |
| Średnia                  | 214,81                    |       |                           |       |                           |

Źródło: opracowanie własne.

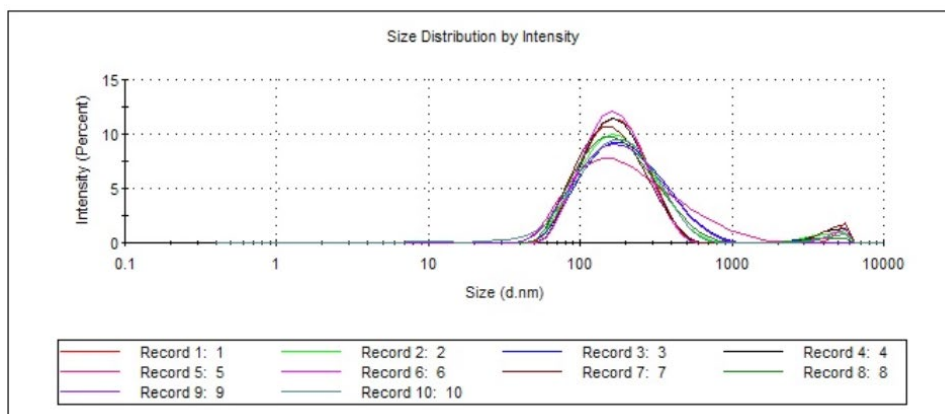


Rysunek 1. Rozkład pików dla PET  
 Źródło: opracowanie własne – Zetasizer Nano ZS Malvern

Tabela 2. Rozkład wielkości cząstek dla PE

| Polietylen |                           |       |                           |       |                           |
|------------|---------------------------|-------|---------------------------|-------|---------------------------|
| Pik 1      | Procent powierzchni 1 [%] | Pik 2 | Procent powierzchni 2 [%] | Pik 3 | Procent powierzchni 3 [%] |
| 184,7      | 97,3                      | 5268  | 2,7                       | 0     | 0                         |
| 201,4      | 95,6                      | 4151  | 4,4                       | 0     | 0                         |
| 231        | 97,6                      | 3946  | 2,4                       | 0     | 0                         |
| 185,6      | 95,1                      | 4462  | 4,9                       | 0     | 0                         |
| 269,9      | 100                       | 0     | 0                         | 0     | 0                         |
| 182,6      | 97,2                      | 4874  | 2,8                       | 0     | 0                         |
| 177,4      | 94,7                      | 4645  | 5,3                       | 0     | 0                         |
| 203,1      | 97,9                      | 4045  | 2,1                       | 0     | 0                         |
| 218,4      | 100                       | 0     | 0                         | 0     | 0                         |
| 197,3      | 97,1                      | 4724  | 2,2                       | 10,21 | 0,7                       |
| Średnia    | 205,14                    |       |                           |       |                           |

Źródło: opracowanie własne.

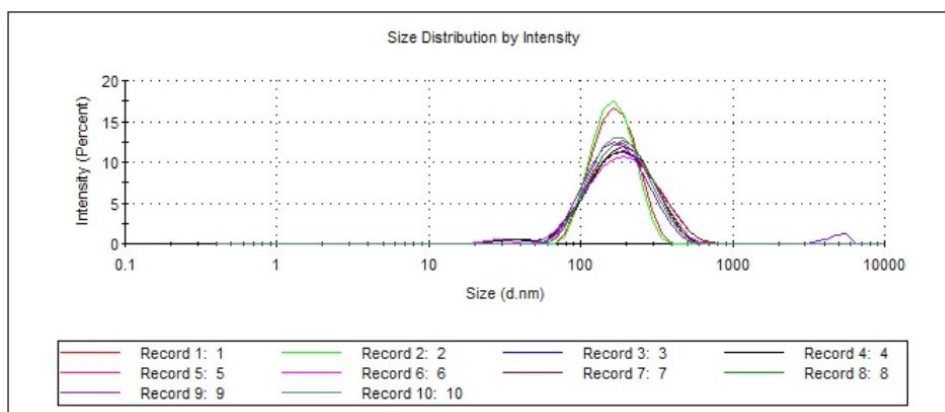


Rysunek 2. Rozkład pików dla PE  
Źródło: Zetasizer Nano ZS Malvern

Tabela 3. Rozkład wielkości cząstek dla PS

| Polistyren |                           |       |                           |       |                           |
|------------|---------------------------|-------|---------------------------|-------|---------------------------|
| Pik 1      | Procent powierzchni 1 [%] | Pik 2 | Procent powierzchni 2 [%] | Pik 3 | Procent powierzchni 3 [%] |
| 173,8      | 100                       | 0     | 0                         | 0     | 0                         |
| 169,4      | 100                       | 0     | 0                         | 0     | 0                         |
| 202,9      | 98,2                      | 34,92 | 1,8                       | 0     | 0                         |
| 202,5      | 97,3                      | 36,68 | 2,7                       | 0     | 0                         |
| 204,4      | 100                       | 0     | 0                         | 0     | 0                         |
| 211,9      | 98,3                      | 28,7  | 1,7                       | 0     | 0                         |
| 212,1      | 100                       | 0     | 0                         | 0     | 0                         |
| 199,7      | 100                       | 0     | 0                         | 0     | 0                         |
| 188,3      | 96,8                      | 4847  | 3,2                       | 0     | 0                         |
| 196,8      | 100                       | 0     | 0                         | 0     | 0                         |
| Średnia    | 196,18                    |       |                           |       |                           |

Źródło: opracowanie własne.



Rysunek 3. Rozkład pików dla PS

Źródło: Zetasizer Nano ZS Malvern

## 4.8. Analiza otrzymanych wyników DLS

Analizując wyniki uzyskane w poszczególnych pomiarach i porównując je do siebie, można wysnuć prostą zależność, iż dobrana metoda przygotowania próbek była odpowiednią do tego typu badań. Dane otrzymane podczas analizy DLS poli(tereftalanu etylenu), polietylenu i polistyrenu pokazują, jak niewiele różnią się od siebie poszczególne wyniki pomiarów. Średnie z pomiarów dla trzech wybranych polimerów są do siebie zbliżone. Różnica pomiędzy wartościami średnimi to mniej niż 20 nm, co świadczyć może o bardzo dokładnej analizie jakościowej przebadanych próbek. Kolejnym bardzo ważnym aspektem ukazany na rysunkach 1, 2 i 3 jest rozkład poszczególnych pików. Jest on bardzo zbliżony i jedynie nieliczne piki wychodzą poza średni zakres obszarowy. Sugeruje to jednolite przygotowanie wszystkich próbek do badań, a piki powyżej 1000 oraz te poniżej 100 nm to jedynie niewielki procent otrzymanych wyników, nie stanowią bazy próbki. Otrzymane średnie wartości wielkości cząstek mieszczą się w przedziale między 169 a 269 nm dla trzech wybranych polimerów. Wartości otrzymane podczas przeprowadzania tego badania utwierdzają w przekonaniu, że do wytworzenia nanostruktur nie potrzeba koniecznie długiego czasu i ekspozycji na czynniki degradujące, lecz wystarczy obróbka mechaniczna, aby otrzymać struktury o wielkościach nano.

Wytworzenie nanocząstek jest procesem czasochłonnym i złożonym ze względu na bardzo małe rozmiary poszczególnych cząstek. Jednocześnie, cząstki wielkości poniżej 1 mikrometra, powstałe na drodze rozkładu tworzyw sztucznych, są bardzo groźne dla środowiska i zdrowia ludzi. Cząstki te ze względu na swoje wymiary nie są widoczne dla oka ludzkiego, mogą w niekontrolowany sposób przemieszczać się na duże odległości oraz oddziaływać na rośliny, zwierzęta i ludzi.

Cel pracy został osiągnięty – w wyniku rozdrabniania i homogenizacji udało się otrzymać nanocząstki wybranych tworzyw sztucznych. Uzyskano następujące średnie wielkości dla poszczególnych materiałów: politereftalanu etylenu (PET) 214,81 nm, polietylenu (PE) 205,14 nm, polistyrenu (PS) 196,18 nm.

## Literatura

- CZARNECKI L. 2011. *Nanotechnologia w budownictwie*. [W:] Przegląd budowlany 1, s. 40–53.
- KELSAL R.W., HAMLEY I.W. i GEOGHEGAN M. 2008. *Nanotechnologie*. Wyd. Nauk. PWN, Warszawa, s. 19–29.
- LANGAUER-LEWOWICKA H. i PAWLAS K. 2014. *Medycyna Środowiskowa*. *Environmental Medicine* 17(2), s. 7–14.
- ŁASKOWIEC J. i MICHALIK R. 2002. *Zagadnienia teoretyczne i aplikacyjne w implantach*. Wyd. Pol. Śl., Gliwice.
- NOWACK B. i BUCHELI T.D. 2007. *Occurrence, behavior and effects of nanoparticles in the environment*. *Environmental Pollution* 150, s. 5–22.

## Badanie sprawności nowej magnetycznej przekładni precesyjnej

**STRESZCZENIE:** Ciągły rozwój technologiczny determinuje powstawanie nowych maszyn i urządzeń o coraz lepszych właściwościach użytkowych. Kluczowymi komponentami większości maszyn są przekładnie. Służą one do przeniesienia ruchu z elementu czynnego (napędowego) na bierny (napędzany) z jednoczesną zmianą parametrów ruchu, czyli prędkości i siły lub momentu siły. W pracy podjęto tematykę przekładni magnetycznych. Biorąc pod uwagę ich liczne zalety, zastosowania przekładni z magnesami trwałymi doskonale wpisują się w cele zrównoważonego rozwoju. Umożliwią one między innymi zapewnienie ludziom w biedniejszych państwach dostępu do tańszej energii elektrycznej oraz trwałego, przystępnego cenowo systemu transportu. Zaprezentowano krótkie porównanie znanych konstrukcji tych przekładni pod względem gęstości momentu obrotowego i zakresu przełożenia. Przedstawiono koncepcję, podstawy teoretyczne i zasadę działania nowatorskiej dwustopniowej magnetycznej przekładni precesyjnej, która jest przedmiotem patentu nr PL 229502. Zaletą prezentowanej przekładni jest możliwość uzyskania znacznie większych przełożeń od tych oferowanych przez obecnie znane przekładnie magnetyczne. Zbudowano prototyp przekładni o przełożeniu 1/144 oraz stanowisko badawcze, składające się z serwonapędu, dwóch momentomierzy (przed i za badaną przekładnią) oraz hamulca na wyjściu. Badanie polegało na napędzaniu przekładni ze stałą prędkością obrotową oraz stopniowym jej obciążaniu za pomocą hamulca i mierzeniu jednocześnie momentu obrotowego na wejściu i wyjściu z przekładni. Na tej podstawie wyznaczono zależność sprawności przekładni od prędkości obrotowej i obciążenia, a także porównano ją ze sprawnością mechanicznej przekładni precesyjnej z uzębieniami czołowymi. Praca wpisuje się w 7., 8. i 9. cel zrównoważonego rozwoju.

**SŁOWA KLUCZOWE:** przekładnia magnetyczna, konstrukcja, badanie sprawności

## An experimental investigation of the new magnetic precession gear efficiency

**ABSTRACT:** Continuous technological development determines the emergence of new machines and devices with increasingly better performance. Gearboxes are the key components of most machines. They are used to transfer motion from the active (driving) element to passive (driven) with simultaneous change of motion parameters, i.e. speed and

---

<sup>1</sup> Mgr inż., Politechnika Poznańska, Poznań, Polska.

force or moment of force. The topic of magnetic gears was discussed in the paper. Due to the numerous advantages over mechanical transmissions, this type of design perfectly fits the Sustainable Development Goals. Among others, they will enable people in poorer countries to have access to cheaper electricity and a sustainable, cost-effective transport system. A brief comparison of already known designs of these gears in terms of torque density and gear ratio was provided. The concept, theoretical foundations and principle of operation of the innovative two-stage precession magnetic transmission, which is the subject of patent no. PL 229502, are presented. The advantage of the presented transmission is the possibility of obtaining much larger gear ratio than those offered by currently known magnetic transmissions. A prototype of the gear as well as a research stand consisting of a servo drive, two torque meters (at input and output of the tested gear) and an output brake was built. On the basis of experimental research, the dependence of the efficiency on the rotational speed and load put to the gear was determined and it was also compared with the efficiency of the mechanical precession transmission with the face toothing.

