

INSTYTUT GOSPODARKI SUROWCAMI MINERALNYMI I ENERGIA,
POLSKIEJ AKADEMII NAUK

Infrastruktura i środowisko w gospodarce o obiegu zamkniętym



Redakcja naukowa:
Anna Krakowiak-Bal, Mateusz Malinowski, Jakub Sikora

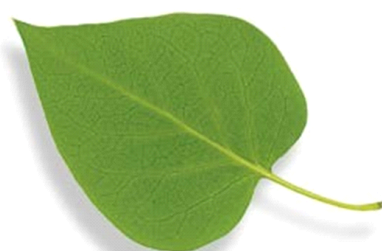
KRAKÓW 2021

INSTYTUT GOSPODARKI SUROWCAMI MINERALNYMI I ENERGIA,
POLSKIEJ AKADEMII NAUK

Infrastruktura i środowisko w gospodarce o obiegu zamkniętym

Redakcja naukowa:

Anna Krakowiak-Bal, Mateusz Malinowski, Jakub Sikora



KRAKÓW • 2021
Wydawnictwo IGSMiE PAN

RECENZENCI

prof. dr hab. inż. Jerzy GRUSZCZYŃSKI
dr hab. inż. Anna SZELAĞ-SIKORA

REDAKTORZY TOMU

dr Anna KRAKOWIAK-BAL, dr inż. Mateusz MALINOWSKI, dr hab. inż. Jakub SIKORA, prof. UR
Uniwersytet Rolniczy im. H. Kołłątaja w Krakowie



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 Sudol

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

Printed in Poland

Kraków 2021

ISBN 978-83-959215-7-5

ISBN elektroniczny 978-83-959215-8-2

Spis treści

<i>Anna KRAKOWIAK-BAL, Mateusz MALINOWSKI, Jakub SIKORA</i> Przedmowa	5
ENERGIA I ZAGOSPODAROWANIE ODPADÓW	
<i>Jolanta Barbara CICHOWSKA</i> Perspektywy rozwoju odnawialnych źródeł energii w opinii mieszkańców miast oraz wsi	9
<i>Jakub SIKORA, Piotr ŁYSZCZARZ</i> Analiza zużycia potencjalnej energii cieplnej do celów bytowo-gospodarczych w gminach województwa świętokrzyskiego.....	22
<i>Jolanta Barbara CICHOWSKA</i> Zalety i wady montażu instalacji fotowoltaicznych	33
<i>Jarosław KNAGA, Stanisław FAMIIELEC, Kazimierz RUTKOWSKI, Joanna SZCZĘSNY, Adrianna SŁOWIK</i> Perspektywy i ograniczenia wykorzystania nowych elementów grzejnych w uprawach pod osłonami	46
<i>Maciej GLINIAK, Stanisław FAMIIELEC, Mateusz MALINOWSKI</i> Audyty energetyczne jako narzędzie poprawy efektywności energetycznej i ekonomicznej procesu produkcyjnego. Studium przypadku: instalacja do przetwarzania odpadów komunalnych	57
<i>Arkadiusz BIESZCZAD</i> Wykorzystanie procesu zestalania jako metody zagospodarowania odpadów – analiza SWOT wybranych rozwiązań technicznych	66
BIOGOSPODARKA I ZASOBY WODNE	
<i>Krzysztof WIERZBICKI, Andrzej EYMONTT, Witold Jan WARDAL</i> Wykorzystanie antropogenicznych osadów dennych w procesie wdrażania biogospodarki	79
<i>Adam BRYSIWICZ, Agata KORZELECKA-ORKISZ, Adam TĄNSKI, Krzysztof FORMICKI</i> Charakterystyka warunków siedliskowych poprzez ocenę granulacji podłoża jako substratu do rozrodu ryb łososiowatych w rzece Rega (płn.-zach. Polska)	88
<i>Krzysztof WIERZBICKI, Andrzej EYMONTT, Witold Jan WARDAL</i> Innowacyjne technologie dezynfekcji i odmulniania dna stawowego oraz rowów	101

<i>Adam BRYSEWICZ, Michał ROGACKI, Jarosław DĄBROWSKI, Agnieszka KOZIOŁ, Krzysztof FORMICKI</i> Wpływ użytkowania rolniczego zlewni na warunki fizykochemiczne wody w niewielkich śródpolnych zbiornikach wodnych	113
<i>Ariel ŁANGOWSKI, Roman ROLBIECKI</i> Analiza kosztorysowa w planowaniu inwestycji nawodnieniowej w terenach zieleni	126
<i>Anna FIGAS, Barbara JAGOSZ, Stanisław ROLBIECKI, Roman ROLBIECKI, Piotr STACHOWSKI</i> Wpływ przewidywanych zmian klimatu na potrzeby wodne kalafiora późnego w rejonie Bydgoszczy (centralna Polska)	134
<i>Muhammet BÖCEK, Yusuf UCAR</i> The response of lisianthus (<i>Eustoma grandiflorum</i> Raf. Shinn.) on different irrigation strategies	143
<i>Sibel IPEKESEN, Fatma BASDEMİR, Murat TUNC, Seval ELİS, Sevgi SAYLAK, B. Tuba BİCER</i> The effect of fertilization on the above-ground and underground plant parts in chickpea varieties	157
<i>Ariel ŁANGOWSKI, Karol KOTWICA</i> Wykorzystanie cyfrowych narzędzi grafiki inżynierskiej w urządzaniu terenów zieleni	172
<i>Aneta BODZIONY, Anna LIS, Maciej GLINIĄK</i> Unieszkodliwianie zanieczyszczeń ropopochodnych w glebie – porównanie metod chemicznych i mikrobiologicznych	180
TRANSPORT I LOGISTYKA	
<i>Mateusz MALINOWSKI, Jacek SALAMON, Anna KRAKOWIAK-BAL, Klaudia KWIECIEŃ</i> Środowiskowa ocena transportu intermodalnego	193
<i>Karolina BRZOZA, Justyna OBRZUT, Klaudia KWIECIEŃ, Mateusz MALINOWSKI, Jacek SALAMON, Anna KRAKOWIAK-BAL</i> Aspekty projektowe terminali intermodalnych – studium przypadku: terminal lądowy	205
<i>Aleksandra SZCZEPAŃSKA, Anna KRAKOWIAK-BAL, Urszula ZIEMIAŃCZYK</i> Racjonalne wykorzystanie zasobów na przykładzie gospodarki magazynowej – studium przypadku	217
PODSUMOWANIE	
<i>Mateusz MALINOWSKI, Jakub GŁOWACKI, Piotr KOPYCIŃSKI, Łukasz MAMICA</i> Ocena transformacji kraju w kierunku gospodarki o obiegu zamkniętym – propozycja wskaźników pomiaru dla obszaru „zrównoważona konsumpcja”	231

Przedmowa

W monografii przedstawiono zagadnienia łączące wyzwania związane z wdrażaniem gospodarki o obiegu zamkniętym (GOZ) z uwarunkowaniami infrastrukturalnymi i środowiskowymi. Gospodarka o obiegu zamkniętym (ang. *circular economy*) to nowy system ekonomiczny, w którym wartość produktów, materiałów i zasobów jest utrzymywana tak długo, jak to możliwe, a wytwarzanie odpadów ograniczane jest do minimum (KE 2015). Idea GOZ pojawiła się w latach sześćdziesiątych XX wieku. Profesor Boulding porównywał wówczas planetę Ziemię do pojedynczego statku kosmicznego, który nie ma nieograniczonych zasobów. Sama koncepcja tego systemu mówiła o tym, że wszystkie wyjścia z systemu są wejściami, które podlegają ciągłemu recyklingowi, a poziom „zapasów do przetworzenia” zależy od rozwoju technologicznego państwa (Boulding 1966). W latach siedemdziesiątych ubiegłego wieku wskazywano na istotną rolę 6 elementów przyrody, które należy objąć szczególną troską w aspekcie GOZ: surowce energetyczne (w tym woda), metale, surowce niemetaliczne, biomasa leśna, zasoby rolnicze oraz zasoby fauny i flory (Komar 1975). Aktualne modele gospodarcze w wielu krajach Unii Europejskiej opierają się na liniowym procesie przechodzenia od wydobycia (pozyskania) wyżej wymienionych surowców przez ich przetwarzanie, użytkowanie, aż do unieszkodliwiania zużytych towarów. Jaworski i Grochowska (2017) stwierdzają, że GOZ stanowi zerwanie z modelem liniowym i wymaga wdrożenia niekończącego się projektowania pozwalającego na osiągnięcie pętli (cykli) obejmujących maksymalne wydłużenie okresu użytkowania produktów i komponentów.

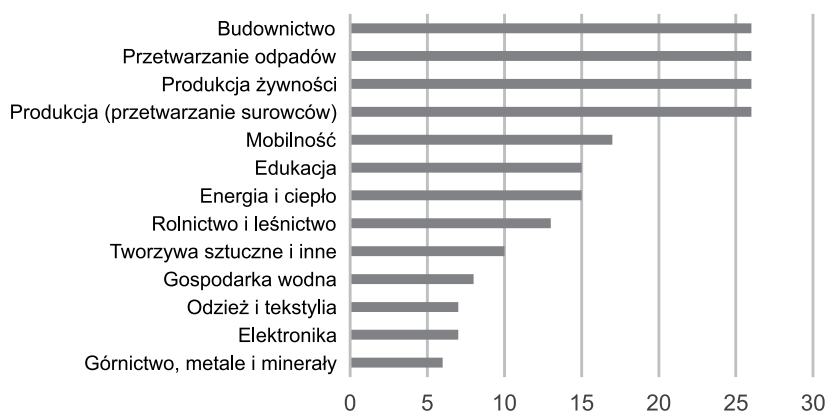
Komisja Europejska promuje ideę przejścia do gospodarki o zamkniętym obiegu, gdzie produkty, materiały (surowce) i zasoby (często ujmowane w funkcji wartości) są utrzymywane w gospodarce tak długo, jak to tylko możliwe, a wytwarzanie odpadów jest zminimalizowane (prowadzone zgodnie z hierarchią postępowania z odpadami) (KE 2015). Celem wspomnianego „przejścia”, czyli zmiany modelu systemu ekonomicznego, jest budowa i rozwój zrównoważonej, niskoemisyjnej, zasobooszczędnej i konkurencyjnej gospodarki. „Przejście” z modeli liniowych na cyrkularne powinno przynieść zmiany w systemach ekonomicznych, czyniąc je bardziej zrównoważonymi, a także przyczynić się do realizacji celów klimatycznych i zachowania zasobów. Ponadto wdrożenie GOZ powinno wiązać

się z tworzeniem nowych miejsc pracy i generować przewagę konkurencyjną dla Europy w świecie, który przechodzi głębokie zmiany (KE 2018). Należy jednak zaznaczyć, że rozwój GOZ jest możliwy jedynie przy zapewnieniu odpowiednio wyspecjalizowanej infrastruktury, która będzie wspomagała wszystkie procesy oszczędzania zasobów (np. wodnych, energetycznych, mineralnych) i odzysku odpadów.

Wdrażanie gospodarki o obiegu zamkniętym, cechującej się efektywnym wykorzystaniem i zarządzaniem zasobami, stanowi współczesne wyzwanie dla przedsiębiorców, władz różnego szczebla oraz w skali globalnej. Wdrożenie modelu GOZ wymaga współpracy wielu podmiotów, często lokalnych, i zidentyfikowania przepływu materiałów w kolejnych etapach cyklu życia produktu, zaczynając od pozyskania surowca, przez projektowanie, produkcję, konsumpcję, a także zbieranie odpadów i ich zagospodarowanie (Kulczycka 2019). Bardzo często podkreśla się także konieczność ujęcia procesowego GOZ, tak by uwzględnić i skoordynować wysiłki podejmowane przez różne strony zaangażowane w jej realizację.

Pojęcie GOZ jest niezwykle pojemne i wdrażane w krajach, regionach, miastach Europy i całego świata w myśl własnych koncepcji, bezpośrednio przystosowanych do sytuacji gospodarczej danego kraju lub regionu (Głowacki i in. 2019). Różnorodność zagadnień i sektorów gospodarczych, w których podejmowane są działania na rzecz zamkniętego obiegu materiałów i redukcji zużycia zasobów, prowadzi w konsekwencji do wdrażania planów i strategii dla kompleksowej ochrony środowiska i rozwoju infrastruktury.

Rola infrastruktury w realizacji GOZ powinna wiązać się nie tylko z odpowiednią funkcjonalnością inwestycji, ale polegać na optymalnym zarządzaniu cyklem życia infrastruktury, wykorzystania jej poszczególnych elementów w kolejnych łańcuchach produkcyjnych czy też w realizacji innych zamierzeń inwestycyjnych. Na rysunku 1 zilustrowano częstotliwość występowania obszarów tematycznych (sektorów gospodarczych), w ramach których w różnych krajach UE realizowane są i będą inwestycje z zakresu rozwoju GOZ.



Rysunek 1. Częstotliwości ujęcia poszczególnych sektorów gospodarki w strategiach i planach wdrażania GOZ w krajach europejskich

Źródło: opracowanie własne na podstawie EESC 2019

Badania naukowe skupiają się głównie na ekonomicznych i technicznych uwarunkowaniach GOZ, uwzględniając nowe technologie produkcji czy nowe modele biznesowe. Jednak mechanizmy i działania leżące u podstaw tej transformacji gospodarczej nadal wymagają badań i szczególnej uwagi, zwłaszcza w zakresie infrastruktury (technicznej, społecznej i ekonomicznej) wspomagającej wdrażanie GOZ oraz wpływu tych aktywności na środowisko.

Zmiana dotychczasowego podejścia do zarządzania zasobami wymaga wielu innowacyjnych rozwiązań, a także odpowiedniej infrastruktury. Potwierdza to analiza przeprowadzona przez EESC (2019), wskazująca na to, że szeroko rozumiana infrastruktura techniczna, w tym rozwój budownictwa, systemów gospodarki wodno-kanalizacyjnej, obiektów przetwarzania odpadów i wytwarzania energii, wpisuje się w kluczowe obszary wdrażania GOZ w krajach europejskich. Rozwój infrastruktury (technicznej, społecznej i ekonomicznej) umożliwi bowiem przestrzenne powiązanie miejsc wytwarzania, konsumpcji, ponownego wykorzystania i odzysku/recyklingu odpadów/materiałów, wspomaga wdrażanie rozwiązań związanych z ekomobilnością, a ponadto warunkuje efektywny przepływ materiałów, usług i informacji. Pomimo wielu metod, zasad i strategii GOZ przedstawionych w literaturze, ich efektywne wdrażanie stanowi współczesne wyzwanie dla praktyki gospodarczej. Rozważania podejmowane w niniejszej monografii stanowią próbę odpowiedzi na te wyzwania. Biorąc pod uwagę doświadczenia krajów UE oraz Chin, będących prekursorami w zakresie wdrażania GOZ (McDowall i in. 2017), tematyka prac prezentowanych w niniejszej monografii dotyczy trzech głównych zagadnień:

1. Energetyka i zagospodarowanie odpadów.

W tej części omówiono perspektywy rozwoju odnawialnych źródeł energii w opinii mieszkańców miast i wsi, a także praktyczne aspekty ograniczania zużycia energii w gospodarstwach domowych, zakładach produkcyjnych i rolnictwie. Ponadto wskazano na uwarunkowania inwestycji z zakresu odnawialnych źródeł energii oraz minimalizacji i zagospodarowania odpadów.

2. Biogospodarka i zasoby wody

Kolejne rozdziały poruszają złożoną problematykę wykorzystania wody w działalności rolniczej i wpływu tej działalności na środowisko. Szczegółowo omówiono m.in. procesy nawożenia, odmulania, nawodnienia z wykorzystaniem odpowiednich urządzeń i infrastruktury. Scharakteryzowano także wpływ zmian klimatu na potrzebny wodne roślin, a także omówiono kwestie projektowania terenów zielonych stanowiących ważny element gospodarki wodnej.

3. Transport i logistyka

Transport i logistyka stanowią istotne narzędzie transformacji gospodarki w kierunku obiegu zamkniętego, wspierają procesy zamykania cykli usługowych i produkcyjnych (w tym zaopatrzenia i dostaw). W tej części omówiono rozwiązania infrastrukturalne minimalizujące wpływ transportu na środowisko oraz racjonalizujące gospodarowanie zapasami.

4. Podsumowanie

W ostatnim rozdziale przedstawiono propozycję wskaźników, które mogą posłużyć do monitorowania transformacji polskiej gospodarki w kierunku GOZ w zakresie omówionych w poprzednich rozdziałach elementów zrównoważonej konsumpcji.

Wierzymy, że przedstawione w niniejszej monografii zagadnienia stanowią rozwinięcie problematyki gospodarki o obiegu zamkniętym w kontekście wyzwań infrastrukturalnych i dbałości o środowisko, a także prezentują nowe ujęcie tych kwestii. Zróżnicowanie tematyczne prac z wielu dyscyplin naukowych, m.in. rolnictwa, inżynierii mechanicznej, inżynierii środowiska, energetyki i ekonomii czy inżynierii lądowej i transportu, świadczą o wieloaspektowości GOZ i konieczności podejmowania interdyscyplinarnych badań w tym zakresie.

Szczególne podziękowania składamy recenzentom: prof. dr. hab. inż. Jerzemu Gruszczyńskiemu i dr. hab. inż. Annie Szeląg-Sikorze, prof. UR, za cenne i wnikliwe recenzje tekstów zamieszczonych w prezentowanej monografii.

dr Anna Krakowiak-Bal

dr inż. Mateusz Malinowski

dr hab. inż. Jakub Sikora, prof. UR

Literatura

- Boulding K. 1966: The Economics of the Coming Spaceship Earth. Environmental Quality in a Growing Economy, Johns Hopkins University Press, Stany Zjednoczone, s. 3–14.
- EESC (The European Economic and Social Committee). 2019: Circular economy strategies and roadmaps in Europe: Identifying synergies and the potential for cooperation and alliance building.
- Głowacki J., Kopyciński P., Mamica Ł., Malinowski M. 2019: Identyfikacja i delimitacja obszarów gospodarki w obiegu zamkniętym w ramach „zrównoważonej konsumpcji”. [W:] Kulczycka J. red. 2019: Gospodarka o obiegu zamkniętym w polityce i badaniach naukowych. Kraków: Wyd. IGSMiE PAN, s. 167–179.
- Jaworski T.J., Grochowska S. 2017: Circular Economy – the criteria for achieving and prospect of implementation in Poland. Archives of Waste Management and Environmental Protection, 19(4), s. 13–22.
- KE (Komisja Europejska) 2015: Closing the Loop – An EU Action Plan for the Circular Economy. Communication From the Commission to the European Parliament. The Council, the European Economic and Social Committee and the Committee of the Region. COM (2015).
- KE (Komisja Europejska) 2018: A European Strategy for Plastics in a Circular Economy. Communication From the Commission to the European Parliament. The Council, the European Economic and Social Committee and the Committee of the Region. COM (2018).
- Komar I. 1975: Rational use of natural resources and resource cycles, Moskwa: Nauka, s. 211.
- Kulczycka J. red. 2019: Gospodarka o obiegu zamkniętym w polityce i badaniach naukowych Kraków: Wyd. IGSMiE PAN, s. 5–6.
- McDowall W., Geng Y., Huang B., Barteková E., Bleischwitz R., Türkeli S., Kemp R., Doménech T. 2017: Circular Economy Policies in China and Europe. Journal of Industrial Ecology, 21(3), s. 651–661.

Energia i zagospodarowanie odpadów

Perspektywy rozwoju odnawialnych źródeł energii w opinii mieszkańców miast oraz wsi

Streszczenie. Celowość wdrażania ekologicznych metod produkcji energii stała się głównym wyznacznikiem polityki Polski w zakresie ograniczenia spalania paliw, a tym samym poprawy jakości środowiska, poprzez redukcję szkodliwych gazów do atmosfery. W opracowaniu przeanalizowano stan wiedzy młodych ludzi na temat technologii wykorzystujących odnawialne źródła energii (OZE). Przy użyciu kwestionariusza wywiadu ustalono, że największą szansę rozwoju na krajowym rynku – ma obok pomp ciepła i siłowni wiatrowych lądowych – przede wszystkim fotowoltaika. Osoby z miast jak i wsi deklarowały zakup w przyszłości urządzeń wytwarzających ekoenergię, niemniej na decyzje tych pierwszych miały wpływ głównie rekomendacje rządu w postaci stworzonych dla przyszłych właścicieli OZE korzystnych zachęt finansowych. Młodzież ze wsi zapowiadała przeprowadzenie inwestycji przy zaangażowaniu wyłącznie własnego kapitału. Obydwie grupy badawcze upatrują korzyści wynikających z zastosowania zielonych technologii przede wszystkim dla środowiska. Przedkładają je nad straty wynikające z produkcji i utylizacji elementów konstrukcyjnych wykorzystywanych do ich produkcji. Aspekt negatywnego oddziaływania ekologicznych nośników energii na otoczenie nie został praktycznie w badaniu dostrzeżony.

Słowa kluczowe: odnawialne źródła energii, czysta energia, zrównoważony rozwój, studenci

Development prospects of renewable energy sources in the opinion of town and rural area inhabitants

Abstract. In recent years the advisability of implementing ecological energy production methods has become the major determinant of the Polish policy for combustion of energy resources, and subsequently improvement in the quality of the environment, through reduction in emissions of harmful gases into the atmosphere. The study presents an analysis of young people's knowledge on the subject of renewable energy technologies. An interview questionnaire was used to carry out a survey among young people. According to the survey results, apart from wind farms and heat pumps, it is photovoltaics that has the largest chances of development on the Polish market. Both city dwellers and rural area inhabitants declared willingness to purchase eco-energy devices. However, the

¹ Uniwersytet Technologiczno-Przyrodniczy w Bydgoszczy, Wydział Budownictwa, Architektury i Inżynierii Środowiska

decisions of town inhabitants were largely affected by governmental support in the form of financial benefits to be provided for prospective RES owners. The youth of rural areas declared investing into renewable sources while maintaining their own capital. Both groups of respondents were aware of advantages of green technology application, especially for the environment. They prioritize them over losses that are caused by utilization of structural elements used for their production. In fact, the aspect of negative impact of renewable energy sources on the environment has not been raised by respondents.

Keywords: renewable energy sources, clean energy, environmental sustainability, university students

Wprowadzenie

Według Międzynarodowej Agencji Energii Odnawialnej IRENA (2018) zdekarbonizowany sektor energetyczny, zdominowany przez źródła odnawialne, jest podstawą przejścia do zrównoważonej przyszłości energetycznej. Zdaniem Gielen i in. (2019) ekologiczne nośniki energii mogą zaspokoić dwie trzecie całkowitego globalnego zapotrzebowania na energię, przyczyniając się tym samym do znacznej redukcji emisji gazów cieplarnianych. Tripathi i in. (2016) zwracają uwagę, że korzystanie z tego potencjału staje się potrzebą epoki. Zdaniem Hossain i in. (2016) tkwiące w nim możliwości mogą stać się dopiero realne do spożytkowania, gdy technologie inteligentnych oraz efektywnych sieci wykorzystujących odnawialne źródła energii (OZE) będą odznaczały się wystarczającą dojrzałością. Na wzrastający trend w kierunku energetyki odnawialnej wskazują Balcioglu i in. (2017), a z przeglądem jej produkcji w poszczególnych częściach świata spotykamy się w opracowaniach m.in. Manzano-Agugliaro i in. (2013), Misztal (2017) czy Khan i in. (2020). Autorzy zwracają uwagę nie tylko na to, że zmienia ona oblicze gospodarek państw, ale również pozytywnie wpływa na ich środowisko (poprzez redukcję szkodliwych gazów, walkę z globalnym ociepleniem klimatu). Ze względu na zauważalny głównie jej dobroczynny wpływ na otoczenie, niewątpliwie często pomijaną kwestią w zakresie „zielonej energii” jest ta, że może ona także ingerować w środowisko i znacząco na nie oddziaływać. W większości rodzajów urządzeń OZE, jak podaje Muradin (2017) największe zagrożenie ujawnia się nie w fazie ich eksploatacji, lecz w fazie produkcji, a także utylizacji. Dlatego też OZE jest jednym z podstawowych zagadnień gospodarki o obiegu zamkniętym. Tematykę tę poruszają w swoich opracowaniach Wróbel i Sołtysik oraz Rogowska (2018). Polska w swojej polityce kontynuuje zawarte w *Krajowym planie na rzecz energii i klimatu na lata 2021–2030* (2019) kierunki przyczyniające się do wzrostu efektywności energetycznej. W ramach realizacji ogólnounijnego celu nasz kraj deklaruje osiągnięcie do 2030 roku 21–23% udziału odnawialnych źródeł energii w finalnym zużyciu energii brutto (zużycie łącznie w elektroenergetyce, ciepłownictwie i chłodnictwie oraz na cele transportowe). Przede wszystkim ma nastąpić zwiększenie dynamiki rozwoju mikroinstalacji OZE w latach 2020–2030 (głównie instalacji prosumenckich), co będzie naturalnym wyznacznikiem rozwoju sektora elektroenergetycznego. Przewiduje się w nim do 2030 r. wzrost udziału OZE do około 32%.

Ta czysta energia będzie miała ważne znaczenie dla gospodarstw domowych, nie tylko z punktu widzenia jej wartości ekologicznych, ale głównie zmniejszenia kosztów utrzymania. Popularność przydomowych instalacji OZE w Polsce wzrasta, zwłaszcza jak podaje Pawlak (2019) niekwestionowanym liderem wśród nich jest fotowoltaika, cechująca się dużą niezawodnością pracy oraz przewidywalnością w produkcji energii. Niemałym zainteresowaniem cieszą się również kolektory słoneczne, które zamieniają energię promieniowania słonecznego na ciepło, a także mikroinstalacje wiatrowe, odznaczające się znaczną zmiennością podaży energii, zależnej od wietrzności oraz ukształtowania terenu. Nie sposób tu pominąć pomp ciepła, biogazowni rolniczych czy spalania biomasy. Zdaniem powyższego autora, w ostatnich latach dokonały się istotne zmiany związane z możliwościami budowy odnawialnych źródeł energii w gospodarstwie domowym. Dlatego też głównym celem pracy jest sprawdzenie, jak młodzi mieszkańcy miast oraz wsi postrzegają znaczenie i rozwój ekologicznych nośników energii w naszym kraju. Istotne było sprawdzenie, które uwarunkowania (finansowe, instytucjonalne, techniczne, przyrodnicze) mogą hamować te inwestycje, a także określenie, jakie instalacje mają największe szanse, by zaistnieć na polskim rynku.

I. Materiał i metody

Badania ankietowe przeprowadzono w 2019 roku na grupie 236 osób uczących się w placówce uniwersyteckiej. Założeniem przygotowanego kwestionariusza wywiadu było ustalenie poziomu wiedzy młodzieży na temat:

- ◆ znajomości źródeł pozyskiwania odnawialnej energii oraz urządzeń i technologii wykorzystywanych w tym celu,
- ◆ roli i znaczenia ekologicznych źródeł energii dla odbiorców indywidualnych oraz form wsparcia finansowego tych inwestycji ze strony państwa,
- ◆ szans rozwoju OZE na polskim rynku oraz korzyści i zalet wynikających z użytkowania tych systemów.

Ankieta składała się z 27 pytań, z których 5 miało formułę otwartą. Na potrzeby niniejszej pracy wykorzystano 16 z nich. Zbadano (przy pomocy współczynnika korelacji Pearsona r), w jakim stopniu zmienne (odbyte szkolenia, instrumenty wsparcia zewnętrznego czy nakłady finansowe) mogą zachęcić do zakupu OZE i czy zauważalna jest współzależność świadomości podejmowania takich działań dla poprawy jakości środowiska. Dodatkowo sprawdzono, jaki jest, zdaniem młodych ludzi, średni koszt wdrażania ekologicznych inwestycji (dla poszczególnych systemów racjonalnego wykorzystania energii).

2. Wyniki i dyskusja

Spośród ogółu przebadanych osób 69,8% stanowili mieszkańcy miast, pochodzący przede wszystkim z województwa kujawsko-pomorskiego (88,6% z tej grupy). Ogółem Kujawy i Pomorze reprezentowało 86,7% badanych. Pozostali zamieszkiwali Mazowsze (3,9%), Wielkopolskę (3%), Warmię i Mazury (3%), Pomorze (3%) oraz Dolny Śląsk (0,4%). Ankieterzy byli przedstawicielami głównie dwóch grup wiekowych: 20–24 lata (67,4%) i 18–19 lat (24,6%). Wśród najczęściej wymienianych przez studentów źródeł naturalnej energii znalazły się: słońce (93,1%), wiatr (88,8%), a także woda (70%).

Tabela 1. Źródła energii odnawialnej oraz najczęściej wykorzystywane do jej produkcji urządzenia i technologie (w opinii respondentów)

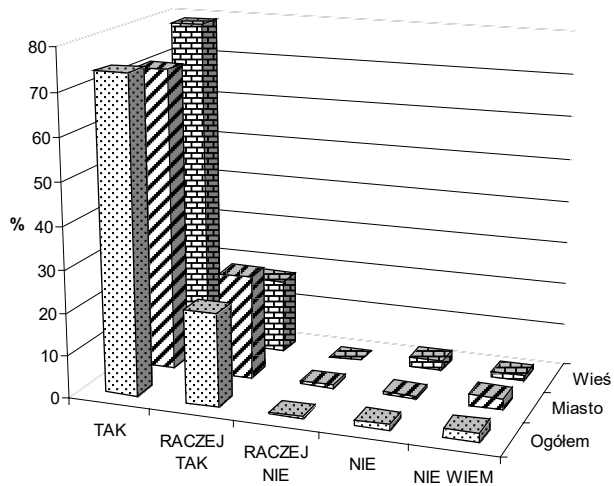
Udzielone odpowiedzi w zakresie znajomości [%]		Ogółem	Miasto	Wieś
Źródeł energii				
1.	Słońce	92,3	92,7	91,7
2.	Wiatr	88,1	88	88,2
3.	Woda	69,5	69,5	69,4
4.	Geotermia	25	28,4	18,8
5.	Biomasa, będąca bazą do produkcji biopaliw	18,2	20,5	14,1
6.	Biogaz	6,8	4,6	10,5
7.	Brak odpowiedzi	2,5	1,9	3,5
Technologii i urządzeń				
1.	Siłownie wiatrowe lądowe	77,1	76,1	78,8
2.	Panele fotowoltaiczne	73,3	70,1	78,8
3.	Elektrownie wodne	33,9	35,7	30,5
4.	Pompy ciepła	25	24,5	25,8
5.	Kolektory słoneczne	24,1	27,1	18,8
6.	Biogazownie	5,9	3,9	9,4
7.	Kotły na biomasę	2,9	2,6	3,5
8.	Brak odpowiedzi	10,5	11,2	9,4
Razem (liczba osób)*		236	151	85

* Wartości % nie sumują się, gdyż respondenci mogli podać więcej niż jedną odpowiedź.

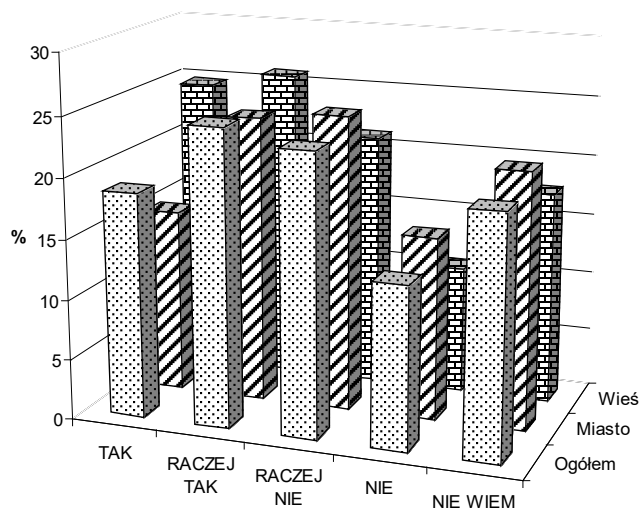
Źródło: opracowanie własne.

Z kolei urządzeniami i technologiami wskazywanymi do przetwarzania tejże energii na energię elektryczną podawano, że są w głównej mierze siłownie witarowe (77,1%), panele fotowoltaiczne (73,3%) i elektrownie wodne (33,9%) – tabela 1. Rozkład odpowiedzi w obydwu przypadkach był identyczny dla mieszkańców miast oraz wsi, niemniej ci drudzy częściej wśród jeszcze innych możliwości pozysku energii dostrzegali biogaz, ale rzadziej od osób mieszkających w miastach nośnik w postaci biomasy.

Bez względu na miejsce zamieszkania młodzi ludzie wyrażali opinię, że inwestycje w OZE są koniecznością dla polskiej gospodarki (rys. 1), gdyż wynikają z potrzeby ochrony środowiska. Zależność korelacji pomiędzy tymi zmiennymi jest bardzo wysoka i wynosi 0,995 (z niewielką przewagą wśród osób z miasta 0,994 vs 0,971). I to nie, zdaniem studentów, oszczędność energii (3,4%) czy jej niska cena wytwarzania (4,1%) ma tu największe znaczenie, a zdecydowanie ograniczenie emisji szkodliwych gazów do atmosfery (54,8%), a także zużycia surowców kopalnianych (21,5%). Były to aspekty najczęściej wskazywane przez młodych ludzi, obok podawanych w mniejszym zakresie rozwiązań o niskim stopniu szkodliwości dla środowiska (6,9%), a tym samym hamujących występowanie zjawiska smogu w ośrodkach miejskich (5,5%) i przyczyniających się do obniżenia śladu węglowego (2%). Tylko jedna osoba uznała, że zielone technologie w ogóle nie wpłyną na zmniejszenie ryzyka wystąpienia szkód w środowisku. Odnotowano też odpowiedzi, że nie da się odejść od tradycyjnych źródeł energii tylko na rzecz samych OZE (1,2%). Taki sam odsetek osób zauważa, że produkcja ekologicznych urządzeń może być szkodliwa dla środowiska, a utylizacja zużytego sprzętu w przyszłości okazać się wysoce problematyczną. Co ciekawe, gdy respondenci mieli określić czy, w najbliższych latach byliby skłonni zainwestować w czystą energię, nie potrafili już tak jednoznacznie wyrazić swojej opinii, jak było to w przypadku jej dobroczynnego wpływu na otoczenie. Zauważono, że osoby zamieszkujące obszary wiejskie wykazywały większe zdecydowanie w tym względzie, udzielając odpowiedzi „TAK” lub „RACZEJ TAK” (rys. 2), a swoje plany uzależniały przede wszystkim od posiadanych własnych środków finansowych, gdyż siła związków korelacyjnych była tu wysoka, bo na poziomie 0,795. Mieszkańcy miast rzadziej wiąźali przyszłe inwestycje z wkładem własnym (0,314) i kalkulowali je głównie w oparciu o pomoc finansową ze strony państwa (0,353). Takiej istotności nie dopatrzono się wśród osób ze wsi (wskaźnik osiągnął tu wartość ujemną). Prawdopodobnie na tę zależność mogła mieć wpływ częstsza wśród młodzieży z miast znajomość krajowych bądź unijnych źródeł dotacji w zakresie różnych programów pomocowych dla tych źródeł energii. Wynikała ona też w pewnym stopniu z pogłębiania wiedzy młodych ludzi w tym zakresie. Niemniej korelacja była słaba (0,155). W specjalistycznych szkoleniach pozwalających lepiej poznać technologie OZE wzięło udział zaledwie 12,7% studentów, głównie z miast (9,3% vs 3,4%). Uczestniczono również w tych organizowanych przez Urzędy Gmin (2,9%), Ośrodki Doradztwa Rolniczego (2,5%) czy firmy, które korzystały z dotacji unijnych przeznaczonych na cel edukacyjny (7,3%). Spośród ogółu badanych osób 75% (tj. 177 ankietowanych) poszerzało bądź zdobywało wiedzę na temat ekologicznych nośników energii poprzez Internet (70,6%), TV (29,3%), czytając specjalistyczne



Rysunek 1. Wypowiedzi ankietowanych czy Polska powinna inwestować w OZE
Źródło: opracowanie własne



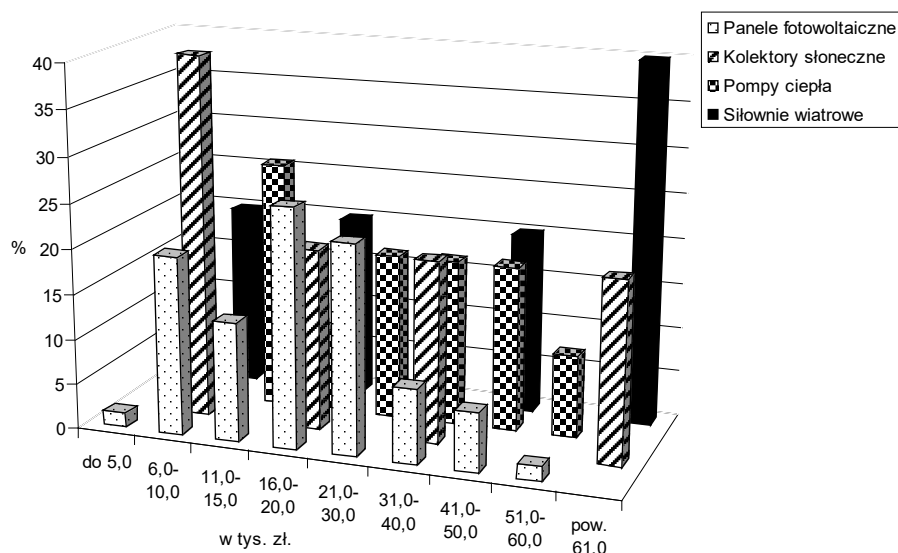
Rysunek 2. Wypowiedzi ankietowanych czy planują w najbliższych latach inwestycje w OZE
Źródło: opracowanie własne

czasopisma (14,1%) lub prasę (13,5%) oraz przeglądając ulotki (10,7%), a także foldery (6,7%). Znaczny odsetek respondentów informacje pozyskiwał od swoich przyjaciół i znajomych (36,1%), a także przyswajał treści o tej tematyce bezpośrednio na studiach (30,9% w tym 58,9% osób z miast). We wszystkich wymienionych formach zgłębiania wiedzy częściej uczestniczyła młodzież z ośrodków miejskich. Studenci uznali, że największą szansę, by zaistnieć na rynku polskim, mają instalacje fotowoltaiczne (75,8%), pompy ciepła (40,2%) i siłownie wiatrowe lądowe (38,1%). Odpowiedzi osób zamieszkujących miasta pokrywały się z tymi, co odnotowano ogółem dla wszystkich. Z kolei w przypadku ankietowanych ze wsi zauważono, że na drugim miejscu po fotowoltaice stawiają oni równorzędnie na kolektory słoneczne i pompy ciepła (być może w tym wypadku zwracali uwagę na to, że systemy te oprócz pracy własnej mogą również wspomagać się nawzajem), a dopiero później wymieniają siłownie wiatrowe.