**KEYWORDS:** magnetic gear, construction, efficiency test

## 1. Wprowadzenie

### 1.1. Historia i klasyfikacja przekładni magnetycznych

dea przekładni magnetycznych pojawiła się na początku XX w. W 1901 r. C.G. Armstrong opisał elektromagnetyczną przekładnię czołową w patencie USA nr 687292A. Od tamtej pory przez ponad pół wieku konstrukcje przekładni magnetycznych były opracowywane na wzór przekładni mechanicznych, głównie zębatych czołowych i ślimakowych. Pierwsza godna uwagi koncepcja przekładni magnetycznej została przedstawiona pod koniec lat 60. XX w. przez T.B Martina w patencie USA nr 3378710. Zaproponowana przekładnia składała się z trzech koncentrycznych części: wewnętrznego i zewnętrznego wirnika magnetycznego oraz modulatora przepływu między nimi. Dalsze badania nad tego typu konstrukcjami przeprowadzili Laing i Ackermann (Miladinovic i in. 2017). Postępy w wytwarzaniu wysokoenergetycznych - neodymowych magnesów trwałych Nd-Fe-B oraz dostępność zaawansowanych metod i narzędzi do analizy oraz projektowania złożonych obwodów magnetycznych doprowadziły do wzrostu zainteresowania tematyką przekładni magnetycznych. Liczba publikacji poświęconych przekładniom magnetycznym rośnie wykładniczo w ciągu ostatnich dwóch dekad (Miladinović i in. 2017; Tlali i in. 2014). Z badań literatury wynika, że obecnie najwyższą gęstość momentu obrotowego (moment przypadający na jednostkę objętości przekładni) można uzyskać stosując przekładnie będące rozwinięciem koncepcji współosiowej przekładni magnetycznej z ferromagnetycznymi elementami pośredniczącymi, zaproponowanej przez Atallaha i Howe'a w 2001 r. (Atallah i Howe 2001) (rys. 1e), w której wszystkie magnesy jednocześnie uczestniczą w przenoszeniu momentu obrotowego. Pomimo dużej gęstości momentu obrotowego, przekładnia ta oferuje jednak bardzo niskie przełożenie. Rozwiązaniem



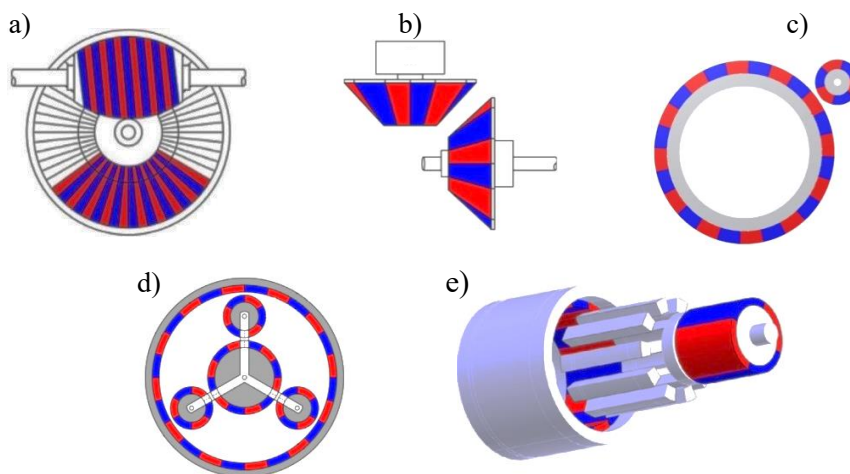
tego ograniczenia może być magnetyczna dwustopniowa przekładnia precesyjna, zaprezentowana w dalszej części niniejszej pracy.

Tabela 1. Porównanie przykładowych przekładni magnetycznych

| Typ przekładni magnetycznej   | Gęstość przenoszonego momentu [ $\text{Nm}/\text{dm}^3$ ] | Zakres dostępnych przełożeń |
|---|---|-----------------------------|
| Przekładnia ślimakowa   | 1–2   | 1:4–1:80                    |
| Przekładnia stożkowa  | 2–3   | 1:1–1:5                     |
| Przekładnia czołowa zewnętrzna  | 10–20   | 1:1–1:20                    |
| Przekładnia planetarna  | 45–110  | 1:3–1:20                    |
| Współosiowa przekładnia magnetyczna z ferromagnetycznymi elementami pośredniczącymi | 50–150  | 1:4–1 :10                   |

Źródło: opracowanie własne na podstawie: Li i in. 2013; Tlali i in. 2014.

W tabeli 1 zestawiono dostępne przełożenia i gęstości przenoszonego momentu obrotowego dla wybranych typów przekładni magnetycznych. Ich konstrukcje zostały, w sposób uproszczony, zaprezentowane na rysunku 1.



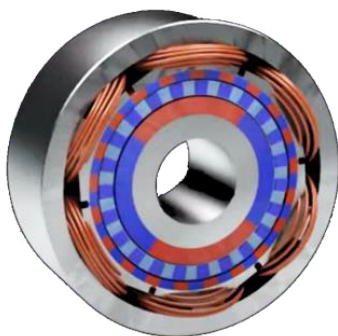
Rysunek 1. Przekładnie magnetyczne: a) przekładnia ślimakowa, b) przekładnia stożkowa, c) przekładnia czołowa zewnętrzna, d) przekładnia planetarna, e) współosiowa przekładnia magnetyczna z ferromagnetycznymi elementami pośredniczącymi

Źródło: opracowanie własne na podstawie: Tlali i in. 2014, Miladinović i in. 2017

## 1.2. Zalety i wady oraz zastosowania przekładni magnetycznych

Najpowszechniej obecnie stosowane przekładnie mechaniczne, pomimo szeregu zalet (m.in. równomierność pracy, czy możliwość przenoszenia dużych mocy), borykają się z pewnymi nieodłącznymi problemami, takimi jak tarcie, hałas i ciepło. Rozwiązanie tych problemów dają przekładnie magnetyczne. Dzięki bezstykowemu przeniesieniu momentu obrotowego za pomocą pola magnetycznego oferują one wiele korzyści. Zapewniają fizyczną izolację pomiędzy kołem napędzającym a napędzanym, dzięki czemu charakteryzują się zwiększoną trwałością oraz obniżonym poziomem wytwarzanego ciepła, wibracji i hałasu (Kowol i in. 2014). Przekładnie magnetyczne zapewniają również „naturalną” ochronę przed przeciążeniem (Mężyk, Tomas 2013), ponieważ mają zdolność do samoczynnego rozłączenia po przyłożeniu do ich wyjścia obciążenia o odpowiednio dużej wartości. Pomimo omawianych zalet przekładniom magnetycznym poświęca się wciąż stosunkowo mało uwagi, głównie ze względu na niską gęstość przenoszonego momentu obrotowego oraz złożoność obwodów magnetycznych.

Przekładnie magnetyczne, ze względu na dużą trwałość i niezawodność, często znajdują zastosowanie w miejscach niedostępnych lub niebezpiecznych dla człowieka, m.in. w przemyśle lotniczym, motoryzacyjnym i morskim, a także w elektrowniach wiatrowych. Największą popularnością cieszy się obecnie konstrukcja współosiowej przekładni magnetycznej z ferromagnetycznymi elementami pośredniczącymi (rys. 1e). Firma Magnomatics opracowała na tej podstawie napęd Pseudo Direct Drive (PDD) pokazany na rysunku 2, który jest połączeniem silnika i reduktora w jednym urządzeniu. PDD oferuje znacznie większą gęstość momentu obrotowego w porównaniu z konwencjonalnym silnikiem z oddzielną przekładnią redukującą.



Rysunek 2. Napęd PDD firmy Magnomatics

Źródło: <http://www.magnomatics.com/pages/technology/pseudo-direct-drive.htm>

### 1.3. Badania nad nową przekładnią jako realizacja celów zrównoważonego rozwoju

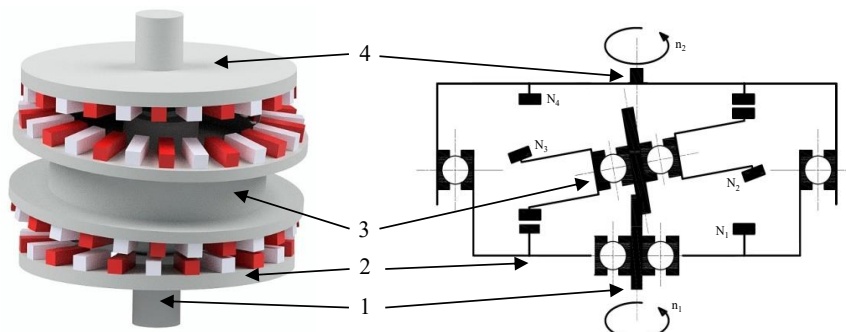
Prace nad nową przekładnią magnetyczną doskonale wpisują się w cele zrównoważonego rozwoju, a w szczególności w cel 7., to jest zapewnienie dostępu do źródeł stabilnej, zrównoważonej i nowoczesnej energii w przystępnej cenie. Ze względu na trwałość, brak konieczności smarowania i czynności związanych z utrzymaniem ruchu, nowa magnetyczna przekładnia precesyjna doskonale sprawdzi się w generatorach elektrowni wiatrowych. Ze względu na niższe koszty wytwarzania energii, wynikające z braku konieczności regularnego serwisowania, farmy wiatrowe wyposażone w takie generatory będą mogły być budowane w biedniejszych krajach (zadanie 7.B). Nowa przekładnia realizuje także cele 8. i 9., którymi są promowanie stabilnego, zrównoważonego wzrostu gospodarczego oraz budowanie stabilnej infrastruktury, promowanie zrównoważonego uprzemysłowienia oraz wspieranie innowacyjności (zadania 8.2, 9.5). Zadanie 11.2 informuje natomiast o zapewnieniu ludziom dostępu do przystępnych cenowo i trwałych systemów transportu. Tu także może pomóc rozwój przekładni magnetycznych, które już teraz stosowane są m.in. w autobusach elektrycznych – w układach odzyskiwania energii.

## 2. Koncepcja nowej magnetycznej przekładni precesyjnej

### 2.1. Zasada działania

**M**agnetyczna przekładnia precesyjna została przedstawiona na rysunku 3. Głównymi elementami składowymi przekładni są: wał wejściowy (1), tarcza nieruchoma (2), tarcza pośrednia (3) oraz tarcza wyjściowa (4). Na obwodach tarcz znajdują się wieńce magnesów neodymowych, o różnej liczbie par biegunów. Liczba magnesów musi być parzysta i muszą być one ułożone polaryzacją naprzemiennie. Wał wejściowy oraz tarcza wyjściowa obracają się wokół tej samej, głównej osi obrotu przekładni.

Ruch precesyjny, osadzonej kątowno na wale wejściowym, ułożyskowanej tarczy pośredniej, ma dwie składowe. Pierwszą jest obrót wokół głównej osi obrotu przekładni, wymuszony przez ruch obrotowy wału wejściowego. Drugą składową jest rotacja tarczy pośredniej wokół własnej osi, pochylonej względem osi głównej o pewien kąt, zwany kątem precesji, pod którym tarcza pośrednia jest osadzona na wale wejściowym. Ta druga składowa wymuszona jest wzajemnym oddziaływaniem magnesów na tarczy pośredniej z magnesami na tarczy nieruchomej. Magnesy przymocowane do drugiej strony tarczy pośredniej oddziałują z magnesami znajdującymi się na tarczy wyjściowej, co powoduje z kolei jej ruch obrotowy. Prędkość tarczy wyj-



Rysunek 3. Magnetyczna przekładnia precesyjna  
 Źródło: Macyszyn i in. 2017; Macyszyn i in. 2019

ściowej zależy od liczby magnesów na poszczególnych tarczach (Macyszyn i Pabiszczak 2016) i wyrażona jest równaniem:

$$n_2 = n_1 \cdot \left( 1 - \frac{N_1}{N_2} \cdot \frac{N_3}{N_4} \right) \quad (1)$$

gdzie:

- $n_1$  – prędkość obrotowa wału wejściowego,
- $n_2$  – prędkość obrotowa tarczy wyjściowej,
- $N_1, N_2, N_3, N_4$  – liczby magnesów na obwodach tarcz,  
 przy czym warunkiem koniecznym jest:  $N_2 \geq N_1$  oraz  $N_3 \geq N_4$ .

Najwyższe przełożenie osiąga się w sytuacji, gdy:

$$N_1 = N - 1; \quad N_2 = N; \quad N_3 = N + 1; \quad N_4 = N \quad (2)$$

Przekładnie precesyjne pozwalają na uzyskanie przełożenia w zakresie  $1/80 \div 1/10000$ .

### 3. Badania sprawności magnetycznej przekładni precesyjnej

#### 3.1. Prototyp i stanowisko badawcze

**P**rototyp dwustopniowej magnetycznej przekładni precesyjnej został zaprojektowany, zbudowany i przebadany (rys. 4). Umożliwia on zmianę szerokości obu szczelin powietrznych (między tarczą wejściową a tarczą pośrednią, a także

niezależnie między tarczą pośrednią a tarczą wyjściową). Wszystkie części metalowe zostały wykonane ze stali S235. Magnesy stałe zostały przyklejone do pierścieni za pomocą specjalnych koszyczków wykonanych technologią druku 3D. Parametry prototypu badanej przekładni przedstawiono w tabeli 2.



Rysunek 4. Zdjęcie prototypu przekładni (Fot. Ł. Macyszyn)

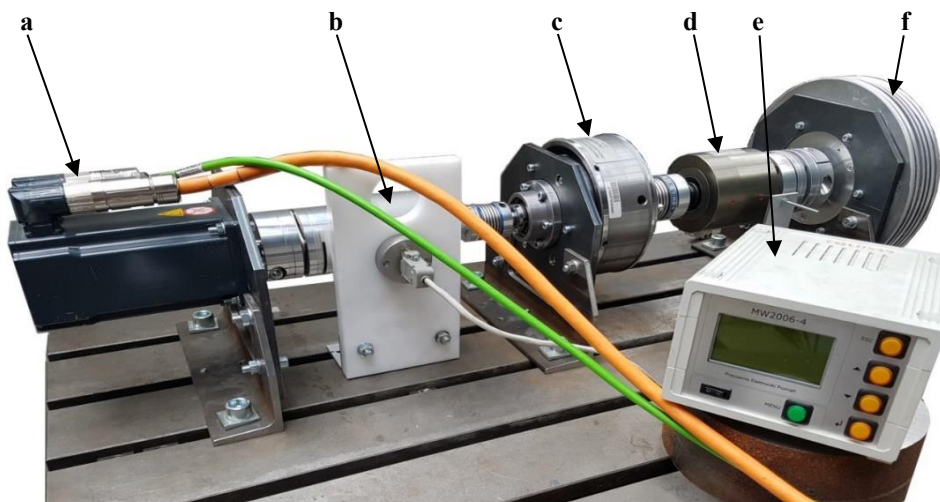
Tabela 2. Parametry prototypu przekładni

| Parametr            | Wartość                                  |
|---------------------|--|
| Przełożenie         | 1/144                                    |
| Kąt precesji        | 6°                                       |
| Średnica zewnętrzna | 164 mm                                   |
| Wysokość            | 125 mm                                   |
| Typ magnesów        | N38                                      |
| Wymiary magnesów    | 15 x 5 x 5 mm                            |
| Liczby magnesów     | $N_1 = 22, N_2 = 24, N_3 = 26, N_4 = 24$ |

Źródło: opracowanie własne.

Stanowisko badawcze składa się z serwośilnika na wejściu, dwóch momentomierzy do pomiaru momentu obrotowego przed i za badaną przekładnią oraz hamulca elektromagnetycznego do obciążania przekładni na wyjściu (rys. 5). Badania eksperymentalne pozwoliły określić współczynnik sprawności przekładni, a także maksymalny moment obrotowy przenoszony przez przekładnię dla różnych prędkości obrotowych i szerokości szczelin powietrznych. Każdy pomiar w danych warunkach wykonywany był trzykrotnie i trwał 20 sekund. Następnie obliczano średnią, a w przypadku wyznaczania maksymalnych przenoszonych momentów szukane były maksima, po przekroczeniu których przekładnia przestawała pracować płynnie

i przeskakiwała o jedną podziałkę magnetyczną, nie przenosząc momentu z założonym przełożeniem.



Rysunek 5. Zdjęcie stanowiska badawczego:  
a – serwośilnik, b – momentomierz 1, c – prototyp przekładni, d – momentomierz 2, e – stacja pomiarowa momentomierza 1, f – hamulec elektromagnetyczny (Fot. Ł. Macyszyn)

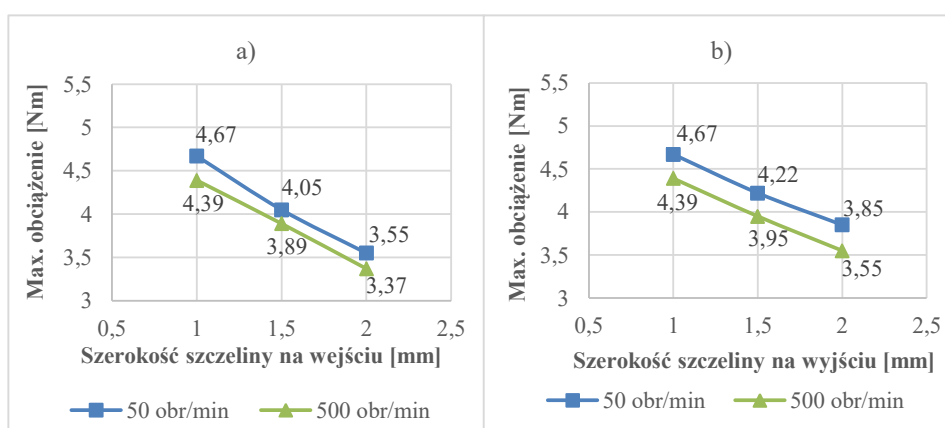
Podczas badań nie zauważono znaczącego wzrostu temperatury przekładni. Poziom hałas wydawał się niższy niż w tradycyjnych przekładniach zębatych o podobnym przełożeniu.

### 3.2. Wyniki badań

Na wykresach (rys. 6) pokazano zależność pomiędzy maksymalnym momentem obrotowym przenoszonym przez przekładnię a szerokością szczelin powietrznych pomiędzy współpracującymi tarczami przekładni, przy różnych prędkościach obrotowych na wejściu. Badanie przeprowadzono dla pięciu różnych konfiguracji szerokości szczelin powietrznych oraz dla dwóch różnych prędkości obrotowych. Z wykresów wynika, że wraz ze zwiększaniem szerokości szczelin powietrznych maleją wartości obciążeń, przy których przekładnia poprawnie przenosi ruch. Dotyczy to obu szczelin powietrznych. Można to łatwo wytłumaczyć spadkiem siły oddziaływań magnetycznych współpracujących magnesów wraz ze wzrostem ich odległości od siebie.

Z wykresów można również odczytać zależność pomiędzy maksymalnym obciążeniem a prędkością obrotową, z jaką napędzana była przekładnia. Wraz ze wzro-

stem prędkości maleje maksymalny moment przenoszony przez przekładnię. Można to wytłumaczyć stratami związanymi ze zjawiskiem powstawania prądów wirowych w elementach stalowych przekładni. Prądy wirowe to prądy indukcyjne, które pojawiają się w materiale przewodzącym, znajdującym się w zmiennym polu magnetycznym lub poruszającym się względem źródła tego pola. Zgodnie z prawem Lenza, prądy wirowe powodują powstawanie własnego indukowanego pola magnetycznego, które przeciwdziała pierwotnemu polu magnetycznemu. Im szybciej zmienia się pole magnetyczne, na którego działanie wystawiony jest przewodnik, tym silniej indukują się prądy wirowe.



**Rysunek 6. Zależność maksymalnego obciążenia przeniesionego przez przekładnię dla:**  
 a) różnych szerokości szczelin pomiędzy tarczą wejściową i pośrednią oraz stałej szerokości szczeliny pomiędzy tarczą pośrednią i wyjściową (równą 1 mm); b) różnych szerokości szczelin pomiędzy tarczą pośrednią i wyjściową oraz stałej szerokości szczeliny pomiędzy tarczą wejściową i pośrednią (równą 1 mm)

Na rysunku 7 przedstawiono zależność sprawności przekładni od prędkości, z jaką przekładnia jest napędzana, i obciążenia wywieranego na wał wyjściowy przekładni. Wynika z niej, że wraz ze wzrostem prędkości obrotowej maleje sprawność. Mają na to wpływ głównie straty spowodowane prądami wirowymi w elementach stalowych. Natomiast wraz ze wzrostem obciążenia sprawność wzrasta aż do momentu przekroczenia maksymalnego obciążenia, które przekładnia jest w stanie przenieść. Powyżej tej wartości przekładnia zatrzymuje się, co stanowi naturalne zabezpieczenie przed przeciążeniem, o czym wspomiano w rozdziale 1.2.

Sprawność przekładni wyznaczono stosując wzór:

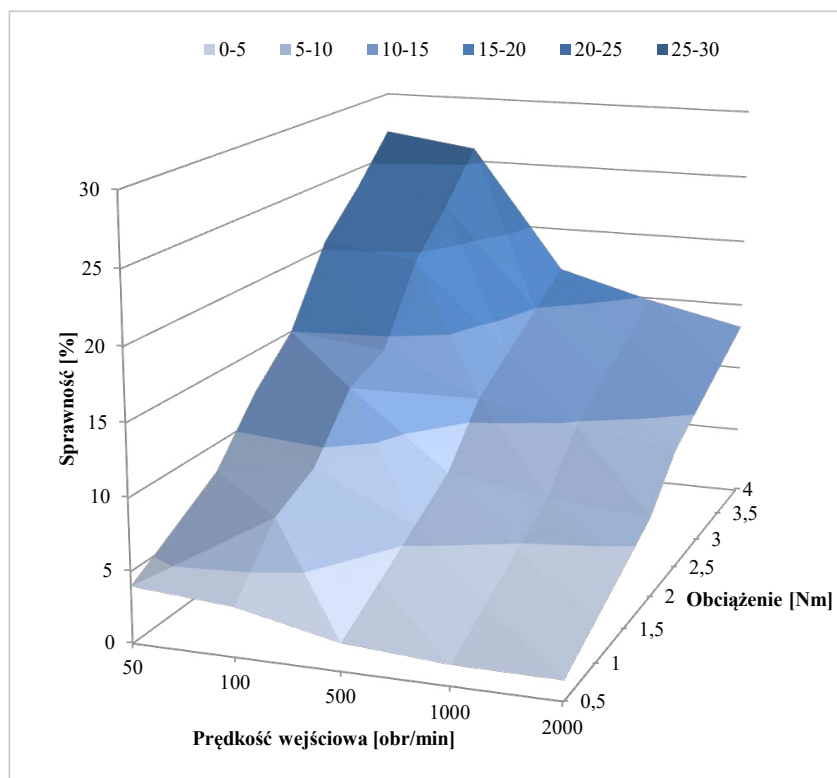
$$\eta = \left( \frac{M_{obc}}{\frac{1}{i} \cdot M_{wej}} \right) \cdot 100 \quad [\%] \quad (3)$$

gdzie:

$M_{obc}$  – moment obciążający przekładnię [Nm],

$M_{wej}$  – moment napędowy przekładni [Nm],

$i$  – przełożenie przekładni.



Rysunek 7. Zależność sprawności przekładni od prędkości obrotowej na wejściu i obciążenia wywieranego na wał wyjściowy przekładni

## 4. Wnioski

Zaprezentowana w pracy dwustopniowa magnetyczna przekładnia precesyjna pozwala na uzyskanie bardzo dużych przełożeń, co wyróżnia ją spośród znanych obecnie konstrukcji przekładni magnetycznych. Do zbudowania prototypu użyto łącznie 96 magnesów neodymowych i uzyskano przełożenie 1/144. Co ciekawe, gdyby zastosować dwukrotnie większą liczbę magnesów, przełożenie wynosiłoby już 1/576, co wysoko stawia poprzeczkę innym konstrukcjom przekładni



magnetycznych. Warto porównać też parametry pracy nowej przekładni z zębatymi przekładniami precesyjnymi. W publikacji dotyczącej przekładni precesyjnych z czołowymi zębieniami modyfikowanymi (Grajdek i in. 1996) zaprezentowane zostały wyniki badań tych przekładni. Wynika z nich, że najlepszy z 4 zbudowanych przez autorów publikacji prototyp uzyskał sprawność maksymalną na poziomie ok. 20%, natomiast sprawność prototypu magnetycznej przekładni precesyjnej osiągnęła podczas badań maksymalną wartość na poziomie ok. 30%.

Dalsze prace nad przekładnią będą miały na celu wyeliminowanie lub zredukowanie ograniczeń obecnej konstrukcji, uniemożliwiających uzyskanie wyższej sprawności i maksymalnego przenoszonego momentu przekładni. Elementy stalowe przekładni generujące straty związane z prądami wirowymi mogą zostać zastąpione elementami wykonanymi z materiału magnetycznie miękkiego, np. PERMALOY. Co więcej, planowane jest przeprowadzenie badań mających na celu zbadanie wpływu wielkości magnesów i ich usytuowania na współpracujących elementach na parametry pracy przekładni.