Głównego koordynatora wspierającego rozwój ekologicznych nośników energii w kraju, a mianowicie Narodowy Fundusz Ochrony Środowiska i Gospodarki Wodnej (NFOŚiGW) wskazało 29,2% badanych, w tym 63,7% osób z miast. Z kolei instytucje finansowe realizujące politykę ekologiczną z ramienia NFOŚiGW, czyli Wojewódzkie Fundusze Ochrony Środowiska i Gospodarki Wodnej (WFOŚiGW) podało 18,6% ankietowanych i tu również większą znajomością funkcjonowania takich jednostek wykazali się mieszkańcy ośrodków miejskich (68,1%). Oni częściej niż osoby ze wsi znali też program „Czyste Powietrze” (60,3% vs 39,7%), którego celem jest poprawa jakości powietrza oraz zmniejszenie emisji gazów cieplarnianych przez wymianę źródeł ciepła oraz poprawę efektywności energetycznej jednorodzinnych budynków mieszkalnych w kraju. Przewidziany na lata 2018–2029 budżet na dotacje w tym zakresie to kwota rzędu 103 mld zł. Beneficjenci uprawnieni do podstawowego poziomu dofinansowania mogą liczyć na wsparcie do kwoty 20 tys. zł, a jeżeli inwestycja obejmuje bardziej efektywne źródło ogrzewania, czyli pompę ciepła – wtedy można uzyskać 25 tys. zł. Jeśli do tego instalowane są jeszcze panele fotowoltaiczne, to łączna wypłata sięgnie nawet 30 tys. zł (<http://nfosigw.gov.pl>). Mieszkańcom wsi bardziej znany był instrument wsparcia przeznaczony na rozwój mikroinstalacji fotowoltaicznych (PV) o nazwie „Mój Prąd” (53,6% vs 46,4%). Szacuje się, że w 2020 r. na ten cel w budżecie państwa przeznaczone są środki w kwocie 868 mln zł. Dzięki temu programowi prosument otrzyma bezzwrotną pomoc na budowę instalacji PV w kwocie do 5 tys. zł, gdy będzie ona miała określoną moc (2–10 kWh), z przeznaczeniem na cele mieszkaniowe. Spośród ogółu ankietowanych 41,5% osób nie potrafiło wskazać żadnego wsparcia dla OZE, a 10,7% określiła, że odbywa się ono w ramach unijnych Regionalnych Programów Operacyjnych, nie podając więcej szczegółów w tym zakresie. Młodzież akademicka jest zgodna, co do kwot, które trzeba zainwestować w zielone nośniki energii, gdyż określiła je jako stosunkowo wysokie (TAK – 28%, RACZEJ TAK – 55%). Niepewność w tym zakresie wykazywali częściej mieszkańcy miast niż wsi (NIE WIEM: 5,6% vs 4,2%), sygnalizując jednocześnie, że zakup tych urządzeń nie wymaga zbyt dużych nakładów finansowych (6% vs 1,2%). Odpowiedzi udzielone w tym zakresie korespondują z tymi odnoszonymi się do podawanych przez

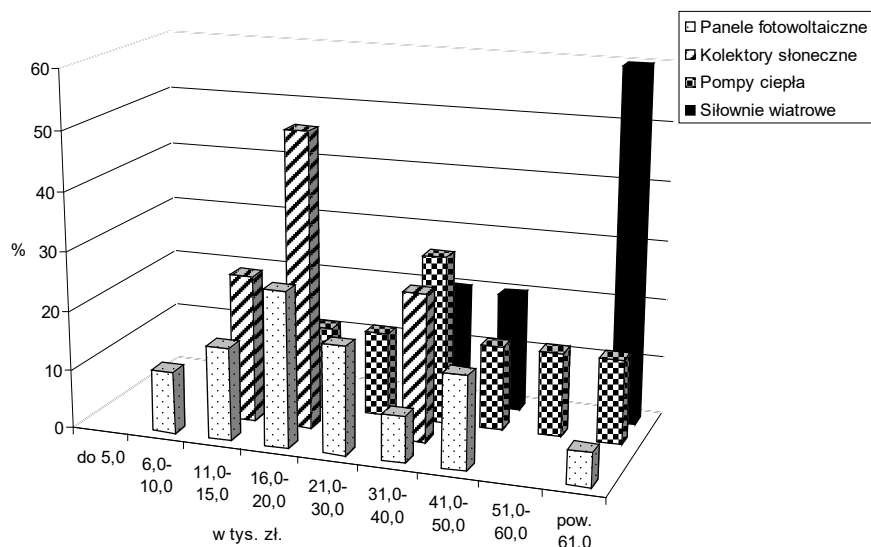
młodych ludzi średnich kwot zakupu urządzeń, łącznie z ich montażem. Dla osób z miast na panele fotowoltaiczne, kolektory słoneczne czy pompy ciepła zgodnie z wcześniejszymi sugestiami wydatkuje się kwoty niższe (rys. 3). Koszt kolektorów słonecznych kształtuje się według nich głównie na poziomie od 6 do 10 tys. zł, a pomp ciepła w przedziale 11–15 tys. zł. Dla drugiej grupy badanych osób instalacje te są droższe odpowiednio o 10 i 20 tys. zł (rys. 4). Podobne obserwacje poczyniono w zakresie paneli fotowoltaicznych oraz siłowni wiatrowych, choć by zbudować te pierwsze, ankietowani (zarówno z miast, jak i wsi) określili, że wystarczą na ten cel przede wszystkim środki oscylujące w przedziale 16–20 tys. zł.

Reasumując, należy zauważyć, że młodzi ludzie zauważają potrzebę traktowania OZE jako sektora o dużych możliwościach do wykorzystania w kraju. Temat zielonych źródeł energii jest podejmowany w Polsce od wielu lat, na co zwraca uwagę Szałański (2016) pisząc, że poważnym impulsem rozwojowym było dla nich uruchomienie programów unijnych, dzięki czemu inwestycjom towarzyszyło większe tempo i rozmach. Wraz z rozwojem gospodarczym zwiększa się zapotrzebowanie na energię, co stanowi obszar badań w zakresie zmiany miksu energetycznego w kierunku energetyki odnawialnej i dekarbonizacji sektora energetycznego (Zakrzewska, Rojek 2019). Już cztery lata temu Szałata i in. (2016) pisali, że mimo wszelkich trudności, przede wszystkim wysokich kosztów inwestycyjnych, a także niezależnie od przekonań proekologicznych (lub ich braku), należy mieć świadomość, że w związku z ogólnymi trendami Unii Europejskiej w nadchodzących latach rezygnacja z konwencjonalnych źródeł energii na rzecz OZE stanie się w Polsce koniecznością,



Rysunek 3. Średnie kwoty, jakie trzeba zainwestować w poszczególne nośniki zielonej energii (zdaniem respondentów z miast)

Źródło: opracowanie własne



Rysunek 4. Średnie kwoty, jakie trzeba zainwestować w poszczególne nośniki zielonej energii (zdaniem respondentów ze wsi)
Źródło: opracowanie własne

a nowelizacji prawa (wspólnotowego i polskiego) będą tym znamionom sprzyjać. Obecnie dzięki utworzeniu w kraju Ministerstwa Klimatu nastąpiło nowe otwarcie dla promocji i rozwoju zastosowania odnawialnych źródeł w wytwarzaniu energii oraz ciepła ([www.gov.pl/web/klimat/...](http://www.gov.pl/web/klimat/)). Zachęty stworzone dla prosumentów w postaci wprowadzenia mechanizmów ułatwiających włączanie własnych kapitałów dają nadzieję na coroczny przyrost konsumpcji energii z ekologicznych źródeł. Wspierając zrównoważony rozwój sektora energetycznego, należy mieć jednak na uwadze, jak pisze Muradin (2017), zawsze środowiskową ocenę cyklu życia wyrobu wykonaną indywidualnie dla każdego urządzenia OZE, łącznie z analizą aspektów ekonomicznych.

Wnioski

Na podstawie przeprowadzonych badań wyklarowały się następujące wnioski:

1. Rozwój branży OZE jest zdaniem ankietowanych ze wsi i miast koniecznym rozwiązaniem dla gospodarki kraju, gdyż ma pozytywny wpływ na środowisko przyrodnicze poprzez głównie ograniczenie zużycia surowców kopalnianych, a tym samym emisję szkodliwych gazów do atmosfery. Ci pierwsi, oprócz produkcji zielonej energii pochodzącej z promieni słonecznych, wody oraz wiatru, zauważyli też rolę biogazu otrzymywanego

z substancji organicznych. Przepuszczalnie z racji miejsca zamieszkania dostrzegli ważność w przestrzeni wiejskiej biogazowni rolniczych, które mogą w sposób efektywny pozyskiwać energię z surowców pochodzących bezpośrednio z gospodarstwa rolnego. Z kolei osoby z miast zwracały częściej uwagę na biomasę, stającą się coraz bardziej popularnym, odnawialnym źródłem energii, dostarczającym ciepło w miejskim budownictwie w postaci paliwa.

2. Mieszkańcy miast byli mniej skłonni od osób ze wsi inwestować w OZE, choć częściej od nich poszerzali wiedzę na temat ekologicznych nośników energii, uczestniczyli w specjalistycznych szkoleniach, mieli większą świadomość istnienia instytucji i programów pomocowych przeznaczonych na ten cel, czy też liczniejszy krąg znajomych, którzy takie nośniki zakupili. Brak bodźców motywujących mógł być podyktowany z jednej strony rodzajem miejsca zamieszkania (osiedla wielorodzinne, kamienice), niepozwalającym z różnych powodów (cenowych czy to formalnych) sprostać takim inwestycjom, z drugiej strony zaś problemami technicznymi albo finansowymi. Gdyby jednak zdecydowali się na montaż takich urządzeń (głównie PV), to koszty inwestycyjne zminimalizowałyby korzystając z dotacji państwowych, zwłaszcza w ramach znanego im częściej programu „Czyste Powietrze”.
3. Respondenci ze wsi wykazali większą chęć wdrażania OZE w swoich domostwach, ale głównie w oparciu o własny kapitał, co mogło być podyktowane rezygnacją z krajowych programów zachęt na rzecz zakupu instalacji bezpośrednio „za gotówkę”.
4. Zachodzi konieczność organizowania specjalistycznych szkoleń zwłaszcza dla mieszkańców wsi, gdzie potencjał możliwości wykorzystania OZE jest duży. Ciągłe zgłębianie wiedzy na temat nowoczesnych oraz innowacyjnych sposobów magazynowania i przesyłu energii pozwoli wybrać im najskuteczniejszy dla siebie system zarządzania energią.
5. Nowe technologie wprowadzane na rynek nadają kierunek gospodarce energetycznej w kraju i powinny być nadal dotowane przez państwo, bo jak pokazują badania, głównym czynnikiem hamującym rozwój odnawialnych źródeł energii są wysokie koszty ich zakupu.
6. Nie odnotowano w badaniach wad wynikających z zastosowania energooszczędnych technologii. Respondenci podkreślali głównie ich zalety, nie mając świadomości o ich również negatywnym wpływie na otoczenie. Dlatego też zagadnienia gospodarki OZE w obiegu zamkniętym powinny być, zdaniem autorki opracowania, bardziej rozpropagowane wśród użytkowników i przyszłych potencjalnych konsumentów.

Analiza zużycia potencjalnej energii cieplnej do celów bytowo-gospodarczych w gminach województwa świętokrzyskiego

Streszczenie. W Polsce i na świecie sektor budowlany postrzegany jest przez pryzmat energochłonności. Cały czas poszukiwane są nowe rozwiązania techniczne, dzięki którym obniży się zużycie energii. Nowe rozwiązania dotyczą usprawniania systemów grzewczych, poprawy termoizolacji, wykorzystania proekologicznych rozwiązań. Wśród budynków energooszczędnych można wyróżnić: budynki pasywne, budynki inteligentne, budynki niskoemisyjne CO₂, budynki zeroenergetyczne.

Województwo świętokrzyskie położone jest w południowo-wschodniej Polsce. Jest jednym z najmniejszych i najstabilniej rozwiniętych województw, w którym jednak najlepiej rozwija się przemysł i rolnictwo. Celem artykułu jest analiza zużycia potencjalnej energii cieplnej dla celów bytowo-gospodarczych w gminach województwa świętokrzyskiego. Analiza powierzchni mieszkaniowej gospodarstw domowych pokazała, że w badanych latach (2014, 2016, 2018) nie nastąpiły istotne zmiany w przyroście wielkości powierzchni mieszkaniowej. Na podstawie przeprowadzonych badań wykazano, że największe zapotrzebowanie na energię cieplną dla celów bytowo-gospodarczych ma gmina Kielce, a najmniejsze gmina Moskorzew.

Słowa kluczowe: energia cieplna, budownictwo, rozkład przestrzenny

Analysis of potential thermal energy consumption for economic purposes in communes of the świętokrzyskie province

Abstract. In Poland and in the world also, the construction sector is perceived from the perspective of energy consumption. New technical solutions are constantly being sought to reduce energy consumption. New solutions concern the improvement of heating systems, improvement of thermal insulation, the use of environmentally friendly solutions. Energy-efficient buildings include: passive buildings, intelligent buildings, low-carbon CO₂ buildings, zero energy buildings.

The Świętokrzyskie Voivodeship is located in south-eastern Poland. Is one from the smallest and least developed voivodships. Industry and agriculture are developing the best in the Świętokrzyskie region. The aim of the

¹ Uniwersytet Rolniczy w Krakowie, Wydział Inżynierii Produkcji i Energetyki

study was to analyse the consumption of potential thermal energy in the communes of the Świętokrzyskie Province. The analysis of the residential area of the municipal farm in the Świętokrzyskie Province showed that in the years 2014, 2016 and 2018 examined, there were no significant changes in the size of residential areas. Based on the research, it was shown that heat energy requirements are available for the Kielce commune, and the smallest for the Moskorzew commune.

Keywords: thermal energy, architecture, spatial distribution

Wprowadzenie

Rozwój budownictwa uwarunkowany jest technologią budowy, podejściem do projektowania oraz analizą kosztów. W budownictwie do wznoszenia konstrukcji bardzo często wykorzystuje się elementy ceramiczne. Czynnikiem decydującym o wyborze materiałów ceramicznych jest duża różnorodność kształtów i wymiarów. Ściany jednowarstwowe wykonywane są z ceramiki poryzowanej. Warstwę nośną z pustaków pokrywa się z obu stron tynkiem. Grubość takiej ściany wynosi około 42 cm, a ciężar około 360 kg/m². W wyniku różnic w ciężarze i grubości przegrody okupione zostały zwiększeniem przenikalności cieplnej. W przypadku ceramiki poryzowanej przenikalność cieplna wynosi około 0,45 W/(m²·K). W przypadku ścian jednowarstwowych współczynnik przenikalności ciepła nie powinien przekraczać 0,5 W/(m²·K). Kolejnym rodzajem ścian wykonywanych elementami ceramicznymi są ściany trójwarstwowe. Wykonane są one z 3 warstw pustaków ceramicznych, które są wykończone tynkiem, następnie szczelina wypełniona termoizolacją, na zewnątrz warstwa cegieł elewacyjnych lub klinkierowych, wymagających jedynie spoinowania. Szerokość ściany trójwarstwowej wynosi około 54 cm, a jej ciężar to około 540 kg/m². Stosuje się również ściany dwuwarstwowe. Wykonywane są one w podobny sposób jak ściany trójwarstwowe. Pomija się jedynie warstwę cegły elewacyjnej czy przeznaczonej do tynkowania (Kowalik 2008).

Aspekt ekologiczny od wielu lat jest bardzo ważny, dlatego zaczęto produkować pustaki ceramiczne, w których skład wchodzi surowce odpadowe. W produkcji zastępuje się 50% gliny popiołami lotnymi. Dzięki takiemu zabiegowi gotowy produkt charakteryzuje się zwiększonymi parametrami, takimi jak wytrzymałość na ściskanie czy izolacyjność. Takie pustaki są również lżejsze. Zaletą tej technologii jest zmniejszenie kosztów produkcji, ponieważ lotne popioły otrzymywane są za darmo lub wręcz za dopłatą. Do dodatkowych korzyści należą między innymi: mniejsze wydobycie gliny oraz utylizacja surowca wtórnego (Kowalik 2008).

Gotowe ściany powinno się ocieplić w celu kontrolowania procesu wymiany ciepła przez przegrody budynku. Izolacja termiczna powinna być ciągła wokół całego budynku. Wykonuje się to dla komfortu użytkowników budynku oraz dla energetycznej trwałości i wydajności budynku. Występują trzy grupy materiałów termoizolacyjnych: materiały pochodzenia roślinnego, materiały pochodzenia mineralnego, spienione tworzywa sztuczne (Przybek 2006).

Najczęściej do termoizolacji budynku stosuje się płytowe wyroby polistyrenowe. Na rynku dostępnych jest wiele rodzajów płyt styropianowych. Różnią się one od siebie gęstością pozorną, odpornością na ściskanie, współczynnikiem przewodzenia ciepła, odpornością na zrywanie. Płyty styropianowe charakteryzują się tym, że im niższa gęstość, tym wyższy współczynnik przewodzenia ciepła. Wraz ze wzrostem gęstości wyrobów polistyrenowych maleje ich chłonność. Charakterystyczne dla płyt styropianowych jest również to, że wraz ze wzrostem gęstości pozornej rośnie wytrzymałość mechaniczna. Płyty styropianowe stosuje się zarówno do ocieplenia ścian jak i izolacji podłóg, wylewek (Przybek 2006).

Popularnym materiałem do termoizolacji budynku jest wełna mineralna. Jest ona paroprzepuszczalna i tworzy niepalną izolację cieplną. Dzięki tym cechom zapewnia ona duży komfort ciepłno-wilgotnościowy, a także redukuje ryzyko pożarowe. Wełna mineralna w porównaniu z ociepleniem ścian styropianem wykazuje lepsze parametry akustyczne. Sprawdzone systemem wykorzystującym wełnę mineralną do termoizolacji budynku jest system ETICS. Ocieplenie takie jest bardzo trwałe, odporne na starzenie, odporne na korozję chemiczną i biologiczną. System ETICS wykorzystuje się do ocieplenia płyt z wełny mineralnej. Płyty te cechują się wysoką odpornością na większość bodźców. Nie odkształcają się nawet pod wpływem ekstremalnych temperatur i wilgotności (Buszko 2017).

Podczas budowania domu bardzo ważnym elementem jest dach. Jednym z materiałów do pokrycia połaci dachu jest blacha. Rdzeń pokrycia stanowi stal bądź aluminium. Z zewnątrz blachy zabezpieczane są lakierami akrylowymi, poliestrowo-silikonowymi lub powłokami ochronnymi. Dzięki temu blaszane pokrycie dachowe będzie odporne na korozję, działanie promieniowania słonecznego, zarysowania, uszkodzenia mechaniczne (Białorucka, Korpysz-Drzazga 2019).

W ostatnich latach rynek zdominowały dachy wykonane z dachówek ceramicznych i cementowych. Występują one w różnorodnych kształtach, kolorach. Dachówki wyróżniają się trwałością. Są również mrozo odporne, niepalne i nienasiąkliwe. Należą do materiałów produkowanych z surowców naturalnych. Dachówki ceramiczne produkowane są ze specjalnej mieszanki gliny. Po wysuszeniu dachówki poddawane są angobowaniu. Jest to proces, który polega na pokrywaniu dachówek mieszanką gliny z dodatkiem naturalnych barwników. Kolejnym etapem produkcji jest wypalanie dachówek w piecu w temperaturze 1000°C. Po wypalaniu dachówki poddawane są glazurowaniu. Dzięki temu zabiegowi powierzchnia zyskuje połysk. Drugim rodzajem dachówek są dachówki cementowe. Do ich produkcji wykorzystuje się: piasek kwarcowy, cement portlandzki, pigmenty na bazie tlenków żelaza oraz wody. Wyróżniają się one małą porowatością betonu. Podczas produkcji dachówki cementowe są barwione oraz pokrywane powłoką akrylową. Dzięki temu kolor dachówek będzie jednolity i trwały (Białorucka, Korpysz-Drzazga 2019).

Bardzo ważnym aspektem w budowie domu są okna. Obecnie na rynku można znaleźć okna plastikowe, drewniane, aluminiowo-drewniane oraz aluminiowe. Największą popularnością cieszą się dwa pierwsze rodzaje. Okna plastikowe zbudowane są z profili o budowie komorowej. Najczęściej w profilu jest od pięciu do siedmiu komór. Wypełnione są

one powietrzem. Ramy okien wykonane są z bardzo twardego PCW, włókien szklanych lub mieszanki PCW z dodatkiem włókien szklanych. Okna plastikowe wyróżniają się wytrzymałością, szczelnością, niewielkim ciężarem, termoizolacyjnością na tle pozostałych typów okien. Dużą zaletą jest również ich niska cena. Wadą okien plastikowych jest wrażliwość na promieniowanie słoneczne. Przez szkodliwe działanie promieni okna często ulegają przebarwieniom, których nie da się usunąć w żaden sposób. Jedynym rozwiązaniem jest wymiana okien na nowe. Z upływem czasu okna plastikowe odkształcają się i zaczynają skrzywić. Kolejnym popularnym rodzajem okien są okna drewniane. Ich konstrukcja składa się z elementów wykonanych z drewna klejonego. W celu zabezpieczenia okien drewnianych przed warunkami atmosferycznymi maluje się je lakierem bezbarwnym. Występuje wiele modeli, wzorów, kształtów okien drewnianych. Charakteryzują się one dużą wytrzymałością oraz sztywnością. Do wad okien drewnianych można zaliczyć konieczność impregnacji ich co kilka lat. Dzięki impregnacji okna chronione są przed rozwojem mikroorganizmów, dla których drewno jest idealnym środowiskiem życia. Okna drewniane są droższe w porównaniu do okien plastikowych (Firląg i in. 2019).

Istnieje wiele podziałów budynków ze względu na zapotrzebowanie i zużycie energii. Pierwszy z nich uwzględnia takie budynki jak: budynek standardowy, budynek niskoenergochłonny, budynek o racjonalnej charakterystyce termoenergetycznej, budynek o zminimalizowanych potrzebach cieplnych. Budynek standardowy to obiekt, który charakteryzuje się sezonowym zapotrzebowaniem na ciepło. Do niedawna były to budynki najbardziej popularne. Budynek niskoenergochłonny to obiekt, który ma względnie małe potrzeby energetyczne na wszystkich etapach powstawania oraz eksploatacji. Budynek o racjonalnej charakterystyce termoenergetycznej to obiekt, który charakteryzuje się sezonowym zapotrzebowaniem na ciepło do ogrzewania na poziomie niższym niż określony w aktualnych przepisach budowlanych. Poziom ten osiąga się przy zwiększonych kosztach inwestycyjnych. Po kilku latach eksploatacji budynki stają się budynkami standardowymi. Budynek o zminimalizowanych potrzebach cieplnych to obiekt, który charakteryzuje się niskim zapotrzebowaniem na ciepło do ogrzewania, który osiąga się przy znacznych kosztach (Laskowski 2005).

Drugi podział ze względu na zużycie energii uwzględnia takie budynki jak: budynek superizolowany, budynek helioaktywny, budynek bez ogrzewania, budynek autarkiczny, budynek substandardowy. Pierwszy z nich, czyli budynek superizolowany, to obiekt cechujący się możliwie dużą izolacyjnością cieplną i szczelnością obudowy. Budynek ten zwany jest bunkrem cieplnym. Kolejny, czyli budynek helioaktywny, to obiekt, który wykorzystuje docierającą do niego energię słoneczną. Budynek bez ogrzewania to obiekt, w którym ogrzewanie uruchamia się w momencie wystąpienia najniższych wartości temperatur na zewnątrz. Kolejnym rodzajem budynku jest budynek autarkiczny. Obiekt ten jest samowystarczalny w zakresie zaopatrzenia w ciepło. W budynkach autarkicznych nie stosuje się nieodnawialnych źródeł energii. Ostatnim rodzajem budynku jest budynek substandardowy. To obiekt, który charakteryzuje się sezonowym zapotrzebowaniem na ciepło do ogrzewania

na poziomie wyższym niż aktualnie przyjęty w przepisach budowlanych. Są to budynki, które wymagają termomodernizacji (Laskowski 2005).

Trzeci podział ze względu na zapotrzebowanie na energię uwzględnia takie budynki jak: budynek tradycyjny, budynek energooszczędny, budynek pasywny, budynek zeroenergetyczny. Budynek tradycyjny inaczej zwany standardowym to obiekt charakteryzujący się sezonowym zapotrzebowaniem na ciepło. Kolejnym rodzajem budynków jest budynek energooszczędny, którego zapotrzebowanie na energię jest mniejsze niż zapotrzebowanie budynku tradycyjnego. Budynek pasywny to obiekt o bardzo niskim zapotrzebowaniu energetycznym i bardzo prostej konstrukcji, dzięki której budynek nie ma dużych strat energetycznych (Idczak 2006). Budynek zeroenergetyczny to obiekt o zerowym zużyciu energii netto i zerowej emisji dwutlenku węgla w skali roku (Bochnia 2017).

Zużycie energii w budynkach zarówno obliczeniowe, jak i rzeczywiste zależy od kilku czynników. Wszystkie te czynniki wpływają na jakość energetyczną budynku i zależą od: lokalizacji budynku, strefy klimatycznej, usytuowania względem stron świata, wyposażenia w urządzenia emitujące podczas użytkowania ciepła, zacielenia od otaczających budynków, zieleni i elementów małej architektury, przyjętych rozwiązań projektowych. W dużej mierze to już od etapu projektowania zależy, czy budynek będzie energooszczędny. Projekt budynku musi być dostosowany do panującego klimatu. Najważniejszymi elementami klimatycznymi są: minimalne temperatury w czasie zimy i czas ich trwania, długość okresu grzewczego oraz średnie temperatury, jakie w nim występują, dominujące wiatry w okresie grzewczym, maksymalne temperatury w okresie letnim, nachylenie słońca, opady, wilgotność. Projektowanie budynku wymaga wykonania analizy wewnętrznych zysków ciepła, maksymalnego obciążenia cieplnego przez użytkowników. Pomińnięcie takiej analizy może doprowadzić do problemów eksploatacyjnych związanych z utrzymaniem odpowiednich parametrów w pomieszczeniach. Projektowane budynki energooszczędne powinny mieć: odpowiednią geometrię (zwarta konstrukcja), odpowiednią izolacyjność termiczną przegród zewnętrznych, optymalne parametry efektywności energetycznej przegród przezroczystych, minimalne mostki cieplne, szczelność budynku, odpowiednią wentylację oraz system chłodniczy, a także budynek powinien posiadać inteligentne zarządzanie energią (Żurawski 2013).

Zużycie energii w budynkach wiąże się z kilkoma kwestiami takimi jak: energia użytkowa, energia końcowa i energia pierwotna. Energia użytkowa to roczna ilość energii dla ogrzewania, chłodzenia, wentylacji i przygotowania ciepłej wody użytkowej. Oblicza się ją w odniesieniu do standardowych warunków klimatycznych i standardowych warunków użytkowania. Energia użytkowa jest miarą efektywności energetycznej budynku. Jest to energia, którą potrzebuje budynek i która uwzględnia straty ciepła przez przegrody i zyski ciepła. Im większa wartość energii użytkowej, tym budynek jest bardziej energochłonny. Kolejnym pojęciem jest energia końcowa, która określa roczną ilość energii dla ogrzania, chłodzenia wentylacji i przygotowania ciepłej wody użytkowej oraz oświetlenia wbudowanego z uwzględnieniem sprawności systemów. Oblicza się ją w odniesieniu do standardowych

warunków klimatycznych i standardowych warunków użytkowania. Energia końcowa jest miarą efektywności energetycznej budynku i jego techniki instalacyjnej. Wysoka wartość energii końcowej może wskazywać na dużą energochłonność budynku lub na instalację charakteryzującą się niską sprawnością. Ostatnim pojęciem jest energia pierwotna, która określa efektywność całkowitą budynku. W jej skład wchodzi energia końcowa oraz dodatkowe nakłady energii dostarczone do granicy budynku (np. gaz, energia elektryczna, energia odnawialna, olej opałowy). Wysokie wartości energii pierwotnej wskazują na energochłonność budynku, oświetlenie energochłonne (Żurawski 2013).

W celu oceny zużycia energii przez budynek powstała klasyfikacja budynków przedstawiona w tabeli 1. Uwzględniono w niej następujące grupy budynków: zeroenergetyczny (A++), pasywny (A+), niskoenergetyczny (A), energooszczędny (B), średnio energooszczędny (C), minimum prawne (D), energochłonny (E), wysoko energochłonny (F) (Żurawski 2013).

Tabela 1. Klasyfikacja energetyczna budynków według Stowarzyszenia na rzecz Zrównoważonego Rozwoju

Klasa energetyczna	Rodzaj budynku	Wskaźnik energii użytkowej [kWh/(m ² ·rok) ⁻¹]
A++	Zeroenergetyczny	≤10
A+	Pasywny	do 15
A	Niskoenergetyczny	od 15 do 45
B	Energooszczędny	45 do 80
C	Średnio energooszczędny	80 do 100
D	Minimum prawne	100 do 150
E	Energochłonny	150 do 200
F	Wysoko energochłonny	ponad 250

Źródło: Żurawski 2013.

Celem pracy była analiza zużycia potencjalnej energii cieplnej do celów bytowo-gospodarczych na poziomie gmin województwa świętokrzyskiego. Dane pozyskano ze statystyk publicznych Głównego Urzędu Statystycznego i obejmują lata: 2014, 2016, 2018. Zmienne diagnostyczne odnosiły się do powierzchni gospodarstw domowych.

1. Materiał i metody

Wykonanie pracy zostało oparte na stanie wiedzy i źródłach literaturowych na temat zużycia energii cieplnej w różnego typu budynkach.

Zużycie potencjalnej energii cieplnej do celów bytowo-gospodarczych zostało określone na podstawie zależności:

$$Ep_c = A \cdot EU \text{ [kWh/rok]} \quad (1)$$

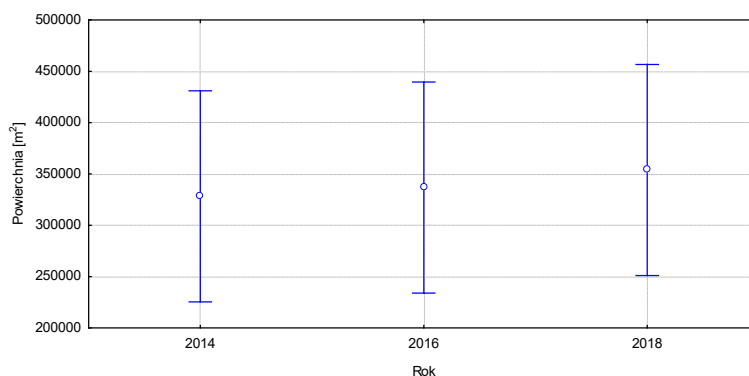
gdzie:

- Ep_c – zużycie potencjalnej energii cieplnej do celów bytowo-gospodarczych [kWh/rok],
- A – powierzchnia gospodarstw domowych [m^2],
- EU – uśredniony wskaźnik EU [kWh/($m^2 \cdot rok$)].

Przeprowadzone obliczenia zużycia potencjalnej energii cieplnej oraz analiza zmian powierzchni mieszkaniowej gospodarstw domowych pozwoliły na porównanie wyników w poszczególnych gminach województwa świętokrzyskiego. Do obliczeń wykorzystano dane pochodzące z lat 2014, 2016, 2018, które zostały pozyskane z Głównego Urzędu Statystycznego. Obliczenia zostały oparte na danych, które dotyczyły powierzchni mieszkaniowej gospodarstw domowych. Uzyskane w obliczeniach wyniki, pozwoliły na stworzenie map, na których widoczne jest zróżnicowanie.

2. Wyniki i dyskusja

Powierzchnia została wyrażona w m^2 . Na rysunku 1 widoczne są niewielkie zmiany powierzchni mieszkaniowej gospodarstw domowych w latach 2014, 2016, 2018. Największą

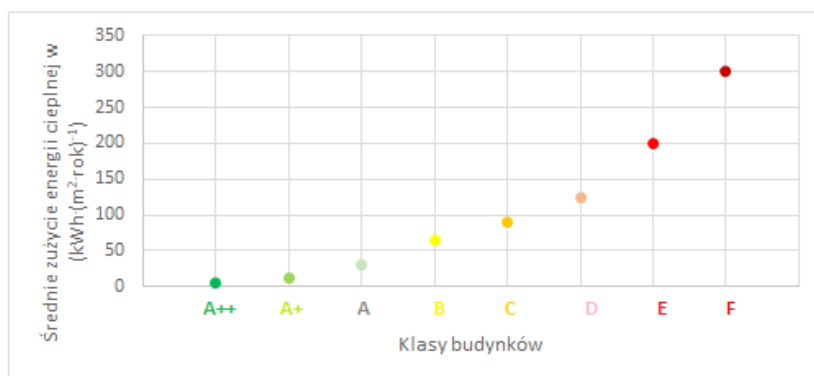


Rysunek 1. Średnia powierzchnia mieszkaniowa gospodarstw domowych gmin województwa świętokrzyskiego w latach 2014, 2016, 2018

powierzchnią mieszkaniową w latach 2014, 2016, 2018 charakteryzowała się gmina Kielce, zaś najmniejszą gmina Moskorzew.

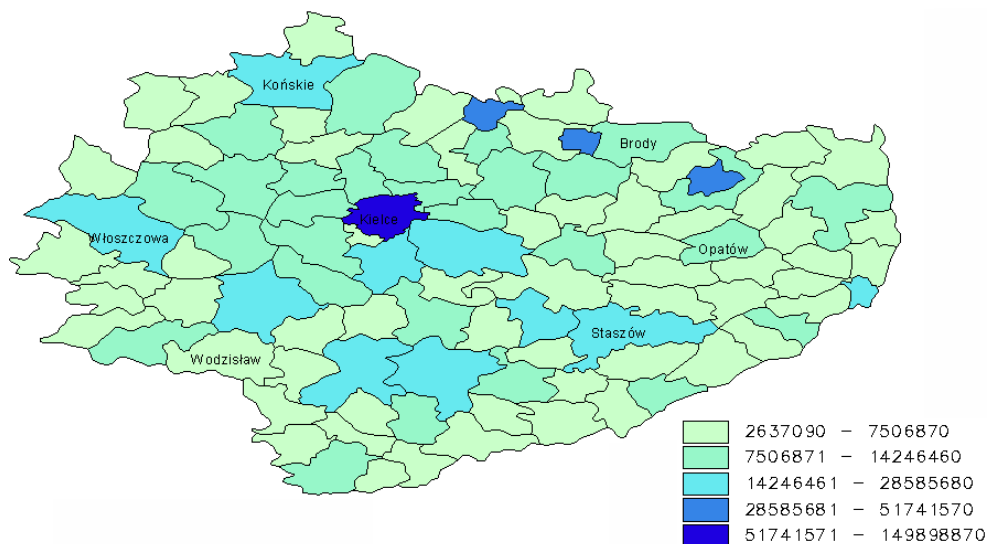
Średnia powierzchnia mieszkaniowa gmin woj. świętokrzyskiego w 2014 roku wyniosła 324 906,1 m². W 2016 roku średnia powierzchnia mieszkaniowa gospodarstw domowych wyniosła 333 426,3 m², a w 2018 roku: 350 514,5 m². Średni przyrost absolutny powierzchni mieszkaniowej gospodarstw domowych gmin województwa świętokrzyskiego w latach 2014–2018 wyniósł 25 608,4 m². Z przeprowadzonej analizy wynika, że nie ma istotnych różnic w przyroście powierzchni mieszkaniowej w badanych latach.

Rysunek 2 przedstawia różnice energetyczne pomiędzy klasami budynków. Średnie zużycie energii cieplnej dla poszczególnych klas budynków zostało wyrażone w kWh/(m²·rok). Uśredniony wskaźnik zużycia energii cieplnej dla poszczególnych klas budynków wynosi: 5 kWh/(m²·rok) dla budynków A++, 13 kWh/(m²·rok) dla budynków A+, 30 kWh/(m²·rok) dla budynków A, 65 kWh/(m²·rok) dla budynków B, 90 kWh/(m²·rok) dla budynków C, 125 kWh/(m²·rok) dla budynków D, 200 kWh/(m²·rok) dla budynków E, 300 kWh/(m²·rok) dla budynków F.



Rysunek 2. Różnice energetyczne pomiędzy klasami budynków [kWh/(m²·rok)]

Rysunek 3 przedstawia rozkład przestrzenny zużycia potencjalnej energii cieplnej dla budownictwa A w 2018 roku. Zużycie potencjalnej energii cieplnej wyrażone jest w kWh/rok. Według wyników obliczeń, gminy województwa świętokrzyskiego zostały podzielone na 5 grup. Pierwsza grupa składa się z 60 gmin, które wyróżniają się niskim zużyciem potencjalnej energii cieplnej dla budownictwa A. Ich średnie zużycie w 2018 roku wyniosło 4 778 225,5 kWh/rok. W pierwszej grupie została sklasyfikowana gmina o najniższym zużyciu potencjalnej energii cieplnej w województwie świętokrzyskim. Jest to gmina Moskorzew. Jej zużycie ukształtowało się na poziomie 2 637 090 kWh/rok. Druga grupa składa się z 28 gmin, których średnie zużycie potencjalnej energii cieplnej dla budownictwa A w 2018 roku wyniosło 10 423 782,9 kWh/rok. Do trzeciej grupy zakwalifikowano 9 gmin, których



Rysunek 3. Rozkład przestrzenny zużycia potencjalnej energii cieplnej dla budownictwa A w 2018 roku w kWh/rok

średnie zużycie potencjalnej energii cieplnej wyniosło 23 143 453,3 kWh/rok. Do przedostatniej, czwartej grupy zaliczono 3 gminy. Są to gminy Skarżysko-Kamienna, Starachowice, Ostrowiec Świętokrzyski. Ich średnie zużycie potencjalnej energii cieplnej wyniosło 41 769 880 kWh/rok. Ostatnia grupa składa się z jednej gminy. Jest to gmina Kielce. Charakteryzuje się ona najwyższym zużyciem potencjalnej energii cieplnej w województwie świętokrzyskim. Jej zużycie dla budownictwa A w 2018 roku wyniosło 149 898 870 kWh/rok.

Dodatkowo wykonano analizę wariancji w klasyfikacji pojedynczej dla uśrednionego wskaźnika EU dla poszczególnych klas budynków, którą przedstawiono w tabeli 2.

Tabela 3 przedstawia analizę testu Tukeya dla grup jednorodnych zużycia energii jako uśredniony wskaźnik EU dla poszczególnych klas budynków.

W teście Tukeya klasy budynków zostały podzielone na 4 grupy. Do poszczególnych grup przypasowane zostały klasy budynków, pomiędzy którymi nie występują duże różnice.

Tabela 2. Analiza wariancji w klasyfikacji pojedynczej dla uśrednionego wskaźnika EU dla poszczególnych klas budynków

Zmienna grupująca	Suma kwadratów	Średnia kwadratów	Test F	P
Klasa budynków	0,00936	0,0013	23,164	0,000*

* Istotna zależność na poziomie $\alpha = 0,05$.

Tabela 3. Analiza testu Tukeya dla grup jednorodnych zużycia energii jako uśredniony wskaźnik EU dla poszczególnych klas budynków

Klasa energetyczna	UWEU [kWh/(m ² ·rok)]	1	2	3	4
A++	1 769 281	****			
A+	4 600 130	****			
A	10 615 685	****			
B	23 000 651	****	****		
C	31 847 055	****	****		
D	44 232 021		****	****	
E	70 771 233			****	
F	106 156 850				****

Do pierwszej grupy przyporządkowano klasę A++, A+, A, B, C. Druga grupa to klasy budynków: B, C, D. W trzeciej grupie znalazły się klasy budynków: D i E. W ostatniej grupie znalazła się tylko klasa budynków F, która charakteryzuje się dużym zużyciem energii cieplnej w przeliczeniu na m². Test Tukeya wykazał, że nie ma dużych różnic pomiędzy poszczególnymi klasami znajdującymi się w tej samej grupie.

Wnioski

Analiza powierzchni mieszkaniowej gospodarstw domowych gmin województwa świętokrzyskiego pokazała, że w badanych latach: 2014, 2016, 2018 nie zaszły istotne zmiany w wielkości powierzchni mieszkaniowej. W latach 2014, 2016, 2018 gmina Moskorzew wyróżniała się najmniejszą powierzchnią mieszkaniową gospodarstw domowych wśród gmin województwa świętokrzyskiego. Gmina, która w tych latach wyróżniała się na tle innych gmin pod względem największej powierzchni mieszkaniowej gospodarstw domowych, to gmina Kielce.