## Literatura

- ATALLAH K. i HOWE D. 2001. *A novel high-performance magnetic gear*. IEEE Transactions on Magnetics t. 37, nr 4, s. 2844–2846.
- ARMSTRONG C.G. 1901. *Power transmitting device*. US Patent 687292
- GRAJDEK R., STANIEK R. i PTASZYŃSKI W. 1996. *Przekładnie precesyjne w napędach robotów i urządzeń pozycjonujących* Przegląd Mechaniczny z. 15/96, s. 5–8.
- KOWOL M., KOŁODZIEJ J. i LUKANISZYN M. 2014. *Analiza pracy przekładni magnetycznej*. Zeszyty problemowe – Maszyny Elektryczne nr 104, s. 125–130.
- LI X., CHAU K.-T., CHENG M. i HUA W. 2013. *Comparison of magnetic geared permanent magnet machines*. Progress in Electromagnetics Research nr 133, s. 177–198.
- MACYSZYN Ł. i PABISZCZAK S. 2016. *Przekładnie beztarciove jako alternatywa dla tradycyjnych przekładni zębatych*. Mechanik nr 89, s. 1770–1773.
- MACYSZYN L., MYSZKOWSKI A., STANIEK R. i PABISZCZAK S. 2017. *Two-Stage Precession Type Gear – Design, Geometric and Kinematic Analysis*. Proceedings of the ASME 2017 International Mechanical Engineering Congress and Exposition, Tampa, USA.
- MACYSZYN L., JĘDRYCZKA C. i STANIEK R. 2019. *Design and finite element analysis of novel two-stage magnetic precession gear*. International Journal of Simulation Modelling t. 18, nr 4, s. 586–595.
- MARTIN T.B. 1968. *Magnetic transmission*. US Patent 3378710.
- MEŻYK A. i TOMAS A. 2013. *Przekładnie magnetyczne – nowa jakość w transmisji momentu obrotowego*. Przegląd mechaniczny nr 72, s. 40–44.
- MILADINOVIĆ S., IVANOVIĆ L., BLAGOJEVIĆ M. i STOJANOVIĆ B. 2017. *The development of magnetic gears for transportation applications*. International Journal for Vehicle Mechanics, Engines and Transportation System t. 43, nr 1, s. 41–55.
- Organizacja Narodów Zjednoczonych 2015. *Agenda na rzecz zrównoważonego rozwoju 2030, Rezolucja przyjęta przez Zgromadzenie Ogólne*.
- SARIBAY Z. i BILL R. 2013. *Design analysis of pericyclic mechanical transmission system*. Mechanism and Machine Theory nr 61, s. 102–122.

- TLALI P.M., WANG R.-J. i GERBER S. 2014. *Magnetic Gear Technologies: A Review*. International Conference on Electrical Machines (ICEM), Berlin, Niemcy, s. 544–549.
- [Online] <http://www.magnomatics.com/pages/technology/pseudo-direct-drive.htm> [Dostęp: 21.04.2020].
- [Online] <https://www.udt.gov.pl/prady-wirowe-guided-waves> [Dostęp: 30.06.2020].
- [Online] <https://www.utrzymanieruchu.pl/pomiary-metoda-pradow-wirowych> [Dostęp: 30.06.2020].
- GIOŚ 2019. *Pięcioletnia ocena jakości powietrza w strefach w Polsce*. [Online] <http://powietrze.gios.gov.pl/pjp/maps/air/quality/type/W> [Dostęp: 16.05.2020].
- GIOŚ 2020a. *Bank danych pomiarowych*. [Online] <https://powietrze.gios.gov.pl/pjp/archives> [Dostęp: 27.05.2020].
- GUS 2011. *Lecznictwo uzdrowiskowe w Polsce w latach 2000–2010*. [Online] <http://www.stat.gov.pl> [Dostęp: 20.05.2020].
- KACZMARCZYK M. red. 2005. *Niska Emisja: Od Przyczyn Występowania Do Sposobów Eliminacji*. Geosystem Burek, Kotyza S. C., Kraków.
- KOBIZE, IOŚ-PIB 2020. *Krajowy bilans emisji SO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub>, CO, NH<sub>3</sub>, NMLZO, pyłów, metali ciężkich i TZO za lata 1990–2018. Raport syntetyczny*. [Online] <https://www.kobize.pl/pl/fileCategory/id/16/krajowa-inwentaryzacja-emisji> [Dostęp: 16.06.2020].
- KONDRACKI J. 2002. *Geografia regionalna Polski*. Wyd. Naukowe PWN, Warszawa.
- KOZŁOWSKA-SZCZĘSNA T., BŁAŻEJCZYK K., KRAWCZYK B. i LIMANÓWKA D. 2002. *Bioklimat uzdrowisk polskich i możliwości jego wykorzystania w lecznictwie*. Monografie IGiPZ PAN, 3, Warszawa.
- KUCHCIK M., BŁAŻEJCZYK K., SZMYD J., MILEWSKI P., BŁAŻEJCZYK A. i BARANOWSKI J. 2013. *Potencjał leczniczy klimatu Polski*. IGiPZ PAN, Wyd. Akademickie Sedno, Warszawa.
- MATUSZKO A. i MATUSZKO D. 2014. *Prognoza oddziaływania na środowisko do miejscowego planu zagospodarowania przestrzennego dla strefy „A” ochrony uzdrowiskowej uzdrowiska Rabka-Zdrój*. Kraków.
- Ministerstwo Zdrowia 2020. *Lecznictwo uzdrowiskowe*. [Online] <https://www.gov.pl/web/zdrowie/lecznictwo-uzdrowiskowe> [Dostęp: 19.05.2020].
- NIK 2016. *Spełnienie wymogów określonych dla uzdrowisk*. [Online] <https://www.nik.gov.pl/plik/id,12663,vp,15061.pdf> [Dostęp: 18.05.2020].
- PACZYŃSKI B. i SADURSKI A. red. 2007. *Hydrogeologia regionalna Polski*. Tom II, *Wody mineralne, lecznicze i termalne oraz kopalniane*. Warszawa, Państwowy Instytut Geologiczny.
- PORWISZ B. 2013. *Szlakiem wód leczniczych i termalnych w Małopolsce*. Departament Środowiska Urzędu Marszałkowskiego Województwa Małopolskiego, Wyd. „Compass”, Kraków.
- RAJCHEL L. 2009. *Zagłębie rozlewni wód mineralnych w Dolinie Popradu*. Geologia t. 35, z. 2/1, s. 279–288. Rozporządzenie Ministra Środowiska RMŚ z dnia 8 czerwca 2018 r. w sprawie dokonywania oceny poziomów substancji w powietrzu (Dz.U. 2018 r., poz. 1119).
- WHO 2005. *Air Quality Guidelines. Global update 2005*. WHO Regional Office for Europe, Copenhagen.

## Mechanizm zmiennego skoku łopaty dla lekkich jednostek BSL

**STRESZCZENIE:** W pracy pokazano etapy konstrukcji nowego mechanizmu przeznaczonego dla bezzałogowych statków powietrznych (BSL) typu tilt-rotor. Mechanizm ten pozwala na użycie standardowego śmigła składanego jako śmigła o zmiennym skoku. Budowany jest obecnie dron ratunkowy pionowego startu i lądowania. Aby zwiększyć sprawność oraz prędkość maksymalną, dron powinien być wyposażony w śmigła o zmiennym skoku. Do osiągnięcia tego celu postanowiono skonstruować mechanizm pozwalający na konwersję łopaty ze śmigła składanego na śmigło o zmiennym kącie zaklinowania łopaty. Mechanizm składa się z niewielu komponentów: zmodyfikowanego serwomechanizmu klasy mikro, przekładni śruba–nakrętka i mechanizmu dźwigniowego. Materiały użyte do budowy są odporne na korozję, a połączenia mechaniczne zapewniają minimalną histerezę. Wykonano modyfikację serwomechanizmu dla uzyskania wieloobrotowego pomiaru pozycji. Dobrano i zaprogramowano niezbędną elektronikę. Po wykonaniu części konstrukcyjnej poddano ją procesowi patentowania, z uwagi na unikalność w zastosowaniu oraz bardzo szeroką gamę możliwych zastosowań. Badania prowadzone wpisują się, w koncepcję zrównoważonego rozwoju z uwagi na innowacyjność, możliwości komercjalizacji, rozwój gospodarki szczególnie w sektorze logistycznym i transporcie medycznym. Praca wpisuje się w 3., 9. i 11. cel zrównoważonego rozwoju.

**SŁOWA KLUCZOWE:** BSP, zmienny skok śmigła, śmigło, historia zmiennego skoku śmigła

## Variable propeller pitch mechanism for light-weight UAV

**ABSTRACT:** This paper presents the development stages of the construction of a new mechanism for a tilt-rotor for Unmanned Aerial Vehicle (UAV) which makes the standard propeller a variable pitch one. A rescue drone with a vertical take-off and landing capability is under construction. The drone has to be equipped with a variable pitch propeller to increase efficiency and maximum speed. To achieve these aims, the author started to construct a mechanism that can make standard folding drones propeller a variable pitch one. The whole mechanism is based on a few components: the modified micro servo motor, screw-nut gear and lever mechanism. Materials used for building the mechanism were chosen to avoid corrosion and all connections were designed to avoid looseness in the drive system. The next step was to modify the servomotor to achieve the multi reverse servo with a position measurement.

---

<sup>1</sup> Inż., Politechnika Łódzka, Łódź, Polska.

A new program was prepared to control the servo motor and a few electronic components were added. With the construction part of the project finished, the whole construction was submitted for patenting as it is a very unusual mechanism in this application.

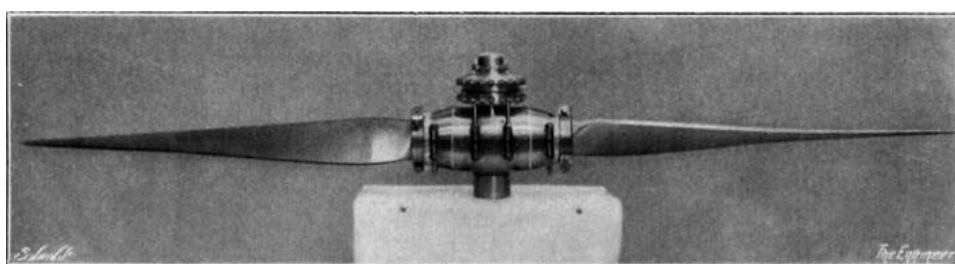
**KEYWORDS:** UAV, Variable pitch, Drone, Propeller, Variable pitch propeller history

## 1. Wprowadzenie

### 1.1. Historia zmiennego skoku

Pomysł śmigła o zmiennym skoku łopat nie jest nowy. W czasach, kiedy dopiero zaczęto produkować samoloty, stosowano śmigła stałe, jednak bardzo szybko zauważono, że skok śmigła wpływa istotnie na osiągi samolotu. Zauważono, że dla samolotów, które mają latać z dużymi prędkościami, niezbędny jest większy skok śmigła, a dla samolotów, które latają wolniej, mniejszy. Spostrzeżenia te spowodowały, że do różnych samolotów o różnym przeznaczeniu i silniku trzeba było indywidualnie dobierać śmigło. Już przed I wojną światową inżynierowie wpadli na pomysł, aby w zależności od silnika zamontowanego w maszynie i od jego zadań – zmieniać na ziemi kąt zaklinowania łopat. Jednymi z pionierów lotnictwa, którzy zastosowali śmigła o nastawnym skoku, byli Alliott Verdon Roe oraz Louis Charles Breguet. Śmigła te miały jednak tę wadę, że zmiana kąta zaklinowania łopat mogła następować tylko na ziemi. Dziś stosuje się podobne śmigła w motolotniach.

W historii lotnictwa pierwszym śmigłem mogącym zmieniać kąt zaklinowania łopat w trakcie lotu, było śmigło bazujące na hydraulicznym przeniesieniu napędu. Powstało ono w brytyjskich zakładach Gloster Aircraft Company w 1929 r. (rys. 1).