Analiza zużycia potencjalnej energii cieplnej w 2014 roku pokazała różnice, jakie występują pomiędzy budynkami A++, A+, A, B, C, D, E, F. W 2014 roku największe zapotrzebowanie na energię ciepłą dla celów bytowo-gospodarczych miała gmina Kielce. Różnica pomiędzy zużyciem potencjalnej energii cieplnej dla budownictwa F, a A++ wyniosła 1 414 902 010 kWh/rok. Najmniejszym zapotrzebowaniem na energię ciepłą dla celów bytowo-gospodarczych w 2014 roku wyróżniała się gmina Moskorzew. Różnica pomiędzy zużyciem potencjalnej energii cieplnej dla budownictwa F a A++ wyniosła 25 146 980 kWh/rok.

W analizowanych latach 2014–2018 nastąpił nieznaczny wzrost powierzchni mieszkaniowej gospodarstw domowych gmin województwa świętokrzyskiego. Jeśli nowe powierzch-

nie mieszkaniowe należałyby do klas budynków: A++, A+, A, B, nieznacznie wpłynęłoby to na globalne zużycie energii cieplnej. Modernizacja istniejących budynków, których klasa budynków to D, E, F, na niskoenergetyczne klasy budynków znacznie wpłynęłaby na globalne zużycie energii cieplnej.

Literatura

- Białorucka A., Korpysz-Drzazga J. 2019: Szczelny, bezpieczny i trwały dach, s. 28–90.
- Bochnia K. 2017: Budynki niemal zeroenergetyczne. *Builder*, s. 64–65.
- Buszko A. 2017: Ocieplanie ścian zewnętrznych wełną mineralną. *Ekspert Budowlany*, s. 14–15.
- Firląg S., Gregoriou-Szczepaniak M., Kaliszuk-Wirotecka A., Węglarz A., Miszczuk A., Sobczyńska E. 2019: Kompleksowa termomodernizacja budynków jednorodzinnych, s. 5–140.
- Kowalik M. 2008: Nowoczesne technologie robót budowlanych w budownictwie jednorodzinym, s. 30–37.
- Laskowski L. 2005: Ochrona cieplna i charakterystyka energetyczna budynku. Warszawa: Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej.
- Przybek P. 2006: Materiały termoizolacyjne w aspekcie jakości energetycznej budynków. *Zeszyty Naukowe*, 718, s. 111–117.
- Żurawski J. 2013: Efektywność energetyczna w budownictwie, s. 5–8.

Zalety i wady montażu instalacji fotowoltaicznych

Streszczenie. Celem opracowania było określenie, które uwarunkowania (ekonomiczne, techniczne, środowiskowe) w opinii respondentów mogą wpływać na rozwój systemów fotowoltaicznych, a które je ograniczać. W kontekście powyższych założeń ujawniono, że główną barierą utrudniającą inwestycje w PV (PhotoVoltaic) jest ich cena, a zaletą darmowa energia elektryczna ze Słońca. Zdaniem ankietowanych budownictwo jednorodzinne jest tym sektorem gospodarki, w którym fotowoltaika najprężniej się rozwija. Niemniej produkcja prądu na własne potrzeby będzie tu wtedy zbilansowana, jeśli wyeliminuje się przeszkodę w postaci braku dodatkowego systemu wspierającego, którego praca uzupełni zwiększone zapotrzebowanie energetyczne budynku przy niekorzystnych warunkach pogodowych w ciągu roku. Mieszkańcy wsi zwracali uwagę głównie na korzyści ekonomiczne z ogniw PV (szybki zwrot inwestycji, zyski ze sprzedaży nadwyżek prądu, podniesienie wartości nieruchomości) oraz bariery techniczne związane z ich lokalizacją (brak wolnych przestrzeni czy powierzchni niezacienionej). Osoby z miasta zdecydowanie częściej dostrzegały zalety i wady modułów o charakterze technicznym (ich dodatnie walory estetyczno-wizualne oraz problemy eksploatacyjne, spowodowane mechanicznymi uszkodzeniami). Wyrażały też częściej od mieszkańców wsi zaniepokojenie wpływem produkcji modułów na środowisko.

Słowa kluczowe: panele fotowoltaiczne, odnawialne źródła energii, czysta energia, bariery i korzyści, studenci

Advantages and disadvantages of installing photovoltaic systems

Abstract. The aim of this study is to find out which factors (economic, technical, environmental), according to the respondents, have a positive impact on the development and montage of photovoltaic systems, and which of them have an adverse effect. In terms of the above assumptions, it has been found that the main disadvantage is the PV system installation price, whereas, free electricity to be generated from the solar energy is an advantage. The respondents are of the opinion that this is the single-family housing that is the sector of economy where photovoltaics develop most dynamically. Nevertheless, production of electricity for one's own needs can be balanced, if the obstacle such as the lack of additional support system to be used for supplementing a building increased energy demand in case of adverse seasonal weather conditions, will be eliminated. Rural area inhabitants focused on the economic benefits of PV systems (fast investment cost return, profits from electricity sale, increased prices of real

¹ Uniwersytet Technologiczno-Przyrodniczy w Bydgoszczy, Wydział Budownictwa, Architektury i Inżynierii Środowiska

assets) and technical barriers connected with their location (too little space or lack of surfaces to be exposed to the sun). Town inhabitants were more aware of advantages and disadvantages of the module technical structure (its esthetic–visual features and maintenance problems caused by mechanical damage). They were more concerned than rural area inhabitants about the impact of PV modules on the environment.

Keywords: photovoltaic panels, renewable energy sources, clean energy, barriers and benefits, university students

Wprowadzenie

Fotowoltaika (PV) jest bardzo ważnym obszarem zainteresowania krajowego rynku przetwarzania energii słonecznej. Według danych raportu Instytutu Energetyki Odnawialnej – IEO (Rynek fotowoltaiki... 2019) sektor ten jest jednym z najszybciej rozwijających się sektorów odnawialnych źródeł energii (OZE), nie tylko w Polsce, ale i na świecie. Zdaniem ekspertów zasoby tego potencjału nie są w naszym kraju dostatecznie wykorzystane. Łączna moc zainstalowana w źródłach fotowoltaicznych na koniec 2018 i 2019 roku wynosiła odpowiednio około 500 MW oraz 1500 MW. Ocenia się, że 2020 roku może ona osiągnąć 2,5 GW, a obroty na rynku fotowoltaiki wzrosnąć w stosunku do poprzedniego roku nawet o 25% i przekroczyć 5 mld zł (Rynek fotowoltaiki... 2020). W związku z tym prognozuje się, że pod względem tempa wzrostu zainstalowanej mocy Polska uplasuje się w 2020 roku na piątym miejscu w Unii Europejskiej (UE). Należy podkreślić, że pozyskiwanie energii ze źródeł odnawialnych stało się jednym z istotnych elementów ramowych *Krajowego planu na rzecz energii i klimatu na lata 2021–2030* (2019), na co miał wpływ przyjęty już na szczycie UE w październiku 2014 roku nowy pakiet klimatyczno-energetyczny nakładający na państwa członkowskie obowiązek osiągnięcia w 2030 roku zużycia energii zielonej na poziomie 27% (Wiśniewski 2015). W Polsce zakłada się, że w ramach ogólnounijnego celu uzyskamy wtedy 21% udziału OZE w finalnym zużyciu energii brutto (zużycie łącznie w elektroenergetyce, ciepłownictwie, chłodnictwie oraz na cele transportowe). Przewiduje się, że zadanie to będzie realizowane w latach 2021–2030 w orientacyjnej liniowej trajektorii, a mianowicie: około 15% w 2021 r., 17% w 2025 r. i około 19% w 2027 roku (Krajowy plan na rzecz... 2019). I choć ta perspektywa wydaje się być obiecująca, to Najwyższa Izba Kontroli (NIK) w swoim raporcie z sierpnia 2018 roku sygnalizowała, że osiągnięcie założonego już w 2020 roku celu 15% udziału OZE w ogólnym zużyciu energii brutto może być zagrożone (Rozwój Sektora... 2018). Zaktualizowany i rozszerzony projekt dokumentu *Polityka energetyczna Polski do 2040 roku* (2019) zakłada, że w 2030 roku realizacja celu OZE może być nawet na poziomie 23%, ale tylko w sytuacji przyznania dodatkowych środków unijnych. W przypadku fotowoltaiki (która obecnie stała się dominującym obszarem inwestycji w elektroenergetyce odnawialnej) prognozuje się przekroczenie w roku 2025 mocy źródeł PV zakładanych w *Krajowym Planie na Rzecz Energii i Klimatu na lata 2021–2030* (2019). Zdaniem analityków już w 2025 roku moc zainstalowana w foto-

woltaice może osiągnąć 7,8 GW (Rynek fotowoltaiki... 2020), czyli wzrosnąć na przestrzeni pięciu lat o 5,3 GW. Nowelizacja ustawy *Prawo ochrony środowiska oraz niektórych innych ustaw* (Ustawa z dnia 16 października 2019) wprowadziła w 2019 roku ważne dla polskiego rynku OZE regulacje, pozwalające na szybszy rozwój instalacji PV w budownictwie jednorodzinym. Ustawodawca daje możliwość montowania tych technologii właścicielom budynków mieszkalnych o powierzchni 300 m² z 8% stawką VAT, zamiast obowiązującej do tej pory 23%, z zastrzeżeniem, że można je instalować nie tylko na dachu, ale w dowolnym miejscu na terenie swojej posesji, o ile ta instalacja będzie związana funkcjonalnie z domem jednorodzinym. Przewidziane są też zmiany dotyczące wypłacanych dotacji w programie „Mój Prąd”. Posunięcia tego typu mogą zainicjować przyspieszenie zmian w sektorze ciepłowniczym poprzez zastępowanie kotłów zasilanych paliwami stałymi tymi bardziej ekologicznymi. Z uwagi na wzrastające zainteresowanie mikroinstalacjami PV celem pracy będzie analiza korzyści i wad wynikających z zastosowania modułów fotowoltaicznych. Uzasadnieniem wyboru tematu opracowania jest fakt, że to odnawialne źródło energii sprzyja nie tylko ochronie środowiska, ale jest jednym z najtańszych w eksploatacji sposobów na zapewnienie odpowiedniej temperatury i wody w budynku mieszkalnym. Dlatego w pracy sprawdzono wiedzę młodych ludzi z zakresu montażu systemów fotowoltaicznych oraz to, czy wśród innych odnawialnych źródeł energii mają one największą szansę zaistnieć na polskim rynku. Ponadto wyraźne w sektorze indywidualnych prosumentów zainteresowanie tym nośnikiem energii wymusza przeanalizowanie czy zauważalna jest rola ogniw PV w gospodarce w obiegu zamkniętym (GOZ), bo jak piszą Kulczycka i Pędziwiatr (za den Hollander, Bakker i Hultink 2019), jej istotą jest zachowanie ekonomicznej i środowiskowej wartości materiałów tak długo, jak to możliwe przez utrzymywanie ich w systemie gospodarczym, albo przez wydłużenie życia wytworzonych z nich produktów, albo przez włączenie ich z powrotem do systemu dla ponownego użycia. W przypadku paneli fotowoltaicznych chodzi o odpady, które będą generowane po zakończeniu żywotności instalacji.

I. Materiał i metody

Badanie przy użyciu kwestionariusza wywiadu przeprowadzono w 2019 roku na grupie 236 osób uczących się w placówce uniwersyteckiej. Jego założeniem było ustalenie poziomu wiedzy młodzieży na temat źródeł ekologicznej energii, w szczególności z zakresu mikroinstalacji fotowoltaicznych. Uzyskano od respondentów informacje dotyczące:

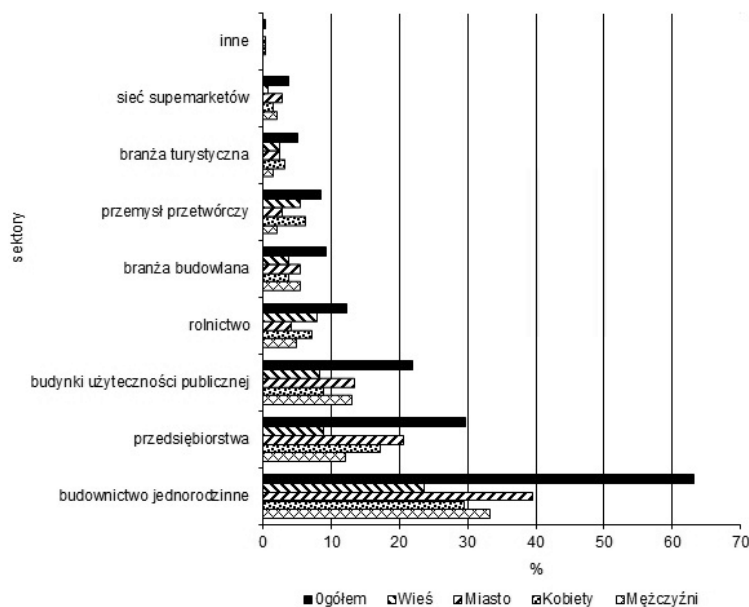
- ♦ sektorów gospodarki, w których technologie PV mają największe zastosowanie w produkcji czystej energii,
- ♦ sposobów umiejscawiania paneli fotowoltaicznych w przestrzeni, ze wskazaniem głównych wad i zalet wynikających z ich montażu (ekonomicznych, technicznych, środowiskowych),

- ♦ kosztów zakupu podstawowej instalacji PV (ze wskazaniem liderów branży OZE na rynku polskim),
- ♦ oceny szans i barier rozwoju małych technologii OZE na obszarach wiejskich, w tym próby określenia czy systemy fotowoltaiczne mogą stać się przyszłością dla polskiego rolnictwa.

Ankieta skierowana była do studentów, a jej celem było zweryfikowanie wiedzy młodych ludzi na temat odnawialnych źródeł energii. Składała się ona z 27 pytań, z których 11 wykorzystano do przeprowadzenia analiz w niniejszym opracowaniu. Pytania miały w przeważającej części formułę zamkniętą (dla nich przygotowano różne warianty odpowiedzi) oraz otwartą (pozwalającą uchwycić specyfikę wypowiedzi ankietowanych, bez sugerowania im jakiegokolwiek odpowiedzi). Dodatkowo zastosowana skala Likerta pozwoliła uzyskać od respondentów wiadomości, w jakim stopniu zgadzają się (bądź nie zgadzają) z danym stwierdzeniem (Sołoma 2002). Chodziło o ustalenie opinii ankietowanych na temat tego, czy małe technologie OZE mają być wdrożone na polskiej wsi. Badanie zostało zrealizowane bezpośrednio przez autorkę opracowania. Studenci zostali poinformowani o wykorzystaniu uzyskanych wyników do celów wyłącznie poznawczych. Analizy przeprowadzono z uwzględnieniem ich płci oraz miejsca zamieszkania (miasto, wieś). Zwrócono uwagę na to, czy pochodzenie ankietowanych ma wpływ na zróżnicowane postrzeganie potencjału fotowoltaicznego oraz jakie reprezentują w tym obszarze poglądy kobiety i mężczyźni.

2. Wyniki i dyskusja

Zdaniem młodzieży budownictwo jednorodzinne jest sektorem gospodarki, w którym fotowoltaika rozwija się najprężniej (63,1%). Taki pogląd reprezentowali głównie mieszkańcy miast (39,4%), w większości mężczyźni (33,4%) – rysunek 1. Szałata i in. (2016) wskazują, że jest to przykład uzasadnionej ekonomicznie działalności prosumenckiej, mającej, zdaniem Dołęgi (2013), duże znaczenie oszczędnościowe ekologiczno-energetyczne. Drugą wyodrębnioną przez respondentów jednostką gospodarczą wykorzystującą możliwośći pozyskiwania energii przy pomocy ogniw PV były przedsiębiorstwa (29,6%). Zapewne respondenci zwrócili uwagę na fakt, że firmy mogą w ten sposób nie tylko obniżyć rachunki za prąd, ale wpłynąć na ogólną redukcję kosztów ponoszonych na funkcjonowanie swoich jednostek. Prawdopodobnie te same motywy towarzyszyły ankietowanym w przypadku wskazania budynków użyteczności publicznej (22%), niemniej tu instalacje fotowoltaiczne mają za zadanie zmniejszyć niską emisję. Stworzono ku temu odpowiednie instrumenty wsparcia w postaci Regionalnych Programów Operacyjnych, w ramach których dofinansowuje się montaż ogniw dla tych właśnie podmiotów: Oś priorytetowa 4. Efektywność energetyczna, odnawialne źródła energii i gospodarka niskoemisyjna, Działanie 4.3. Efektywność energetyczna i odnawialne źródła energii w infrastrukturze publicznej i mieszkaniowej (<https://www.fundusze>). Rozwój fotowoltaiki zauważony został przez młodych ludzi także



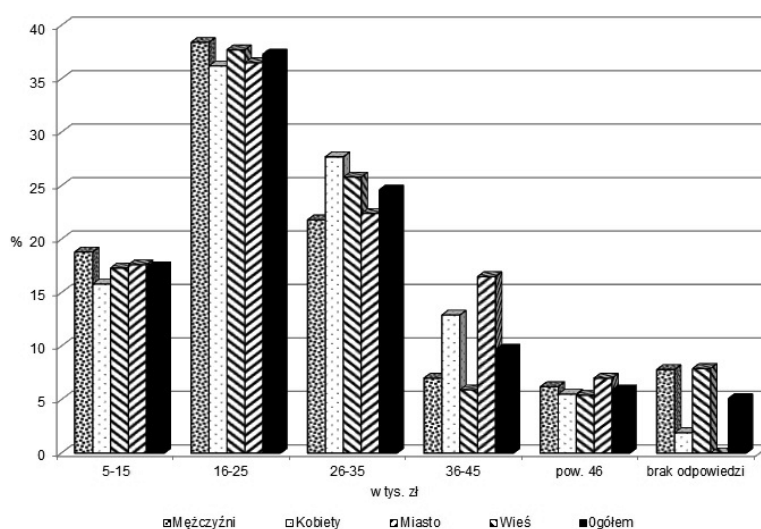
Rysunek 1. Sektory gospodarki, w których zdaniem respondentów fotowoltaika rozwija się najprężniej
Źródło: opracowanie własne

w rolnictwie (12,3%) i przemyśle przetwórczym (8,4%). Takich wskazań dokonywały głównie osoby zamieszkujące wieś, zwłaszcza kobiety (rys. 1). Być może zauważają one atrakcyjność tego źródła dla rozwoju gospodarstw rolnych, dzięki obniżeniu kosztów wydatkowanych na energię w zautomatyzowanych procesach produkcyjnych. Rozwój ogniw PV w branży budowlanej, turystycznej czy sieci supermarketów uznano za marginalny (9,3% vs 5% vs 3,8%). Podobne wyniki odnotował Instytut Energetyki Odnawialnej w 2017 roku; tu wykazały one, że fotowoltaika rozwijać się będzie najszybciej w przemyśle przetwórczym i branży towarowych gospodarstw rolnych. W mniejszym zaś stopniu, podobnie jak w badaniach własnych w branży spożywczej, sieci supermarketów, branży turystycznej oraz branży budowlanej (Szekalska 2017).

Studenci są zgodni, co do tego, że małe technologie OZE mają szansę zaistnieć na obszarach wiejskich kraju (TAK – 35,6%, RACZEJ TAK – 42,8%) i stać się przyszłością dla polskiego rolnictwa (TAK – 75%, NIE – 20,3%, brak zdania – 4,7%). Przekonani do tych kwestii byli częściej mieszkańcy wsi niż miast. Ich zdaniem OZE odegrają bardzo ważną rolę na wsi (TAK – 38,8%, RACZEJ TAK – 44,7%), stając się dla rolnictwa wyznacznikiem rozwoju (TAK – 82,3%, NIE – 18,6%). Perspektyw wykorzystania zielonej energii respondenci (głównie mieszkańcy wsi) upatrują zdecydowanie w fotowoltaice (41,1%), która będzie ich zdaniem najważniejszą formą pozyskiwania energii ze Słońca, uniezależniającą rolników od publicznych dystrybutorów prądu. Zwracają ponadto uwagę na konieczność

tworzenia wiejskich spółdzielni energetycznych (26,2%) i dostrzegają ważność biomasy (37,7%), pomp ciepła (36%) oraz biogazowni rolniczych (24,5%). Uważają, że rozwój odnawialnych źródeł energii może przyczynić się do wzrostu miejsc pracy i dać mieszkańcom obszarów wiejskich dodatkowe bądź stałe zatrudnienie (22,8%). By tak się jednak stało, muszą zostać uruchomione korzystne mechanizmy wsparcia dla OZE (21,4%), by w przyszłości zapewnić samowystarczalność cieplną i energetyczną mieszkańcom wsi (12,7%). Inwestycje będą służyć ochronie środowiska (14,8%), gdy zwiększona zostanie edukacja (11,4%) i samoświadomość wśród społeczności wiejskiej (8,5%). Rolnicy powinni częściej postrzegać ekologiczne technologie jako mogące usprawnić gospodarstwo albo stać się alternatywą dla uprawy ziemi. Ankieterzy posiadane przez rolników duże nieużytkowane przestrzenie widzą jako wyznacznik do organizowania farm fotowoltaicznych (12,2%). Wyrażają pogląd, że obok zapewnienia niezależności energetycznej, wpłyną one na ogólny wizerunek producentów rolnych jako osób z innowacyjnym i ekologicznym podejściem. Szansą na rozwój OZE mogą stać się dotacje przyznawane rolnikom w ramach programu priorytetowego „Agroenergia”, dofinansowanego przez Narodowy Fundusz Ochrony Środowiska i Gospodarki Wodnej – NFOŚiGW (<http://www.nfosigw>). Jego nadrzędnym celem jest zwiększenie produkcji energii ze źródeł odnawialnych właśnie w sektorze rolniczym (w tym na zakup i montaż instalacji fotowoltaicznej o zainstalowanej mocy elektrycznej większej niż 10 kW oraz nie przekraczającej 50 kW). Ta forma dofinansowania jest bardzo ważna, gdyż zdaniem młodzieży, to koszty OZE stanowią wciąż priorytetową barierę utrudniającą ich rozwój na wsi (37,2%). Drugą znaczącą barierą jest brak wiedzy na ich temat (23,7%), co przekłada się często na negatywne nastawienie społeczności wiejskich do nowych technologii (8,4%). Brak pomocy ze strony państwa wskazywany był rzadko (7,6%). W pojedynczych przypadkach jako przeszkody podawano: długi czas zwrotu inwestycji i jej niepewność, słabo rozwiniętą infrastrukturę przesyłową prądu, hałas urządzeń, sąsiedztwo obszarów chronionych, niechęć do oddawania ziemi, a także zły stan techniczny budynków uniemożliwiający instalowanie np. paneli słonecznych. Mocowanie modułów wymaga bowiem zapewnienia bezpieczeństwa konstrukcji budynku, jak i całej instalacji, a zatem spełnienia wymagań technicznych związanych z projektowaniem oraz montażem. Chodzi tu nie tylko o znajomość przepisów prawa zawartych w ustawach: *O odnawialnych źródłach energii* (Obwieszczenie Marszałka...) *Prawo energetyczne* (Ustawa z dnia 20 kwietnia 2020), ale również doboru odpowiedniej konstrukcji montażowej (na dach płaski bądź skośny), inwertera, okablowania i zestawu paneli o odpowiedniej dla budynku mocy. Zdaniem respondentów moduły PV głównie umiejscawia się na dachach budynków mieszkalnych (90,6%) bądź gospodarczych (35,6%), albo bezpośrednio na gruncie (38,1%). Sposobność wykorzystania do tego ścian elewacji budynków (mieszkalnego bądź gospodarczego) była przez młodzież punktowana rzadziej (odpowiednio 7,6% vs 3,3%). Być może ta innowacyjna technika montażu paneli nie jest im do końca znana, choć pojawia się ona już w przestrzeni naszego życia. Możemy spotkać bryły budynków obudowane panelami PV lub elewacje skonstruowane wyłącznie z samych modułów. Często wskazywano też dachy garaży (31,3%), ale już

rzadziej ich elewacje (3,3%). Ogólnie stwierdzono, że można je zamontować na praktycznie każdym budynku wolnostojącym (11,4%). Podawany przez badanych średni koszt podstawowej instalacji fotowoltaicznej oscylował przeważnie w granicach 16–25 tys. zł (37,3%) i 26–35 tys. zł (24,6%) – rysunek 2, przy czym, by dokładnie go oszacować, trzeba zdaniem Flizikowskiego i Mrozińskiego (2015) przeprowadzić kompleksową analizę ekonomiczną poprzez symulację funkcjonowania określonego systemu w danych warunkach klimatycznych. W swoim opracowaniu autorzy pokazują, w jaki sposób należy podejść do prawidłowego sporządzenia takiej analizy, by wybrać najlepsze dla siebie rozwiązanie.

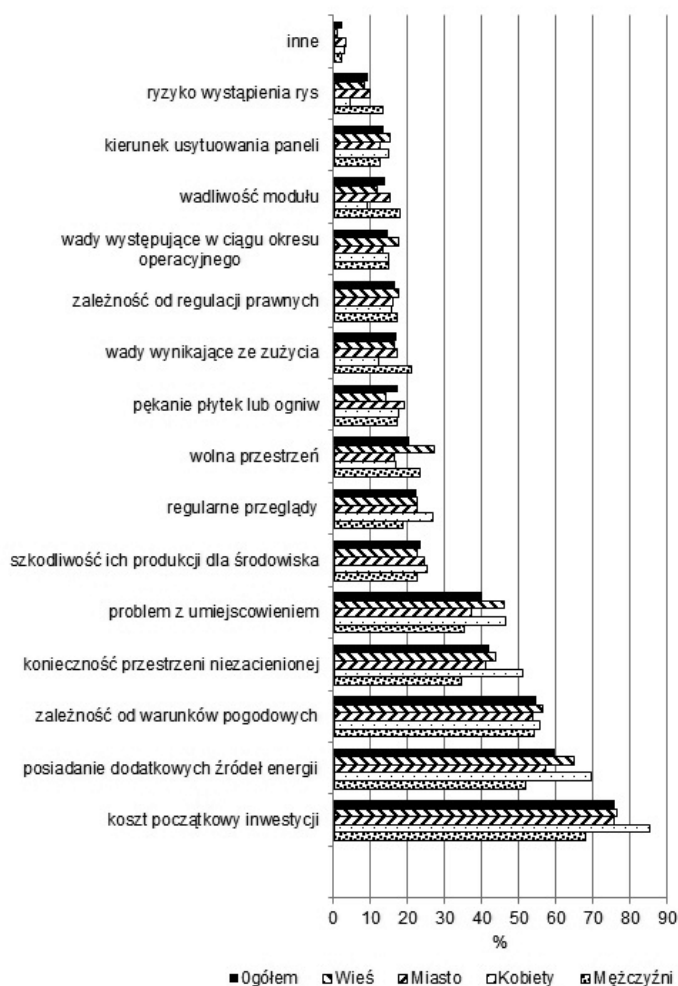


Rysunek 2. Średni koszt podstawowej instalacji fotowoltaicznej (w opinii respondentów)

Źródło: opracowanie własne

Respondenci wskazali, że rzadko dokonuje się zakupu urządzeń rodzimych producentów (24,5% vs 75,5%). Sporadycznie udzielano odpowiedzi (7,7%) co do zagranicznych kanałów dystrybucji tych urządzeń, podając Chiny jako główne centrum rozprowadzania paneli fotowoltaicznych (w pojedynczych przypadkach Niemcy, Norwegię, Japonię i USA). Młodzież uznała, że aspekt finansowy jest główną przesłanką utrudniającą zakup paneli PV (75,8%) – rysunek 3, a tym samym hamującą wdrażanie tych ekologicznych systemów w kraju. Stwierdzono również, że przyszli użytkownicy muszą dysponować dodatkowym źródłem energii (59,7%), gdyż zależność pracy modułów fotowoltaicznych od warunków pogodowych jest znaczna (54,6%). Respondenci są zorientowani w oddziaływaniu czynników zewnętrznych, które przede wszystkim decydują o wydajności pracy instalacji (intensywność docierającego promieniowania słonecznego, przejrzystość atmosfery, odpowiedni kąt padania promieni słonecznych). Trudności upatrywano w ich odpowiedniej lokalizacji (40,2%),

zwłaszcza posiadaniu przestrzeni niezacienionej (41,9%) i wolnej pod zabudowę (20,3%). Zauważono również problem z kierunkiem usytuowania paneli (13,5%). Wyrażano też obawy związane z koniecznością przeprowadzania regularnych przeglądów instalacji (22,4%), co byłoby obciążone w przyszłości dodatkowymi wydatkami. Dopatrzone się także minusów związanych z pracą paneli w ciągu całego okresu ich eksploatacji. Najczęściej wskazywano na mogące pojawić się uszkodzenia mechaniczne, a mianowicie pękanie płytek lub ogniw (17,3%), ryzyko wystąpienia rys (9,3%) oraz wady wynikające ze zużycia modułów (16,9%), ujawniające się w ciągu okresu operacyjnego (14,8%), a także te przedwczesne, związane ze złym montażem instalacji (14%). Uszkodzenia powstałe w procesie produkcji

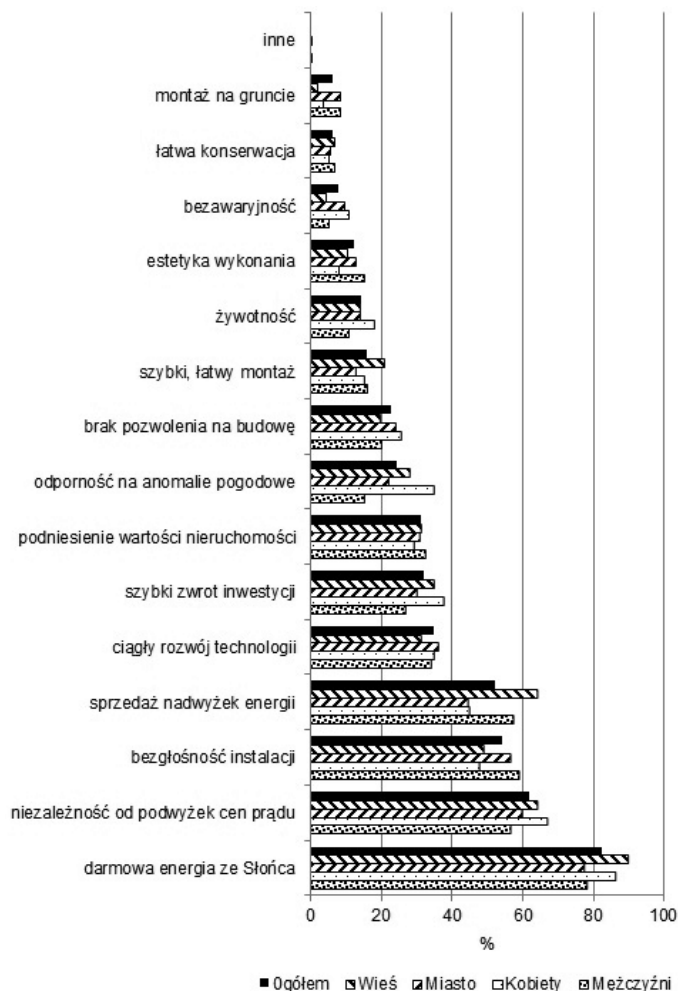


Rysunek 3. Utrudnienia związane z montażem instalacji fotowoltaicznych (w opinii respondentów)

Źródło: opracowanie własne

są najczęściej trudno zauważalne, a wykrycie ich praktycznie niemożliwe (np. mikropęknięcia, mogące prowadzić do tzw. ścieżek ślimaczych). Z kolei przy etapie montażu najczęściej dochodzi do stłuczeń, pęknięć, wgnieceń i uszkodzeń ram. W trakcie eksploatacji ogniwa przede wszystkim są narażone na czynniki pogodowe. Niemniejsze znaczenie ma tu także ich nieumiejętna konserwacja – czyszczenie (<http://www.instsani.pl>).

Zdaniem młodzieży poważnym zagrożeniem jest też sam proces produkcyjny paneli (23,7%), gdyż w cyklu ich wytwarzania wykorzystuje się niebezpieczne chemicznie związki. Potwierdza to w swoim opracowaniu Muradin (2017) podając, że największe oddziaływanie na środowisko wykazuje właśnie etap produkcji modułów fotowoltaicznych z uwagi na bardzo energochłonny proces wydobycia krzemu (surowca będącego podstawą wytwarzania ogniw). Również po demontażu instalacja może stać się poważnym obciążeniem dla środowiska, jeśli nie zostanie poddana recyklingowi. Badania ujawniły, że obowiązujące regulacje prawne respondenci postrzegają jako dodatkowy ogranicznik rozwoju fotowoltaiki (16,5%), choć ustawodawca wprowadził wiele korzystnych przepisów dla potencjalnych prosumentów. Dostrzegło je w badaniu 22,9% osób, uznając za kryterium, które może zwiększyć zainteresowanie systemami PV i skłonić do ich zakupu. Chodziło przede wszystkim o brak uzyskiwania pozwolenia na budowę dla mikroinstalacji do 50 kW. Główną zaletą produkcji biopędu z instalacji PV zdaniem młodzieży jest darmowość energii pochodzącej ze Słońca (82,6%) – rysunek 4, która pozwala uniezależnić się od wzrostu cen za energię (61,8%). Odsprzedaż bądź oddanie jej nadwyżek do sieci energetycznej z możliwością późniejszego wykorzystania postrzegana była jako kolejny atut zastosowalności tego źródła (52,1%). Badani stwierdzili ponadto, że taka inwestycja szybko się zwróci (32,2%) i podniesie wartość nieruchomości (31,3%). Uznano też, że ciągły rozwój przemysłu fotowoltaicznego (34,7%) wymusza popyt na tego rodzaju produkty. Stają się one konkurencyjne cenowo i przede wszystkim wyższej jakości. Jak podkreśla Kaczmarczyk (2020) na rynku istnieje wielu producentów paneli słonecznych, dlatego konsumentom trudno jest dokonać właściwego wyboru. Autor sugeruje, by przed ich zakupem zapoznać się z rankingiem firm, w których przeanalizowano ich niezawodność pracy przy pomocy testów przeprowadzonych przez Instytut PV Evolution Lab. Pozwalają one na właściwą ocenę standardów produkcyjnych, gdzie jednym z ważniejszych wskaźników jakości danego produktu, jest m.in. długość jego gwarancji. Znajomość tych zagadnień jest bardzo ważna, gdyż już w 2016 roku Polskie Towarzystwo Fotowoltaiki wyrażało duże zaniepokojenie sygnałami o złej jakości komponentów systemów fotowoltaicznych sprzedawanych na rynku (Pietruszko 2016). Mocną stroną instalacji fotowoltaicznych jest zdaniem młodzieży ich bezgłośność (54,2%) oraz odporność na anomalie pogodowe (24,5%). Przy czym generować hałas może jedynie inwerter (urządzenie przetwarzające prąd stały wytwarzany przez moduły na prąd przemieniony, dostarczany do budynku mieszkalnego), a poziom jego dźwięku uzależniony jest głównie od mocy danej instalacji. Wytrzymałość konstrukcji na czynniki zewnętrzne jest wynikiem pokrycia (laminowania) paneli specjalną warstwą folii. Zabezpiecza ona je nie tylko przed opadami atmosferycznymi, ale również dużymi wahaniami temperatury powietrza.



Rysunek 4. Zalety montażu paneli fotowoltaicznych (w opinii respondentów)

Źródło: opracowanie własne

Zalet fotowoltaiki upatrują też respondenci w szybkim i łatwym jej montażu (16,1%), produkcji czystej energii przez okres nawet kilkudziesięciu lat (14,4%) oraz bezawaryjności systemu (8%). Dostrzeżono również estetykę wykonania ogniw PV (12,3%), nieskomplikowaną ich konserwację (6,3%), a także możliwość montażu na gruncie (6,3%). Na podstawie przeprowadzonych analiz korzyści i szans płynących z zastosowania paneli fotowoltaicznych dało się zauważyć, że młodzież ze wsi koncentrowała swoją uwagę głównie na aspektach technicznych, które pozwalają szybko wdrożyć ekologiczne systemy w życie (ze względu na nietrudny montaż, ich wytrzymałość, jak również łatwą konserwację) i stają się sposobem

na zapewnienie stałych dostaw, darmowej oraz czystej energii. Jeśli respondenci z obszarów wiejskich zgłaszali jakiegokolwiek obawy związane z fotowoltaiką, to odnosiły się one głównie do utrudnień lokalizacyjnych oraz ograniczeń wynikających z montażu i użytkowania urządzeń. Czynili to częściej niż mieszkańcy miast – ta grupa badanych koszt paneli i regulacje prawne uznawała za bariery, z którymi trzeba się zmierzyć w początkowej fazie uruchamiania inwestycji. Być może dlatego podawała wyższe (w górnych wyróżnionych przedziałach cenowych) kwoty (rys. 2) na zakup paneli, zakładając, że zainwestowany kapitał zwróci się w przyszłości inwestorom ze sprzedaży nadwyżek energii. Z kolei młodzież z miast skupiła uwagę na rozwoju technologii PV, śledząc nowe rozwiązania konstrukcyjne na rynku, poprawiające estetykę modułów, a także wydłużające czas ich pracy. Wykazała się też większą samoświadomością z zakresu oceny cyklu życia paneli fotowoltaicznych, podkreślając ich negatywny wpływ na środowisko. To bardzo ważny wynik badań, gdyż jak podaje Rapacka (2019), pomimo że mamy do czynienia z boomem inwestycyjnym w sektorze fotowoltaiki, trzeba odpowiednio przygotować się do poradzenia sobie z odpadami po zakończonej ich pracy (zwłaszcza że niebawem zostaną wyłączone z obiegu te z lat dziewięćdziesiątych XX wieku i zastąpione instalacjami wyższej generacji). To poważne wyzwanie dla środowiska, a tym samym uruchamiające szanse biznesowe na recykling takiego sprzętu. Na krajowym rynku działają już tego typu firmy, odzyskujące z modułów m.in. szkło oraz aluminium. Jednocześnie wchodzi technologie, które mają zastąpić ogniwa krzemowe bardziej zrównoważonymi z fosforanu (<https://globenergia.pl/nowy>), czyli nakierowane na przyjazną środowisku produkcję. Oceniając wypowiedzi młodzieży ze względu na ich płeć, daje się zauważyć, że kobiety miały podobne odczucia w zakresie czynników wspomagających i hamujących rozwój fotowoltaiki, co osoby reprezentujące wieś, zaś mężczyznom były bliższe te wskazywane przez osoby z ośrodków miejskich (rys. 3 i 4). Kobiety były też częściej przekonane od mężczyzn o konieczności wdrażania OZE nie tylko w rolnictwie, ale także w innych sektorach gospodarki (budownictwie jednorodzinnym, przedsiębiorstwach, przemyśle przetwórczym i turystyce) – rysunek 1.

Technologia fotowoltaiczna postrzegana jest na rynku światowym jako jeden z najlepszych sposobów wykorzystania energii słonecznej (Parida i in. 2011). Może ona współpracować z innymi źródłami OZE na zasadzie układu hybrydowego, np. z pompą ciepła, i służyć do ogrzewania pomieszczeń lub do przygotowania ciepłej wody użytkowej, albo zarówno ogrzewania budynku, jak i wody użytkowej (Madej i in. 2016). Dynamiczny rozwój tego potencjału w ostatnich latach przyniósł udoskonolenia wydajności systemu oraz jego jakości (Nayak i in. 2019). Przyszłością ma być jednak fotowoltaika spersonalizowana, czyli estetyczna i efektywna (<https://globenergia.pl/spersonalizowana>). Niemniej producenci wprowadzając na rynek swoje produkty, powinni uwzględnić rozwiązania pod kątem zagrożeń mogących ujawnić się w procesie użytkowania instalacji, a także późniejszego jej demontażu. Dlatego tak ważnego znaczenia nabiera w przypadku OZE gospodarka o obiegu zamkniętym.