Rysunek 1. Pierwsze śmigło o zmiennym skoku „Gloster- Hele Shaw – Beacham variable pitch propeller”  
Źródło: <https://www.gracesguide.co.uk/images/d/d7/1m1929v147-p35a.jpg>

Pomysł śmigieł o zmiennym skoku był modernizowany i mechanizmy przeniesienia napędu były udoskonalane. Powstawało wiele koncepcji, które można podzielić

według kilku kryteriów. Pierwszy podział dotyczy zakresu możliwej zmiany kąta zaklinowania łopat oraz płynności zmiany (Bukowski i Łucjanek 1984). Do pierwszej grupy tego podziału należą śmigła, które mają tylko dwie ustalone pozycje pracy. Są to tzw. śmigła dwupołożeniowe. Do grupy drugiej należą śmigła o kącie zaklinowania łopat ograniczonym do kilkudziesięciu stopni (typowy maksymalny kąt zaklinowania to około 20–40 stopni). Są to śmigła standardowe najczęściej stosowane. Trzecią grupą są śmigła mogące ustawić łopatę w tzw. chorągiewkę, czyli tak, aby śmigło stawiło minimalny opór powietrzu, jeżeli się nie obraca.

Istnieje również podział ze względu na sposób dostarczania energii do mechanizmu. Wyróżnia się przede wszystkim napędy ręczne, hydrauliczne, elektryczne i samonastawne.

Wszystkie wymienione do tej pory podziały dotyczą śmigieł samolotowych. Pisząc o mechanizmach zmiany skoku łopat śmigła, nie można nie napisać o helikopterach, z uwagi na to, że mechanizm ten jest ich nieodłącznym elementem. Pierwszymi helikopterami były maszyny typu Focke-Wulf Fw 61 (Young 1987) oraz Vought-Sikorsky VS-300 (Harris 2011). W tych maszynach zastosowano dużo bardziej skomplikowane mechanizmy zmiany skoku, które zostały omówione w dalszej części pracy.

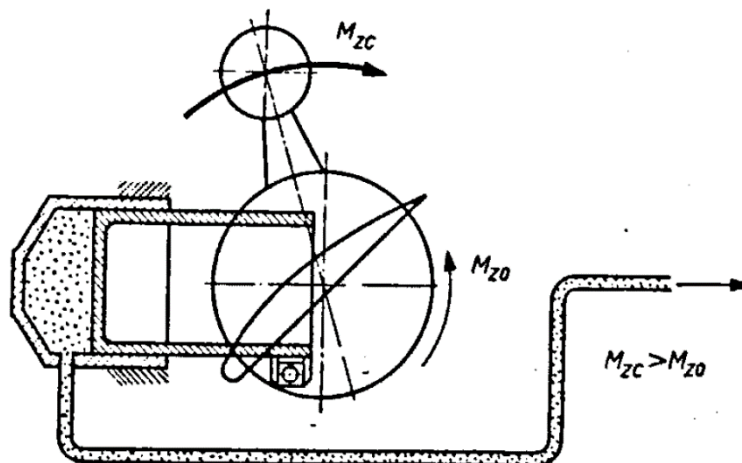
## 1.2. Mechanizmy hydrauliczne stosowane w samolotach

Mechanizm przedstawiony na rysunku 2 w postaci schematu można zaklasyfikować do standardowych śmigieł z napędem hydraulicznym jednostronnym. Głównym elementem mechanizmu jest tłok z cylindrem, montowany zazwyczaj współosiowo z wałem napędowym. Poprzez zwiększanie ciśnienia działającego na tłok, ruchome tłoczysko jest przesuwane ruchem prostoliniowym. Tłoczysko jest połączone z palcem zamontowanym u nasady łopaty śmigła. Oś tego palca jest usytuowana w pewnej odległości od osi łopaty (mimośrodowo) tak, aby poruszając nim poprzez uchwyt jarzmowy zaczepiony do tłoczyska, możliwe było obrócenie łopaty wokół jej osi.

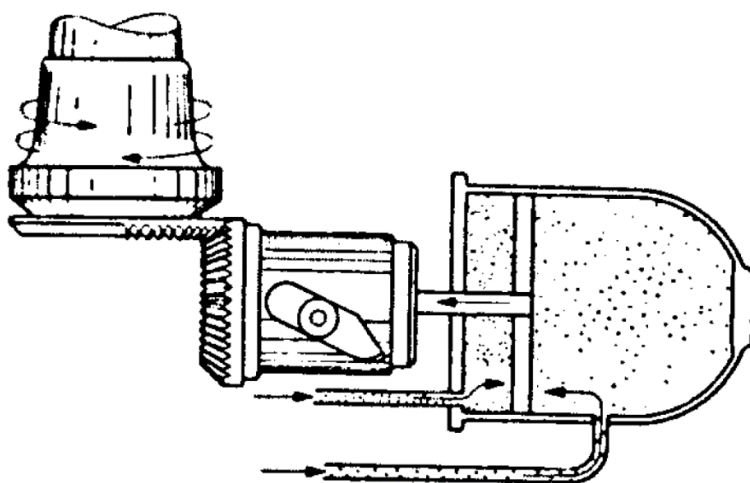
Siłę przeciwdziałającą ciśnieniu oleju zapewnia moment od siły odśrodkowej, działający na łopatę, generowany przez ciężarek zamontowany u nasady łopaty.

Mechanizm przedstawiony na rysunku 3 wykorzystuje siłownik dwustronnego działania. Do nieruchomego cylindra są podłączone dwa przewody doprowadzające olej. Poprzez sterowanie zaworami ustala się pozycję tłoka względem cylindra. Koniec tłoczyska jest połączony jarzmowo z bębniem w taki sposób, że przesuwanie tłoczyska powoduje obrót bębna. Na bębnie jest wykonane stożkowe koło zębate. U nasady łopat znajdują się również koła stożkowe, które współpracują z tym zamieszczonym na bębnie.

Na rysunku 2 przedstawiono tylko uproszczony schemat mechanizmu. W rzeczywistości jego implementacja była o wiele bardziej skomplikowana. Mechanizm



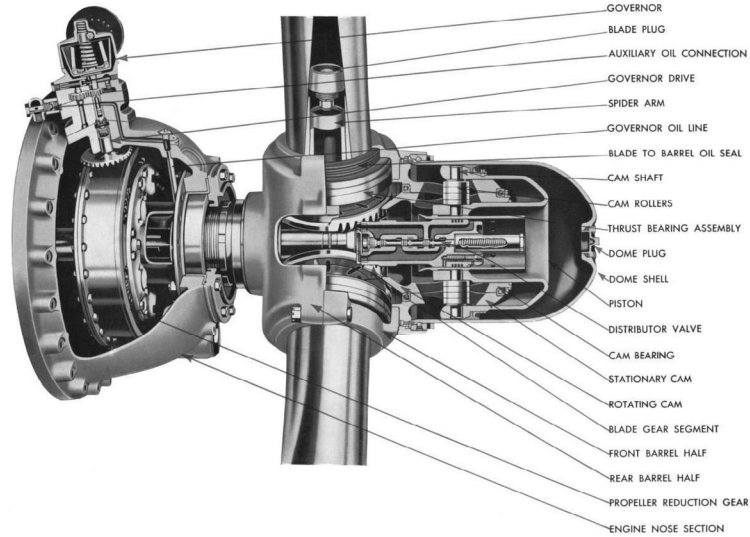
Rysunek 2. Jednokierunkowy mechanizm zmiany skoku z napędem hydraulicznym – schemat  
Źródło: Bukowski i Łuczjanek 1984



Rysunek 3. Dwukierunkowy mechanizm zmiany skoku z napędem hydraulicznym – schemat  
Źródło: Bukowski i Łuczjanek 1984

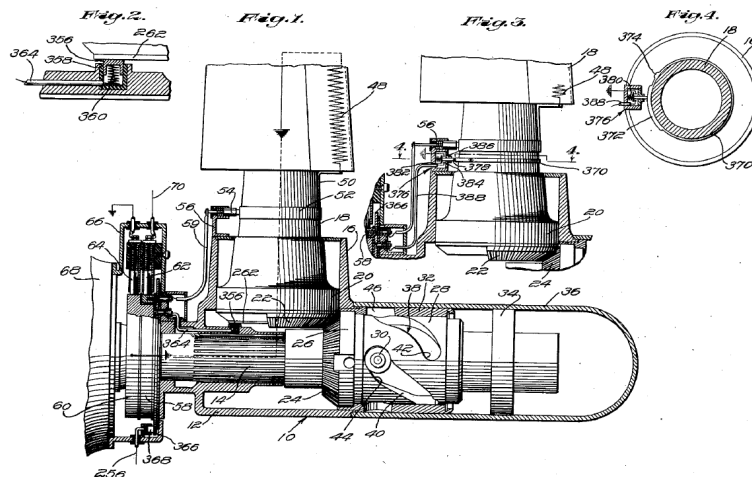
ten został zamontowany między innymi w typoszeregu śmigieł firmy Hamilton Standard, które były montowane w znanych miłośnikom historii II wojny światowej, samolotach F4U-Corsair (D'Angina 2014). Przekrój przez śmigło przedstawiono na rysunku 4.

Mechanizm zmiennego skoku topała dla lekkich jednostek BSL



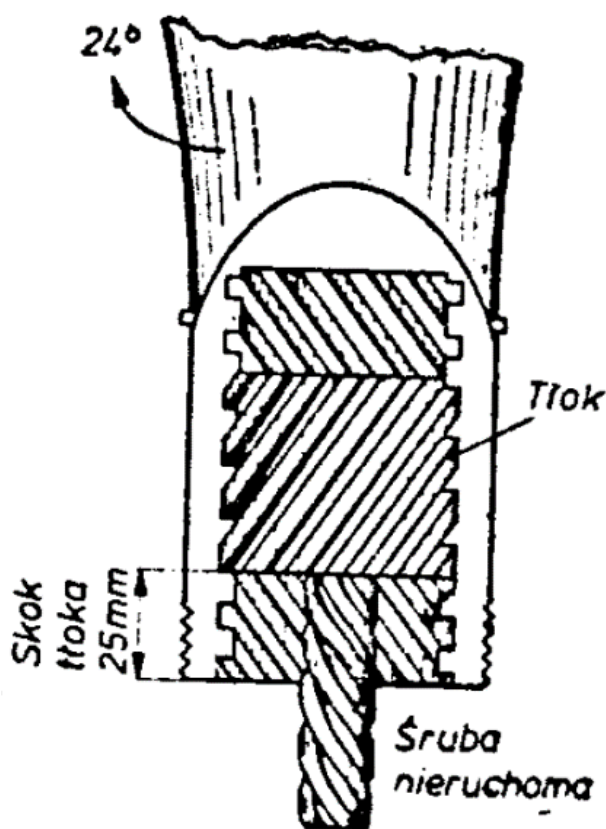
Rysunek 4. Przekrój przez śmigło firmy Hamilton Standard  
 Źródło: <http://enginehistory.org/Propellers/HamStdSH/HamStdSH01.shtml>

Wprowadzano coraz więcej ulepszeń i tworzono pateny opierające się na mechanizmie pokazanym na rysunku 3. Udoskonalenia polegały m.in. na metodach sterowania oraz doprowadzania oleju do układu. Przykład takich udoskonalień obrazuje rysunek 5. Nie jest to jedyne zastrzeżenie tego patentu, jednak pokazuje kierunek działań wynalazców i to, co w tamtych czasach było istotne w tego typu napędach.



Rysunek 5. Fragment patent mechanizmu zmiany skoku z napędem hydraulicznym  
 Źródło: Martin i McCarthy 1953

Kolejny pomysł mechanizmu zmiennego skoku, wykorzystujący podwójny układ śruba-nakrętka, został przedstawiony na rysunku 6. Łopata jest jednocześnie cylindrem siłownika i nakrętką przekładni śruba-nakrętka, gdzie rolę śruby pełni tłok. Tłok, oprócz pełnienia roli śruby, pełni również rolę nakrętki, ponieważ wewnątrz niego znajduje się gwintowany otwór. W otwór ten wchodzi nieruchoma śruba o przeciwnym kierunku zwojów niż jest w łopacie. Dzięki zastosowaniu gwintów o przeciwnym kierunku obydwaj wymuszenia obrotu nakładają się na siebie i łopata obraca się o większy kąt.



Rysunek 6. Mechanizm śrubowy zmiany kąta zaklinowania łopaty z napędem hydraulicznym – schemat  
Źródło: Bukowski i Łucjanek 1984

Mechanizm oparty na połączeniu śrubowym został opatentowany przez Thomasa Barisha jeszcze przed wybuchem II wojny światowej. Na rysunku 7 pokazano fragment patentu przedstawiającego, w mniej uproszczony sposób, cały mechanizm, w tym koła stożkowe (59) zapewniające identyczny obrót każdej z łopat.



Feb. 14, 1939.