Wnioski

1. Respondenci w potencjale fotowoltaicznym upatrują dostaw przede wszystkim darmowej energii, która uniezależni konsumenta głównie od podwyżek opłat taryfowych za prąd. Są to dwie najważniejsze przesłanki (zalety), które po przełamaniu bariery finansowej i posiadaniu zabezpieczenia w postaci dodatkowego źródła energii mogą stać się impulsem do zakupu modułów. Młodzież zdaje sobie sprawę z tego, że pracę urządzenia PV warunkuje przede wszystkim pogoda, dlatego wskazała warunki atmosferyczne, jako ogranicznik zmuszający do posiadania innych sposobów produkcji energii, by móc w pełni zaspokoić zapotrzebowanie na energię elektryczną przez cały rok. Być może wkalkulowała w ogólne koszty przedsięwzięcia także systemy, które te braki uzupełnią.
2. Osoby zamieszkujące obszary wiejskie, które znają realia wsi, miały większe przekonanie o ważności OZE dla rolnictwa. Rynek rolny postrzegały jako wysoce perspektywiczny dla fotowoltaiki, która przyniesie mu nie tylko darmową, oszczędną energię, ale również zysk w postaci sprzedaży wyprodukowanych jej nadwyżek. Zatem może ona odegrać istotną rolę w procesie dywersyfikacji działalności rolniczej.
3. Respondenci zwracali uwagę głównie na zalety techniczne (nieskomplikowany montaż) i środowiskowe (odporność na anomalie pogodowe) paneli PV, które przyniosą w przyszłości wymierne korzyści finansowe (szybki zwrot inwestycji, zyski ze sprzedaży prądu, podniesienie wartości nieruchomości). Wśród barier wyróżniali zwłaszcza te o charakterze lokalizacyjnym. Z kolei ci z miast częściej widzieli atuty w estetyczno-wizualnej stronie paneli i możliwościach ich montażu na gruncie. Orientowali się dobrze w zakresie dostępnych na rynku technologii, postrzegając ich ciągły rozwój jako ważny pozytyw. Być może ta ciekawość wiedzy na ich temat podyktowana była dostrzeganiem częściej od mieszkańców wsi różnorodnymi wadami technicznymi modułów, a tym samym śledzeniu, co zmienia się w branży, by je wyeliminować.
4. Kobiety były bardziej przekonane od mężczyzn o wysokich kosztach instalacji PV, ale jednocześnie upatrywały szybszego ich zwrotu. Mężczyźni widzieli możliwość zysków ze sprzedaży nadwyżek energii, które mogą jednak w znacznym stopniu ograniczyć liczne wady mechaniczne modułów.
5. Fotowoltaika ma szansę stać się nie tylko sposobem na zapewnienie dostaw czystej energii, ale również alternatywą dla paliw kopalnych. Jej wpływ na środowisko na etapie produkcji i demontażu powinien być ciągle monitorowany, a procesy wytwarzania tak doskonałe, by obejmowały cały cykl życia produktu, od jego powstania aż do utylizacji i recyklingu.

Jarosław KNAGA¹, Stanisław FAMIELEC¹, Kazimierz RUTKOWSKI¹,
Joanna SZCZĘSNY¹, Adrianna SŁOWIK¹

Perspektywy i ograniczenia wykorzystania nowych elementów grzewczych w uprawach pod osłonami

Streszczenie. Uprawy pod osłonami charakteryzują się wysoką produktywnością przy zmniejszonym zużyciu wody i środków agrochemicznych na jednostkową powierzchnię produkcji. Poprzez skuteczną kontrolę wpływu produkcji na środowisko i klimat, a także zaawansowane techniki zarządzania uprawami i precyzyjnego stosowania zasobów (wody, nawozów, energii), produkcja szklarniowa wpisuje się w dążenie do realizacji celów gospodarki o obiegu zamkniętym. Skuteczna kontrola nad mikroklimatem w obiektach pod osłonami oraz ograniczenie strat ciepła są ciągłym wyzwaniem w nowoczesnej produkcji szklarniowej, zgodnej z koncepcją *Circular Horticulture*. Rury grzejne o nowatorskiej konstrukcji, tzw. rury Walczaka o przekroju gwiazdy sześcioramiennej, umożliwiają korzystniejsze gospodarowanie ciepłem w szklarni i szybką reakcję systemu grzewczego przy zmiennych warunkach zewnętrznych. W rozdziale przedstawiono wyniki badań nad jednostkową wydajnością cieplną P_j rur Walczaka o średnicy hydraulicznej 25,2 mm wykonanych z polietylenu (PE) domieszkowanego grafenem, dla zmiennych prędkości przepływu czynnika grzewczego oraz różnic temperatur DT pomiędzy czynnikiem a otoczeniem. Stwierdzono, że badane elementy grzejne charakteryzują się wysoką wydajnością cieplną, o czym świadczą wyższe wartości gradientu $\Delta P_j / \Delta DT$ w porównaniu do rur PE i stalowych o przekroju okrągłym, czy rur Walczaka wykonanych z polipropylenu o podobnych średnicach hydraulicznych, w zbliżonym zakresie zmienności parametrów pracy. Wykazano również, iż podczas eksploatacji układów grzewczych opartych na badanych elementach grzewczych należy zwracać uwagę na prędkość przepływu medium grzewczego, gdyż w zakresie dużych wartości P_j , powyżej 40 W/m, następuje zauważalny spadek wydajności cieplnej układu wraz ze wzrostem prędkości przepływu.

Słowa kluczowe: rury Walczaka, uprawy pod osłonami, systemy grzewcze, przewody grzejne

Prospects and limitations in the usage of new heating elements in protected horticulture

Abstract. Protected horticulture is characterized by high productivity with reduced water and agrochemicals use per unit of production. Through the effective control of its impact on the environment and climate, as well

¹ Uniwersytet Rolniczy w Krakowie, Wydział Inżynierii Produkcji i Energetyki

as advanced techniques of crop management and the precise use of resources (water, fertilizers, energy), greenhouse farming is part of the pursuit to achieve the goals of the Circular Economy concept. Effective control of the microclimate and reduction of heat losses are a constant challenge in modern greenhouse farming, aimed at introducing recommendations of *Circular Horticulture*. Heating pipes with an innovative design, hexagram-shaped, the so-called Walczak's pipes, enable higher heat efficiency and quicker response to changes of external conditions. The article presents the research on specific heat efficiency P_j of Walczak pipes, with a hydraulic diameter of 25.2 mm, made of polyethylene (PE) doped with graphene, for different flow velocities and temperature differences DT between the heating medium and the ambient environment. It was found that the tested heating elements are characterized by high thermal efficiency, as evidenced by higher values of $\Delta P_j / \Delta DT$ gradient compared to PE and steel pipes with a circular cross-section, or Walczak pipes made of polypropylene with similar hydraulic diameters, within a similar range of variability of operating parameters. It was also noted that during the operation of heating systems based on the tested heating elements, attention should be paid to the flow velocity of the heating medium, because in the range of high P_j values, above 40 W/m, there is an observable decrease in the thermal efficiency of the system with an increase in the flow velocity.

Keywords: Walczak's pipes, protected horticulture, heating systems, heating elements

Wprowadzenie

Uprawy pod osłonami są w stanie zapewnić wysoką jakość i wydajność produkcji ogrodniczej, a przez to przyczynić się do globalnego bezpieczeństwa żywnościowego, stwarzają ponadto wiele możliwości do odpowiedzi na wyzwania gospodarki o obiegu zamkniętym, jakie stoją przed współczesnym rolnictwem (De Gelder i in. 2012; Stoknes i in. 2018). W uprawach szklarniowych można skutecznie kontrolować ich wpływ na środowisko i klimat oraz optymalizować wykorzystanie zasobów dzięki zarówno prostym, jak i zaawansowanym technikom prowadzenia produkcji, zarządzania uprawami czy precyzyjnego stosowania zasobów (wody, nawozów, energii). Jak wskazuje raport Europejskiego Partnerstwa Innowacyjnego na Rzecz Wydajnego i Zrównoważonego Rolnictwa – EIP-AGRI (EIP-AGRI Final Report 2019), uprawy pod osłonami są szczególnie predysponowane do wdrażania idei gospodarki o obiegu zamkniętym w rolnictwie ze względu na:

- ♦ potencjał w zakresie wysokiej produktywności przy zmniejszonym zużyciu wody i środków agrochemicznych na jednostkową powierzchnię produkcji,
- ♦ zdolność produkcyjną do 15 razy wyższą w przeliczeniu na hektar niż w przypadku rolnictwa polowego,
- ♦ wysoki potencjał w zakresie recyklingu wody i składników odżywczych.

Komisja Europejska w 2017 r. utworzyła Grupę Fokusową (ang. *Focus Group*) działającą na rzecz *Circular Horticulture* (co można przetłumaczyć jako „produkcja ogrodnicza o obiegu zamkniętym”). Grupa ta funkcjonuje w ramach EIP-AGRI. W swoich licznych raportach i publikacjach zwraca uwagę m.in. na dobre praktyki w produkcji pod osłonami (EIP-AGRI Starting Paper 2017; Berckmoes i in. 2019; Bartzanas, Vatsanidou 2019).

Z punktu widzenia prezentowanych poniżej badań, należy zwrócić uwagę na to, iż problem poprawy efektywności energetycznej oraz minimalizowania energii pochodzącej z paliw kopalnych w produkcji szklarniowej jest ciągle istotny i akcentowany w raportach dotyczących wdrażania praktyk zgodnych z *Circular Horticulture* (Berckmoes i in. 2019; EIP-AGRI Final Report 2019). Zużycie energii w uprawach pod osłonami stanowi ponadto bardzo istotny udział w kosztach. Przykładowo, w uprawie szklarniowej pomidorów w Królestwie Niderlandów koszty energii stanowią największy udział (aż 32%) w sumie kosztów produkcji, kolejne składowe sumy kosztów są na znacznie niższym poziomie, np. koszty pracy 19%, amortyzacja środków trwałych 16%, pozostałe – po kilka procent (Ruijs 2018). Obniżenie zużycia energii jest zatem jednym z priorytetów w modernizacji technologii produkcji w obiektach pod osłonami. Możliwe jest to m.in. poprzez zoptymalizowanie systemu grzewczego w szklarni czy zastosowanie pasywnych akumulatorów ciepła np. akumulator ze złożem kamiennym (Rutkowski 2010; Kurpaska i in. 2016). Jak pokazały badania m.in. (Rutkowski i in. 2013, 2014; Kurpaska i in. 2020) istnieją jeszcze rezerwy w zakresie poprawy mikroklimatu i ograniczenia strat ciepła w obiektach pod osłonami.

Zapotrzebowanie mocy w systemie grzewczym szklarni cechuje się dużym zróżnicowaniem w czasie (różnice kilku- lub nawet kilkunastokrotne, w zależności od zmian warunków dzień/noc czy w dłuższych okresach czasu). W okresie jesieni czy wiosny każdy spadek natężenia promieniowania słonecznego skutkuje niemal natychmiastowym wzrostem zapotrzebowania mocy grzewczej (Rutkowski 2008, 2010; Rutkowski, Wojciech 2008; Atilgan 2017). System grzewczy wymaga zatem wyposażenia w źródło ciepła o odpowiedniej mocy, przy czym należy zwrócić uwagę na dużą bezwładność termiczną obiegu wody grzewczej, co utrudnia szybką regulację warunków termicznych w szklarni. Związane jest z dużą objętością wody grzewczej w instalacji, szacuje się, że jest to około 20 m³/ha (Knaga i in. 2019). Z kolei z badań wynika, że szklarnie średnio wykorzystują jedynie 15–25% wartości mocy szczytowej (Rutkowski i in. 2014). Biorąc powyższe pod uwagę, zasadne jest dążenie do zmian technologicznych w systemie grzewczym, które umożliwiłyby skuteczniejszą regulację warunków termicznych, co przyczyniłoby się również do zmniejszenia strat ciepła oraz ograniczenia niezbędnej mocy zainstalowanej.

Nowoczesny system grzewczy szklarni to nie tylko zapewnienie odpowiedniej temperatury, ale również wyrównany ruch powietrza w strefie wegetacji roślin oraz szybka reakcja systemu na zmieniające się warunki zewnętrzne (De Gelder i in. 2012; Kurpaska i in. 2016). Aby temu sprostać, stosuje się niezależne sterowanie obwodami grzewczymi o zróżnicowanej bezwładności grzewczej. Zróżnicowana bezwładność obwodów grzewczych ma szczególne znaczenie w okresie dużej zmienności warunków zewnętrznych, w którym często dochodzi do przegrzania szklarni bądź dużych strat ciepła. Jedną z nowatorskich technologii umożliwiających obniżenie bezwładności cieplnej obiegów grzewczych jest zastosowanie rur grzejnych o przekroju sześcioramiennej gwiazdy, zwanej od nazwiska konstruktora rurami Walczaka. Rury o takim przekroju posiadają kilkukrotnie mniejszą pojemność w porównaniu z tradycyjnymi rurami grzejnymi o tej samej średnicy zewnętrznej oraz

większą sztywność. Mała pojemność zładu umożliwia szybką reakcję systemu grzewczego przy zmiennych warunkach zewnętrznych. W porównaniu z systemem tradycyjnym (rury o przekroju okrągłym) rury Walczaka umożliwiają korzystniejsze gospodarowanie ciepłem. Rury te wykonane mogą być z różnych materiałów – stali, polipropylenu (PP), polietylenu (PE), itp. Wydajność grzewcza rur wykonanych ze stali i polipropylenu została opisana w poprzednich pracach (Rutkowski i in. 2016; Knaga i in. 2019). Celem zaprezentowanych badań jest określenie wydajności grzewczej rur wykonanych z PE domieszkowanego grafenem oraz analiza możliwości, jak również ewentualnych ograniczeń ich zastosowania w obiektach pod osłonami.

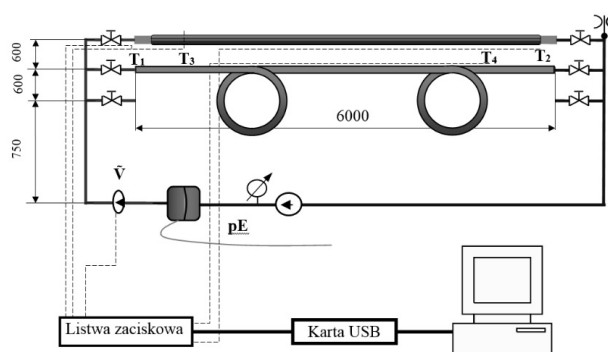
I. Metodyka

Do badań wykorzystano rury Walczaka (wzdłużnie karbowane, o przekroju gwiazdy sześcioramiennej) wykonane z PE wzbogaconego grafenem. Dodatek grafenu (ok. 7,5% wagowo) wynikał z założenia, iż może on poprawić wydajność cieplną rur, jak również parametry wytrzymałościowe. Ponad 2,5-krotnie mniejsza pojemność przedmiotowych przewodów grzejnych spełnia jeden z wymienionych warunków polegających na szybkiej zmianie parametrów systemu grzewczego przy nagłych zmianach warunków zewnętrznych. Ponadto taki przewód grzejny jest odporny na korozję i nie wymaga konserwacji; dodatkowo, jest elementem lżejszym od rur stalowych, co nie obciąża nadmiernie konstrukcji szklarni.

Badania zrealizowano zgodnie z wytycznymi norm dotyczących warunków pomiaru urządzeń cieplnych. W toku badań określano jednostkową wydajność cieplną w zależności od przepływu wody grzewczej oraz jej temperatury. Temperatura otoczenia w pomieszczeniu, w którym prowadzono badania, wynosiła 10–20°C, co odpowiada zakresowi temperatur spotykanych w uprawach warzywniczych pod osłonami. Medium grzewczym (nośnikiem ciepła) była woda o temperaturze dochodzącej do 60°C, zależnej od ustawień elementu wymuszającego – podgrzewacza elektrycznego. Badania wykonano w stanie ustalonym, tzn. po ustabilizowaniu się wszystkich parametrów pracy, w tym przypadku temperatury otoczenia w pomieszczeniu, temperatury medium grzewczego oraz natężenia przepływu. Wartości mocy rozpraszanej na przedmiotowych elementach grzejnych sprowadzono do zmiennej dyskretnej, wyznaczonej na podstawie prób o czasie trwania nie krótszym niż 30 min.

Badaniami objęto 12-metrowy odcinek przewodu grzejnego, o średnicy obwiedni 40 mm, posiadającego pętlę umożliwiającą zmianę długości powodowaną różnicą temperatur. Badany element zawieszony był na wysokości 0,5 m i podłączony do przewodów zasilających oddalonych od siebie o 6 m. Jednostkowa pojemność wodna przewodu grzejnego wynosi 0,5 dm³/m, co w przeliczeniu na zastępczą średnicę o przekroju poprzecznym okrągłym odpowiada wartości średnicy wynoszącej 25,2 mm. Jest to odpowiednik rury 1" w typoszerzegu średnic elementów hydraulicznych.

Na tak zaprojektowanym stanowisku badawczym rur grzejnych został zaimplementowany układ pomiarowy (rys. 1), którego zasadniczym elementem była karta pomiarowa USB DT9818 z szesnastoma analogowymi wejściami napięciowymi. Wielkości mierzone rejestrowano bezpośrednio na PC z wykorzystaniem aplikacji napisanej w programie DasyLab 11.0, która zarządzała obsługą karty. Wartości wielkości mierzonych rejestrowano z częstotliwością próbkowania 1,0 Hz. Pomiar temperatur na wejściu i wyjściu z badanego przewodu grzejnego oraz w jego otoczeniu był realizowany dwiema parami czujników parowanych Pt100 (T_1, T_2, T_3, T_4 – rys. 1). Takie rozmieszczenie czujników parowanych pozwoliło na pełne bilansowanie strumienia ciepła w układzie grzewczym. Mierzono również natężenie przepływu czynnika roboczej w układzie hydraulicznym przepływomierzem typu MTWH. Specyfikację wszystkich elementów pomiarowych zamieszczono w tabeli 1.



Rysunek 1. Schemat układu badawczego rur grzejnych

T_1, T_2 – temperatury medium grzewczego na wejściu i wyjściu badanego przewodu grzejnego,

T_3, T_4 – temperatury otoczenia w pobliżu wejścia i wyjścia badanego przewodu grzejnego,

\dot{V} – przepływ cieczy roboczej

Źródło: opracowanie własne

Tabela 1. Specyfikacja elementów pomiarowych stanowiska badawczego

Oznaczenie	Wielkość mierzona	Rodzaj i typ przyrządu
T_1, T_2	Temperatury medium grzewczego na wejściu i wyjściu badanego przewodu grzejnego	czujnik temperatury PT 100, zakres: 0–60°C, dokładność: $\pm 0,01^\circ\text{C}$
T_3, T_4	Temperatury otoczenia w pobliżu wejścia i wyjścia badanego przewodu grzejnego	czujnik temperatury PT 100, zakres: 0–60°C, dokładność: $\pm 0,01^\circ\text{C}$
\dot{V}	Natężenie strumienia objętości (przepływ) cieczy roboczej	przepływomierz typu MTWH, $Q_{\text{NOM}} = 2,0 \text{ m}^3/\text{h}$, $1,0 \text{ dm}^3/\text{impuls}$

Źródło: opracowanie własne.

Energia elektryczna jest niezbędna do zasilania układu grzałek dostarczających strumień ciepła do rur grzejnych, zasilanych regulowanym napięciem zmiennym (AC), oraz pompy obiegowej zasilanej napięciem stałym (DC). Badania prowadzono dla czterech ustawień grzałek (500, 700, 900, 1200 W). Pompa obiegowa pozwala na regulację strumienia czynnika skokowo w zakresie pięciu wartości natężeń przepływu.

Jednostkową wydajność strumienia ciepła P_j obliczono w oparciu o wzór:

$$P_j = \frac{\dot{V} \cdot \rho \cdot c_w \cdot (T_1 - T_2)}{l} \quad (1)$$

gdzie:

- P_j – jednostkowa wydajność strumienia ciepła [W/m],
- \dot{V} – przepływ wody grzewczej [dm³/s],
- ρ – gęstość wody, $\rho = 1 \text{ kg/dm}^3$,
- c_w – ciepło właściwe wody, $c_w = 4190 \text{ J/(kg}\cdot\text{K)}$,
- T_1, T_2 – temperatury medium grzewczego na wejściu i wyjściu [K],
- l – długość badanego przewodu grzejnego, $l = 12 \text{ m}$.

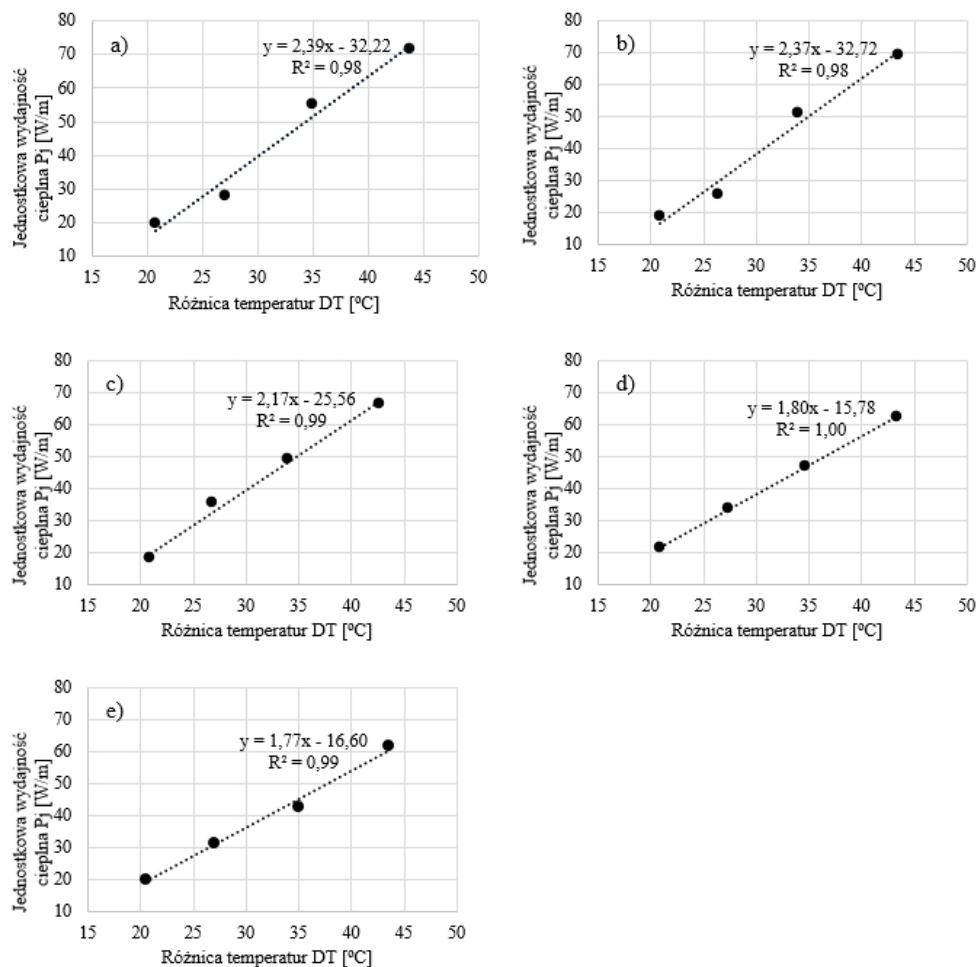
Różnicę temperatur wody grzewczej w badanym przewodzie i otoczenia (DT) obliczono jako różnicę średnich arytmetycznych z par temperatur T_1, T_2 oraz T_3, T_4 .

Przeprowadzono dwie serie pomiarowe: w pierwszej zmieniano ustawienia grzałki dla ustalonego przepływu cieczy, w drugiej zmieniano przepływ cieczy przy stałej (w przybliżeniu) wartości DT . Wartości przyjęte do analizy uśredniono dla okresu 30 min trwania pomiaru w stanie ustalonym (zdefiniowanym powyżej).

2. Wyniki i dyskusja

Na rysunku 2 przedstawiono zmiany jednostkowej wydajności cieplnej P_j w zależności od różnicy temperatur DT dla badanych przepływów cieczy roboczej wynoszących odpowiednio: $0,051 \pm 0,004 \text{ dm}^3/\text{s}$, $0,072 \pm 0,005 \text{ dm}^3/\text{s}$, $0,090 \pm 0,005 \text{ dm}^3/\text{s}$, $0,111 \pm 0,005 \text{ dm}^3/\text{s}$, oraz $0,125 \pm 0,004 \text{ dm}^3/\text{s}$. Dla uzyskanych wykresów punktowych dodano linie trendu opisane równaniem funkcji liniowej, w którym współczynnik kierunkowy określa różnicę P_j przypadającą na 1°C wzrostu różnicy temperatur DT (tj. gradient $\Delta P_j / \Delta DT$). Równania te również przedstawiono na rysunku 2.

Dla mniejszych prędkości przepływu ($0,051 \pm 0,004 \text{ dm}^3/\text{s}$ i $0,072 \pm 0,005 \text{ dm}^3/\text{s}$) obserwowany jest zbliżony gradient $\Delta P_j / \Delta DT$, odpowiednio $2,39 \text{ W/(m}\cdot^\circ\text{C)}$ i $2,37 \text{ W/(m}\cdot^\circ\text{C)}$. Przy dalszym wzroście wartości gradient $\Delta P_j / \Delta DT$ wyraźnie zmniejszał się, osiągając wartość $1,77 \text{ W/(m}\cdot^\circ\text{C)}$ dla $0,125 \pm 0,004 \text{ dm}^3/\text{s}$. Świadczy to o tym, iż dla większych przepływów cieczy roboczej przez badane przewody (powyżej wartości ok. $0,075 \text{ dm}^3/\text{s}$)



Rysunek 2. Zmiana jednostkowej wydajności cieplnej P_j w zależności od różnicy temperatur DT dla przepływu v : a) $0,051 \pm 0,004 \text{ dm}^3/\text{s}$, b) $0,072 \pm 0,005 \text{ dm}^3/\text{s}$, c) $0,090 \pm 0,005 \text{ dm}^3/\text{s}$, d) $0,111 \pm 0,005 \text{ dm}^3/\text{s}$, e) $0,125 \pm 0,004 \text{ dm}^3/\text{s}$

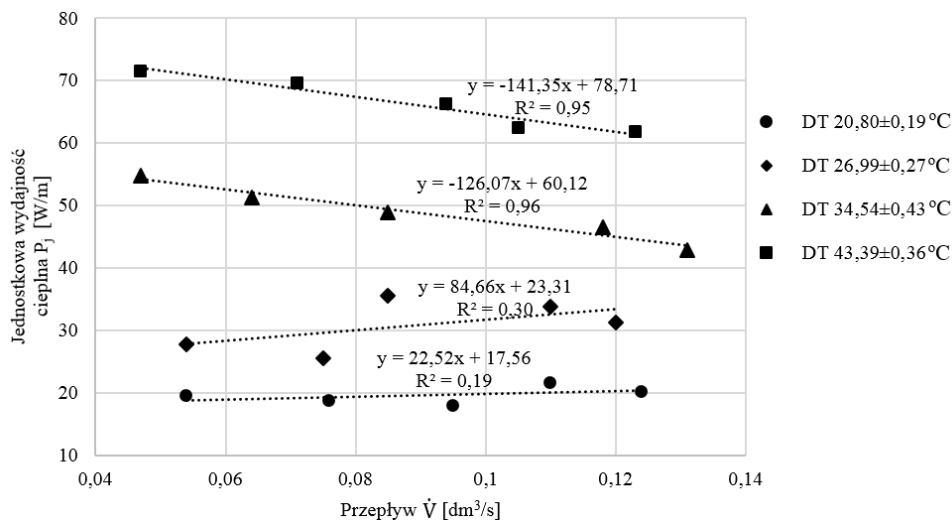
Źródło: opracowanie własne

jednostkowa wydajność cieplna będzie maleć w obszarze dużych różnic temperatur czynnik grzewczy/otoczenie. Mówiąc obrazowo, ciecz grzewcza „nie zdąży” oddać ciepła przy tych prędkościach przepływu.

Należy podkreślić, iż otrzymane wartości gradientu $\Delta P_j / \Delta DT$ są wyższe niż typowe wielkości charakteryzujące rury o przekroju okrągłym, przy podobnych przepływach. Jak podają (Van de Braak 1995; Castilla 2013), w zakresie wartości DT między 10 a 40°C stalowe rury grzejne o średnicy 26,4 mm charakteryzują się średnim gradientem $\Delta P_j / \Delta DT$

wynoszącym $1,21 \text{ W}/(\text{m}\cdot^{\circ}\text{C})$. Z kolei dla tych samych warunków rury grzejne wykonane z PE (bez dodatku grafenu) o średnicy $25,0 \text{ mm}$ odznaczają się współczynnikiem $\Delta P_j/\Delta DT$ o średniej wartości $0,97 \text{ W}/(\text{m}\cdot^{\circ}\text{C})$. Otrzymane współczynniki $\Delta P_j/\Delta DT$ dla badanych rur Walczaka wykonanych z PE domieszkowanego grafenem dla każdej badanej prędkości przepływu są wyższe niż powyżej wymienione parametry rur o przekroju okrągłym. Również w porównaniu do rur Walczaka wykonanych z PP (Knaga i in. 2019) o tych samych parametrach geometrii, współczynnik $\Delta P_j/\Delta DT$ dla badanych rur jest wyższy. W przypadku rur PP wartości $\Delta P_j/\Delta DT$ nieznacznie rosły wraz z wzrostem prędkości przepływu czynnika (w zakresie od $0,020 \text{ dm}^3/\text{s}$ do $0,067 \text{ dm}^3/\text{s}$), osiągając odpowiednio $0,700 \text{ W}/(\text{m}\cdot^{\circ}\text{C})$ dla najmniejszej i $0,865 \text{ W}/(\text{m}\cdot^{\circ}\text{C})$ dla największej prędkości przepływu. Powyższe porównanie świadczy o dużym potencjalnie aplikacyjnym badanych przewodów grzejnych wykonanych z PE domieszkowanego grafenem. Przykładowo, dla prędkości przepływu $0,072 \text{ dm}^3/\text{s}$ (tj. $4,3 \text{ dm}^3/\text{min}$) z przewodu o długości 50 m możemy uzyskać moc cieplną na poziomie 2 kW , przy różnicy temperatur $DT 30^{\circ}\text{C}$. Możliwe jest zatem zaprojektowanie wydajniejszych systemów grzewczych niż tradycyjne, ograniczając równocześnie zużycie materiałów, co również wpisuje się w cele gospodarki o obiegu zamkniętym.

Na rysunku 3 przedstawiono zmiany jednostkowej wydajności cieplnej P_j przy zmiennym przepływie dla stałych (w przybliżeniu) różnic temperatur DT , wynoszących odpowiednio $20,80\pm 0,19^{\circ}\text{C}$, $26,99\pm 0,27^{\circ}\text{C}$, $34,54\pm 0,43^{\circ}\text{C}$ oraz $43,39\pm 0,36^{\circ}\text{C}$. Dla uzyskanych wykresów punktowych dodano linie trendu opisane równaniem funkcji liniowej, w którym współczynnik kierunkowy określa różnicę P_j przypadającą na wzrost prędkości przepływu o $1 \text{ dm}^3/\text{s}$. Równania te również przedstawiono na rysunku 3.



Rysunek 3. Zmiana jednostkowej wydajności cieplnej P_j w zależności od zmiany przepływu dla stałych różnic temperatur DT
 Źródło: opracowanie własne

Jak wynika z wykresu (rys. 3), związek między prędkością przepływu a jednostkową wydajnością cieplną nie jest jednakowy w całym zakresie analizowanych zmiennych. W zakresie niskich DT (a co za tym idzie – mniejszych wartości P_j , poniżej 40 W/m) nie obserwuje się jednoznacznej korelacji między tymi dwoma parametrami, na co wskazują niskie współczynniki R^2 oraz duży rozrzut punktów pomiarowych. Natomiast dla wyższych wartości P_j , powyżej 40 W/m, tj. dla wartości DT równych $34,54 \pm 0,43^\circ\text{C}$ oraz $43,39 \pm 0,36^\circ\text{C}$, można jednoznacznie stwierdzić, iż jednostkowa wydajność cieplna maleje ze wzrostem natężenia przepływu w zakresie zmiennych objętych badaniami. Świadczą o tym wysokie współczynniki R^2 dla zależności liniowych opisujących ten spadek (odpowiednio 0,96 oraz 0,95). Wzrost prędkości przepływu z wartości $0,05 \text{ dm}^3/\text{s}$ do $0,12 \text{ dm}^3/\text{s}$ powoduje spadek P_j o 8,8 W/m, tj. o 16,4%, dla wartości DT $34,54 \pm 0,43^\circ\text{C}$, oraz o 9,9 W/m, tj. o 13,8%, dla wartości DT $43,39 \pm 0,36^\circ\text{C}$. Należy zatem się liczyć, iż w systemie grzewczym wykorzystującym badane rury, dla dużych różnic temperatur DT , a co za tym idzie dla wysokich jednostkowych wydajności cieplnych, wzrost prędkości przepływu czynnika powyżej pewnej wartości optymalnej będzie skutkował znacznym obniżeniem sumarycznej wydajności cieplnej układu.

W trakcie badań zaobserwowano, że ze wzrostem temperatury badany przewód grzejny staje się mniej sztywny, co ogranicza jego konstrukcyjne przeznaczenie. Odnosi się to do przypadku, gdy rury grzejne stanowią również element konstrukcji podtrzymującej rośliny w uprawie szklarniowej. W sytuacji, w której przedmiotowe rury grzejne miałyby stanowić podporę dla roślin, należy zwiększyć liczbę podpór w konstrukcji nośnej dla elementów grzejnych.

Podsumowanie

Rury Walczaka wykonane w PE domieszkowanego grafenem charakteryzują się wysoką wydajnością cieplną, o czym świadczą między innymi duże wartości gradientu $\Delta P_j / \Delta DT$ w porównaniu do rur PE i stalowych o przekroju okrągłym, czy rur Walczaka wykonanych z PP o podobnych średnicach zastępczych, w zbliżonym zakresie zmienności i DT (Van de Braak 1995; Castilla 2013; Knaga i in. 2019). Przykładowo, układ grzewczy z 50 m odcinkiem rur Walczaka z PE domieszkowanego grafenem umożliwia uzyskanie około 2 kW mocy cieplnej (przy przepływie $4,3 \text{ dm}^3/\text{min}$), co jest wartością o 60% większą niż w przypadku układu zbudowanego z takiego samego odcinka rur Walczaka z PP o tej samej średnicy i przy porównywalnym przepływie (Knaga i in. 2019). Wykorzystanie badanych rur w praktyce umożliwi budowę systemów grzewczych o wyższej efektywności energetycznej, jak również wykorzystujących rury o mniejszych średnicach hydraulicznych, co również przyczyni się do zmniejszenia zużycia materiałów konstrukcyjnych. Co więcej, rury z PE w przeciwieństwie do stalowych nie wymagają konserwacji antykorozyjnej, ponadto, po okresie eksploatacji w 100% mogą zostać poddane recyklingowi materiałowemu (Juan i in. 2020).

Jak pokazały przeprowadzone badania, podczas eksploatacji układów grzewczych opartych na rurach Walczaka z PE domieszkowanego grafenem należy zwracać uwagę na prędkość przepływu medium grzewczego, gdyż w zakresie dużych jednostkowych wydajności cieplnych, tj. przy dużych różnicach temperatur DT , następuje zauważalny spadek wydajności cieplnej układu wraz ze wzrostem prędkości przepływu. Kolejne ograniczenia zastosowania rur Walczaka wykonanych z PE mogą wynikać również z potencjalnie niższej wytrzymałości mechanicznej w porównaniu do rur stalowych, jak również pewnej podatności na odkształcenia przy wyższych wartościach DT , co w niewielkim zakresie było obserwowane podczas wykonywanych badań. Dlatego też konieczne są szczegółowe badania uzupełniające w aspekcie wytrzymałości mechanicznej przedmiotowych rur grzewczych. Badania takie, zaplanowane przez zespół autorów, umożliwią pełne scharakteryzowanie przydatności rur Walczaka z PE domieszkowanego grafenem do zastosowania w uprawach pod osłonami.

Literatura

- Atilgan A., Yucel A., Tanriverdi C., Oz H., Tezcan A. 2017: Determination of optimum heating and cooling degree-hour values for pepper plant. *Infrastructure and Ecology of Rural Areas II/1*, s. 457–467. On-line: <http://dx.medra.org/10.14597/infraeco.2017.2.1.034>.
- Bartzanas T., Vatsanidou A. 2019: Mini-paper – Sustainability in circular in horticulture. EIP-AGRI Focus Group – Circular Horticulture. On-line: https://ec.europa.eu/eip/agriculture/sites/agri-eip/files/fg27_mini-paper_sustainability_2019_en_0.pdf (dostęp: 2.12.2020).
- Berckmoes E., Costa M., Lonardo S., Magán J., Massa D. 2019: Mini-paper – Monitoring and metrics to boost circularity in horticulture. EIP-AGRI Focus Group – Circular Horticulture. On-line: https://ec.europa.eu/eip/agriculture/sites/agri-eip/files/fg27_mini-paper_monitoring_metrics_2019_en.pdf (dostęp: 1.12.2020).
- Castilla N. 2013: *Greenhouse technology and management*. Wyd. II, CABI Publishing, Wielka Brytania.
- De Gelder A., Dieleman J.A., Bot G.P.A., Marcelis L.F.M. 2012: An overview of climate and crop yield in closed greenhouses. *Journal of Horticultural Science and Biotechnology*, 87(3), s. 193–202, DOI: 10.1080/14620316.2012.11512852.
- EIP-AGRI Focus Group on Circular Horticulture: Final report. 2019. On-line: https://ec.europa.eu/eip/agriculture/sites/agri-eip/files/eip-agri_fg_circular_horticulture_final_report_2019_en.pdf (dostęp: 1.12.2020).
- EIP-AGRI Focus Group on Circular Horticulture: Starting paper. 2017. On-line: https://ec.europa.eu/eip/agriculture/sites/agri-eip/files/eip-agri_fg_circular_horticulture_starting_paper_2017_en.pdf (dostęp: 1.12.2020).
- Juan R., Domínguez C., Robledo N., Paredes B., García-Muñoz R.A. 2020: Incorporation of recycled high-density polyethylene to polyethylene pipe grade resins to increase close-loop recycling and Underpin the circular economy. *Journal of Cleaner Production*, 276, 24081, DOI: 10.1016/j.jclepro.2020.124081.
- Knaga J., Famielec S., Rutkowski K. 2019: The New Construction of Heating Elements for Greenhouse Heating Systems [W:] Krakowiak-Bal A., Vaverkova M. red. *Infrastructure and Environment*. Springer, Cham, s. 30–36, DOI: 10.1007/978-3-030-16542-0_5.
- Kurpaska S., Knaga J., Latała H., Cupiał M., Konopacki P., Hołownicki R. 2020: The Comparison of Different Types of Heat Accumulators and Benefits of Their Use in Horticulture. *Sensors*, nr 20, 1417, DOI: 10.3390/s20051417.
- Kurpaska S., Sikora J., Mudryk K., Latała H., Knaga J. 2016: The effects of storing heat excess in a stone battery in a horticultural premise. *E3S Web Conf.*, 10 00052, DOI: 10.1051/e3sconf/20161000052.