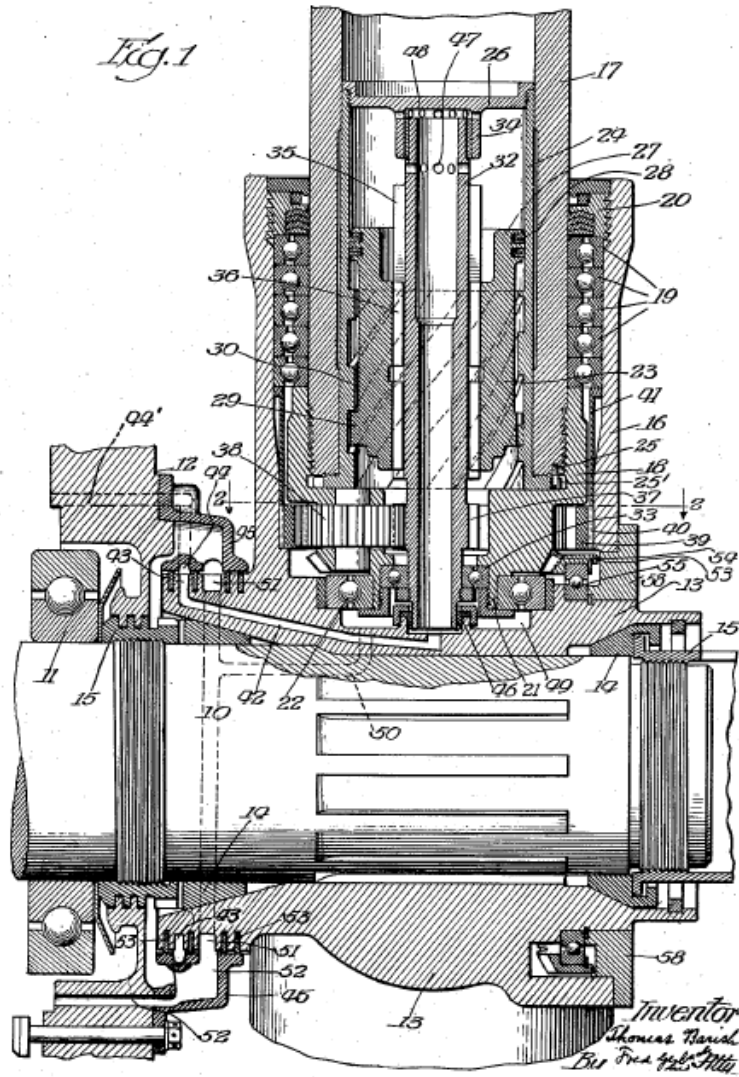
T. BARISH

2,147,078

CONTROLLABLE PITCH PROPELLER

Filed Aug. 5, 1935

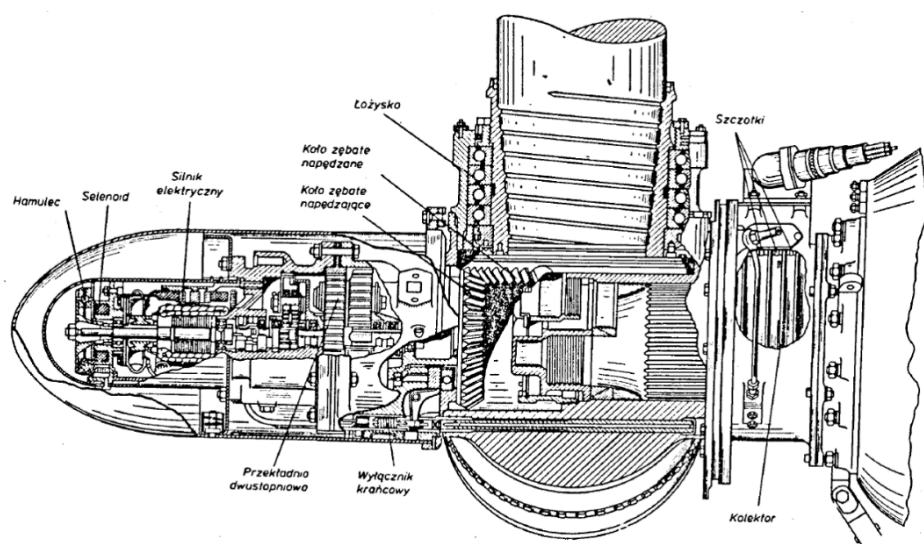
3 Sheets-Sheet 1



Rysunek 7. Fragment patentu mechanizmu śrubowego z napędem hydraulicznym  
Źródło: Barish 1935

### 1.3. Mechanizmy z napędem elektrycznym stosowane w samolotach

W mechanizmach wykorzystujących napęd z silnika elektrycznego podstawową metodą ustalania kąta zaklinowania łopaty wirnika jest zamocowanie u nasady łopaty stożkowego koła zębatego. W osi śmigła montuje się drugie współpracujące stożkowe koło zębate napędzane z przekładni. Dzięki temu, że silnik zamontowany jest osiowo razem z obracającym się wirnikiem, eliminuje się wiele problemów wynikających z przeniesienia energii niezbędnej do poruszenia mechanizmu z części nieruchomej samolotu do wirującego z dużą prędkością śmigła. Najprostszym rozwiązaniem jest zastosowanie komutatorów, przez które dostarczany będzie do silnika prąd. Przykład takiego mechanizmu obrazuje rysunek 8.

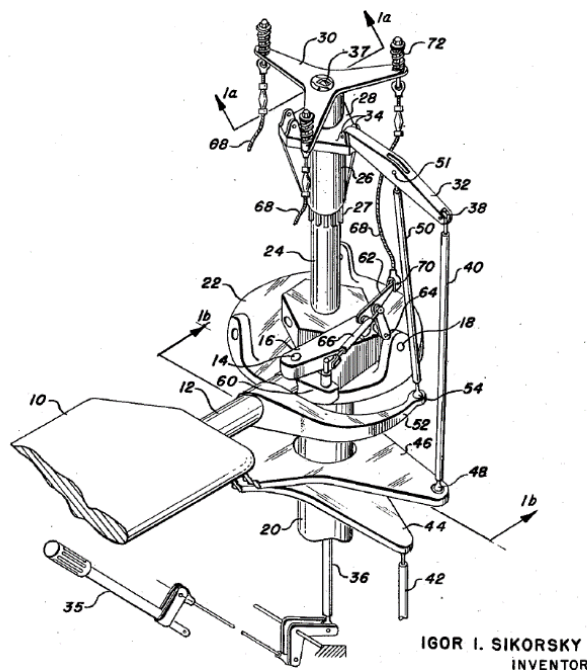


Rysunek 8. Elektryczny mechanizm zmiany skoku śmigła  
Źródło: Bukowski i Łuczjanek 1984

### 1.4. Mechanizm helikopterowy

Mechanizm zmiany skoku łopaty śmigła w helikopterach różni się w założeniach od mechanizmów samolotowych. W helikopterach niezbędne jest, aby kąt skręcenia każdej z łopat wirnika zależał od kąтового ustawienia osi łopaty w płaszczyźnie prostopadłej do osi wirnika. Wymaganie to wynika ze sposobu sterowania śmigłowcem. Jeżeli z lewej strony śmigłowca kąt natarcia łopat wirnika będzie większy niż z prawej, to z lewej strony będzie większa siła ciągu działająca na śmigłowiec, co spowoduje jego przechylenie na prawą stronę. Za jednego z wynalazców śmi-

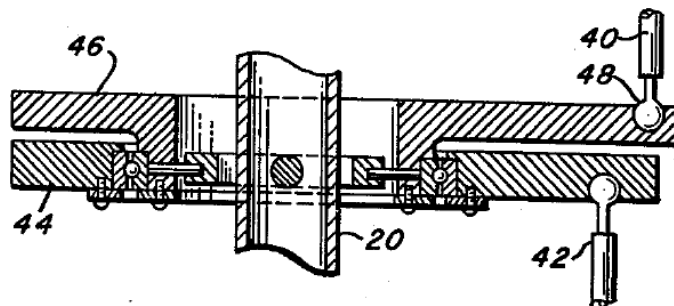
głowców uważa się Iwana Sikorskiego, którego fragment patentu przedstawiono na rysunku 9.



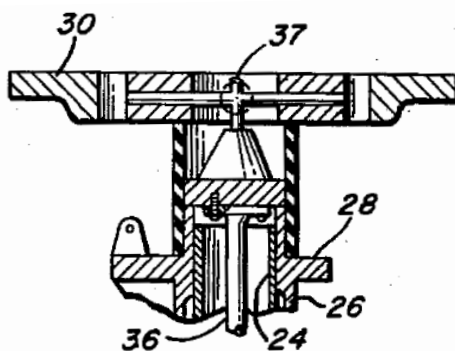
Rysunek 9. Mechanizm zmiany skoku śmigłowca  
Źródło: Sikorsky 1947

Podstawowa zasada sterowania kierunkiem przechylania śmigłowca, czyli regulacji, w którym momencie obrotu śmigła wokół jego osi skok łopaty ma być większy, a który mniejszy, pokazano na rysunku 10. Ustawiając płaszczyznę nieobracającego się krążka (44), regulując kierunek i wartość przechylenia względem wału wirnika, ustawia się w tej samej orientacji krążek (46). Krążki są połączone poprzez łożysko i górny krążek jest przymocowany do wału wirnika przez przegub Cardana tak, by obracał się razem z wałem.

Do regulacji wartości średniego kąta natarcia, co przekłada się bezpośrednio na siłę ciągu całego śmigła, służy popychacz (36). Jest on połączony bezpośrednio z dźwignią pilota. Popychacz jest zamontowany w łożysku tak, aby się nie obracał w przeciwnieństwie do tarczki (28). Podnoszenie i opuszczanie tarczki powoduje przesunięcie pionowe przymocowanego do niej końca dźwigni (32), która jest połączona z ciągnem sterującym kątem natarcia łopaty śmigła. Poruszanie końcem dźwigni (32) wywołuje zmianę średniej wysokości położenia cięgna sterującego (40). W rezultacie osiągnięte jest sumowanie się kąta natarcia wynikającego ze sterowania, jak i z założonego ciągu (rys. 11).



Rysunek 10. Mechanizm zmiany skoku śmigłowca – mechanizm przeniesienia sterowania  
Źródło: Sikorsky 1947



Rysunek 11. Mechanizm zmiany skoku śmigłowca – mechanizm regulujący średni kąt natarcia łopaty  
Źródło: Sikorsky 1947

Aktualnie, oprócz załogowych helikopterów, istnieją śmigłowce zdalnie sterowane, używane przede wszystkim przez modelarzy. Zasady działania małych jednostek są praktycznie identyczne jak dużych, jednak w tak niewielkich konstrukcjach stosuje się uproszczenia. Na rysunku 12 przedstawiono jeden z możliwych do kupienia mechanizmów dla helikoptera zdalnie sterowanego – w skrócie RC (ang. *Radio Controlled*).

Łopaty są zamontowane obrotowo w łopach, które mają mimośrodowo zamocowaną dźwignię. Do dźwigni przymocowany jest na przegubie kulistym popychacz, który z drugiej strony jest połączony z pierścieniem zamontowanym wahliwie i zarazem przesuwnie na wale napędzającym. Pierścień jest połączony poprzez łożysko z pierścieniem sterującym i ma trzy przyłącza dla popychaczy na przegubach kulowych. Każdy z popychaczy jest przymocowany do oddzielnego serwomechanizmu, który może nim przesuwac. Serwomechanizmy poprzez popychacze wyznaczają



Rysunek 12. Mechanizm zmiany skoku śmigłowca RC

Źródło: <https://www.ercmarket.com/cnc-alu-main-rotor-grips-for-mikado-logo-500-550-series-avgrip-500.html>

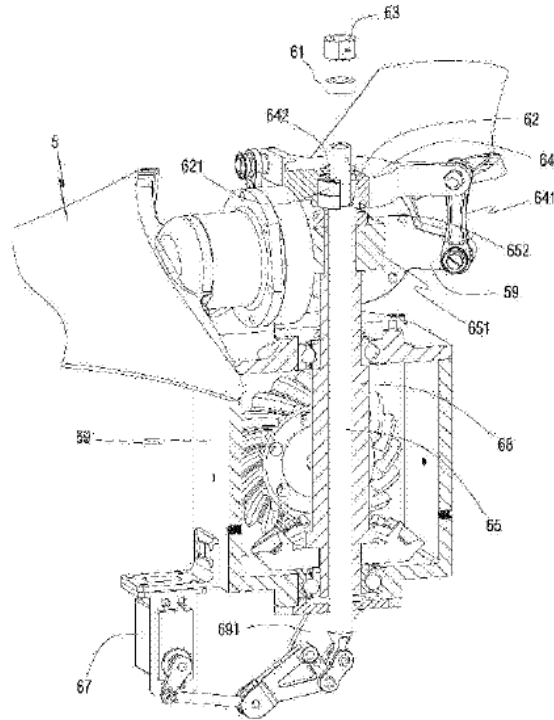
płaszczyznę. Położenie pionowe punktu będącego na przecięciu płaszczyzny z osią wału napędowego decyduje o średnim kącie natarcia łopat, natomiast przechylenie tej płaszczyzny decyduje o kierunku i wielkości przechyłu.