- Ruijs M. 2018: Soilless culture in Dutch greenhouse tomato; History, economics and current issues. On-line: https://www.wur.nl/upload_mm/5/5/9/81567367-3b11-4aea-8639-225d6437d37f_Szentes%20Marc%20Ruijs%20UK%20Presentation_Soilless%20culture%20NL_28062011.pdf (dostęp: 2.12.2020).
- Rutkowski K. 2008: Analiza energetyczna wybranych typów szklarni. *Inżynieria Rolnicza*, 9(107), s. 249–257.
- Rutkowski K. 2010: Analiza energetyczno-technologiczna szklarni. *Inżynieria Rolnicza*, 2(120), s. 157–162.
- Rutkowski K., Knaga J., Krakowiak-Bal A., Vogelgesang J., Sikora J., Smółka Ł. 2016: „Walczak’s pipes” in the greenhouse heating system. *Acta Universitatis Agriculturae Silviculturae Mendeliana Brunensis*, 64, s. 135–140.
- Rutkowski K., Pasternak W., Latała H. 2013: Możliwości wykorzystania ciepła odpadowego w obiektach pod osłoniętymi. *EPISTEME: Czasopismo Naukowo-Kulturalne*, 3(20), s. 485–492.
- Rutkowski K., Wojciech J. 2008: Nakłady energetyczne na produkcję pomidora w szklarniach zblokowanych. *Inżynieria Rolnicza*, 9(107), s. 257–262.
- Rutkowski K., Vogelgesang J., Findura P. 2014: Analysis of effectiveness of storing waste heat in the water accumulator. *Inżynieria Rolnicza*, 4(152), s. 205–212, DOI: 10.14654/ir.2014.152.095.
- Stoknes K., Wojciechowska E., Jasińska A., Gulliksen A., Tesfamichael A.A. 2018: Growing vegetables in the circular economy; cultivation of tomatoes on green waste compost and food waste digestate. *Acta Horticulturae*, 1215, s. 389–396, DOI: 10.17660/ActaHortic.2018.1215.71.
- Van de Braak N.J. 1995: Heating equipment [W:] Bakker J.C., Bot G.P.A., Challa H., Van de Braak N.J. red. *Greenhouse climate control – an integrated approach*. Wageningen Pers, Wageningen, s. 171–179.

Maciej GLINIAK¹, Stanisław FAMIELEC¹, Mateusz MALINOWSKI¹

**Audyt energetyczny jako narzędzie poprawy efektywności energetycznej i ekonomicznej procesu produkcyjnego.
Studium przypadku: instalacja do przetwarzania odpadów komunalnych**

Streszczenie. Audyt energetyczny procesu produkcyjnego jest wieloetapową procedurą polegającą na zbieraniu i analizowaniu informacji o wykorzystywanych w danej technologii urządzeniach i maszynach, ich energochłonności, kosztach zakupu i utrzymania, a następnie ocenie opłacalności inwestycji (jako całości) i określeniu opłacalnych ekonomicznie działań, które bezpośrednio mogą przelożyć się na poprawę efektywności (energetycznej i ekonomicznej) badanego obiektu. Audyt energetyczny jest opracowywany na podstawie Ustawy o efektywności energetycznej oraz normy PN-EN 16247-3:2014. Celem rozdziału jest przedstawienie metodyki i przeprowadzenie audytu energetycznego i ekonomicznego dla modelowej instalacji mechaniczno-biologicznego przetwarzania odpadów. W wyniku przeprowadzonej analizy przedstawiono propozycje poprawy efektywności energetycznej instalacji. Pierwsza z nich sprowadza się do optymalizacji działania instalacji sprężonego powietrza, m.in. poprzez zastosowanie systemu monitorującego oraz wykrywającego nieszczelności układu. Druga propozycja to zastosowanie systemu ciągłego monitorowania zużycia mediów. Zastosowanie odpowiedniego oprogramowania pozwala na monitorowanie zużycia energii przez urządzenia i maszyny oraz optymalizację ich działania z wykorzystaniem kalkulacji wskaźnika efektywności energetycznej. Wdrożenie powyższych rozwiązań może prowadzić do zaoszczędzenia nawet 5% kosztów związanych ze zużyciem energii elektrycznej.

Słowa kluczowe: inżynieria mechaniczna, utrzymanie maszyn i urządzeń, proces produkcyjny

Energy audit as a tool for improving energy and economic efficiency of a production process. A case study of municipal solid waste treatment installation

Abstract. The energy audit of a production process is a multi-stage procedure consisting in collecting and analyzing information about the devices and machines used in this process, their energy consumption, purchase

¹ Uniwersytet Rolniczy w Krakowie, Wydział Inżynierii Produkcji i Energetyki

and maintenance costs, and then assessing the profitability of the investment (as a whole) and determining cost-effective activities that can directly contribute to improving the efficiency (energy and economic) of the tested facility. The energy audit is developed on the basis of the Energy Efficiency Act and the PN-EN 16247-3:2014 standard. The aim of this work was to conduct an energy and economic audit for a model installation for mechanical and biological waste treatment. As a result of the analysis, proposals for improving the energy efficiency of the installation were presented. The first recommendation comes down to improving the operation of the compressed air installation, e.g. through the use of a monitoring system and leak detection system. The second suggestion is the use of a continuous media consumption monitoring system. The use of appropriate software allows for monitoring the energy consumption of devices and machines and optimize their operation using the calculation of the energy efficiency index. The implementation of the above solutions can lead to savings of up to 5% of costs related to electricity consumption.

Keywords: mechanical engineering, maintenance, production process

Wprowadzenie

Zarządzanie energią w zakładach produkcyjnych polega na stosowaniu coraz nowszych technologii w celu poprawy charakterystyki energetycznej obiektu (ISO 50001:2018), a także wdrażaniu systemów sterowania automatycznego, ciągłego monitorowania i innych środków zwiększających efektywność energetyczną obiektu (Bunse i in. 2011). Ciągłe doskonalenie efektywności energetycznej obiektu, instalacji lub procesu poprzez wprowadzanie skutecznych (często innowacyjnych) działań i metod (mających na celu ułatwienie realizacji zadań proenergetycznych) może zapewnić trwałe obniżenie kosztów zużycia energii (Javied i in. 2015). Do głównych przyczyn podejmowania działań związanych z zarządzaniem energią i zasobami energii należą (za ISO 16247:2014):

- ◆ chęć zwiększania efektywności energetycznej, a co za tym idzie, obniżenie kosztów eksploatacji zakładu,
- ◆ zgodność z krajowymi lub europejskimi aktami prawnymi dotyczącymi efektywności energetycznej,
- ◆ spełnienie norm europejskich, krajowych lub klientów.

W celu ułatwienia realizacji powyższych potrzeb, w zakładach przemysłowych coraz częściej stosuje się systemy zarządzania środowiskowego, a dokładniej zarządzania energią. Racjonalne gospodarowanie energią w zakładach produkcyjnych prowadzące do oszczędzania zużycia zasobów (w tym przypadku paliw pierwotnych, np. węgla kamiennego) jest zgodne z założeniami gospodarki o obiegu zamkniętym (Głowacki i in. 2019). Systemy zarządzania energią mogą być wdrażane z wykorzystaniem europejskiej normy ISO 50001:2018 lub mogą być dedykowanymi systemami opracowanymi specjalnie dla danej organizacji, wówczas muszą one spełniać wymogi aktów prawnych obowiązujących w lokalizacji zakładu. Niezależnie od rodzaju przedsiębiorstwa i branży, system zarządzania energią powinien uwzględniać strategię energetyczną przedsiębiorstwa oraz cele operacyj-

ne i strategiczne, opis aktualnej sytuacji wyjściowej wraz ze szczegółową analizą danych historycznych, w tym szczegółowy raport z audytu energetycznego, opis procedur, środków i metodologii wprowadzania optymalizacji, schemat struktury organizacyjnej z precyzyjnie opisanymi zadaniami dla personelu, wdrażanie zmian, opis systemu szkoleń, prowadzenie otwartej i przejrzystej dokumentacji oraz sposób prezentacji wyników w raporcie (Abdelaziz i in. 2011; Weidong i in. 2011; ISO 50001:2018; Gliniak i in. 2020).

Polska jako państwo członkowskie Unii Europejskiej (UE) musi nieustannie dostosowywać się do polityki energetycznej Wspólnoty. Adaptacja do wspomnianej polityki zakłada, że do 2020 roku Polska ma zmniejszyć zużycie energii elektrycznej o 20 punktów procentowych w stosunku do scenariusza dla lat 1990–2020 (PEP 2030). Polska dobrze realizuje zapisy polityki energetycznej UE. Energochłonność PKB zmniejszyła się o 30% pomiędzy 1999 a 2009 rokiem i nadal maleje, m.in. dzięki większej świadomości społeczeństwa w tym zakresie. Niestety efektywność polskiej gospodarki wyrażona jako wartość PKB na jednostkę energii (według kursu euro) jest wciąż dwukrotnie niższa od średniej europejskiej (PEP 2030). Znaczący rozwój gospodarczy wynikający z modernizacji obiektów i automatyzacji większości zakładów przekłada się na wzrost zużycia energii elektrycznej przy relatywnym spadku dostępności innych form energii. Dziś kwestia efektywności energetycznej jest priorytetem, a postęp z nią związany będzie miał znaczący wpływ na realizację wszystkich celów gospodarki o obiegu zamkniętym.

W 2014 roku polityka efektywności energetycznej UE uległa zmianie. Kraje członkowskie zobowiązały się do wprowadzenia 27% oszczędności energii w stosunku do starszych prognoz. W 2018 roku cel ten został zwiększony do 32,5% dla wszystkich członków UE (PEP 2040). Polska jako państwo członkowskie UE zadeklarowała dalsze postępy w zakresie zwiększania efektywności energetycznej gospodarki. Na podstawie analizy wpływu na PKB, skutków podjętych działań oraz potencjału oszczędnościowego, Polska deklaruje krajowy cel poprawy efektywności energetycznej do 2030 roku na poziomie 23% w stosunku do prognoz energii pierwotnej z 2007 roku (PEP 2040).

Zakładami, w których w ostatnich latach zwiększyło się zużycie energii elektrycznej, głównie ze względu na zastosowanie systemów automatyki przemysłowej i robotyki oraz rozbudowanych systemów pneumatycznych, są instalacje przetwarzania odpadów. O powyższym świadczy rozpiętość zużycia energii przez instalacje mechaniczno-biologicznego przetwarzania zmieszanych odpadów komunalnych (MBP), które zawiera się w przedziale od około 4 kWh (w instalacjach, w których sortowanie odbywa się ręcznie) do ponad 50 kWh w przeliczeniu na 1 Mg przetwarzanych odpadów (Malinowski 2020).

Celem pracy jest wieloetapowa analiza efektywności energetycznej i ekonomicznej instalacji komunalnej do mechaniczno-biologicznego przetwarzania zmieszanych odpadów komunalnych z uwzględnieniem zużycia energii elektrycznej, a następnie zaproponowanie metod modernizacji, które pozwolą zmniejszyć zużycie energii elektrycznej oraz zwiększyć kontrolę nad jej wykorzystaniem.

I. Materiał i metody

Przykładowy zakład MBP, dla którego przeprowadzono analizę, cechuje się wydajnością na poziomie 50 Mg/h (dla zmieszanych odpadów komunalnych) oraz 25 Mg/h (dla odpadów zbieranych selektywnie). Zakład odzyskuje obecnie kilka rodzajów surowców wtórnych: złom stalowy i aluminiowy, papier, odpady wielomateriałowe (kartony z soków, napojów lub mleka, tzw. tetrapaki), PET bezbarwny, niebieski, zielony, polipropylen (PP), polietylen o dużej gęstości (HDPE), folia (LDPE) i karton. Praca w zakładzie odbywa się na dwie zmiany – pierwsza od 6.00 do 14.00, a druga od 14.00 do 22.00.

Odpady przyjęte do przetwarzania po zważeniu są rozładowywane ze śmieciarek w zamkniętej hali. Rozpoczęcie procesu przetwarzania polega na załadowaniu odpadów do rozrywarki worków. Następnie maszyna dozująca równomiernie rozprowadza odpady na przenośniku taśmowym, skąd są transportowane na sito obrotowe. Na sicie odpady rozdzielane są na trzy frakcje: poniżej 80 mm, 80–340 mm, powyżej 340 mm. Frakcja powyżej 340 mm trafia bezpośrednio do kontenerów i dalej do spalarni odpadów. Dwie pierwsze frakcje oddzielnymi przenośnikami trafiają do separatorów magnetycznych i wiropędowych i balistycznych, gdzie odzyskuje się złom stalowy i aluminiowy, który trafia do kabiny sortowniczej i jest czyszczony ręcznie przez pracowników fizycznych.

Frakcja podsitowa (o uziarnieniu poniżej 80 mm) trafia do bioreaktorów, w których podawana jest stabilizacji tlenowej. Proces stabilizacji wymaga odpowiednio dobranego nawietrzania i specjalnej infrastruktury, która została szczegółowo opisana m.in. przez Białowiec (2018). Frakcja nadsitowa kierowana jest na sita wibracyjne i rozdzielana na frakcje o uziarnieniu: 80–140 mm i 140–340 mm. Obie frakcje po przesianiu trafiają do separatorów optycznych, które wydzielają: papier i tworzywa sztuczne. Częściowo oddzielony papier transportowany jest przenośnikami do kolejnych separatorów optycznych, gdzie jest sortowany po raz kolejny. Na samym końcu linii papieru pracownicy fizyczni sortują materiał, który w luźnej postaci trafia na prasę i jest formowany w kostkę dla łatwiejszego transportu i przechowywania. Tworzywa sztuczne trafiają do separatorów balistycznych, na których oddzielana jest folia kierowana następnie do separatorów optycznych. Pozostałe tworzywa trafiają do separacji z wykorzystaniem sześciu separatorów optycznych, które wybierają: PET, opakowania wielomateriałowe, PP oraz HDPE. Wszystkie te surowce kierowane są do kabiny sortowniczej w celu ręcznego doczyszczenia, a następnie są prasowane i magazynowane. Pozostałości procesowe trafiają po separacji powietrznej do rozdrabniacza odpadów w kierunku wytworzenia paliwa alternatywnego (RDF).

Proces oceny efektywności energetycznej instalacji rozpoczyna się od wstępnej wizyty w badanym obiekcie. Podczas wizyty audytor rozpoznaje poszczególne elementy procesowe (tj. maszyny i urządzenia) oraz charakteryzuje ich system zasilania i źródła energii. W drugiej fazie oceny, po wstępnej analizie zebranych danych, ustalany jest poziom szczegółowości audytu. W przypadku braku danych (np. o zużyciu energii przez poszczególne urządzenia) audytor jest zobowiązany do ich uzupełnienia, dokonując pomiarów osobiście.

Zapytanie o dane może zawierać: informacje o procesach technologicznych, informacje o budynku, informacje o źródłach energii, systemie zmianowym, czasie pracy instalacji, sprawności i typach maszyn. Po zebraniu niezbędnych danych audytor sprawdza, czy informacje są wystarczające do założonego poziomu szczegółowości. Jeżeli na tym etapie stwierdzi, iż nie wszystkie dane są dostępne, audytor powinien przeprowadzić dalsze pomiary, aby np. potwierdzić odpowiedniość stanu początkowego lub potwierdzić zużycie energii, bilans energetyczny lub obliczyć wskaźniki korygujące. Następnie audytor tworzy analizę, która obejmuje bilans i dystrybucję energii, wskaźniki charakterystyki energetycznej oraz najważniejsze, czyli identyfikację i ocenę możliwości poprawy efektywności energetycznej (ISO 16247:2014).

Wskaźnik efektywności energetycznej EnPI powinien być obliczany w czasie rzeczywistym poprzez kontrolę zużycia energii przez poszczególne odbiorniki. W przeprowadzonych badaniach proces kalkulacji wykonywany był w czasie rzeczywistym za pomocą oprogramowania SCADA ASIX. System ASIX wspomaga realizację celów i zadań polityki efektywnego wykorzystania energii w zakładzie, obiekcie lub instalacji, a także pozwala na pomiar faktycznych efektów energetycznych i ekonomicznych tej polityki.

2. Wyniki

W procesie przetwarzania odpadów na analizowanej linii technologicznej, wykorzystywanych jest 181 urządzeń elektrycznych o łącznej mocy zainstalowanej 1 605,35 kW. W ujęciu średniorocznym instalacja przetwarza około 105 000 Mg odpadów. Najliczniejszą grupą urządzeń są przenośniki taśmowe (125 sztuk), które w bilansie zużycia energii wykorzystują 417,55 kW (26% mocy zainstalowanej w zakładzie). W procesie separacji odpadów wykorzystywane są także trzy kompresory o łącznej mocy 360 kW. Inne maszyny to osuszacze, szafy elektryczne, wentylatory i dmuchawy do ogrzewania pomieszczeń. Do oddzielenia strumienia odpadów po kwalifikacji przez separatory optyczne wykorzystywane jest także sprężone powietrze. Średnioroczne zużycie energii na cele przetwórcze oszacowano na 4 822,05 MWh/rok. Po przeliczeniu na jednostkę przetworzonego odpadu uzyskujemy zużycie na poziomie 46 kWh/Mg. Zakład zużywa łącznie 414,62 Mg oleju ekwiwalentnego (toe) energii końcowej w ciągu roku (tab. 1).

Jedną z propozycji poprawy efektywności energetycznej jest wprowadzenie prewencyjnych kontroli systemu dystrybucji sprężonego powietrza. Wykrywanie wycieków powietrza z instalacji ma znaczący wpływ na generowanie oszczędności finansowych. Wartość sprawności całkowitej jest tym większa, im wyższa jest sprawność cząstkowa w postaci wydajności wytwarzania, akumulacji, dystrybucji, wykorzystania powietrza. Przykład analizy ekonomicznej montażu przepływomierzy w układzie sprężonego powietrza przedstawiono w tabeli 2. W ramach działań na rzecz poprawy efektywności energetycznej zaleca się zainstalowanie układu odzysku energii cieplnej z układu sprężarek. W tabeli 3 przedstawiono

Tabela 1. Energochłonność procesu technologicznego MBP

Proces	Średnioroczne zużycie energii [MWh/rok]		Średnioroczne zużycie energii finalnej [Mg _{toe} /rok]	
	łącznie	na 1 Mg przetworzonych odpadów	łącznie	na 1 Mg przetworzonych odpadów
Transport	1 294,35	0,012	111,29	0,0010
Przesiewanie	419,37	0,004	36,06	0,0001
Frakcjonowanie	201,33	0,002	17,31	0,0002
Procesy przygotowawcze	135,00	0,002	11,61	0,0001
Rozdrabnianie	960,00	0,009	82,55	0,0008
Sortowanie	435,00	0,004	37,40	0,0004
Przygotowanie powietrza	1 080,00	0,010	92,86	0,0009
Prasowanie	297,00	0,003	25,54	0,0002
Razem	4 822,05	0,046	414,62	0,0037

Tabela 2. Przedstawienie inwestycji polegającej na zakupie przepływomierzy do instalacji sprężonego powietrza

Moc zainstalowana [kW]	360,00
Średnioroczny koszt przygotowania powietrza [PLN]	88 000,00
Koszt zakupu przepływomierzy i systemu monitorowania [PLN]	2 500,00
Średnioroczne oszczędności w procesie przygotowania powietrza wynikłe z zainstalowania przepływomierzy i systemu monitoringu [PLN]	8 800,00
Czas zwrotu inwestycji [lata]	1

Tabela 3. Prezentacja inwestycji w wykrywanie i naprawę wycieków z instalacji sprężonego powietrza

Produkcja powietrza [m ³ /min] – sprężarka o mocy 360 [kW]	1060,00
Zużycie powietrza przez linię [m ³ /h]	63 600,00
Czas pracy sprężarki [h]	3 200,00
Koszt wytworzenia powietrza [PLN]	8 140 800,00
Koszt lokalizacji wycieków powietrza i napraw instalacji [PLN]	15 000,00
Średnioroczne oszczędności w procesie dystrybucji powietrza [PLN]	814 080,00
Czas zwrotu inwestycji [lata]	1

przykład analizy ekonomicznej do wykrywania i naprawy nieszczelności w układzie sprężonego powietrza.

Optymalizację pracy systemu sprężonego powietrza można zapewnić w dwóch obszarach. Pierwszym obszarem, w którym można zapewnić oszczędności zużycia energii, jest produkcja powietrza (Thollander i in. 2020). Analizowany przykład wskazuje, że wykonanie nieskomplikowanych modernizacji instalacji polegających na zainstalowaniu systemu monitorowania przepływu powietrza może zwiększyć sprawność obecnego systemu o 5–20%. Przeprowadzone symulacje zapotrzebowania na energię po wdrożeniu systemu monitorowania wskazują na zmniejszenie zużycia energii pierwotnej przez sprężarki o około 10–15%. Drugim obszarem wprowadzania oszczędności jest redukcja zużycia sprężonego powietrza. Obecnie system generuje 20–30% więcej powietrza niż wynika z symulacji zapotrzebowania odbiorników. Jest to efekt występowania wycieków powietrza w instalacji oraz brak odpowiedniej infrastruktury towarzyszącej systemowi przesyłowemu powietrza. Pomiar przeprowadzone w badanej instalacji wykazały, że redukcja ciśnienia w urządzeniach odbiorczych o 1% obniża zapotrzebowanie na energię sprężarek o 7 i 13% zmniejsza ryzyko występowania wycieków powietrza.

W omawianej modelowej instalacji MBP sprężone powietrze powstaje w scentralizowanym punkcie obiektu i jest rurociągami dostarczane do poszczególnych odbiorników. Transport sprężonego powietrza zależy od wielu czynników takich jak średnica i długość rurociągu, przepustowość oraz straty hydrauliczne. Monitorowanie tych czynników jest skomplikowanym procesem i bardzo często ogranicza się do pomiarów różnicy ciśnienia na początku i końcach rurociągu (Nehler 2018). W przedmiotowej instalacji wykonanej z aluminium, spełniony jest podstawowy warunek efektywności energetycznej poprzez dobór odpowiednich materiałów konstrukcyjnych. W systemie transportu powietrza zaleca się także stosowanie zbiorników buforowych oraz minimalizowanie nieeksploatowanych wyjść z instalacji. Symulacja zmian w instalacji, które są możliwe do zastosowania w analizowanym obiekcie, wykazała obniżenie spadków ciśnienia w punktach odbioru powietrza w zakresie od 2 do 5% wartości zmierzonych w punkcie przygotowania powietrza. Sumaryczne zmniejszenie strat transportu powietrza może spowodować ograniczenie zużycia energii przez sprężarki do 20% wartości bazowej.

Realizacja procesu przetwarzania odpadów wymaga również ciągłego monitoringu (kontroli) zużycia mediów energetycznych. Mechanizm kontroli bazuje na systemie wyznaczonych celów energetycznych (Wu-Yang i in. 2020; Gliniak i in. 2020). Kalkulację oszczędności energii zrealizowano w oparciu o normę ISO 50001:2018, z którą oprogramowanie SCADA ASIX jest w pełni kompatybilne. Do obliczeń, na podstawie pozyskanych danych, założono 100 wejść komunikacyjnych podzielonych na liczniki, mierniki i sterowniki. Oszacowane oszczędności wynikające z wprowadzenia pomiaru zużycia energii elektrycznej to około 5% obecnych kosztów energii. Koszt zakupu systemu uzależniony jest od ilości docelowych punktów pomiarowych. Na podstawie przeprowadzonej symulacji, w przypadku instalacji do mechaniczno-biologicznego przetwarzania odpadów należy przewidzieć

co najmniej 70 punktów pomiarowych. Szacunkowe nakłady inwestycyjne i oszczędności wynikające z wdrożenia systemu SCADA ASIX przedstawiono w tabeli 4.

Tabela 4. Wstępne parametry do obliczenia efektywności ekonomicznej inwestycji w system monitorowania zużycia mediów SCADA ASIX

Nakłady inwestycyjne netto [PLN]	250 000,00
Podatek VAT [PLN]	57 500,00
Średnioroczna oszczędność energii [kWh]	110 645,50
Średnioroczny koszt zakupu energii [PLN/kWh]	0,48
Średnioroczna oszczędność energii [PLN]	53 109,84
Czas zwrotu inwestycji [lata]	4,7

Podsumowanie

W ciągu ostatnich kilku dekad jednym z głównych celów polityki energetycznej i klimatycznej było promowanie redukcji zużycia energii w sektorach energochłonnych, do których należy gospodarka odpadami. Cel, jakim jest ograniczenie zużycia energii bez zakłócania pracy zakładu, wymaga zwiększenia oszczędności energii elektrycznej. Taka poprawa oznacza jednak obniżenie kosztów krańcowych usługi energetycznej, co z kolei może stymulować wzrost jej zapotrzebowania („wykorzystanie” zaoszczędzonej energii w innych obszarach, np. poprzez zwiększenie produkcji). Zjawisko to, czyli tzw. efekt odbicia, wiąże się ze wzrostem zużycia energii, co może częściowo lub w całości zrównoważyć oczekiwany wzrost efektywności energetycznej. Jeśli skala tego efektu nie jest bez znaczenia, polityki mające na celu zmniejszenie zużycia energii poprzez promowanie efektywności energetycznej mogą nie być w pełni skuteczne. Efekt odbicia może również mieć nieoczekiwane skutki ekonomiczne lub środowiskowe, takie jak wyższe emisje gazów cieplarnianych niż oczekiwano. Dlatego istotne jest zachęcanie do ograniczania całkowitego zapotrzebowania energii elektrycznej w zakładach produkcyjnych. Krajowe polityki i strategie w tym zakresie powinny być objęte odpowiednimi sygnałami cenowymi, np. nakładaniem określonych podatków, promowaniem automatyzacji przemysłowej oraz w miarę możliwości, zapewnianiem alternatywnych i przyjaznych dla środowiska maszyn do produkcji.

Przeprowadzona analiza efektywności energetycznej i ekonomicznej dla przedsiębiorstwa przetwarzającego odpady komunalne wskazała na możliwości poprawy efektywności energetycznej zakładu i w konsekwencji efektywności ekonomicznej. Uzyskane wyniki pokazują średnią efektywność paliwową zakładu na poziomie 78% (jest to skumulowana

wartość wszystkich możliwych do wprowadzenia oszczędności zużycia energii elektrycznej w odniesieniu do obecnego zużycia).

Literatura

- Abdelaziz E., Saidur R., Mekhilef S. 2011: A Review on Energy Saving Strategies in Industrial Sector. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 15, s. 150–168.
- Białowiec A. 2018: Tlenowa biostabilizacja odpadów komunalnych. Obliczenia projektowe i eksploatacyjne. Wrocław: Wydawnictwo Uniwersytetu Przyrodniczego we Wrocławiu.
- Bunse K., Vodicka M., Schönsleben P., Brühlhart M., Ernst F.O. 2011: Integrating Energy Efficiency Performance in Production Management – Gap Analysis between Industrial Needs and Scientific Literature *Journal of Cleaner Production*, 19, s. 667–679.
- EN 16247:2014 Energy audits.
- Gliniak M., Wałag P., Samek M. 2020: Energy and Economic Efficiency of Municipal Waste Processing Plant [W:] Soliman Khalid S. red. *Proceedings of the 36th International Business Information Management Association Conference (IBIMA): Sustainable Economic Development and Advancing Education Excellence in the era of Global Pandemic*, s. 1–7.
- Głowacki J., Kopyciński P., Mamica Ł., Malinowski M. 2019: Identyfikacja i delimitacja obszarów gospodarki o obiegu zamkniętym w ramach „zrównoważonej konsumpcji” [W:] Kulczycka J. red. 2019: *Gospodarka o obiegu zamkniętym w polityce i badaniach naukowych*, s. 167–179.
- ISO 50001:2018 Energy management systems.
- Javied T., Rackow T., Franke J. 2015: Implementing Energy Management System to Increase Energy Efficiency in Manufacturing Companies. *Procedia CIRP*, 26, s. 156–161.
- Malinowski M. 2020: Zastosowanie elektromagnetyczności w procesie mechanicznego odzysku odpadów budowlanych ze szczególnym uwzględnieniem doczyszczania złomu odpadów budowlanych w MIKI Recykling Sp. z o.o. z siedzibą w Krakowie. Raport z niepublikowanych badań. s. 1–88.
- Nehler T. 2018: Linking energy efficiency measures in industrial compressed air systems with non-energy benefits – A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 89, s. 72–87.
- PEP 2030, Polityka Energetyczna Polski do 2030 (M.P. z 2010 r. nr 2, poz. 11).
- PEP 2040, Zaktualizowany Projekt Polityki energetycznej Polski do 2040 z 8.11. 2019 r. On-line: (<https://www.gov.pl/web/klimat/Projekt-Polityki-Energetycznej-Polski-do-2040r-poddany-strategicznej-ocenie-oddziaływania-na-srodowisko>) (dostęp: 20.12.2020 r.)
- Thollander P., Karlsson M., Rohdin P., Wollin J., Rosenqvist J. 2020: Energy efficiency in compressed air, ventilation, and lighting. *Introduction to Industrial Energy Efficiency*, Academic Press, s. 183–214.
- Weidong F., Wei H., Kunya W., Huoyin L., Zhihao J. 2011: A Method to Establish and a Run Management System for Energy. *Energy Procedia*, 5, s. 1584–1588.
- Wu-Yang S., Ya-Yun C., Lili Lorensia M., Jian-Gu C., Han-Yang L. 2020: Energy consumption analysis in wastewater treatment plants using simulation and SCADA system: Case study in northern Taiwan. *Journal of Cleaner Production*, 276, 124248.

Wykorzystanie procesu zestalania jako metody zagospodarowania odpadów – analiza SWOT wybranych rozwiązań technicznych

Streszczenie. W rozdziale przedstawiono wybrane innowacyjne rozwiązania dotyczące zagospodarowywania odpadów z zakresu ich immobilizacji, czyli zestalania. Metoda ta jest coraz częściej wykorzystywana szczególnie w procesach zagospodarowania odpadów niebezpiecznych, które dotychczas w dużej części przekazywane były do składowania. Popularność technologii zestalania wynika bezpośrednio z korzyści, jakie z niej wynikają. Poddawanie odpadów niebezpiecznych procesom immobilizacji pozwala na przekształcenie ich w nowe produkty o charakterze np. obojętnym dla środowiska. Wysoki potencjał i ciągłe optymalizowanie procesu zestalania wynika bezpośrednio z możliwości wykorzystania produktów tego przetwarzania w różnych gałęziach przemysłu. Celem artykułu było dokonanie przeglądu, analizy szans i zagrożeń oraz mocnych i słabych stron procesu immobilizacji odpadów w technologiach dostępnych na rynku.

Słowa kluczowe: zestalanie, gospodarka odpadami, beton, analiza SWOT

The use of the solidification process as a method of waste management – SWOT analysis of the selected technical solutions

Abstract. The paper presents selected innovative solutions in the field of municipal and post-industrial waste management, which mainly include immobilization processes, like solidification. This method is commonly used especially in the processes of hazardous waste management, which so far has been largely transferred for landfilling. The popularity of the solidification technology is a direct result of its benefits. Subjecting hazardous waste to immobilization processes allows for its transformation into new products, neutral to the environment. The high potential and constant optimization of the solidification process results directly from the possibility of using the products of this processing in various industries. The aim of the article was to review and analyze the opportunities and threats, strengths and weaknesses of the waste solidification process in commonly used technologies.

Keywords: immobilization, waste management, concrete, SWOT analysis

¹ Uniwersytet Rolniczy w Krakowie, Wydział Inżynierii Produkcji i Energetyki

Wprowadzenie

Regulacje dotyczące technologii i sposobów wykorzystywanych w procesach zagospodarowywania odpadów są w znacznym stopniu zdeterminowane. Polska jako kraj członkowski Unii Europejskiej jest zobligowana do przestrzegania wytycznych przyjętych przez wszystkie kraje Wspólnoty. Głównym dokumentem określającym kierunki rozwoju technologii zagospodarowywania odpadów jest Dyrektywa Parlamentu Europejskiego i Rady Unii Europejskiej w sprawie odpadów, zgodnie z którą w pierwszej kolejności powinniśmy zapobiegać powstawaniu jakichkolwiek odpadów (Dyrektywa 2018). Jeżeli powstanie odpadów zapobiec nie możemy, wówczas powinniśmy minimalizować ich ilość, a te wytworzone poddawać procesom ponownego użycia lub recyklingu, a w ostateczności stosować techniki unieszkodliwiania (Frąś i in. 2017). Wyżej wymienione wytyczne stanowią oś cyklu technologicznego w modelu gospodarki o obiegu zamkniętym, natomiast w Polsce są jednym z kluczowych obszarów wdrażania nowego systemu gospodarczego (Głowacki i in. 2019).

Zestalanie i stabilizacja odpadów stanowi formę fizykochemicznego unieszkodliwiania odpadów. Jego celem jest takie przekształcenie odpadów, aby zawarte w nich związki niebezpieczne o charakterze rozpuszczalnym, nie mogły przedostawać się do otoczenia na skutek wymywania. Dodatkowo technologie zestalania stwarzają możliwości, aby wytworzone w procesach produkty charakteryzowały się korzystnymi właściwościami technicznymi, takimi jak niska nasiąkliwość i mrozoodporność (Fengler 2012). Wśród procesów immobilizacji wyróżniamy cementowanie, geopolimeryzację, bituminizację i witrifikację (Mikuła i in. 2017). Wykorzystywane są również inne technologie takie jak Synroc czy Geodur, jednak zostały one opracowane dla specyficznych rodzajów odpadów i nie są stosowane na szeroką skalę (Fengler 2012).

Celem pracy jest dokonanie przeglądu dostępnej literatury krajowej i zagranicznej z zakresu wykorzystywanych technologii immobilizacji odpadów oraz analiza możliwych korzyści płynących z wdrożenia tego procesu do modelu gospodarki o obiegu zamkniętym (w zakresie postępowania z odpadami). Ponadto w oparciu o zgromadzoną bazę danych o technologiach została wykonana analiza SWOT, mająca na celu usystematyzowanie zebranych informacji poprzez wskazanie słabych i mocnych stron oraz szans i zagrożeń omawianego kierunku zagospodarowania odpadów.

1. Metodyka

Analiza SWOT stanowi kompleksową metodę analizy, która uwzględnia badane zjawisko w sposób wielowymiarowy. W procesie analizowane zagadnienie postrzegane jest w sposób indywidualny, jak i zostaje odniesione do otoczenia zewnętrznego. Dzięki takiemu podejściu możliwa jest wielopłaszczyznowa identyfikacja kluczowych atutów i słabości

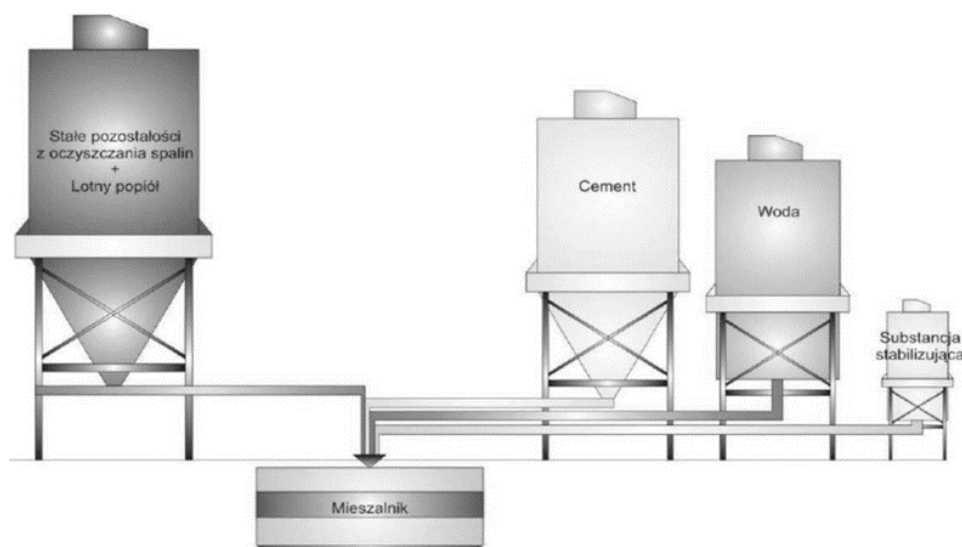
procesu oraz skonfrontowanie ich z istniejącymi szansami i zagrożeniami (Igliński i in. 2015). Analiza SWOT stanowi jedno z najbardziej podstawowych narzędzi analiz strategicznych, dających zestawienie czterech głównych aspektów przedsięwzięcia, takich jak:

- ♦ S (*Strengths*) – silne strony, które należy rozwijać,
- ♦ W (*Weaknesses*) – słabe strony, które należy redukować,
- ♦ O (*Opportunities*) – szanse, które należy wykorzystywać,
- ♦ T (*Threats*) – zagrożenia, których należy unikać.

Analizę SWOT przeprowadzono w oparciu o informację zebrane z przeglądu literatury.

2. Proces immobilizacji odpadów

Immobilizacja odpadów w procesie produkcji wyrobów betonowych stanowi jedną z najbardziej rozpowszechnionych i przebadanych form ich unieszkodliwiania. Poprzez użycie spoiwa, np. cementu portlandzkiego, dochodzi do powstania wiązań hydraulicznych między związkami rozpuszczalnymi w matrycy betonowej, co skutecznie zmniejsza wymywalność tych związków. Trwałość wiązań jest szacowana na okres od 2 do 3 lat (Fengler 2016). Tym samym otrzymujemy produkt bezpieczny podczas transportu i składowania oraz cechujący się zminimalizowaniem wolnej powierzchni odpadów, przez którą może zajść migracja substancji szkodliwych. Produkt poddany takiemu procesowi nie wykazuje oznak występowania substancji szkodliwych, lub stopień zagrożenia substancjami niebezpiecznymi jest zminimalizowany. Substancje szkodliwe, które znajdują się w odpadach, podlegają



Rysunek I. Schemat instalacji do zestalania odpadów poprocesowych

Źródło: Soxotec Polska Sp. z o.o. 2009

trwałemu kapsułowaniu, tzn. są wyizolowane od naturalnego otoczenia, przy jednoczesnej poprawie właściwości mechanicznych. Dzięki temu ta metoda wykorzystywana jest przede wszystkim w procesach przetwarzania odpadów takich jak popioły i żużle wielkopieczowe oraz szlamy powstające na drodze oczyszczania ścieków komunalnych i przemysłowych. Na rysunku 1 zaprezentowany został schemat instalacji wykorzystywany w procesie zestalania i stabilizacji odpadów poprocesowych w zakładzie termicznego przekształcania odpadów komunalnych (Wasiak, Różalska 2003).

2.1. Immobilizacja popiołów ze spalania osadów ściekowych

Ideą procesu zestalania jest używanie mieszanin chemicznie aktywnych komponentów, np. cementu portlandzkiego, który wskutek zachodzącej hydrolizy ulega łatwemu zestaleniu. Substancje szkodliwe jakie są zawarte w osadach ściekowych są wiązane trwale na chemicznie aktywnych centrach hydratyzowanego cementu. W tym procesie wytwarzają się również trudno rozpuszczalne produkty, które wbudowują się w mikrostrukturę produktów procesu hydratacji cementu lub zostają kapsułkowane zastosowaną mieszanką zestalającą. Proces zestalania prowadzi do przekształceń zanieczyszczeń w odpadach w formy trudno rozpuszczalne ze zredukowaną ilością substancji toksycznych. Dzięki temu można ograniczyć swobodę migracji jonów metali (Fengler 2016). Do zestalania osadów przemysłowych używa się cementu portlandzkiego CEM I 32,5 o wysokiej wytrzymałości wczesnej w składzie, w którym 10% cementu lub spoiwa jest zastępowane odpadem niebezpiecznym (Król 2012). Udział procentowy odpadów w mieszance betonowej wynosi od 1 do kilku procent. Wysoka wilgotność odpadów, które podlegają procesowi unieszkodliwiania, niekorzystnie wpływa na końcową jakość produktu. Zwiększona zawartość wody ma wpływ na porowatość, mrozoodporność, nasiąkliwość oraz wytrzymałość mechaniczną. W celu wyeliminowania tego problemu stosuje się suszenie osadów w temperaturze około 21°C przez 28 dni (Banaszkiewicz 2012).