Dopiero od kilkunastu lat technika osiągnęła stopień zaawansowania, który pozwala na budowanie w pełni funkcjonalnych dronów. Obecnie jest niewiele przypadków zastosowania zmiennego skoku śmigła w dronach. Istnieje jednak kilka artykułów naukowych, w których autorzy wskazują zalety stosowania zmiennego skoku w dronach, zwłaszcza pionowego startu i lądowania (Chipade i in. 2018). Dzięki zastosowaniu zmiennego skoku poprawia się zdecydowanie osiągi dronów oraz daje im nowe możliwości.

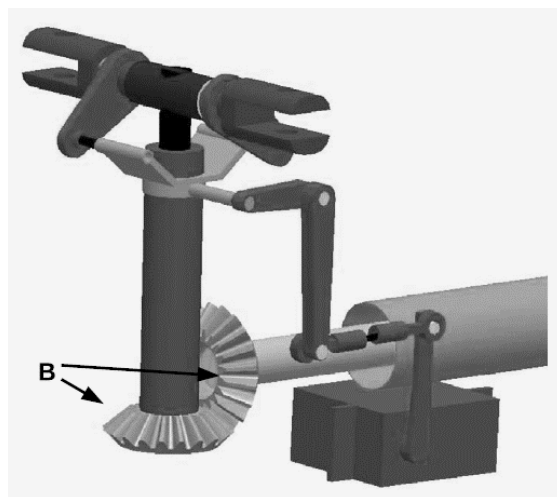
Powstałe patenty zastosowania zmiennego skoku w dronach oparte są głównie na zmodyfikowanym mechanizmie stosowanym w helikopterach (rys. 13).

Przedstawiona w patencie konstrukcja jest w większości kopią pomysłu I. Sikorskiego (rys. 9), z pominięciem wszystkich części przeznaczonych do kierowania przechyłu. Serwomechanizm (67) porusza układem dźwigni, przesuującym cięgiem, w drążonym wale, które jest ułożyskowane w pierścieniu nad śmigłem. Do pierścienia są przymocowane dźwignie połączone jednocześnie z trzpieniami przymocowanymi mimośrodowo do łopat. Poruszanie serwomechanizmem powoduje jednakową zmianę skoku dla wszystkich łopat.

Podobną koncepcję przedstawiono w artykule opisującym BSP (Bezzałogowy Statek Powietrzny) typu VTOL (ang. *Vertical Take Off and Landing*) Tilt Sitter (Chipade i in. 2018). Koncepcja została przedstawiona na rysunku 14. Jedyna różnica, jaką można zauważyć pomiędzy tą konstrukcją a przedstawioną na rysunku 13, to brak przeprowadzenia popychacza przez wał napędzający śmigło.



Rysunek 13. Mechanizm zmiany skoku w dronie  
Źródło: 刘新民 i in. 2017



Rysunek 14. Mechanizm zmiany skoku w dronie typu VTOL  
Źródło: Chipade i in. 2018

## 2. Przyczyny rozwoju technologii dla małych jednostek latających

Zmienny skok śmigła jest obecnie wykorzystywany przede wszystkim do dwóch celów: sterowania kierunkiem i prędkością strugi powietrza pod śmigłem, co jest podstawą działania helikopterów, oraz dopasowania geometrii śmigła do aktualnej prędkości statku powietrznego, aby uzyskać maksymalną sprawność układu napędowego. Dzięki temu można latać szybciej i bardziej ekonomicznie.

Aktualnie można wskazać wiele różnorodnych konstrukcji małych jednostek latających pionowego startu i lądowania takich jak: płatowce z dodatkowymi silnikami do lotu pionowego (Zaludin i Harituddin 2019), konstrukcje typu tail-sitter (Wu i in. 2019; Wang i in. 2019; Phillips i in. 2016), tiltrotor (Liu i in. 2019; Chen i in. 2017) oraz tiltwing (Cetinsoy i in. 2012). Konstrukcje te zakładają wykorzystanie śmigieł o stałym skoku. Konsekwencją tego jest kompromis między maksymalnym udźwigniem, wymagającym odpowiedniego skoku, dla którego silnik osiąga swoje maksymalne parametry, a maksymalną prędkością przelotową, dla której skok śmigła powinien wzrastać wraz z jej wzrostem.

Do tej pory większość publikacji dotyczących badań nad śmigłami o zmiennym skoku dotyczyła wirników śmigłowców (Lee i in. 2011; Shrestha i in. 2016; Panayotov i in. 2018). Tylko nieliczne publikacje (Cohen i in. 2014; Manchin i in. 2018) dotyczyły małych jednostek BSP typu fixed-wing lub multi-rotor, z uwagi na braki rynkowych konstrukcji. Niestety dostępne mechanizmy przystosowane są w większości do małych, maksymalnie 10-calowych, plastikowych śmigieł, które nie znajdują zastosowania w jednostkach nastawionych na duży udźwig, między innymi do przewożenia paczek.

W związku z tym istnieje jeszcze sporo niezbadanych problemów w fizyce lotu małych jednostek latających. Istotnym problemem jest brak dobrego mechanizmu potrafiącego zmieniać skok dużych śmigieł, dochodzących rozmiarami do 30 cali.

Głównym wynikiem badań autorów tej pracy jest konstrukcja mechanizmu zmiennego skoku łopata śmigła przeznaczonego do lekkich jednostek BSP, pozwalająca w niewielkich jednostkach korzystać z pełnego zakresu mocy silnika podczas wszystkich faz lotu. Rozwiązanie to zapewnia lepsze wykorzystanie możliwości BSP. Badania przeprowadzone w trakcie konstruowania są naturalnym kierunkiem rozwoju lotnictwa bezzałogowego, niezbędnym do dalszego rozwoju tej dziedziny techniki, która zaczyna mieć coraz większy wpływ na otaczający nas świat.



### 3. Założenia konstrukcyjne mechanizmu

**N**a wstępnym etapie projektowania mechanizmu powstały pewne założenia, jakie powinien on spełniać, m.in.:

- 1) niewielkie rozmiary,
- 2) niska masa,
- 3) wykorzystanie silnika z drążonym wałem,
- 4) możliwość dokładnego wyważenia na etapie montażu,
- 5) możliwość precyzyjnego ustawiania kąta zaklinowania łopat śmigła,
- 6) konstrukcja mieszcząca się w cieniu aerodynamicznym silnika.

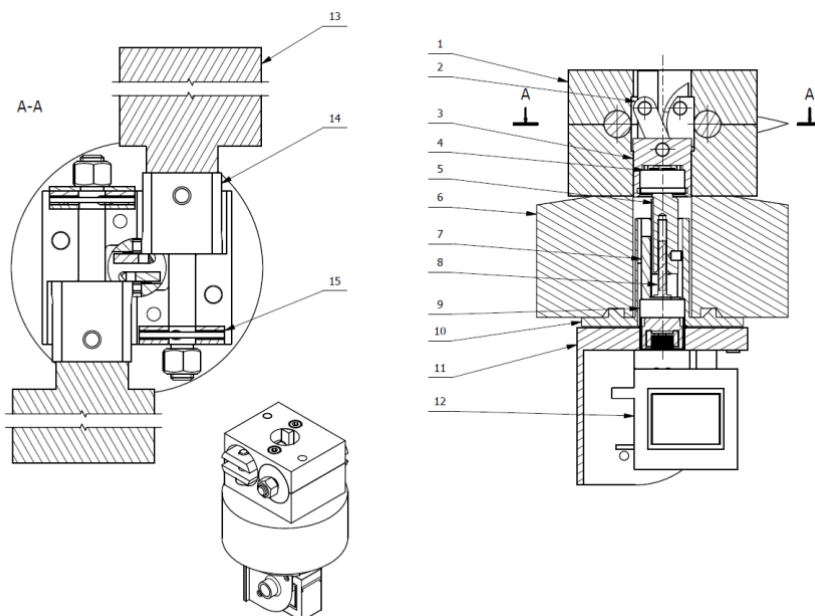
W związku z tym, że mechanizm ma mieć zastosowanie w dronach, do jego zbudowania zostały użyte elementy, które są używane w tego rodzaju jednostkach latających, w celu zapewnienia kompatybilności z dotychczasowymi rozwiązaniami układów sterowania.

### 4. Opis i zasada działania

**M**echanizm zmiennego skoku łopat śmigła przedstawiono na rysunku 15. Układem centralnym mechanizmu jest przerobiony serwomechanizm (12) umieszczony w obudowie (11) wraz z przekładnią śruba-nakrętka. Przekładnia składa się ze stalowej śruby (8) ułożyskowanej w tulei (10) przez łożysko (9), oraz nakrętki (5) wykonanej z igliduru. Połączenie wykazuje samohamowność oraz brak znaczących luzów. Na nakrętce znajduje się zworka potencjometru liniowego (7). Potencjometr jest połączony bezpośrednio z płytką sterującą w serwomechanizmie (12), zapewniając w ten sposób kontrolę położenia przekładni i brak konieczności bazowania, niezbędnego w przypadku stosowania enkoderów. Układ jest osadzony i centrowany na spodniej części silnika BLDC (6). Silnik ma wał drążony, w którym mieści się część mechanizmu. Na nakrętce (5) jest osadzone łożysko (4), które pośredniczy w przekazaniu napędu wzdłużnego z nieobracającej się nakrętki (5) na obracający się razem z silnikiem suwak (3). Suwak jest prowadzony w dwuczęściowym, iglidurowym korpusie (1) osadzonym na silniku. Do suwaka przymocowane są dźwignie (2), które zamieniają ruch postępowy na ruch obrotowy łap (14). Łożyskowanie łap zapewniają łożyska igiełkowe (15). W łapie jest umocowana łopata śmigła, która obraca się razem nią. W ten sposób w niewielkiej masie i objętości zawarto układ pozwalający na zmianę kąta zaklinowania łopat śmigła na obracającym się silniku.

Ważną cechą mechanizmu jest sposób sterowania oraz bezpieczeństwo w razie awarii. Podczas projektowania zachowano sposób sterowania serwomechanizmem, dzięki czemu układ jest kompatybilny z większością kontrolerów lotu stosowanych





Rysunek 15. Mechanizm zmiennego skoku łopaty śmigła  
Źródło: opracowanie własne

w niewielkich BSP. Dzięki temu, że układ jest samohamowny i nie wymaga pozycjonowania, awaria systemu sterowania lub samego serwomechanizmu w trakcie lotu nie spowoduje utraty silnika, a śmigło pozostanie w swojej ostatniej pozycji. Jest to niezwykle istotna cecha, której brak w większości rozwiązań stosowanych obecnie w jednostkach bezzałogowych.

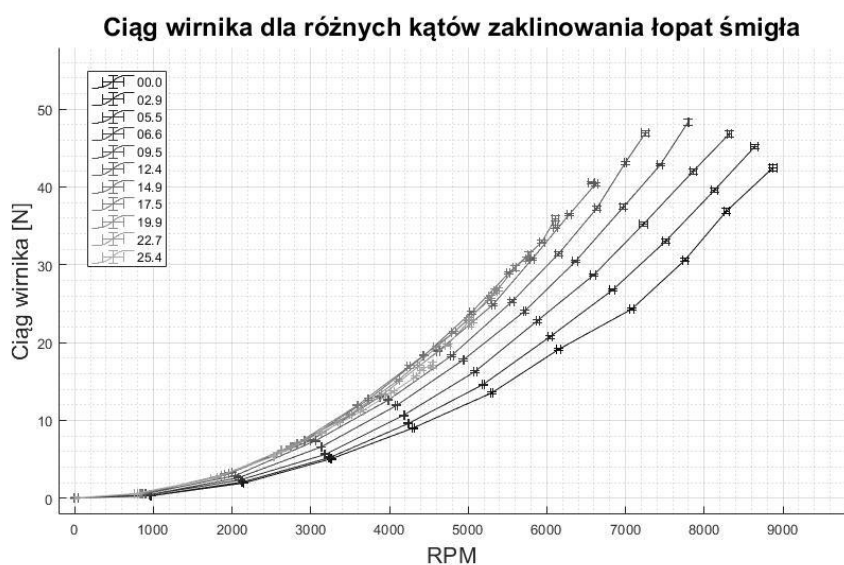
## 5. Badania mechanizmu

**P**rzestawiony wcześniej mechanizm został zbudowany i przetestowany na stanowisku pomiarowym widocznym na rysunku 16. Waga mechanizmu to 185 g. Stanowisko ma omawiany wcześniej mechanizm wraz z zamontowanymi łopatom ze śmigła  $16 \times 6$  (oryginalnie), wykonanymi z włókna węglowego, zmodyfikowane mocowanie przystosowane do mocowania czujnika siły, 6-osiowy czujnik siły i osprzęt modelarski do sterowania silnikiem wraz z mechanizmem.

Badanie polegało na pomiarze siły ciągu silnika, przy określonej wartości skoku śmigła poprzez zwiększanie prędkości obrotowej silnika. Po pomiarze następowała zmiana skoku śmigła i rozpoczęcie kolejnego cyklu pomiarowego. Podstawowe wyniki badań pokazano na rysunku 17.



Rysunek 16. Stawisko badawcze  
Źródło: opracowanie własne



Rysunek 17. Ciąg wirnika dla różnych skoków śmigła  
Źródło: opracowanie własne

Na wykresie można zauważyć, że zwiększając skok śmigła, zwiększa się generowaną siłę ciągu. Ponadto większy skok stawia większy opór silnikowi, który ze względu na zabezpieczenie przed termicznym zniszczeniem ma ograniczony pobór

prądu, a co za tym idzie, maksymalną moc. Zatem im większy skok, tym mniejsze maksymalne osiągnięte prędkości obrotowe silnika.

Podczas badań stwierdzono poprawne działanie mechanizmu pod obciążeniem. Nie odnotowano istotnych wibracji. Testy będą prowadzone w przyszłości na platformie prezentowanej na rysunku 18, przekształconej na dron typu tilt-rotor. Konstrukcja ta charakteryzuje się możliwością pionowego startu i lądowania, a po wystartowaniu możliwością przejścia do lotu poziomego po obróceniu gondoli silników. W tym trybie lotu konieczne będzie zwiększenie skoku śmigieł tak, by wykorzystać pełną moc silników i osiągnąć maksymalną prędkość. Przeznaczeniem drona jest służba w ratownictwie górskim, gdzie nie ma pasów startowych, a jest konieczność pokonywania dalekich dystansów. Ze względu na charakter planowanych misji bardzo istotne jest, aby wykorzystywać pełnię możliwości jednostki latającej w każdej fazie lotu.



Rysunek 18. Platforma testowa mechanizmu  
Źródło: opracowanie własne

## 6. Pozatechniczne efekty wyników badań

**U**niwersalność urządzenia oraz płynące z jego użytkowania korzyści uzasadniają przekonanie, że komercjalizacja wynalazku jest nieuniknionym następstwem prowadzonych badań. Dalsze prace rozwojowo-wdrożeniowe niosą również korzyści pozatechniczne. Projekt niewątpliwie wpisuje się w koncepcję zrównoważonego rozwoju wspierając realizację niektórych z siedemnastu celów przedstawionych przez ONZ (Organizację Narodów Zjednoczonych). Pierwszą i najważniejszą cechą rozwiązania jest jego innowacyjność, która może sprostać nowym ekonomicznym i środowiskowym wyzwaniom w bardzo szybko rozwijającym się sektorze bezzałogowego lotnictwa. Charakter prowadzonej pracy idealnie wpisuje się w realizację 9. celu ONZ związanego ze zrównoważonym rozwojem. Innowacje,

jakie wprowadza praca, mogą się przyczynić do realizacji 3. i 11. celu. Usługi świadczone za pomocą BSP dotyczą wielu dziedzin życia ludzkiego, dlatego ich rozwój oraz wzrost możliwości może znacząco poprawić jakość życia oraz bezpieczeństwo człowieka. Opiswany mechanizm jest częścią projektu mającego na celu budowę BSP do zadań w ratownictwie górskim. Powodzenie projektu będzie miało bezpośredni wpływ na zwiększenie efektywności i bezpieczeństwa prowadzonych działań ratowniczo-medycznych w górach. Na ryzyko są narażeni nie tylko poszkodowani, ale muszą się z nim mierzyć także pracujący ratownicy. Rozwiązanie pozwalające na wykonywanie części działań przez BSP pozwoli na przyspieszenie działań poszukiwawczych i transportowych oraz pozwoli na redukcję zagrożenia życia ratowników przez przejście niektórych z działań. To jednak nie jedyny sposób na wspieranie medycyny.

Obecnie w krajach Afryki wykorzystuje się drony do rozprowadzania środków medycznych wymagających specjalnych warunków przechowywania, szczególnie tam, gdzie nie ma rozwiniętej infrastruktury drogowej. Powiększenie zasięgu i maksymalnego udźwigu dronów przez stosowanie przedstawionego w pracy mechanizmu pozwoli placówkom dostawczym na zwiększenie obszaru działania, a przez to dostarczenie niezbędnych zapasów do większej ilości potrzebujących. Poprawa zasięgu i zwiększenie maksymalnej masy ładunkowej przyczynia się również do rozwoju szeroko pojętego rynku logistycznego. W wielu przypadkach samochody dostarczają niewielką masę przesyłek na bardzo duże dystanse, co powoduje duże zużycie paliwa i przy okazji zanieczyszcza środowisko. Zwiększenie możliwości ładunkowych elektrycznych jednostek latających może wyeliminować problem marnowania energii paliw kopalnych.

## 7. Podsumowanie i wnioski

Zaprojektowany mechanizm jest w pełni funkcjonalnym urządzeniem różniącym się znacznie od dotychczas stosowanych. Sama konstrukcja jest unikatowa, nie tylko ze względu na swój kształt, ale również ze względu na wielkość, wagę oraz zastosowane materiały. Dotychczasowe konstrukcje były duże oraz mało aerodynamiczne w przeciwieństwie do tej zaprezentowanej w pracy. Osiągnięto to dzięki zastosowaniu mechanizmu mieszczącego się w obrysie silnika i posiadającego możliwość zamontowania kołpaka.

Podstawową zaletą zaprezentowanego urządzenia jest możliwość zmiany skoku w jednostkach wykorzystujących śmigła z zakresu od 10 do 30 cali średnicy, czyli w większości profesjonalnych dronów. Korzyści ze stosowania tego mechanizmu mogą znacząco poprawić osiągi budowanych jednostek latających. Ponieważ jest to konstrukcja kompatybilna z większością kontrolerów lotu, możliwe jest

przerobienie już istniejących egzemplarzy dzięki wymianie samego silnika na silnik połączony z mechanizmem. Możliwość efektywnego korzystania z pełnej mocy silnika podczas lotu z dowolną prędkością wynika z zastosowania zmiennej geometrii wirnika.

W dalszych badaniach sporządzone zostaną dokładne charakterystyki śmigła z różnymi łopatami dla różnych prędkości powietrza. Układ zostanie również przetestowany na jednostkach latających w celu doświadczalnego zmierzenia poprawy osiągnięć, takich jak zasięg oraz prędkość maksymalna. Ponieważ dotychczas stosowanie zmiennego skoku śmigła w dronach jest bardzo mocno ograniczone brakiem dobrych rozwiązań technicznych, dalsze badania nad konstrukcją wydają się niezbędne w celu pełnej optymalizacji.

## Literatura

- BARISH T. 1935. *Controllable pitch propeller*. USA Patent 2147078, 5 lipiec.
- BUKOWSKI J. i ŁUCJANEK W. 1984. *Napęd śmigłowy teoria i konstrukcja*. Ministerstwo Obrony Narodowej, Warszawa.
- CETINSOY E., DIKYAR S., HANCER C., ONER K.T., SIRIMOGLU E., UNEL M. i AKSIT M.F. 2012. *Design and construction of a novel quad tilt-wing UAV*. *Mechatronics* nr 22, t. 6, s. 746–756.
- CHEN C., ZHANG J., ZHANG D. i SHEN L. 2017. *Control and flight test of a tilt-rotor unmanned aerial vehicle*. *International Journal of Advanced Robotic Systems* nr 14, t. 1, s. 1–12.
- CHIPADE V.S., ABHISHEK, KOTHARI M. i CHAUDHARI R.R. 2018. *Systematic design methodology for development and flight testing of a variable pitch quadrotor biplane VTOL UAV for payload delivery*. *Mechatronics* nr 55, s. 94–114.
- COHEN R., MICULESCU D., REILLEY K., PAKMEHR M. i FERON E. 2014. *Online Performance Optimization of a DC Motor Driving a Variable Pitch Propeller*. 2014 American Control Conference, University of Michigan, Portland.
- D'ANGINA J. 2014. *Vought F4U Corsair*. Osprey Publishing, Oxford.
- HARRIS F. 2011. *Introduction to Autogyros, Helicopters and Other V/STOL Aircraft, Volume 1: Overview and Autogyros*. NASA, Moffett Field.
- LEE B.-E., BYUN Y.-S., KIM J. i KANG B.-S. 2011. *Experimental hover performance evaluation on a small-scale rotor using a rotor test stand*. *Journal of Mechanical Science and Technology* nr 25, t. 6, s. 1449–1456.
- LIU N., CAI Z., ZHAO J. i WANG Y. 2020. *Predictor-based model reference adaptive roll and yaw control of a quad-tiltrotor UAV*. *Chinese Journal of Aeronautics* nr 33, t. 1, s. 282–295.
- MANCHIN A., LAFTA W.M. i DAO D.V. 2018. *Smart variable pitch propeller system for unmanned aerial vehicles*. *International Journal of Engineering & Technology* nr 7, t. 4, s. 5238–5241.
- MARTIN E. i MCCARTHY C.D. 1953. *Propeller control mechanism*. USA Patent 2643077.  
[Online] <https://www.gracesguide.co.uk/images/d/d7/Im1929v147-p35a.jpg> [Dostęp: 20.01.2020].  
[Online] <http://enginehistory.org/Propellers/HamStdSH/HamStdSH01.shtml> [Dostęp: 20.01.2020].  
[Online] <https://www.ercmarket.com/cnc-alu-main-rotor-grips-for-mikado-logo-500-550-series-av-grip-500.html> [Dostęp: 20.01.2020].
- PANAYOTOV F., DOBREV I., MASSOUH F. i TODOROV M. 2018. *Experimental study of a helicopter rotor model in hover*. 10<sup>th</sup> International Scientific Conference on Aeronautics, Automotive and Railway Engineering and Technologies, MATEC Web of Conferences.

- PHILLIPS B.P., HRISHIKESHAVAN V., RAND O. i CHOPRA I. 2016. *Design and Development of a Scaled Quadrotor Biplane with Variable Pitch Proprotors for Rapid Payload Delivery*. AHS International 72<sup>nd</sup> Annual Forum & Technology Display, American Helicopter Society, West Palm Beach.
- SIKORSKY I. 1947. *Helicopter rotor*. USA Patent 2627929, 26 marzec.
- SHRESTHA R., BENEDICT M., HRISHIKESHAVAN V. i CHOPRA I. 2016. *Hover Performance of a Small-Scale Helicopter Rotor for Flying on Mars*. Journal of Aircraft nr 53, t. 4, s. 1160–1167.
- WANG W., ZHU J., KUANG M., YUAN X., TANG Y., LAI Y., CHEN L. i YANG Y. 2019. *Design and hovering control of a twin rotor tail-sitter UAV*. Science China Information Sciences nr 62, t. 9, nr 194202, s. 1–3.
- WU Y., DU X., DUIVENVOORDEN R. i KELLY J. 2019. *The Phoenix Drone: An Open-Source Dual-Rotor Tail-Sitter Platform for Research and Education*. International Conference on Robotics and Automation, IEEE, Montreal.
- YOUNG W. 1987. *The helicopters*. Time-Life Books, Alexandria.
- ZALUDIN Z. i HARITUDDIN A.S.M. 2019. *Challenges and Trends of Changing from Hover to Forward Flight for a Converted Hybrid Fixed Wing VTOL UAS from Automatic Flight Control System Perspective*. 9<sup>th</sup> International Conference on System Engineering and Technology, IEEE, Shah Alam.
- 刘新民 i in. 2017. *Rotor wing variable propeller pitch mechanism of UAV (Unmanned Aerial Vehicle)*. Chi-ny Patent CN107719661A, 8 listopad.



ISBN 978-83-956380-9-1