Monzó i in. (2014) badając możliwość zastosowania procesu immobilizacji jako formy zagospodarowania popiołów ze spalania osadów ściekowych, w produkcji zaprawy zastąpili wagowo 15–30% cementu popiołem. W wyniku badań stwierdzono, że próbki zawierające 15% dodatku nie różniły się wytrzymałością w sposób znaczący w odniesieniu do próbki kontrolnej. Zastąpienie 30% cementu portlandzkiego popiołem przełożyło się na zmniejszenie urabialności świeżej zaprawy. Stwierdzono, że jest to spowodowane dużą nieregularnością ziaren popiołu. W badaniach Chang i in. (2004) również potwierdzono, że dodatek popiołu z osadu ściekowego wpływa na wzrost porowatości próbki, a tym samym jej zdolności absorpcji wody z otoczenia. Natomiast Baeza-Brotons i in. (2014) zastosowali dodatek 5, 10, 15, 20% popiołu w blokach betonowych stwierdzając, że po okresie 28 dni wszystkie badane próbki charakteryzowały się zbliżonymi właściwościami mechanicznymi jak bloki wykonane metodą konwencjonalną. Stwierdzono również, że dodatki wyraźnie zmniejszyły absorpcję wody.

Zastosowanie popiołów lotnych pochodzących ze spalania osadów ściekowych w produkcji betonu przekłada się na zmniejszenie wytrzymałości na ściskanie betonu we wczesnych etapach jego dojrzewania. Pod koniec procesu stabilizacji wpływ na wytrzymałość jest już nieznaczny. Wspomniane dodatki przekładają się natomiast bezpośrednio na spadek wytrzymałości próbek na zginanie. Niezależnie od wielkości dodatku odnotowuje się spadek wytrzymałości znacznie większy niż w przypadku wytrzymałości na ściskanie. Warty uwagi jest również, że wzrost absorpcji wody przez próbki jest ściśle powiązany ze wzrostem ilości zastosowanego dodatku popiołu (Rutkowska i in. 2017).

Przykładem ilustrującym korzyści płynące z zagospodarowania odpadów pochodzących z różnych źródeł, jest technologia otrzymywania kruszyw sztucznych, która w procesie termicznego przekształcania wykorzystuje osady z komunalnych oczyszczalni ścieków wraz z drobnoziarnistymi surowcami mineralnymi, będącymi także odpadami z procesów przemysłowych. Kruszywo takie jest produkowane w technologii bezodpadowej i klasyfikowane jest jako w pełni użyteczny surowiec rynkowy o określonych parametrach technicznych, co umożliwia jego zaplanowane zastosowanie. Cena zbytu uzyskanego surowca umożliwia całkowite pokrycie kosztów operacji technologicznych i konkurowanie z kruszywami tradycyjnymi obecnymi na rynku (Kukielska, Uzunow 2017).

2.2. Imobilizacja odpadów gumowych

Najbardziej rozpowszechnionymi metodami przetwarzania i przekształcania odpadów gumowych jest ich wykorzystanie jako paliw w piecach cementowych lub jako surowca w projektach z zakresu inżynierii lądowej. Jednak te formy nie są wystraszające i duży udział odpadów gumowych nadal musi być magazynowany, co stanowi źródło kolejnych problemów zarówno ekologicznych jak i zdrowotnych. W związku z czym zastosowanie tych odpadów jako substratów w produkcji wyrobów betonowych może przynieść szereg korzyści.

Khatib i Bayomy (1999) sprawdzili, jak zastosowanie granulatu gumowego o różnej twardości, w zastępstwie kruszywa przyczyni się na właściwości mechaniczne finalnych produktów. Stwierdzili oni, że wraz ze wzrostem udziału domieszek wytrzymałość betonu była coraz mniejsza. Ponad odnotowano, że zastosowanie drobnego granulatu przyczyniło się do zwiększenia podatności bloków na obróbkę mechaniczną. Ze względu na niski ciężar właściwy gumy stwierdza się tendencję do rozwarstwiania próbek podczas poddawania procesowi wibracji, co skutkuje gromadzeniem granulatu w górnych warstwach próbki. Taka niejednorodność betonu prowadzi do zmniejszenia wytrzymałości mechanicznej. Zastosowanie 7,5–10% dodatku granulatu przyczynia się do zmniejszenia wytrzymałości na ściskanie próbek o 10–23%. Natomiast próbki zawierające do 12,5% dodatku po okresie 90 dni charakteryzowały się zbliżoną wytrzymałością na ściskanie jak próbki kontrolne. Stwierdzono, że dodatek do 12,5% odpadowego granulatu gumowego może stanowić substytut

drobnego kruszywa w betonie przeznaczonym do zastosowania innego niż konstrukcje nośne. Dzięki zwiększonej odporności próbek na ścieranie istnieje możliwość zastosowania tego typu betonu do budowy chodników lub wylewek betonowych (Sofi 2017). Domieszki granulatu gumowego przekładają się znacząco na zwiększoną wytrzymałość betonu na uderzenia w zestawieniu z próbkami betonu tradycyjnego (Stallings i in. 2019). W celu sprawdzenia wpływu domieszki granulatu gumowego na wytrzymałość mechaniczną betonu Girska i Nagrockiene (2017) sporządzili próbki zawierające 20% udział masowy granulatu o różnej twardości w zastępstwie drobnego kruszywa. Uzyskane wyniki wykazały, że próbki charakteryzowały się wytrzymałością na ściskanie mniejszą o 61,3–68% (zależnie od twardości gumy) w stosunku do próbki kontrolnej. Z badań Thomas i Gupta (2016) wynika, że dodatek granulatu gumowego przekłada się bezpośrednio na spadek gęstości betonu. Będzie on tym większy im większy dodatek zostanie zastosowany. Dzięki temu możliwe jest stworzenie betonu lekkiej wagi do specjalnego przeznaczenia. Na podstawie powyższych wniosków stwierdzono również, że dodatek granulatu wpływa na znaczący wzrost absorpcji wody przez próbki. Istnienie tego trendu jest również bezpośrednio powiązane z wielkością ziaren gumy. Po przeanalizowaniu szeregu wariantów dotyczących zastosowania granulatu gumowego jako substytutu piasku przy tworzeniu wyrobów betonowych, Issa i Salem (2013) stwierdzili, że dodatek masowy mniejszy niż 25% pozwala na uzyskanie zadowalających właściwości produktu. Taki beton może z powodzeniem zostać wykorzystany do tworzenia konstrukcji o charakterze innym niż nośny. Dodatkowo stwierdzono, że wzbogacony w ten sposób beton charakteryzuje się mniejszą gęstością i lepszymi właściwościami izolacyjnymi. Jednakże zastosowanie powyżej 25% domieszki w zastępstwie kruszywa, drastycznie zmniejsza wytrzymałość betonu na ściskanie i zginanie. Taki produkt nie znajduje już zastosowania przy tworzeniu konstrukcji inżynierskich. Na skutek dużej zawartości gumy, taki beton jest nieprzewidywalny, gdyż wykres jego wytrzymałości pod różnym obciążeniem za każdym razem będzie inny. Z tych względów stosowanie dodatków powyżej 25% jest wysoce niewskazane. Qin i in (2019) dodali do zaprawy gumowanej włókna bazaltowe i stwierdzili wyraźny wzrost jednoosiowej wytrzymałości na ściskanie uzyskanego betonu. Sugerowane zastosowanie betonu gumowanego obejmuje przeznaczenie na projekty architektoniczne niepoddawane dużym obciążeniom oraz jako surowiec do produkcji barier zderzeniowych (Darling 2019).

2.3. Immobilizacja w technologii Geodur

Technologia ta oparta jest na wspólnej kombinacji chemicznej stabilizacji substancji szkodliwych zawartych w odpadach poprzez trwałe przekształcenie substancji rozpuszczalnych w nierozpuszczalne i zestalania przy użyciu spoiw hydraulicznych, takich jak różnego gatunku cementy i wapna palone. Aby cały proces był skuteczny, konieczna jest dokładna znajomość składu chemicznego odpadu poddawanego procesowi unieszkodliwiania.

Dzięki temu możliwe jest stechiometryczne dobranie chemikaliów stanowiących bezpośrednio komponenty mieszanki, dzięki którym związki rozpuszczalne zostają przekształcone w nierozpuszczalne. Jakość przygotowywanych mieszanek zależy od energii wprowadzonej do produktu w jednostce czasu i stopnia homogenizacji różnych jego składników. W pierwszej fazie procesu, dzięki precyzyjnie dobranym reagentom, kontrolowanemu pH i temperaturze w mieszaninie dochodzi do przekształcenia związków chemicznych. Druga faza obejmuje zmiany fizycznej struktury mieszanki poprzez dodawanie odpowiednich spoiw. W wyniku stosowania technologii *Geodur* możliwe jest znaczne zmniejszenie migracji substancji szkodliwych do środowiska. Dzięki tworzeniu wewnętrznych barier poszczególne jony zajmują swoje pozycje jako funkcja średnicy i ładunku w strukturze krystalicznej. W czasie zestalania przy użyciu cementu dochodzi natomiast do powstania barier zewnętrznych. Utworzona wcześniej struktura krystaliczna jest zamykana w masie cementowej, wpływa to na zmniejszenie jej przepuszczalności i tym samym zwiększenie gęstości samego produktu. W efekcie technologia ta, ze względu na swoją wysoką efektywność, wykorzystywana jest na szeroką skalę w procesach przetwarzania popiołów pochodzących ze spalania osadów ściekowych (Fengler 2012).

2.4. Immobilizacja w technologii *Syncroc*

Podstawowym problemem techniki jądrowej są radioaktywne odpady. Na świecie poza składowaniem w odpowiednich pojemnikach, odpady promieniotwórcze przetwarza się z użyciem skomplikowanych technologii. Przykładem takiej technologii jest *Syncroc* (syntetyczna skała). Jest to opracowana w Instytucie Chemii i Techniki Jądrowej metoda tworzenia ceramiki składającej się z geochemicznie stabilnych związków tytanu występujących w skorupie ziemskiej. Dzięki swojej strukturze związki te umożliwiają wbudowanie prawie wszystkich radioaktywnych elementów obecnych w odpadach nuklearnych. Zamknięcie odpadów w masie szklanej jest jednym z lepszych sposobów ograniczenia ich negatywnego oddziaływania na środowisko. *Synroc* nie jest metodą utylizacji, otrzymywane produkty nadal muszą być składowane w odpowiednich warunkach ze względu na potencjalne ryzyko emisji promieniotwórczej (Włoch 2013).

3. Analiza SWOT procesu zestalania odpadów

Na podstawie informacji zebranych w przedstawionym powyżej przeglądzie literatury sporządzono analizę SWOT procesu zestalania odpadów jako możliwego kierunku ich zagospodarowywania w ramach struktury gospodarki o obiegu zamkniętym.

Z przeprowadzonego powyżej przeglądu i analizy technologii stosowanych do scalania odpadów o różnym pochodzeniu stwierdzono, że rozwój tej dziedziny gospodarki odpadami

posiada szeroką perspektywę rozwoju. W perspektywie dalszego rozwoju społeczeństwa i wzrostu liczby ludności, rozwój gałęzi przemysłu jest nieunikniony. To z kolei skutkuje stale rosnącą liczbą odpadów, w tym także odpadów niebezpiecznych. Ograniczona możliwość przetwarzania niektórych odpadów ze względu na ich właściwości fizyczne i chemiczne w sposób konwencjonalny pozwala z powodzeniem na stosowanie technologii scalania odpadów. Technologia ta doskonale wpisuje się również w kontekst gospodarki odpadami

Tabela 1. Analiza SWOT procesu zestalania odpadów

Mocne strony	Słabe strony
<ul style="list-style-type: none"> – Możliwość zastosowania procesu dla odpadów o różnym pochodzeniu. – Niski poziom złożoności procesu. – Wysoka wydajność procesu zestalania. – Ograniczenie oddziaływania odpadów na środowisko. – Utworzenie alternatywnej metody gospodarowania odpadami. – Ponowne wykorzystanie odpadów do tworzenia nowych produktów, bez konieczności poddawania ich składowaniu. – Możliwość uzyskania produktów charakteryzujących się przydatnymi właściwościami fizykochemicznymi – Ograniczenie wydobycia surowców mineralnych. – Uzyskiwany w procesie beton posiada mniejszą gęstość i większą odporność na ścieranie. 	<ul style="list-style-type: none"> – Każdorazowa konieczność dostosowania parametrów procesu do właściwości przetwarzanego odpadu. – Ograniczona możliwość stosowania tej technologii w miejscu wytwarzania odpadów. – Konieczność transportu odpadów do miejsca ich przetwarzania. – Uzyskany w procesie beton charakteryzuje się mniejszą wytrzymałością w zestawieniu z betonem konwencjonalnym. – Produkty procesu wymagają znacznie dłuższego czasu stabilizacji. – Zwiększona absorpcja wody. – Końcowa wytrzymałość betonu uzyskiwana znacznie później niż w przypadku próbek referencyjnych. – Nie wszystkie technologie zestalania zapewniają długotrwałą skuteczność procesu. – Wysokie koszty przeprowadzenia procesu. Dodatkowo koszt ten wzrasta, jeśli wyroby cementowe pokrywa się warstwą hydrofobową, np. warstwą smoły.
Szanse	Zagrożenia
<ul style="list-style-type: none"> – Dobrze rozwinięta gałąź przemysłu cementowego w Polsce. – Szybki rozwój technologii. – Zmniejszenie liczby odpadów trafiających na składowiska. – Wielkoskalowa produkcja kruszyw sztucznych z opadów w procesach zestalania może rekompensować koszty przeprowadzenia operacji technologicznych. 	<ul style="list-style-type: none"> – Znacząca heterogeniczność odpadów oraz ich właściwości fizycznych i chemicznych. – Niestabilność cen substratów wykorzystywanych w procesie cementowania. – Brak gwarancji stabilnych dostaw surowca do przeprowadzenia procesu – Brak informacji na temat właściwości produktów procesu w perspektywie długoterminowej. – Potencjalne zagrożenia dla zdrowia ludzi w przypadku zastosowania produktów procesu zestalania w zamkniętych pomieszczeniach.

Źródło: opracowanie własne.

o obiegu zamkniętym. Wykorzystanie odpadów do produkcji nowych wyrobów pozwala na zachowanie ich w cyklu, bez konieczności poddawania ich procesom unieszkodliwiania lub składowania. W efekcie możliwe jest osiągnięcie kilku korzyści. Przede wszystkim odpady, których przetworzyć nie bylibyśmy w stanie, nie trafiają na składowiska, a stanowią surowiec w procesie. Skutkiem czego jest wytworzenie nowych produktów mogących stanowić użyteczny surowiec dla innych gałęzi przemysłu. Tutaj duże pole do popisu posiada bardzo rozwinięta gałąź cementowa, obecna w Polsce. Zastosowanie odpadów w produkcji betonu pozwala na opracowywanie nowych składów mieszanek betonowych o unikatowych właściwościach fizycznych i chemicznych. Takie mieszanki lub tworzone z nich prefabrykaty budowlane stanowią doskonałą alternatywę dla konwencjonalnych wyrobów wykorzystywanych w projektach inżynierskich. Tutaj odnotować można kolejny z plusów, wykorzystanie substancji odpadowych jako substytutów kruszyw betonowych pozwala na ograniczenie wydobycia surowców pochodzenia mineralnego. Pośród przedstawionych powyżej korzyści płynących z zastosowania procesu konieczne jest też zwrócenie uwagi na samą jego opłacalność. Poddawanie odpadów procesom zestalania przyczynia się do znaczącego wzrostu kosztów ich zagospodarowania. Konieczność transportu i duża heterogeniczność odpadów pochodzących z różnych źródeł wymusza nieustanną potrzebę monitorowania parametrów uzyskiwanych wyrobów w celu sprostanania narzuconym normom jakościowym. Warto wspomnieć jest również, że proces zestalania nie w każdym przypadku umożliwia zmianę kodu odpadu niebezpiecznego na inny bez gwiazdki, co dodatkowo powinno być brane pod uwagę przy doborze kierunku zagospodarowania danego odpadu.

Wnioski

Pomimo wysokiej wartości wskaźnika odzysku odpadów osiąganego w kraju w ostatnich latach zauważane są pierwsze trudności w dalszym jego zwiększaniu. Poszukiwanie nowych, alternatywnych metod zagospodarowania odpadów, które pozwolą na zmniejszenie masy odpadów unieszkodliwianych na składowiskach, jest więc koniecznością. Zastosowanie technologii zestalania (cementowania) odpadów umożliwia zagospodarowywanie odpadów o różnym pochodzeniu i o różnych właściwościach fizykochemicznych. Efektem procesu jest beton o indywidualnych właściwościach, który z powodzeniem może zostać zastosowany w projektach inżynierskich i architektonicznych. Oczywiście przed zastosowaniem wspomnianej technologii konieczne jest wykonanie analizy inwestycyjnej, gdyż w wielu przypadkach zastosowanie odpadów w procesach technologicznych może być ekonomicznie nieuzasadnione. Duże zróżnicowanie właściwości przetwarzanego surowca, w celu uzyskiwania produktu o neutralnym oddziaływaniu na środowisko wymaga zastosowania dodatkowych domieszek reagentów, co bezpośrednio przekłada się na wzrost kosztów prowadzenia procesu zestalania.

Literatura

- Baeza-Brotons F., Garces P., Paya J., Saval J.M. 2014: Portland cement systems with addition of sewage sludge ash. Application in concretes for the manufacture of blocks. *Journal of Cleaner Production*, 82, s. 112–124.
- Banaszkiewicz K. 2012: Ocena właściwości fizykochemicznych zestalonych odpadów przemysłowych. Wrocław: Politechnika Wrocławska, s. 52–56.
- Chang F., Lin J., Tsai C., Wang K. 2010: Study on cement mortar and concrete made with sewage sludge ash. *Water Science & Technology*, 7, s. 1689–1693.
- Darling G. 2019: Structural Behavior of TL-4 Recycled Tire Chip and Fiber Reinforced Concrete Single Slope Barriers. Master's Thesis, The University of Georgia, USA, s. 14–17.
- Dyrektywa Parlamentu Europejskiego i Rady Unii Europejskiej 2018/851 z dnia 30 maja 2018 r. w sprawie odpadów.
- Fengler M. 2012: Stabilisation and solidification (immobilisation) of hazardous waste from waste incineration plants using the Geodur technology. *Piece Przemysłowe & Kotły*, 12, s. 38–44.
- Fengler M. 2016: Immobilizacja odpadów niebezpiecznych. On-line: http://ekologia-info.enginepro.pl/index.php?lang=1&menu=4&menu_select=116&podmenu_select=397&nreko=701 (dostęp: 11.08.2018).
- Fraś J., Scholz S., Olsztyńska I. 2017: Innowacyjne rozwiązania w zagospodarowaniu odpadów przemysłowych i biomas. Poznań: Politechnika Poznańska, s. 441–450.
- Głowacki J., Kopyciński P., Mamica Ł., Malinowski M. 2019: Identyfikacja i delimitacja obszarów gospodarki o obiegu zamkniętym w ramach „zrównoważonej konsumpcji”. [W:] Kulczycka J. red., *Gospodarka o obiegu zamkniętym w polityce i badaniach naukowych*, s. 167–179.
- Girskas G., Nagrockiene D. 2017: Crushed rubber waste impact of concrete basic properties. *Construction and Building Materials*, 140, s. 36–42.
- Igliński B., Buczkowski R., Cichosz M. 2015: Biogazownie rolnicze w Polsce – stan aktualny, potencjał, analiza SWOT. *Rynek Energii*, 6, s. 93–101.
- Issa C.A., Salem G. 2013: Utilization of recycled crumb rubber as fine aggregates in concrete mix design. *Construction and Building Materials*, 42, s. 48–52.
- Khatib Z.K., Bayomy F.M. 1999: Rubberized Portland cement concrete. *J. Mater. Civ. Eng.*, 11, s. 206–213.
- Król A. 2012: Usuwanie metali ciężkich z kompozytów mineralnych z uwzględnieniem oddziaływania środowiska. Opole: Politechnika Opolska, s. 111–112.
- Kukielska D., Uzunow E. 2017: Lekkie kruszywa sztuczne – Kompleksowe zagospodarowanie odpadów komunalnych i przemysłowych. Warszawa: Instytut Mechanizacji Budownictwa i Górnictwa Skalnego, s. 3–7.
- Mikuła J., Łach M., Mierzejewski D. 2017: Sposoby zagospodarowania popiołów i żużli ze spalarni odpadów. *Inżynieria Ekologiczna*, 18, s. 37–46.
- Monzó J., Paya J., Borrachero M.V., Morenilla J.J., Bonilla M., Caldero P. 2004: Some strategies for reusing residues from waste water treatment plants: Preparation of building materials. *Materiały z Konferencji „Use of Recycled Material in Building and Structures”*, Barcelona, s. 373–381.
- Qin J.L., Qiao W.G., Lin D.G., Zhang S. 2019: Mechanical Properties and Numerical Analyses of Basalt Fiber Crumb Rubber Mortars in Soft Rock Roadways. *Adv. Civ. Eng.*, 10, s. 1–13.
- Rutkowska G., Wichowski P., Świigoń K., Sobieski P. 2017: Badanie właściwości betonów z dodatkiem popiołów lotnych pochodzących z termicznej obróbki osadów ściekowych. Warszawa: Katedra Inżynierii Budowlanej, Szkoły Głównej Gospodarstwa Wiejskiego w Warszawie, s. 113–119.
- Sofi A. 2017: Effect of waste tyre rubber on mechanical and durability properties of concrete. VIT University, India, s. 2691–2700.
- Soxotec Polska Sp. z o.o. 2009: Raport oddziaływania przedsięwzięcia na środowisko dla przedsięwzięcia: Budowa Zakładu Termicznego Przekształcania Odpadów przy ul. Giedroycia w Krakowie jako element projektu Program Gospodarki odpadami komunalnymi w Krakowie. Warszawa, s. 40.
- Stallings K.A., Durham S.A., Chorzepa M.G. 2019: Effect of cement content and recycled rubber particle size on the performance of rubber-modified concrete. *Int. J. Sustain. Eng.*, 12, s. 189–200.

Thomas B.S., Gupta R.Ch. 2016: A comprehensive review on the applications of waste tire rubber in cement concrete. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 54, s. 1323–1333.

Wasiak W., Różalska S. 2003: Zestawienie jako sposób unieszkodliwiania odpadów niebezpiecznych. *Przegląd Komunalny*, 6, s. 94–96.

Włoch D. 2013: Zatapianie izotopu. *Przegląd techniczny, Gazeta inżynierska*, 10, s. 17–18.

Biogospodarka i zasoby wodne

Krzysztof WIERZBICKI¹, Andrzej EYMONTT¹, Witold Jan WARDAL¹

Wykorzystanie antropogenicznych osadów dennych w procesie wdrażania biogospodarki

Streszczenie. Rozpoczęte w Instytucie Technologiczno-Przyrodniczym badania nad wykorzystaniem antropogenicznych osadów dennych ze stawów rybnych i wybranych jezior, zmieszanych z innymi komponentami, jako nawozu organiczno-mineralnego umożliwiły następujące stwierdzenie: dzięki zastosowaniu osadów dennych jako składnika nawozu organiczno-mineralnego istnieją możliwości znacznego wzrostu rolniczej produkcji roślinnej, a zarazem spełnienia preferowanych kierunków rozwoju rolnictwa Unii Europejskiej, również w kierunku produkcji ekologicznej. Niemniej jednak wymagane jest wykonywanie pełnych badań składu osadów dennych przy ich wydobyciu z określonego zbiornika przed zastosowaniem.

Słowa kluczowe: antropogeniczne osady denne, biogospodarka

The use of anthropogenic bottom sediments in the bioeconomy implementation process

Abstract. Research commenced at the Institute of Technology and Life Sciences on the use of anthropogenic bottom sediments from fish ponds and selected lakes, mixed with other components as an organic-mineral fertilizer, allowed for the following statement: thanks to the use of bottom sediments as a component of organic-mineral fertilizer, there are opportunities for a significant increase in agricultural plant production, and at the same time to meet the preferred directions of agricultural development in the European Union, also towards organic production. Nevertheless, it is required to perform a complete composition study of the bottom sediment when it is extracted from a specific reservoir prior to use.

Keywords: anthropogenic bottom sediments, bioeconomy

¹ Instytut Technologiczno-Przyrodniczy w Falentach, Oddział w Warszawie, Zakład Systemów Infrastruktury Technicznej Wsi

Wprowadzenie

Zastosowanie w praktyce nawożenia antropogenicznymi osadami dennymi użytków rolnych jest kosztowne i kłopotliwe w eksploatacji, a to głównie z następujących powodów:

- a) braku badań wiążących właściwości fizyko-chemiczne antropogenicznych osadów dennych o dużej zawartości masy organicznej i innych składników nawozowych z funkcjonowaniem urządzeń do ich wydobywania. A ponadto mało rozpoznany jest wpływ tych osadów na zwiększenie retencji wodnej i gęstości gleby.
- b) istnienia opinii o możliwości zanieczyszczenia tego rodzaju osadów metalami ciężkimi i innymi rodzajami zanieczyszczeń (ropopochodnymi) przy jednoczesnym braku technologii eliminowania tych zanieczyszczeń.
- c) wobec sytuacji opisanej w pkt. a i b oraz braku urządzeń sprawnie działających nie powodujących znacznych kosztów przy wydobywaniu osadów dennych o dużej zawartości części organicznych (Eymontt, Wierzbicki 2013), zostały jedynie wdrażane od kilku lat w Polsce technologie prośrodowiskowe, jak np. napowietrzanie wody w jeziorach (Podsiadłowski i in. 2015), czy też stosowanie różnego rodzaju związków chemicznych wiążących w sposób trwały głównie fosfor (Pikuła, Heese 2015). Zupełnie pominięty jest tu fakt, że zasoby fosforu na świecie maleją, a cena tego surowca wzrasta (Eymontt, Wierzbicki 2013), a więc deponowanie fosforu na dnie zbiorników wodnych jest nieracjonalne.

Istniejący stan wiedzy obarczony wymienionymi w pkt. a, b, c uzależnieniami stał się asumptem do rozpoczęcia poszukiwań w celu bardziej racjonalnego wykorzystania osadów dennych do inicjowania wzrostu roślin.

I. Nowe komponenty wzbogacające osady denne

Wyniki badań z kilku ostatnich lat pozwoliły na odkrycie nowych właściwości skały organicznej zwanej opoką oraz zmikronizowanej biomasy sorbującej wodę (Brogowski i in. 2017; Teliga i in. 2017).

Szczególnie cenną właściwością opoki jest zawartość krzemionki organicznej, dostępnej dla roślin. Krzemionka w tej postaci wpływa korzystnie na tworzenie się bariery w ściankach komórek, przestrzeniach międzykomórkowych i wnętrzach komórek oraz wzmacnia aktywność fizjologiczną roślin, przyczyniając się do wzrostu i jakości plonu (RA 2017), co może znacznie zmniejszyć stosowanie ochronnych środków chemicznych. Ponadto opoka odznacza się możliwościami sorbowania fosforu oraz metali ciężkich, a tym samym podwyższa walory zdrowotne plonu.

Natomiast mikronizat biomasy (Rossa, Strzelczyk 2017) jest to produkt o średnicy cząstek stałych materiału biomasy od kilkunastu do kilkudziesięciu mikronów powstających w wyniku procesu mikronizacji. Dzięki temu procesowi znacznie zwiększa się powierzchnia

czynna, a tym samym sorpcja wody z wydobywanych osadów, umożliwiając ich aplikację do gleby typowym sprzętem.

Te dwa nowe komponenty stworzyły możliwości wdrożenia preferowanej przez Komisję Europejską w 2010 roku „Strategii na rzecz inteligentnego i zrównoważonego rozwoju sprzyjającego włączeniu społecznemu – Europa 2020”.

Wspomniana „Strategia” wyróżnia trzy priorytety:

- ◆ rozwój inteligentny: to jest rozwój gospodarki opartej na wiedzy i innowacji;
- ◆ rozwój zróżnicowany: wspieranie gospodarki efektywnej korzystającej z zasobów przyrody, bardziej przyjaznej środowisku i bardziej konkurencyjnej;
- ◆ rozwój sprzyjający włączeniu społecznemu: wspieranie gospodarki o wysokim poziomie zatrudnienia, zapewniającej spójność społeczną i terytorialną.

Kolejnym dokumentem ww. Komisji z 2012 roku jest „Innowacje w służbie zrównoważonego wzrostu: biogospodarka dla Europy”. Sprecyzowano tu na czym polega biogospodarka, a także jakie cele powinny być realizowane na rzecz Wspólnoty Europejskiej. Podstawowym celem „Strategii dotyczącej biogospodarki i jej planu działań jest stworzenie podstaw dla bardziej innowacyjnego, zasobooszczednego i konkurencyjnego społeczeństwa, w którym zapewnienie bezpieczeństwa żywnościowego nie wchodzi w konflikt z zasadami zrównoważonego wykorzystania zasobów odnawialnych dla celów przemysłowych, przy jednoczesnym zapewnieniu ochrony środowiska”. Wymienione priorytety w strategii „Europa 2020” znalazły swoje odbicie w wielu dokumentach Ministerstwa Gospodarki oraz Rolnictwa, a także „Wspólnej Polityce Rolnej w kierunku 2020 roku” (Chyłek, Bielecki 2015).

W Polsce istnieje zapotrzebowanie praktyki na biogospodarkę, czego dowodem jest fakt, że rolnicy z Holandii (1000 km) przywożą obornik, płacąc 175 zł/t przy zawartości 59% sm. Przy wyższej zawartości około 80% sm., cena przekracza znacznie 600 zł/t. Jednocześnie tego typu zakup uzasadniają zawartością w oborniku mikroelementów i znacznie lepszego wpływu na wzrost plonów w porównaniu do nawozów mineralnych (Czubiński 2017).

2. Możliwości prowadzenia biogospodarki na stawach rybnych

Z racji istnienia na terenie Instytutu Technologiczno-Przyrodniczego w Falentach kompleksu stawów rybnych ukierunkowanych na chów karpia, autorzy zwrócili uwagę na znaczne nagromadzenie antropogenicznych osadów dennych powodujących zmniejszenie produktywności stawów.

W celu szerszego omówienia tej problematyki stwierdzono, że obszar w Polsce zajmowany przez stawy typu karpiego wynosi około 75 000 ha, w tym 62 000 ha stanowi powierzchnia lustra wody (Lirski i in. 2010). Z powierzchni tej w 2000 roku odłowiono 23 000 ton karpia (Lirski i in. 2010), a Polska była liderem pod względem hodowlanych karpia konsumpcyjnych oraz powierzchni stawów karpiowych. Wydajność odłowu karpia z 1 ha wynosiła do 4000 kg/ha i nie stwierdzono negatywnego wpływu na środowisko (Knosche

i in. 2000). Rosnący ogólnoswiatowy popyt na ryby wskazuje na tendencje wzrostu cen, a więc posiadane zasoby stawowe powinny być maksymalnie wykorzystane.

Tymczasem nadmierne nagromadzenie antropogenicznych osadów dennych pochodzących głównie z resztek pożywienia i rybich odchodów prowadzi do pojawienia się na dnie tzw. czarnego mułu, czyli warstwy osadów podlegającej procesom gnilnym. W efekcie wydajność takiego stawu spada kilkukrotnie w stosunku do potencjalnych możliwości, ponieważ biogeny zawarte w osadach zalegających na dnie stawu są związane w formach nieprzyswajalnych lub niedostępnych dla łańcucha pokarmowego ryb (Starmach 1965). Sporadycznie, w takich stawach następuje bardzo gwałtowny skok żywności, nazywany zakwitami wody, wywołowany masowym pojawieniem się, a następnie gwałtownym obumieraniem glonów. Stawy użytkowane w ten sposób tracą wszelkie swoje walory środowiskowe i hodowlano-produkcyjne, przekształcając się w nieużytki (Cieśla, Żelazny 2014).

Oprócz zalegania osadów dennych na dnie stawu, stwarzają one również znaczne problemy w okresie odłowów, podczas których staw jest odwadniany, a woda odpływa do łowiska w pobliżu mnicha siecią rowów. Nagromadzone osady denne w tych rowach utrudniają odwodnienie oraz dopływ ryb do łowiska (Eymontt i in. 2017).

3. Analiza i ocena stanu wiedzy dotycząca właściwości nawozowych osadów dennych oraz wyniki badań własnych

Stosunkowo mało polskich autorów omawia problemy dotyczące wykorzystania jeziornych i stawowych antropogenicznych osadów dennych w rolnictwie do użyźniania gleb. Wyróżnia się tu publikacja Gałki i Witkowskiego (2010), zwracająca uwagę nie tylko na zawartości poszczególnych nawozowych składników chemicznych i mineralnych w osadach dennych (np. N_{org} do $11,34 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$, czy do C_{org} $119,5 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$), ale także na korzystny stosunek C:N wynoszący do 16. Ponadto jeziorne osady denne odznaczają się korzystnym uziarnieniem, odczynem i zawartością substancji organicznej, azotu oraz makroelementów, typowymi dla gleb o wysokiej wartości rolniczej, co predysponuje je do zagospodarowania rolniczego lub rekultywacyjnego. Również zawartość pierwiastków śladowych kwalifikuje badane osady do wykorzystania w rolnictwie.

Wśród autorów publikacji dotyczących osadów dennych ze stawów rybnych wyróżniają się opracowania Madeyskiego (2002, 2003a, 2003b). Prace te jednak tylko w sposób ogólny podkreślają przydatność ww. osadów na potrzeby nawożenia w rolnictwie. Natomiast w sposób szczegółowy opisują m.in. procesy gromadzenia się osadów na dnie stawów (sedymentacja), a także ich charakterystyki reologiczne, co jest istotną informacją do oceny możliwości transportu hydraulicznego.

W celu ustalenia wartości nawozowych osadów dennych ze stawów rybnych pobrano sondą (konstrukcji ITP) próbki z warstwy o miąższości około 10 cm ze stawów w Falentach. Miejsca poboru prób wybrano w pobliżu łowisk. Ocenę uziarnienia, jak i pozostałych

parametrów wykonano metodą areometryczną Casagrande'a w modyfikacji Pruszyńskiego, stosując do peptyzacji pirofosforan sodu i mieszając mieszałem wirnikowym zamiast gotowania. Skład chemiczny oznaczono metodą AAS po uprzedniej ekstrakcji próbek osadu stężonym kwasem nadchlorowym. Materię organiczną oznaczono metodą Tiurina.

W celu oceny struktury badanych próbek osadów, w Ogólnouczelnianym Centrum Analitycznym SGGW wykonano zdjęcia skaningowym mikroskopem elektronowym, przy powiększeniu od 400 do 20 000-krotnym.

Badania mikroskopowe szeregu prób wykazują brak ziarn piaskowych zbudowanych z kwarcu. Są to konglomeraty powstałe w wyniku zlepów drobnych ziarn, szkielecików okrzemek i innych organizmów, w tym ryb. Konglomeraty te są bardzo silnie spojone, tworząc ziarna o zróżnicowanej średnicy niepoddające się rozpadowi podczas peptyzacji. Uziarnienie badanych osadów stanowi sztuczny wtórny twór uformowany przez trwające wiele lat zaleganie na dnie. Materiał ten może być wykorzystany w rolnictwie jako ulepszcza gleb pod względem fizycznym i fizykochemicznym. W glebie frakcja piaskowa przekształci się bowiem stopniowo we frakcję < 0,02 mm, w tym ilastą < 0,002 mm.

Spora zawartość szkieletów obumarłych okrzemek, składających się z SiO₂, ma ogromne znaczenie nawozowe. Krzemionka jest jednym z ważnych składników roślin warzywnych i zbożowych. Składnik ten jest mało doceniany w polskim rolnictwie przez specjalistów od nawożenia.

Skład chemiczny badanych osadów dennych ze stawów wykazuje wyraźne zróżnicowanie ilościowe składników w poszczególnych stawach, jak i w warstwach pobranych osadów o grubości około 0–5 i 5–10 cm (tab. 1).

Istotnym składnikiem w osadach dennych jest azot. Jego zawartości w poszczególnych stawach i warstwach wahają się od 1,08 do 7,03 g·kg⁻¹ osadu. Stanowi to przy wniesieniu 20 t·ha⁻¹ od 22 do 140 kg N·ha⁻¹.

Szereg malejącego udziału poszczególnych badanych składników jest następujący:

$$N > Mg > K > P > Na$$

Tabela 1. Średnie wartości składników w osadach dennych w stawach (Staw Spiski, Staw nr 13, Staw Parkowy 2, Staw Puchalskiego w Falentach – Raszyn)

Parametr	Miąższość warstwy osadu [cm]	W [g·kg ⁻¹]								W [mg·kg ⁻¹]				
		Mg	K	Na	P	N	suma	C	C:N	Fe	Mn	Zn	Cu	Pb
Wart. średnia	0–5	1,28	1,13	0,087	1,03	3,36	6,88	49,65	14,7	1 152	206,4	30,7	8,6	12,2
	5–10	1,36	1,36	0,380	1,1	2,77	6,97	43,27	15,6	1 274	178,3	29,9	8,3	11,5

Źródło: Brogowski i in. 2017.

Ten szereg składników mineralnych występuje w badanych próbkach z czterech stawów na obszarze Falent (tab. 2). Osady dennie z badanych stawów mogą zatem stanowić jeden z cenniejszych materiałów nawozowych wzbogacających gleby w mineralne makroelementy o ustabilizowanym stanie związków organicznych, które w glebach uprawnych ubywają w sposób nieprzewidywalny.

Tabela 2. Udział w procentach składników mieszaniny osadu dennego z mikronizowaną słomą

Rodzaj	N	P	C	S	H
Słoma + osad	0,66	0,13	12,02	0,29	1,10

Źródło: Strzelczyk, Rossa 2016.

Mikroelementy (Fe, Mn, Zn, Cu, Pb) w badanych osadach dennych były w niewielkim stopniu zróżnicowane pod względem ich zawartości w poszczególnych warstwach osadu (tab. 1). Głównym składnikiem pod względem ilościowym było żelazo, a najmniejszą miedź. Ilościowo metale ciężkie w omawianych osadach można uszeregować według malejącej ich zawartości następująco:

$$\text{Fe} > \text{Mn} > \text{Zn} > \text{Pb} > \text{Cu}$$

Przyjmując cały zapas tych metali, ze wszystkich badanych stawów według uśrednionych danych za 100%, to procentowy szereg może być następujący:

$$83,3 > 13,2 > 2,1 > 0,8 > 0,6\%$$

Należy podkreślić, że zbadane osady dennie stawów nie wykazują zawartości metali ciężkich przekraczających normy ilościowe przewidzianych w Rozporządzeniu Ministra Środowiska z dnia 16.04.2002 r. Osady te można wykorzystywać w szeroko pojętym rolnictwie. Pod względem zawartości metali ciężkich stanowią nawóz równorzędnie wartościowy jak obornik bydlęcy. Dawka 20 do 30 t·ha⁻¹, w zależności od klasy bonitacyjnej gleb zabezpieczy uprawiane rośliny w pełny zapas składników biogennych. W glebach o niskiej klasie bonitacyjnej IVa, V i VI byłyby wskazany niewielki dodatek fosforu i potasu w dawkach uzależnionych od uprawianej rośliny.

Wykorzystanie zawartych składników nawozowych w osadach dennych będzie wymagało dużej ilości komponentów pochłaniających wodę. Tego rodzaju innowacyjna technologia w wersji modelowej została opracowana w Instytucie Technologiczno-Przyrodniczym i opisana w wielu publikacjach (Brogowski i in. 2017; Eymontt i in. 2013, 2017; Teliga i in. 2017).

Wobec powyższego ważnym ogniwem opisywanej technologii jest urządzenie do mieszania wydobytych osadów dennych z komponentami zapewniającymi wymagany skład nawozowy, bądź pochłanianie wody celem uzyskania konsystencji pozwalającej na aplikację do gleby typowymi maszynami (rozzutnik obornika itp.). W tym celu przeprowadzono doświadczenie (Strzelczyk, Rossa 2016), polegające na zmieszaniu 3,8 kg osadu dennego o zawartości suchej masy 25% z 0,31 kg mikronizowanej słomy o wielkości cząstek powyżej 100 μm w celu sorpcji wody i uzyskaniu gęstości porównywalnej z obornikiem.

Badania podstawowych składników mieszaniny wykonano metodą analizy elementarnej, a wyniki zestawiono w tabeli 3.

Następnie w laboratorium Instytutu przeprowadzono wstępne badania wazonowe (w czterech powtórzeniach bez oceny statystycznej), wartości nawozowej mieszanin osadów dennych ze słomą w kilku wariantach, przyjmując dawkę nawozu nieprzekraczającą 170 $\text{kgN}\cdot\text{ha}^{-1}$. Użyto mieszanki następujących traw gazonowych – kostrzewa czerwona (*festuca rubra*), kostrzewa trzcinowata (*festuca arudinacea*), życica trwała (*lolium perenne*), życica wielokwiatowa/rajgras włoski (*lolium multiflorum*), życica westerwoldzka/rajgras holenderski (*lolium westerwoldicum*).

Zastosowano kombinacje:

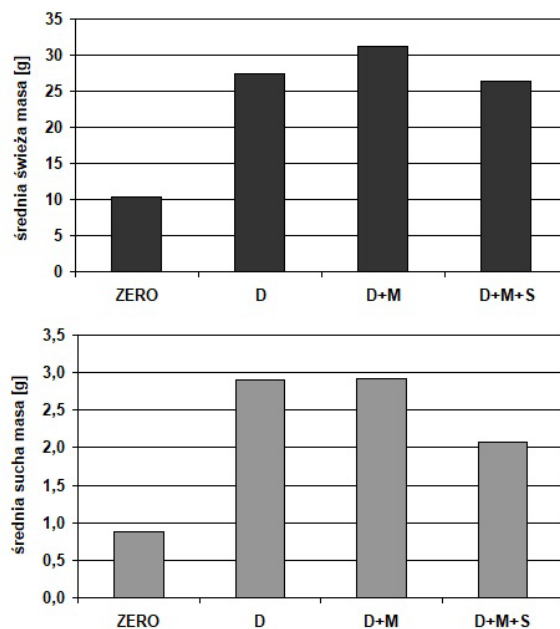
1. ZERO – gleba.
2. D – gleba i osady denne ze stawów rybnych.
3. D + M – gleba, osady denne ze stawów rybnych i słoma mikronizowana (rozdrobiona do wielkości cząstek poniżej 0,01 mm).
4. D + M + S – gleba, osady denne ze stawów rybnych, słoma mikronizowana i siewka.

Wyniki badania masy roślin traw (świeżych i suchych) metodą wagową przedstawiono na rysunku 1, a procentowy udział podstawowych składników pokarmowych w mieszaninach nawozowych i glebie (określony metodami kolorymetryczną i ASA po mineralizacji) w tabeli 3.

Tabela 3. Zawartość w (% s.m) składników pokarmowych w mieszaninach nawozowych przed i po doświadczeniu nawozowym

Rodzaj materiału bad.	Przed nasadzeniem traw			Po ścięciu traw		
	N	P	K	N	P	K
Gleba	0,093	0,047	0,077	0,061	0,039	0,072
Gleba + osad denny	0,109	0,05	0,091	0,080	0,044	0,069
Gleba + osad denny + mikronizat	0,113	0,055	0,099	0,071	0,043	0,077
Gleba + osad denny + mikronizat + słoma cięta	0,099	0,047	0,085	0,065	0,041	0,082

Źródło: Strzelczyk, Rossa 2016.



Rysunek 1. Średnia świeża i sucha masa traw zebranych z czterech wazonów dla kolejnych kombinacji
Źródło: Strzelczyk, Rossa 2016

Pomimo iż osady dennie zawierają stosunkowo mniej związków węgla i azotu w stosunku do innych organicznych substancji pólplennych, takich jak np. gnojówka, dodanie ich jako nawozu powoduje znaczny wzrost masy zebranych roślin. Dodatek zmikronizowanej słomy jeszcze zwiększa otrzymany plon, w przeciwieństwie do dodatku sieczonej słomy. W wazonach z mieszaniną osadów dennych ze słomą mikronizowaną nastąpiło największe zmniejszenie zawartości składników pokarmowych, co zdaje się potwierdzać pozytywną rolę mikronizatu w ich uwalnianiu.

W zależności od przyjętej technologii rozprowadzania wydobytego urobku bez zmieszania z innymi komponentami jako nawozu organiczno-mineralnego po powierzchni gleby lub pod jego powierzchnią możemy uzyskać znaczne korzyści w przyroście plonów. Jest to najprostszy sposób rolniczego wykorzystania wydobytych osadów dennych, jednocześnie zmniejszający koszty wydobywania osadów.

Wnioski

1. Racjonalne wykorzystanie bogactwa składników nawozowych (N, P, K) i mikroelementów oraz węgla organicznego w antropogenicznych osadach dennych powinno być jednym z priorytetów wdrażania biogospodarki w rolnictwie.

2. Proponowany kierunek biogospodarki w rolnictwie sprzyja zahamowaniu eutrofizacji zbiorników wodnych i pozwala zwiększyć pojemność wodną i gęstość gleb, a tym samym przyczynia się do lepszego wzrostu roślin.

Literatura

- Brogowski Z., Burzyńska I., Eymontt A., Wierzbicki K. 2017: Możliwości wykorzystania osadów dennych w rolnictwie. *Wiadomości Melioracyjne i Łąkarskie*, 1, s. 37–43.
- Chyłek K.E., Bielecki S. 2015: Biogospodarka – technologie innowacyjne szansą poprawy konkurencyjności w sektorze rolno-spożywczym i na obszarach wiejskich, *Badania Naukowe w procesie kształtowania polskiej wizji Wspólnej Polityki Rolnej i Wspólnej Polityki Rybackiej*. III Kongres Nauk Rolniczych, Warszawa, s. 9–14
- Cieśla M., Żelazny J. 2014: Dobre praktyki i rola pożytecznych mikroorganizmów w chowie i hodowli ryb z zastosowaniem renowacyjnych, naturalnych technologii. Warszawa: Wyd. Stowarzyszenie Ekosystem – EM – Dziedzictwo Natury, s. 94.
- Czubiński T. 2017: 1000 km z obornikiem. *Topagrar*, 5, s. 29–79.
- Eymontt A., Wierzbicki K. 2013: Nowa technologia usuwania antropogenicznych osadów dennych. *Problemy Inżynierii Rolniczej*, 4(82), s. 129–138.
- Eymontt A., Wierzbicki K., Brogowski Z., Burzyńska I., Rossa L. 2017: Nowa technologia wydobywania osadów dennych z rowów na stawach rybnych i ich zastosowanie w rolnictwie. *Komunikaty Rybackie IRS*, 2, s. 7–13.
- Gałka B., Witkowski M. 2010: Charakterystyka osadów dennych zbiornika zaporowego Młyny oraz możliwości ich rolniczego wykorzystania. *Woda, środowisko – Obszary wiejskie*, 10, 4(32), s. 53–63.
- Knosche R. i in. 2000: Balances of phosphorous and nitrogen in carp ponds. *Fish Mgmt. and Ecol.*, 7, s. 15–22.
- Komisja Europejska. 2010: Strategia na rzecz inteligentnego i zrównoważonego rozwoju sprzyjającego włączeniu społecznemu – Europa 2020. On-line: ec.europa.eu/eu2020/pdf/1_PL_ACT_part1_v1.pdf.
- Lirski A., Wałkowski J., Cieśla M. 2010: Chów karpia w Polsce w latach 2004–2009. [W:] Cieśla M., Wajda R. red. *Wielofunkcyjność gospodarki karpiowej w Polsce. Cz. I, Aktualne uwarunkowania*, Wyd. *Wież jutra*, s. 9–20.
- Madeyski M. 2002: Sedymentacja osadów stawowych. *Zeszyty Naukowe Akademii Rolniczej w Krakowie. Inżynieria Środowiska*, 23, s. 267–273.
- Madeyski M. 2003a: Możliwości usunięcia osadów z dna stawów i zbiorników. *Zeszyty Naukowe Akademii Rolniczej w Krakowie. Inżynieria Środowiska*, 24, s. 89–96.
- Madeyski M. 2003b: Zamulanie stawów rybnych. *Wiadomości Melioracyjne i Łąkarskie*, 3(46), s. 121–122.
- Pikuła K., Heese T. 2015: Metody rekultywacji jezior. Sposoby rekultywacji jezior poznańskich. Poznań: Bogucki Wydawnictwo Naukowe, s. 109–132.
- Podsiadłowski S., Osuch E., Osuch A. 2015: Metody rekultywacji jezior na przykładzie jezior wielkopolskich. Sposoby rekultywacji jezior poznańskich. Poznań: Bogucki, Wydawnictwo Naukowe, s. 101–108.
- RA 2017: Krzem w nawożeniu. *Agro serwis*, 7, s. 2.
- Rossa L., Strzelczyk M. 2017: Raport z wstępnych wyników doświadczeń wazonowych dotyczących nawożenia traw mieszkankami substancji półpłynnych z mikronizowaną słomą. Instytut Technologiczno-Przyrodniczy, Falenty, 8.
- Starmach K. 1965: Staw jako środowisko hodowlane. [W:] Rudnicki A. red. *Hodowla ryb w stawach*. Warszawa: Wyd. PWRiL, s. 23–86.
- Strzelczyk M., Rossa L. 2016: Wstępny raport z wstępnych wyników doświadczeń wazonowych dotyczących nawożenia traw mieszkankami substancji półpłynnych z mikronizowaną słomą. Instytut Technologiczno-Przyrodniczy, Falenty, 8.
- Teliga K., Marchenko W., Brogowski Z., Wierzbicki K., Eymontt A., Strzelczyk M., Rossa L. 2017: Sposób wytwarzania nawozów organicznych i nawóz organiczny wytwarzany tym sposobem. Patent PL, nr 236167.

Adam BRYSEWICZ¹, Agata KORZELECKA-ORKISZ²,
Adam TAŃSKI², Krzysztof FORMICKI²

Charakterystyka warunków siedliskowych poprzez ocenę granulacji podłoża jako substratu do rozrodu ryb łososiowatych w rzece Rega (płn.-zach. Polska)

Streszczenie. Dwuśrodowiskowe ryby łososiowate rozmnażają się jedynie tam, gdzie występują odpowiednie warunki środowiskowe – właściwa struktura podłoża (żwir i kamienie), odpowiednia prędkość przepływu wody i związany z tym poziom natlenienia. Wieloletnie zabiegi melioracyjne i regulacja koryt rzecznych spowodowały niekorzystne zmiany w strukturze dna, polegające na zapiaszczeniu i zamuleniu większości dopływów zlewni rzeki Regi, które stanowią historyczne miejsca naturalnego rozrodu ryb. Badania prowadzono w sezonie badawczym w 2018/2019. Próby substratu z dna rzek pobierano w 26 lokalizacjach zlewni rzeki Regi. Próby w wyznaczonych miejscach pobierano w trzech punktach – 1 metr od brzegu, 3 metry od brzegu i w środku koryta rzeki. Materiał do dalszych analiz, po osuszeniu, rozdzielano przy użyciu wstrząsarki laboratoryjnej Typ LPzE–2e (MULTISERW–Morek) na frakcje o wielkości od 100 µm do 20 mm. Uzyskane wyniki wskazują, że w korytach rzek zlewni Regi dominował piasek o frakcji 1,00–0,100 mm (62%). Frakcja kamieni powyżej 20 mm stanowiła 13%, a żwir o wielkości 20,00–5,00 mm stanowił 11%, oraz drobny żwir 5,00–1,00 mm 14%. Na podstawie przeprowadzonych badań stwierdzono, że najodpowiedniejsze miejsca do rozrodu ryb łososiowatych stwierdzono w dolnym odcinku rzeki Lubieszowa, gdyż podłoże w korycie rzeki miało tam strukturę mieszaną – kamienisto-żwirową z domieszką piasku, a udział każdej z tych frakcji sięgał powyżej 20%. Również na wybranych stanowiskach w Redze, Uklei oraz Łożnicy istnieją korzystne warunki dla rozrodu ryb łososiowatych, ponieważ w strukturze dna przeważają frakcje żwirowo-kamieniste. Przeprowadzone badania struktury dna zlewni rzeki Regi wskazują na konieczność podejmowania działań zmierzających do poprawy warunków rozrodu dwuśrodowiskowych ryb łososiowatych, co pozwoli na skuteczną odbudowę naturalnych populacji tych ważnych zarówno gospodarczo, jak i ekologicznie ryb.

Słowa kluczowe: rozród ryb, ryby łososiowate, tarliska, rzeka Rega, substrat tarliskowy

¹ Instytut Technologiczno-Przyrodniczy, Falenty

² Zachodniopomorski Uniwersytet Technologiczny w Szczecinie, Wydział Nauk o Żywności i Rybactwa

Characteristics of habitat conditions by assessment of ground granulation as a substrate for reproduction of salmonids in the Rega river (north west Poland)

Abstract. Salmonids reproduce only where there are appropriate environmental conditions – proper substrate structure (gravel and stones), appropriate water flow velocity, and the related oxygenation level. Many years of melioration treatments and river channel regulation caused unfavorable changes in the structure of the bottom consisting of sand and siltation of most tributaries of the Rega river basin, which are historical places of natural fish breeding. The research was conducted in the 2018/2019 research season. Substrate samples from the bottom of the rivers were collected at 26 locations in the Rega river catchment area. The samples were taken in designated places at three points – 1 meter from the shore, 3 meters from the shore and in the middle of the river bed. The material for further analyzes, after drying, was separated into fractions ranging from 100 μm to 20 mm using a laboratory shaker, type LPzE–2e (MULTISERV–Morek). The obtained results indicate that sand with a fraction of 1.00–0.100 mm (62%) dominated in the river beds of the Rega catchment. The fraction of stones over 20 mm accounted for 13%, and gravel with a size of 20.00–5.00 mm accounted for 11%, and fine gravel 5.00–1.00 mm was 14%. On the basis of the conducted research, it was found that the most suitable breeding sites for salmonids were found in the lower section of the Lubieszowa River, because the ground in the riverbed had a mixed structure – stony and gravel with an admixture of sand, and the share of each of these fractions was above 20%. Also on selected sites in Rega, Ukleja and Łoźnica, there are favorable conditions for the reproduction of salmonids, as gravel and stone fractions predominate in the structure of the bottom. The research on the structure of the Rega River catchment basin indicates the need to take measures to improve the breeding conditions for two-environmental salmonids, which will allow for the effective reconstruction of natural populations of these economically and ecologically important fish.

Keywords: fish reproduction, salmonids, spawning grounds, Rega River, spawning substrate

Wprowadzenie

Większość ryb, przede wszystkim łososiowate, do swojego rozrodu potrzebują odpowiednich warunków środowiskowych i siedlisk zapewniających prawidłowy rozwój złożonej ikry. Dla wędrownych ryb łososiowatych, a także cert czy minogów, czynnikami umożliwiającymi odbycie tarła, a potem przeżycie we wczesnej ontogenezie, są odpowiednia prędkość przepływu wody (natlenienie) oraz żwirowo-kamienista struktura podłoża o właściwych proporcjach, z którego budowane będą gniazda (Louhi i in. 2008; Dębow-ski i in. 2008; Olsén i in. 2011). Do budowy gniazd łosoś (*Salmo salar*) i troć wędrowna (*Salmo trutta* m. *trutta*) potrzebują do tarła podłoża żwirowe o granulacji 16–64 mm (Louhi i in. 2008).

Ryby łososiowate potrzebują do odbycia tarła dobrze natlenioną, czystą i wartko płynącą wodę z dnem żwirowym lub kamienistym, w którym samice wykonują zagłębienia, gdzie składają jaja, które są natychmiast zapładniane, po czym samica za pomocą ogona przysy-

puje je kamieniami. Czynność ta jest powtarzana kilkakrotnie do tej pory, aż samica złoży wszystkie jaja. Po skończonym tarle ikra znajduje się w kopcach, które mają w przypadku łososia około 30 cm wysokości, zaś przed kopcem jest wgłębienie (dół). Taka konstrukcja zapewnia nie tylko odpowiednią prędkość przepływu wody, ale również umożliwia penetrację kopca przez nurt wody. Zapewnia to rozwijającym się zarodkom właściwe optimum, względnie niezbędne minimum natlenienia dla „skonsumowania” zawartych w substancjach zapasowych żółtka dla prawidłowego przebiegu procesów życiowych (Tański i in. 2009; Korzelecka i in. 2009).

Gniazda tarłowe większości gatunków ryb łososiowatych różnią się od siebie jeśli chodzi o ich kształt (owalne lub bardziej okrągłe), wielkość, wymiary wgłębienia w podłożu, na którym usypywane jest gniazdo, np. gniazda głowacic (*Hucho hucho*) są elipsoidalnego kształtu o długości 1,2 do 2 m, szerokości 0,6 m i głębokości 0,3–0,5 m (Holcík i in. 1988; Schulz, Piery 1982). Nad gniazdami troci w rzece Wdzie usypane były kopce w wysokości do 20 cm. Obserwowano, że kopce mogły być rozproszone po kilka w jednym miejscu, a ich łączna długość przekraczała 5 m (Bartel i in. 2005). Różnice występują przede wszystkim w ich wielkości w zależności od wielkości osobników danego gatunku. Gniazda łososi są zazwyczaj większe od gniazd troci wędrowniej, te ostatnie zaś mają większe rozmiary niż gniazda budowane przez pstrąga potokowego.

W wielu rzekach w Polsce i na świecie, na skutek antropopresji, w tym wcześniejszych prac regulacyjno-melioracyjnych, niekorzystnie zmieniła się struktura dna rzek – żwir został zastąpiony przez podłoże piaszczyste, co w konsekwencji spowodowało spowolnienie nurtu i gromadzenie się na dnie różnej grubości warstwy organicznej, co doprowadza do pogorszenia się parametrów wody, a w konsekwencji zmniejszenie się dostępnego tlenu. Jedną z przyczyn wysokiej śmiertelności zarodków jest zasypywanie przestrzeni pomiędzy ziarnami żwiru przez drobne frakcje substratu – piasek (Dumas, Marty 2006).

Na świecie i w Polsce od wielu lat podejmowane są działania mające odwrócić te niekorzystne zjawiska w rzekach, w efekcie czego do cieków wodnych próbuje się ponownie wprowadzać ryby łososiowate. Od lat dziewięćdziesiątych XX wieku prowadzony jest program restytucji łososia, polegający na wsiedlaniu narybku tego gatunku tam, gdzie występowały w przeszłości (Bartel i in. 2016). Dotychczasowe zarybiania, będące w istocie dobrą metodą umożliwiającą utrzymanie na właściwym poziomie populacji ryb, prowadzone były rybami w różnym wieku pochodzącymi z wylęgarni, które w ograniczonym stopniu były przystosowane do życia w naturalnym środowisku (Saltveit 2006; Kennedy i in. 2012; Bacon i in. 2015; Hagen i in. 2019).

W środowisku naturalnym wiele czynników decyduje o przeżywalności materiału zarybieniowego. Ryby po zarybieniu poza zagrożeniami związanymi z drapieżnictwem, zaburzeniami w odżywianiu, są również narażone na ataki patogenów. Flora mikrobiologiczna dzikich wód, w porównaniu do tej występującej w podchowalni, jest o wiele bardziej zróżnicowana. Ze względu na stosowane zabiegi sanitarne i profilaktyczne, większość patogenów występujących w wodach naturalnych jest rybom hodowlanym obca i dlatego mogą być one

mniej odporne na czynniki chorobotwórcze. Ponadto, bardzo duża część ryb w wyniku osłabienia związanego ze stresem i adaptacją do nowego środowiska może być bardziej podatna na infekcje (Szkudlarek i in. 2008; Gomułka 2008).

Minimalizowanie udziału sztucznego tarła i podchowu ryb w wylęgarniach na rzecz metody nakierowanej na to, by maksymalnie wykorzystać naturalny potencjał cieków do chowu i hodowli ryb zapoczątkowano w Stanach Zjednoczonych oraz w Skandynawii. Badania dotyczyły inkubacji ikry ryb zdeponowanej na dnach rzek w inkubatorach i tarliskach i porównania efektów przeżywalności zarodków (Zimmer, Power 2006; Barlaup i in. 2008; Palm i in. 2010). Prace polegające na urządzeniu bystrzy i tarlisk, są coraz częściej w Polsce stosowane w zlewniach rzek, do których na tarło wstępują łososie i trocie wędrownie – m.in. w Drawie czy w dolinie rzeki Słupi (Dębowski i in. 2008; Bernaś i in. 2009).

Oprócz jakości wody i dostępności do miejsc tarliskowych, jednym z istotnych czynników mających wpływ na rozród ryb łososiowatych w zlewni rzeki Regi jest struktura podłoża dna. Gniazda są zakładane w ściśle wybranych rejonach cieków, z odpowiednim podłożem, właściwą głębokością koryta rzeki i wartkim przepływem wody (Beard, Carline 1991; Lohi i in. 2008; Rubin, Glimsater 1996; Zimmer, Power 2006; Tański i in. 2011).

Celem niniejszych badań było określenie możliwości rozrodu wędrownych ryb łososiowatych poprzez analizę substratu stanowiącą materiał do budowy gniazd w wybranych miejscach w korycie rzeki Regi i jej dopływach.

I. Materiały i metody

I.1. Charakterystyka terenu badań

Rega ma charakter rzeki wyżynnej (zwłaszcza w części źródłiskowej), o dużym spadku – gradiencie 0,8%. Swój początek ma w jeziorze Resko Górne. Bezpośrednie otoczenie tej rzeki stanowią głównie pola uprawne i nieużytki rolne. Jej kręty bieg wynika z topografii terenu, po którym płynie – na przemian po dnach pradolin i w dolinach przelomowych. Badania monitoringowe na rzece Redze wykazały dużą bioróżnorodność, w tym zróżnicowany skład ichtiofauny z 32 gatunkami ryb i minogów (Radtke i in. 2010).

Badania prowadzono w sezonie letnim 2018 r. w 26 punktach poboru prób w rzece Redze (rys. 1). Charakterystyka poszczególnych stanowisk została przedstawiona w tabeli 1.

Tabela 1. Charakterystyka stanowisk objętych monitoringiem z uwzględnieniem elementów hydrografii cieków oraz obszaru zlewni rzeki Regi

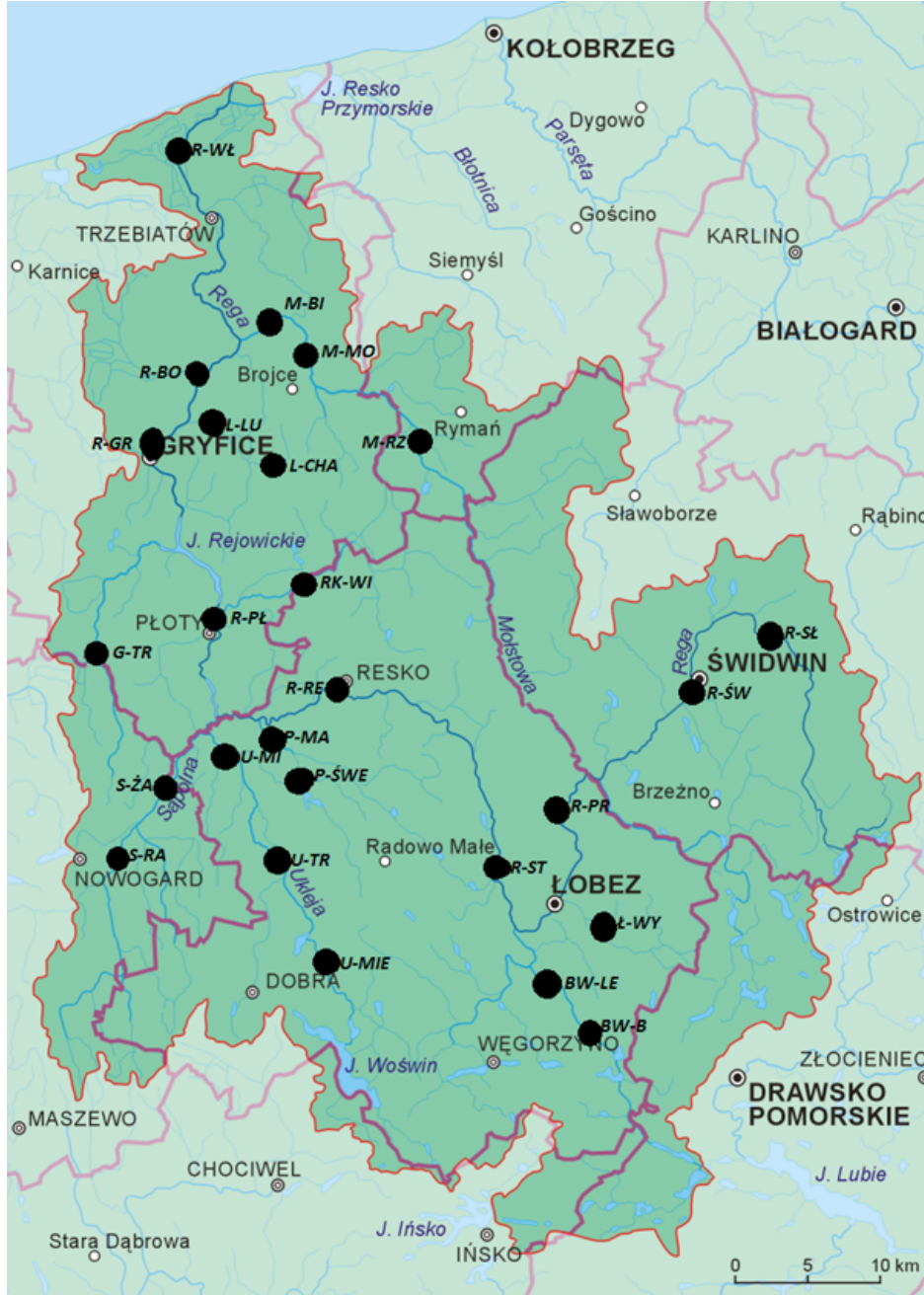
Stanowisko	Współrzędne	Przepływ [m/s]	Szerokość [m]	Głębokość [m]	Charakterystyka zlewni
R-SŁ	N53°46.762' E015°53.660'	0,231	5,4	0,6	Ł, ZD
R-SW	N53°46.499' E015°46.147'	0,442	6,2	0,4	Ł, ZD
R-PR	N53°41.331' E015°37.919'	0,228	11,6	1,0	L, ZD
Ł-WY	N53°37.990' E015°40.603'	0,212	4,55	0,25	L
BW-B	N53°33.092' E015°40.521'	0,478	9,5	0,6	L
BW-LE	N53°35.579' E015°36.447'	0,238	4,8	0,9	L
R-ST	N53°39.372' E015°33.668'	0,371	14,1	1,5	L, Ł, ZD
U-MIE	N53°36.821' E015°23.294'	0,128	3,7	0,4	L, J
U-TR	N53°40.656' E015°18.668'	0,249	6,8	0,35	L, Pp
P-ŚWE	N53°43.303' E015°24.112'	0,029	5,11	1,2	L
R-RE	N53°46.303' E015°24.122'	0,440	19,3	0,65	ZD, ZB
P-MA	N53°43.958' E015°20.831'	0,587	5,9	0,25	L
U-MI	N53°42.985' E015°17.991'	0,361	7,26	0,45	L, Ł
G-TR	N53°48.952' E015°08.668'	0,204	4,9	0,55	ZD, R

Tabela 1. cd.

Stanowisko	Współrzędne	Przepływ [m/s]	Szerokość [m]	Głębokość [m]	Charakterystyka zlewni
R-PŁ	N53°48.435' E015°16.107'	0,123	23,4	1,6	ZB, ZD
R-GR	N53°54.597' E015°12.095'	0,542	23,1	0,75	ZB, ZD
R-BO	N 53°58'344" E 15°16'538"	0,157	26,5	1,85	L, R
M-BI	N53°59.595' E015°18.831'	0,585	7,2	1,2	R, ZD
L-CHA	N53°53.934' E015°18.104'	0,112	1,7	1,0	R
L-LU	N53°56.846' E015°15.253'	0,176	5,4	0,6	L
R-WŁ	N 54°05'530" E 15°13'30.4"	0,490	20,1	1,8	R
M-MO	N53°59.223' E015°21.788'	0,206	10,3	0,6	ZD
M-RZ	N53°55.978' E015°28.742'	0,219	14,8	1,1	ZD, R
RK-WI	N53°50.514' E015°22.381'	0,082	5,9	0,4	R, ZB
S-ŻA	N53°44.029' E015°14.690'	0,247	6,05	0,3	L
S-RA	N53°39.604' E015°10.107'	0,180	6,9	0,25	R, L

Skróty określają miejsca na mapie – litery przed myślnikiem opisują nazwę rzeki (R – Rega, Ł – Łoźnica, BW – Brzeźniacka Węgorza, U – Ukleja, P – Piaskowa, G – Gardominka, M – Mołstowa, L – Lubieszowa, RK – Rekowa, S – Sępólna), litery po myślniku – miejscowość położoną w pobliżu miejsca poboru próby (SŁ – Sława, SW – Świdwie, PR – Prusinowo, WY – Wysiedle, B – Brzeźniak, LE – Lesięcin, ST – Strzemiele, MIE – Mieszewo, TR – Troszczyno, ŚWE – Świącichowo, RE – Resko, MA – Maliniec, MI – Miłogoszcz, TR – Truskolas, PŁ – Ploty, GR – Gryfice, BO – Borzęcin, BI – Bielikowo, CHA – Charnowo, LU – Lubieszewo, WŁ – Włodarka, MO – Mołstowo, RZ – Rzesznikowo, WI – Wicimice, ŻA – Żabówko, RA – Radosław).

Skróty do charakterystyki zlewni: Ł – łąki, R – obszary rolnicze, ZD – zadrzewienia, L – lasy, ZB – obszar zabudowany, J – jeziora, Pp – przepławka.



Punkty oznaczają stanowiska badawcze

Rysunek 1. Zlewnia rzeki Regi

Źródło: opracowanie własne na podstawie: <https://pl.wikipedia.org/wiki/Rega#/media/Plik:Rega-hydrografia3.png>

1.2. Metodyka oceny prób dna w rzece

Dla oceny stanu granulacji dna z wyznaczonych punktów pobierano próby osadów dennych na poszczególnych stanowiskach. Próby pobierano czerpakiem rurowym firmy KC Denmark systemu Kajak, umożliwiającym pobór prób o nienaruszonej strukturze podłoża. Z każdego stanowiska badawczego próby pobierano w trzech miejscach – 1 m od brzegu, 3 m od brzegu oraz na środku koryta rzeki. Poszczególne próby osadów umieszczano oddzielnie w szczelnie zamykanych pojemnikach i przetransportowano do laboratorium Katedry Hydrobiologii, Ichtiologii i Biotechnologii Rozrodu ZUT w Szczecinie, gdzie po osuszeniu, rozdzielano je na poszczególne frakcje za pomocą wstrząsarki laboratoryjnej Typu LPzE-2e firmy MULTISERW-Morek. Wyposażone w system 5 sit urządzenie pozwoliło na wyodrębnienie podłoża o następujących średnicach :

- ◆ poniżej 100 μm ,
- ◆ od 100 μm do 1 mm,
- ◆ od 1 mm do 5 mm,
- ◆ od 5 mm do 10 mm,
- ◆ od 10 mm do 20 mm (rys. 2).



a – 20 mm (frakcja kamieni)



b – 10 mm (frakcja grubego żwiru)



c – 5 mm (frakcja drobnego żwiru)



d – 1 mm (frakcja piasku)



e – 100 μm (frakcja pyłu)

Rysunek 2. Podłoże podzielone na poszczególne frakcje przy użyciu wstrząsarki
Fot. A. Brysiewicz

Każda z prób o wadze 5 kg umieszczana była w górnej komorze wstrząsarki na okres 15 minut. Rozdzielone na frakcje próby ważono przy użyciu wagi laboratoryjnej RADWAG PS 6001.X2 z dokładnością do 0,1 g. Po osuszeniu i przesianiu poszczególnych prób podłoża, wszystkie frakcje żwirowe ważono i obliczono procentowy udział.

2. Wyniki i ich omówienie

Analiza prób podłoża z poszczególnych punktów poboru w rzece Redze i jej dopływach wykazała stosunkowo małe zróżnicowanie podłoża (tab. 2).

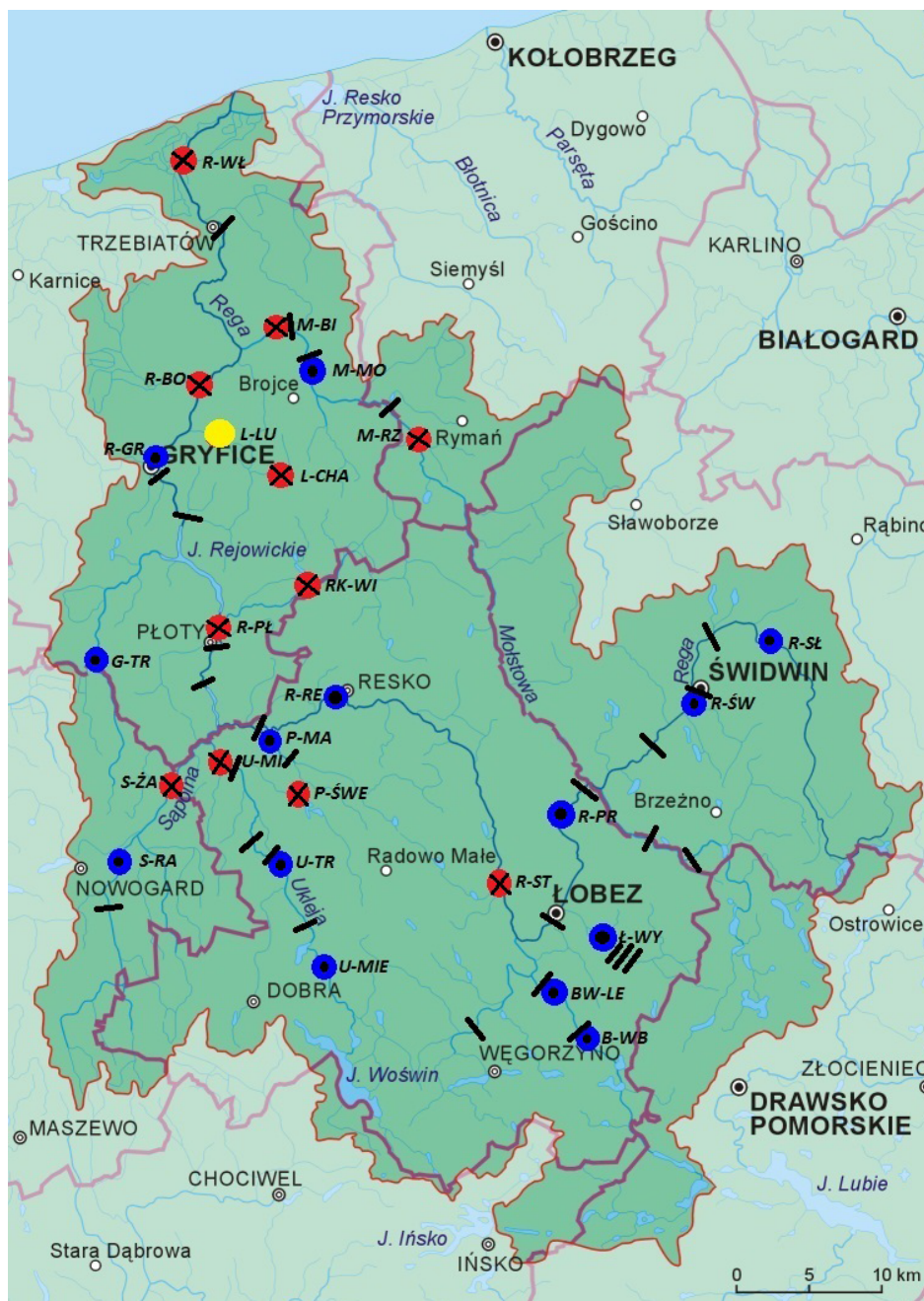
Po przeanalizowaniu wszystkich prób z różnych części Regi stwierdzono, że dominującą frakcją podłoża w tej rzece był piasek (61,92%). Udział frakcji żwirowo-kamienistych (od 1 do 5 mm; 5–20 i powyżej 20 mm) był bardzo zbliżony i oscylował w granicach kilkunastu procent każdej frakcji. Udział w próbach substratu poniżej 1 mm był znikomy.

Na czterech stanowiskach (R–BO, L–CHA, S–ŻA, P–ŚWE) dominował substrat piaszczysty, co czyni te odcinki rzeki nieprzydatnym dla rozrodu ryb łososiowatych. Najbardziej urozmaicone, a tym samym stwarzające odpowiednie warunki do budowy gniazd przez ryby dwuśrodowiskowe (troć, łosoś) stwierdzono na rzece Lubieszowa (L–LU) i BW (BW–LE i BW–B), oraz na rzece Łożnicy (Ł–WY) i na rzece Uklei (U–TR i U–MIE), gdzie podłoże miało strukturę mieszaną, kamienisto-żwirową tylko z domieszką piasku. Na rzece Redze są odcinki zarówno urozmaicone pod względem granulacji (np. R–RE, R–GR), jak i składający się głównie z jednej frakcji (najczęściej tylko piaski np. R–BO) – rysunek 3.

Zlewnia rzeki Regi jest jedną z rzek, do których masowo wpływają z Morza Bałtyckiego na tarło wędrówne ryby łososiowate (Dębowski 2018). Sporym utrudnieniem w migracji do górnych odcinków Regi i jej dopływów są przegrody hydrotechniczne. W większości wyposażone są one w przepławki dla ryb, jednak jak wynika z obserwacji, w okresie niskich stanów wód nie spełniają one odpowiednio swojej funkcji. Drugim czynnikiem ograniczającym rozród jest brak odpowiedniego substratu do odbycia tarła. W korytach Regi i jej dopływach miejsc o zróżnicowanej, żwirowej strukturze dna jest niewiele, a te, które stanowią potencjalne podłoże tarliskowe, są bardzo często niedostępne lub dotarcie do nich jest utrudnione ze względu na dwa zbiorniki zaporowe i liczne przegrody hydrotechniczne. W niektórych dopływach rzeki Regi późną jesienią (czas tarła) stwierdza się obecność troci wędrównych, jednak ze względu na brak odpowiedniego podłoża, czyli dominację frakcji drobnoziarnistych (piasek, muł), nie przystępują one do rozrodu. Mając na uwadze specyfikę zlewni rzeki Regi, należy kontynuować działania mające na celu tworzenie bystrzy żwirowo-kamienistych w celu popierania naturalnego rozrodu, co pozwoli uzyskać materiał zarybieniowy najcenniejszy pod względem jakości, gdyż poddany jest on od momentu zapłodnienia presji środowiskowej (naturalna selekcja). Zwiększanie ilości odcinków żwirowo-kamienistych niesie za sobą dodatkowe korzyści środowiskowe w postaci poprawiających się warunków tlenowych w wodach oraz wzrostu ilości miejsc do bytowania i rozrodu innych gatunków w tym chronionych minogów.

Tabela 2. Zestawienie poszczególnych frakcji podłoża dla każdej z prób dna

Miejsce poboru prób	Substrat powyżej	Substrat	Substrat	Substrat	Substrat poniżej
	20,00 mm	20,00–5,00 mm	5,00–1,00 mm	1,00–0,100 mm	0,100 mm
	%	%	%	%	%
R-WŁ	2,10	2,15	11,57	83,74	0,43
R-BO	0,00	1,84	8,66	89,13	0,37
R-GR	17,62	20,26	10,58	51,34	0,20
R-PŁ	4,86	11,01	11,06	72,16	0,91
R-RE	14,64	10,61	26,25	48,35	0,14
R-ST	0,00	6,14	31,27	61,74	0,85
R-PR	0,00	2,54	43,54	53,53	0,40
R-ŚW	54,33	3,50	5,43	36,44	0,30
R-SŁ	2,12	8,46	46,85	42,35	0,22
RK-WI	4,18	11,26	18,98	65,24	0,34
M-BI	22,49	0,68	1,29	75,07	0,47
M-MO	27,81	8,99	7,40	55,68	0,13
M-RZ	0,00	0,03	11,82	88,13	0,02
L-LU	25,48	21,76	23,13	29,28	0,35
L-CHA	0,05	0,51	5,45	93,33	0,66
G-TR	14,65	23,53	3,09	58,12	0,60
U-MI	1,10	3,21	9,71	85,73	0,25
U-TR	20,97	17,97	26,71	34,27	0,08
U-MIE	11,48	21,29	13,87	52,43	0,93
S-RA	56,47	1,31	0,38	41,72	0,13
S-ŻA	0,00	0,02	2,37	97,54	0,06
Ł-WY	23,13	31,05	15,16	30,35	0,30
BW-LE	17,80	17,67	9,48	54,66	0,39
BW-B	0,42	20,57	19,87	58,97	0,17
P-MA	15,00	26,72	4,56	53,58	0,14
P-ŚWE	0,00	0,00	2,89	96,98	0,14
Udział [%]	12,95	10,50	14,28	61,92	0,35



Rysunek 3. Oznaczenie punktów poboru prób z zaznaczeniem dominacji frakcji podłoża
 wypełniony okrąg z X – dno piaszczyste/muliste, wypełniony okrąg z punktem • – dno piaszczysto/żwirowe,
 okrąg bez wypełnienia – żwirowe, \ oznacza hydrobudowlę utrudniającą migrację ryb
 Źródło: opracowanie własne na podstawie: <https://pl.wikipedia.org/wiki/Rega#/media/Plik:Rega-hydrografia3.png>

Wnioski/Rekomendacje

1. Dominującą frakcją podłoża na ponad połowie badanych stanowisk w rzece Redze był piasek.
2. Obecnie ryby łososiowate rozradzają się w niewielu odcinkach zlewni Regi – w dopływach i głównym korycie rzeki Regi.
3. Należy podjąć działania wspierające naturalny rozród ryb łososiowatych w zlewni rzeki Regi poprzez ochronę już istniejących miejsc tarliskowych i budowę nowych bystrzy żwirowo-kamienistych.
4. Zlewnię rzeki Regi należy objąć stałym monitoringiem w celu zewidencjonowania nowych miejsc rozrodu populacji wstępujących na tarło ryb łososiowatych, aby wyłączyć te odcinki z planów zarybieniowych.

Prace wykonano dzięki operacji współfinansowanej przez Unię Europejską PROGRAM OPERACYJNY „RYBACTWO I MORZE 2014–2020” Priorytet 2 „Innowacje”, umowa o dofinansowanie nr 00001-6521.1-OR1600002/17/18.

Literatura

- Bacon P.J., Malcolm I.A., Fryer R.J., Glover R.S., Millar C.P., Youngson A.P. 2015: Can Conservation Stocking Enhance Juvenile Emigrant Production in Wild Atlantic Salmon? *Transactions of the American Fisheries Society*, 144(3), s. 642–654.
- Barlaup B., Gabrielsen S., Skoglund H., Wiers T. 2008: Addition of spawning gravel a means to restore spawning habitat of Atlantic salmon (*Salmo salar* L.), and anadromous and resident brown trout (*Salmo trutta* L.) in regulated rivers. *River Research and Applications*, 24, s. 543–550.
- Bartel R., Falowska B., Bieniarz K., Epler P. 2005: Dependence of egg diameter on the size and age of cultivated female lake trout (*Salmo trutta* m. *lacustris* L.). *Archives of Polish Fisheries*, 13(1), s. 121–126.
- Bartel R., Pelczarski W., Kardela J., Nadolna-Ałtyn K., Lejk A.M. 2016: Restytucja łososia i troci w wodach Polski: przegląd i kalendarium działań. In book: 95-lecie Morskiego Instytutu Rybackiego: aktualne tematy badań naukowych Chapter: TOM I – Zasoby ryb i rybołówstwo Publisher: Morski Instytut Rybacki – Państwowy Instytut Badawczy, s. 69–80.
- Beard T.D., Carline R.F. 1991: Influence of spawning and other stream habitat features on spatial variability of wild brown trout. *Transactions of the American Fisheries Society*, 120, s. 711–722.
- Bernaś R., Dębowski P., Bartel R., Radtke G., Miller M., Skóra M. 2009: Occurrence of juvenile salmon, *Salmo salar* L., from natural spawning in the Słupia River (northern Poland). *Archives of Polish Fisheries*, 17(4), s. 317–321.
- Dębowski P. 2018: The largest Baltic population of sea trout (*Salmo trutta* L.): its decline, restoration attempts, and current status. *Fisheries & Aquatic Life*, 26, s. 81–100.
- Dębowski P., Bernaś R., Radtke G., Skóra M. 2008: Stan populacji troci wędrownej (*Salmo trutta* m. *trutta*) i łososia (*Salmo salar*) w dorzeczu Słupi i możliwości optymalizacji tarła tych gatunków. Olsztyn: Wyd. IRŚ, s. 91.
- Dumas J., Marty S. 2006: A new method to evaluate egg-to-fry survival in salmonids, trials with Atlantic salmon. *Journal of Fish Biology*, 68, 284–304.
- Gomułka P. 2008: Rola wylęgarni w łańcuchu szczenia się chorób zakaźnych. [W:] Szczerbowski A., Łuczynski M.J., Szkudlarek M. red. *Innowacyjne metody w rozrodzie i wylęgarnictwie ryb – materiały szkoleniowe*. Olsztyn: Wyd. IRŚ, s. 33–40.

- Hagen I.J., Jensen A.J., Bolstad G.H., Diserud O.H., Hindar K., Lo H., Karlsson S. 2019: Supplementary stocking selects for domesticated genotypes. *Nature Communications*, 10(199).
- Holcik J., Hensel K., Nieslanik J., Skácel L. 1988: *The Eurasian Huchen, Hucho hucho*. Dr W. Junk Publ., Dordrecht-Boston-Lancaster.
- Kennedy R.J., Crozier W.W., Allen M. 2012: The effect of stocking with 0+ year age-class Atlantic salmon *Salmo salar* fry: a case study from the River Bush, Northern Ireland. *Journal of Fish Biology*, 81(5), s. 1730–1746.
- Korzelecka-Orkisz A., Tański A., Winnicki A., Formicki K. 2009: Orientacja przestrzenna zarodków ryb łososiowatych jako swoisty przejaw motoryki embrionalnej ryb. [W:] Zakeś Z. i in. red. *Rozród, podchów, profilaktyka ryb łososiowatych i innych gatunków*. Olsztyn: Wyd. IRŚ, s. 149–156.
- Louhi P., Mäki-Petäys A., Erkinaro J. 2008: Spawning habitat of Atlantic salmon and brown trout: general criteria and intragravel factors. *River Research and Applications*, 24, s. 330–339.
- Olsén H., Petersson E., Ragnarsson B., Lundqvist H., Järvi T. 2011: Downstream migration in Atlantic salmon (*Salmo salar*) smolt sibling groups. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 61(3), s. 328–331.
- Palm D., Lepori F., Brännäs E. 2010: Influence of habitat restoration on post-emergence displacement of brown trout (*Salmo trutta* L.): a case study in a northern Swedish stream. *River Research and Applications*, 26, s. 742–750.
- Radtke G., Bernaś R., Dębowski P., Skóra M. 2010: Ichtyofauna dorzecza Regi. *Roczniki Naukowe PZW*, 23 s. 51–78.
- Rubin J.F., Glimsäter C. 1996: Egg-to-fry survival of the sea trout in some streams of Gotland. *Journal of Fish Biology*, 48, s. 585–606.
- Saltveit S.J. 2006: The effects of stocking Atlantic salmon, *Salmo salar*, in a Norwegian regulated river. *Fisheries Management and Ecology*, 13(3), s. 197–205.
- Schultz N., Piery G. 1982: Zur fortpflanzung des huchens (*Hucho hucho* L.) – Untersuchung einer laichgrube. *Österreichische Fish*, 35, s. 241–249.
- Szkudlarek M., Łuczynski M.J., Szczerbowski A., Kucharczyk D. 2008: Projekt innowacyjny w zakresie stymulowania wzrostu produkcji materiału zarybieniowego cennych gatunków ryb, ze szczególnym uwzględnieniem szczupaka – potencjalna szansa rozwoju małych podmiotów gospodarczych sektora akwakultury. [W:] Szczerbowski A., Łuczynski M.J., Szkudlarek M. red. *Innowacyjne metody w rozrodzie i wylęgarnictwie ryb – materiały szkoleniowe*. Olsztyn: Wyd. IRŚ, s. 9–18.
- Tański A., Korzelecka-Orkisz A., Gzyl M., Winnicki A., Formicki K. 2009: Wpływ struktury żwirowo-kamienistej gniazd na wyniki inkubacji jaj troci (*Salmo trutta* m. *trutta*). [W:] Zakeś Z. i in. red. *Rozród, podchów, profilaktyka ryb łososiowatych i innych gatunków*. Olsztyn: Wyd. IRŚ, s. 141–148.
- Tański A., Bonisławska M., Szulc J., Brysiewicz A., Formicki K. 2011: Zasadność budowy tarlisk dla wędrownych ryb łososiowatych w zlewni rzeki Iny na tle badań środowiskowych. *Cz. I. Rzeka Ina. Woda, Środowisko, Obszary Wiejskie*, 11, 3(35), s. 253–268.
- Zimmer M.P., Power M., 2006: Brown trout spawning habitat selection preferences and redd characteristics in the Credit River, Ontario. *Journal of Fish Biology*, 68, s. 1333–1346.

Krzysztof WIERZBICKI¹, Andrzej EYMONTT¹, Witold Jan WARDAL¹

Innowacyjne technologie dezynfekcji i odmulania dna stawowego oraz rowów

Streszczenie. Utrzymanie właściwego reżimu technologicznego produkcji zdrowych ryb o wymaganych parametrach jakościowych, a zarazem spełnienie wymogów eksploatacyjnych związanych z ochroną środowiska naturalnego, gwarantujące uniknięcie kar z tytułu jego zanieczyszczenia, wymagają m.in. okresowej dezynfekcji wapnem palonym dna stawowego, a także usunięcia zanieczyszczonego poprodukcyjnego namułu (osadu dennego) zgromadzonego na dnie w rejonach odłowów i rowów w strefie odpływu wód w okresie jesiennym. Dotychczas stosowane technologie realizujące ww. zabiegi eksploatacyjne nie są zadowalające, o czym świadczą publikacje m.in.: Bednarczyk, Madeyski (1992), Madeyski (2003a, 2003b), Eymontt i in. (2017). Wobec powyższego istnieje potrzeba modernizacji dotychczas stosowanych technologii wykorzystujących zdobyte doświadczenia.

Słowa kluczowe: dezynfekcja, odmulanie, gospodarka stawowa

Innovative technologies of disinfection and desludging of the bottom of a ponds and ditches

Abstract. Maintaining the appropriate technological regime for the production of healthy fish with the required quality parameters, and at the same time meeting the operational requirements related to the protection of the natural environment, guaranteeing the avoidance of penalties for its contamination, requires, inter alia, periodic disinfection of the pond bottom with quicklime, as well as removal of contaminated post-production sludge (bottom sediment) accumulated on the bottom in the catchment areas and ditches in the water outflow zone in the autumn. The technologies used so far implementing the above-mentioned maintenance procedures are not satisfactory, as evidenced by the publications of, among others: Bednarczyk, Madeyski (1992), Madeyski (2003a, 2003b), Eymontt et al. (2017). Accordingly, there is a need to modernize the technology used so far using the experience gained.

Keywords: disinfection, desludging, pond management

¹ Instytut Technologiczno-Przyrodniczy w Falentach, Oddział w Warszawie, Zakład Systemów Infrastruktury Technicznej Wsi

Wprowadzenie

Utrzymanie właściwego reżimu technologicznego produkcji zdrowych ryb o wymaganych parametrach jakościowych wymaga m.in. wykonywania następujących zabiegów:

- ♦ okresowego wapnowania dna stawowego zapewniającego poprawę warunków sanitarnych w stawie poprzez eliminację patogenów ryb i właściwy poziom odczynu pH wody,
- ♦ usuwania nadmiernie zgromadzonych osadów dennych zawierających odchody ryb i obumarłego fito- i zooplanktonu oraz innych zawiesin naniesionych przez wodę i wiatr,
- ♦ udrażnianie rowów umożliwiających odpływ wody i ryb z obszaru stawu do łowisk.

Wymienione zabiegi technologiczne wymagają zastosowania odpowiednich technik umożliwiających ich racjonalne zmechanizowanie.

Przeprowadzone rozeznanie obecnego stanu poziomu rozwoju ww. technik wskazuje na potrzebę ich doskonalenia. Realizacja tego rodzaju udoskonaleń przyczyni się niewątpliwie nie tylko do poprawy ww. reżimu technologicznego, ale także do uniknięcia kar z tytułu zanieczyszczenia środowiska naturalnego oraz poprawy stawowej gospodarki wodnej.

Ten kierunek innowacyjności w odniesieniu do obecnie stosowanych technologii na stawach rybnych wymaga opracowania i wdrożenia do produkcji pojazdu wyposażonego w odpowiednie osprzęty poruszającego się po zamulonym dnie, umożliwiające jednocześnie jego wapnowanie lub wydobywanie zalegających poprodukcyjnych osadów dennych.

Prace badawczo-wdrożeniowe w celu zbudowania tego rodzaju pojazdu podjęto w Instytucie Mechanizacji i Elektryfikacji Rolnictwa (IMER) w latach 1963–1965 (Sołtyński i in. 1965), a następnie zaniechano ze względów organizacyjnych. W latach tych rozpoczęto realizację programu maszyn do mechanizacji prac melioracyjnych m.in. pogłębiarki ślimakowej (PSP-40) z przeznaczeniem do usuwania osadów dennych z rowów melioracyjnych oraz na stawach rybnych. Przeprowadzone badania tej pogłębiarki (Wierzbicki 1963) m.in. na stawach rybnych w Miliczu wskazywały na jej małą przydatność ze względu na trudności w przemieszczaniu się wzdłuż rowu oraz odrzucaniu urobku na zbyt małą odległość w sytuacji przeciwnego kierunku wiatru.

Kontynuacja koncepcji Sołtyńskiego i in. (1965) zbudowania pojazdu wyposażonego w odpowiednie osprzęty, poruszającego się po dnie stawu, stała się aktualna z chwilą opracowania innej technologii wydobywania osadów dennych z dna rowów, kanałów i zbiorników wodnych, jego hydrotransportu oraz przetwarzania po podaniu innych komponentów m.in. sorbujących niepożądane zanieczyszczenia w nawozie organiczno-mineralnym o zbliżonych właściwościach do obornika (Brogowski i in. 2017; Eymontt i in. 2019). Wobec powyższego, realne jest obecnie wdrożenie innowacyjnych technologii dezynfekcji i odmulania dna stawowego oraz rowów.

I. Technologia wapnowania dna stawowego

Technologia ta polega na równomiernym rozproszczeniu co najmniej jednego z wymienionych rodzajów wapna po powierzchni dna stawowego:

- ♦ węglanu wapnia – CaCO_3 ,
- ♦ wapna palonego – CaO ,
- ♦ wapna palonego – CaO ,
- ♦ wapna hydratyzowanego (gaszonego) – Ca(OH)_2 .

Zgodnie z zaleceniami Krajowej Stacji Chemiczno-Rolniczej w Warszawie, węglan wapnia nie ma właściwości odkażających i służy jedynie nawożeniu podłoża stawu. Wapna palone i hydratyzowane (słabsze niż palone) mają właściwości odkażające z drobnoustrojów chorobotwórczych. Najczęściej są stosowane bezpośrednio na osuszone dno stawu lub wodę. Zastosowanie wapna palonego lub hydratyzowanego związane jest z wywołaniem wysokiego pH (>11) i dlatego należy pamiętać o obsadzeniu stawu rybami po około 4–6 tygodni, gdy pH wody obniży się do 8,5. Zalecane terminy stosowania to jesień lub wczesna wiosna, a wielkość dawek podano w tabeli 1 i 2.

Rozprowadzenie dawek podanych w tabeli 1 i 2 stanowi dotychczas nierozwiązany problem m.in., z punktu widzenia równomierności aplikacji i higieny pracy. Rozsypywanie pylistego wapna różnego rodzaju urządzeniami poruszającymi się po grobli lub przewożonego łodzią – trudno akceptować bez zastrzeżeń.

Przemieszczanie się jakiegokolwiek znanego pojazdu w technice rolniczej po dnie stawu, przy znacznej grubości nagromadzonego namułu i równoczesnego rozprowadzania przewożonego wapna, jest obecnie niemożliwe.

Opracowanie koncepcji konstrukcji pojazdu mogącego się poruszać po błotnistym dnie stawu podjęto w Instytucie Mechanizacji i Elektryfikacji Rolnictwa – IMER (obecnie ITP) w 1965 r. (Sołyński i in. 1965).

Tabela 1. Dawki wapna palonego w zależności od odczynu pH i składu granulometrycznego

pH wody	Dawka CaO [t/ha]		
	piaski	piaski gliniaste	gliny ciężkie
<4,0	1,45	2,2	4,2
4,0–4,5	1,45	1,7	3,2
4,5–5,0	1,20	1,45	2,7
5,0–5,5	0,70	1,2	1,7
5,5–6,0	0,45	0,7	1,2
6,0–6,5	0,20	0,7	0,7

Źródło: <http://narybek24.pl/wapnowanie>.

Tabela 2. Dawki wapna palonego stosowane na dno stawowe w zależności od procentowej zawartości części stałych poniżej 0,02 mm

Stan zakwaszenia		Rodzaj gruntu		
stopień	pH	lekkie do 20% części o rozmiarach pon. 0,02 mm	średnie 21–35% części o rozmiarach pon. 0,02 mm	ciężkie – pow. 35% części o rozmiarach pon. 0,02 mm
Dawka [t/ha]				
Silne	<5	0,5–1	1–2	2–4
Średnie	5,1–7	0,25–0,5	0,5–1	1–1,5
Słabe	7,1–8	–	0,5	0,5

Źródło: <http://narybek24.pl/wapnowanie>.

W celu wyboru odpowiedniego podwozia pojazdu, przeprowadzono badania właściwości mechanicznych osadów dennych ze stawu w Miliczu, a wyniki zestawiono w tabeli 3.

Przeprowadzona analiza i ocena (Sołtyński i in. 1965) budowy pojazdu wyposażonego nawet w szerokie i długie gąsienice w warunkach zbadanych właściwości podłoża (tab. 3) oraz naciskach w zakresie 0,143–0,921 kG·cm⁻² spowoduje trudności w poruszaniu się i sterowalności przy zmianie kierunku pojazdu. Wobec powyższego nie można zbudować metodą zmiany wymiarów gąsienic pojazdu gąsienicowego zapewniającego dobre właściwości trakcyjne i siłę uciągu przy nacisku na glebę wielkości $p \leq 0,14 \text{ kG} \cdot \text{cm}^{-2}$. Odrzucono zatem możliwość zastosowania pojazdu gąsienicowego. Do tego rodzaju pojazdu potrzebne są mechanizmy jezdne, które zapewniałyby mniejsze naciski na podłoże i w konsekwen-

Tabela 3. Właściwości mechaniczne osadów dennych ze stawów w Miliczu

Lp.	Wyszczególnienie	Zastosowany symbol	Jednostka	Wartości
1.	Spoistość gleby	–	kG/cm ²	0,00183
2.	Kąt tarcia wewnętrznego gleby*	ρ	stopnie	26°30'
3.	Wykładnik rodzaju gleby	n	–	0,73
4.	Współczynnik spoistości	k_c	kG/cm ⁽ⁿ⁺¹⁾	0
5.	Współczynnik sypkości	k_σ	kG/cm ⁽ⁿ⁺²⁾	0,0067
6.	Ciężar objętościowy	Γ	G/cm ³	1,39
7.	Wilgotność	W	%	60

* Kąt ten jest zależny od ciśnienia wywieranego na glebę.

Źródło: Sołtyński i in. 1965.

cji mniejsze jego zagłębienie. Możliwość taka daje zastosowanie pojazdu, tzw. śrubowego, w którym cylindryczne pływaki wyposażone są w spiralę tworzącą ostrogę i podczas ich obrotu następuje przemieszczanie pojazdu.

Postanowiono wobec powyższego przeprowadzić analizę i ocenę możliwości trakcyjnych tego rodzaju pojazdu< otrzymując w wyniku równanie (1):

$$\frac{N}{GV} = \mu \left\{ \frac{1}{\sin \alpha} + \frac{\mu \left[(a^2 + 1) \cos^2 \alpha + 1 \right]}{a \cdot \cos \alpha - \mu \sin \alpha} \right\} \quad (1)$$

gdzie:

μ – współczynnik tarcia stali o podłoże,

α – kąt pochylenia spirali ślimaka [°],

$a = 1 + h/D$

h – wysokość spirali [cm],

D – średnica pływaka [cm],

N – zapotrzebowanie mocy [KM],

G – ciężar pojazdu [kG],

V – prędkość pojazdu [$m \cdot s^{-1}$].

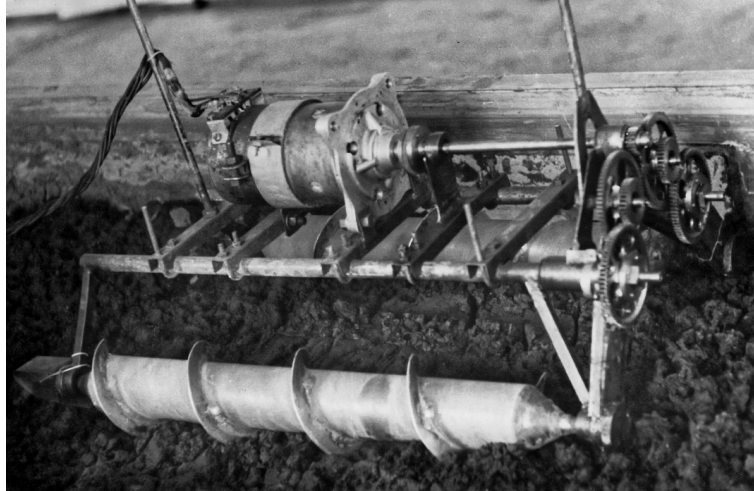
Otrzymane równanie (1) posiada postać bezwymiarową, jest niezależne skalarnie, co oznacza, że powinno być spełnione dla każdej wielkości pojazdu śrubowego. Takie ujęcie pozwala na weryfikację równania (Sołtyński i in. 1965) przy przeprowadzeniu badań modelu w zmniejszonej skali. Model taki zbudowano (fot. 1) o następujących wymiarach:

- ♦ średnica pływaka 5,55 cm, czynna długość pływaka 43,5 cm,
- ♦ wysokość spirali 1,8 cm,
- ♦ czynna liczba zwojów $i = 3,78$;
- ♦ skok zwojów ślimaka $s = 11,5$ cm,
- ♦ silnik prądu stałego o mocy 0,272 KM,
- ♦ ciężar pojazdu $G = 8,7$ kG.

Badania wykonanego modelu pojazdu śrubowego (rys. 1) przeprowadzono na stanowisku pozwalającym wykonywać pomiary przy różnym zagłębieniu pływaków modelu w namule.

W rezultacie dokonanej analizy równania (1) oraz analizy i oceny wyników badań na stanowisku okazało się, że wartości pomierzone na modelu są średnio niższe od teoretycznych, co zapewnia pewien zapas bezpieczeństwa przy obliczeniach odpowiednich parametrów projektowanego prototypu pojazdu, które są następujące:

- ♦ całkowity ciężar pojazdu $G = 2000$ kG,
- ♦ ładunek 1000 kG,



Fotografia 1. Model pojazdu śrubowego
Fot. K. Wierzbicki

- ♦ średnica pływaka $D = 55$ cm,
- ♦ wysokość zwojów spirali $h = 15$ cm,
- ♦ długość pływaka ze zwojami $l = 450$ cm,
- ♦ kąt pochylenia spirali śrubowej u podstaw zwoju $\alpha = 35^\circ$.

Przyjmując do obliczeń wariant ruchu pojazdu bez ładunku i z ładunkiem po podłożu uprzednio zbadanym oraz po piasku, dla którego współczynnik tarcia stali o podłoże przyjęto $\mu = 0,5$, określono następujące parametry eksploatacyjne prototypu pojazdu, co zestawiono w tabeli 4.

Tabela 4. Parametry eksploatacyjne prototypu pojazdu

Parametry	Jednostki	Podłoże błotniste		Podłoże piaszczyste	
Ciężar pojazdu G	kG	2000	3000	2000	3000
Zagłębienie pojazdu z	cm	15,6	21,5	–	–
Średni nacisk na podłoże $P_{\dot{s}r}$	kG/cm ²	0,37	0,0485	–	–
Współczynnik tarcia μ	–	0,24	0,2	0,5	0,5
N/GV (z równ. (1))	–	0,51	0,41	1,29	1,29
Zapotrzebowanie mocy $N \cdot V^{-1}$	KM	3,78	4,55	9,5	14,3

* Wartość V [km·h⁻¹].

Źródło: Sołtyński i in. 1965.

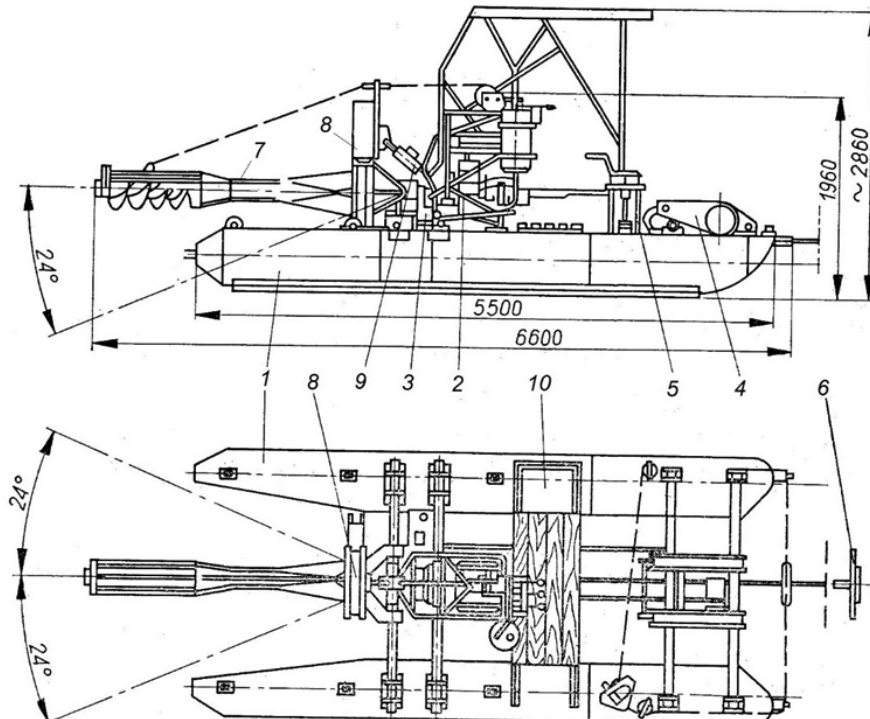
Całkowita moc projektowanego pojazdu, z uwzględnieniem napędu na rozsiewacz wapna, może wynieść około 55 KM. Zainstalowany rozsiewacz powinien zapewnić równomierność $\pm 20\%$ przy prędkości roboczej $1,1 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$. Wówczas osiągnie się wydajność $0,4 \text{ ha} \cdot \text{h}^{-1}$ przy szerokości roboczej 1 m. Kontynuacja przedstawionej koncepcji budowy prototypu podwozia „śrubowego” nie została zrealizowana ze względów organizacyjnych i finansowych.

2. Technologia odmulania dna stawowego oraz rowów

Potrzebę odmulania osadów dennych z dna stawowego oraz rowów omówiono na wstępie. W tym też celu w latach 1961–1965 zbudowano kilka prototypów pogłębiarek wyposażonych w organ roboczy w postaci przenośnika ślimakowego czerpiącego osady denne np. z rowu i rozrzucającego na teren przyległy za pośrednictwem wyrzutnika łopatkowego. Prototypy te poddano badaniom w IBMER (Wierzbicki 1963, 1965).

Schemat budowy pogłębiarki PSP-40 ilustruje rysunek 1.

Na dwóch cylindrycznych pływakach (1) wsparty jest zespół napędowy wyposażony w silnik spalinowy (2) oraz zespół roboczy (3). Na przeciwnym końcu pogłębiarki w sto-



Rysunek 1. Schemat budowy pogłębiarki
Źródło: Fabryka Maszyn Budowlanych w Głogowie

sunku do zespołu roboczego zainstalowano wciągarkę linową (4) z napędem hydraulicznym oraz ręczną wciągarkę (5) do sterowania położeniem liny zakotwiczonej (6).

Zespół roboczy wyposażony jest w przenośnik o dwóch różnych średnicach ślimaka (7) oraz wyrzutnik łopatkowy (8) zamocowany na wspólnym wale napędowym. Układ hydrauliczny wyposażony jest w siłownik (9) umożliwiający opuszczanie zespołu roboczego o kąt 24° w poziomie. Drugi siłownik hydrauliczny umożliwia przemieszczanie zespołu roboczego w płaszczyźnie poziomej o kąt 24° w odniesieniu do osi pogłębiarki.

Przemieszczanie pogłębiarki wzdłuż rowu umożliwia wciągarka, której koniec liny jest zakotwiczony (6) w odległości około 150 m. Przy zsynchronizowaniu prędkości przemieszczania pogłębiarki z ruchem organu roboczego przez operatora stojącego na podeście (10), otrzymujemy efekt wydobycia osadu dennego z rowu i jego rozrzucenia na terenie przyległym.

Pomimo wykonania łącznie ośmiu wersji prototypu omawianej pogłębiarki, nie znalazła ona aprobaty do eksploatacji na terenie stawów rybnych w Miliczu, ani też w kilku przedsiębiorstwach melioracyjnych.

Zebrane doświadczenia podczas badań omawianego typu pogłębiarki (Wierzbicki 1963; Wierzbicki, Jarząbek 1965) wykazały, że bardziej racjonalnym transportem wydobytego namułu jest hydrotransport. W tym też kierunku rozpoczęto współpracę naukowo-badawczą z Wydziałem Melioracji Wodnych Akademii Rolniczej we Wrocławiu (Parzonka, Wierzbicki 1965; Parzonka 1961).

W wyniku tej współpracy udokumentowano, że osady dennie, m.in. ze stawu w Miliczu, charakteryzują się cechami typowymi dla cieczy plastycznych (nienewtonowskich), których struktura w stanie spoczynku jest sztywna, a po jej zniszczeniu wynikającego z przekroczenia naprężenia ścinającego τ_0 staje się płynna (Stręk 1981). W odniesieniu do osadów dennych tę cechę potwierdzono w wielu badaniach (Parzonka, Wierzbicki 1965; Madeyski 1999). Jest to typowe zachowanie mieszanin zawierających części pochodzenia organicznego i mineralnego o odpowiedniej granulacji z wodą.

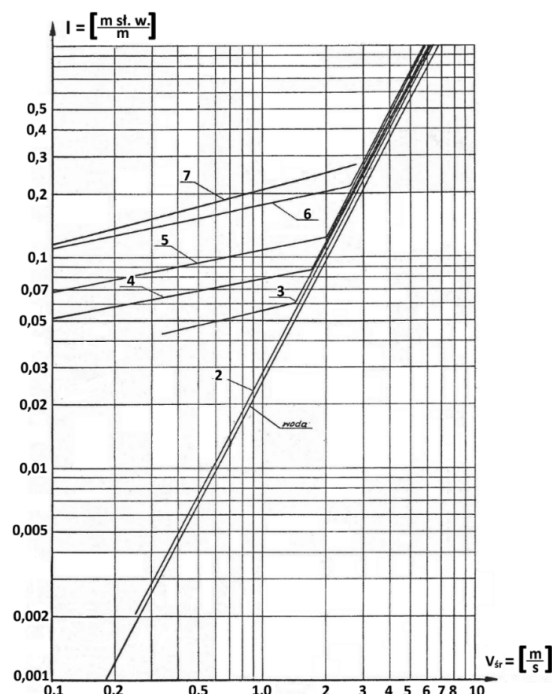
Ilustrację płynięcia tego rodzaju cieczy w rurociągu przedstawiono na rysunku 2, gdzie widoczna jest zmiana jednostkowych strat ciśnienia od średniej prędkości w zależności od koncentracji wagowej stałego składnika S' określanego zależnością (2).

$$S' = \frac{\rho_s (\rho_m - \rho_s)}{\rho_m (\rho_s - \rho_w)} \quad (2)$$

gdzie:

- ρ_s – gęstość składnika części stałych,
- ρ_m – gęstość mieszaniny,
- ρ_w – gęstość wody.

Gęstość namułu $1,169 \text{ kG}\cdot\text{cm}^{-3}$, koncentracja objętościowa składnika stałego dla poszczególnych mieszanin od $s = 3,32\%$.



Rysunek 2. Wykres strat ciśnienia w zależności od średniej prędkości przepływu w rurociągu stalowym o średnicy 51,8 mm, przy przepływie osadów dennych ze stawów rybnych w Miliczu

Źródło: Parzonka 1961

W omawianym przykładzie koncentracja wagowa suchego składnika S' z osadów dennych ze stawów rybnych w Miliczu dla poszczególnych badanych mieszanin oznaczonych na rysunku 2 charakterystykami $I = f(V)$ od 2 do 7 wynosiła: 0,033, 0,073, 0,1416, 0,153, 0,174, 0,187, 0,206. Przy koncentracji suchego składnika $S' = 0,1416$ (3) i większej mieszanina zachowuje się, przy ruchu uwarstwionym, jak ciecz plastyczno-lepka. Koncentrację tę m.in. Parzonka (1961) określił jako graniczną, po przekroczeniu której hydromieszanina przechodzi ze strefy newtonowskiej do nienewtonowskiej. Przejście z tych stref odpowiednio z ruchu laminarnego do turbulentnego odbywa się gwałtownie. Przy maksymalnej koncentracji wagowej składnika stałego $S' = 0,206$ straty hydrauliczne (charakterystyka 7) są zrównane z wartością strat przy przepływie wody przy prędkości $V = 3 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$.

Brogowski i in. (2017) określili, że w osadach dennych ze stawów rybnych w Falentach k. Warszawy, zawartość procentowa w osadach ziarn $< 0,02 \text{ mm}$ zmieniała się w granicach od 4 do 9%. Natomiast zawartość części ilastych $< 0,002 \text{ mm}$ była w ilościach śladowych. Stwierdzono zawartości ziarn, o średnicy 0,1 do 0,02 mm, od 15 do 23%. Pozostały udział w składzie badanych osadów stanowią ziarna o średnicy 0,1 do 1,0 mm, a ich udział procentowy wyniósł od 68 do 81%. Wśród ziaren piaszkowych dominujące są ziarna piasku drobnego (0,25–0,1 mm) przy procentowym składzie około 42% całej masy.

Z analizy powyższych danych wynika, że transport hydrauliczny mieszanin wody i osadów dennych ze stawów rybnych i wybiórczo z innych zbiorników wodnych oraz jezior będzie wymagał zastosowania pomp o odpowiedniej wysokości podnoszenia w celu pokonania oporów przepływu przy możliwie dużej koncentracji części stałych. Jednocześnie, skład i budowa części stałych wskazują, że omawianego rodzaju mieszaniny będą w minimalnym stopniu wpływać na zużycie ściernie podczas przepływu przez pompę i rurociągi. Natomiast trudno będzie odwozić wydobytą hydromieszaninę do stanu stałego (sypkiego). Za główny cel dalszych działań badawczo-wdrożeniowych uznano wobec powyższego potrzebę wydobycia osadów dennych zasobnych w składniki nawozowe oraz części pochodzenia organicznego i mineralnego o średnicach ziarn poniżej 1 mm. W celu potwierdzenia ww. założeń w ramach zrealizowanego w 2016 roku projektu pt. „Innowacyjna technologia wydobycia osadów dennych z zastosowaniem do nawożenia” Nr RPMA 01.02.0014-4539/16, dofinansowanego przez Europejski Fundusz Rozwoju Regionalnego „Mazowsze” – Fundusze Europejskie, zbudowano w Przedsiębiorstwie Łukomet – Krzysztof Łuszczczyk model pływającej pogłębiarki. Przeprowadzono badania modelu na stawie rybnym w Instytucie Technologiczno-Przyrodniczym w Falentach, uzyskując wysoką koncentrację osadu (fot. 2). Bardziej szczegółowe wyniki tych doświadczeń opisano (Brogowski i in. 2017; Eymontt, Wierzbicki 2013; Eymontt i in. 2017).



Fotografia 2. Widok wydobytego osadu dennego o koncentracji składnika stałego $S = 20\%$
Źródło: Wierzbicki 2013

Uzyskane wyniki doświadczeń odmulania rowów na stawach rybnych w Miliczu, przy zastosowaniu pogłębiarki PSP-40 oraz modelu pogłębiarki na stawach rybnych w Falentach, umożliwiają zrealizowanie innowacyjnej technologii usuwania osadów dennych z dna stawowego oraz rowów. Warunkiem będzie tu możliwość zbudowania opisanego projektu pojazdu śrubowego stanowiącego nośnik transportowy nie tylko dla rozrzutnika wapna, ale też dla dwóch urządzeń, a mianowicie:

- a) samojezdnej pogłębiarki ze ślimakowym organem roboczym i wyrzutnikiem łopatkowym o zbliżonej konstrukcji do opisanej pogłębiarki PSP-40. Tego typu urządzenie będzie służyło do odmulania rowów na stawach rybnych przy niskim stopniu uwodnienia osadów dennych;
- b) samojezdnej pogłębiarki wyposażonej w szufłę z zainstalowaną pompą wyposażoną w rozdrabniacze, dostosowanej do hydrotransportu urobku na odległość nie mniejszą niż 500 m.

W obu opisanych urządzeniach założono ich wydajność $40\text{--}50\text{ m}\cdot\text{h}^{-1}$, a ich eksploatacja będzie uzależniona od stopnia uwodnienia osadów dennych oraz lokalnych uwarunkowań.

Wnioski

Zebrane doświadczenia i przeprowadzona analiza i ocena dotychczasowych technologii dezynfekcji oraz usuwania poprodukcyjnych osadów dennych z dna stawowego oraz rowów wskazują, że istnieje możliwość i potrzeba doskonalenia opisanych technologii.

Problem racjonalnej technologii usuwania osadów dennych na stawach nie został dotychczas rozwiązany, o czym m.in. świadczą opisane przykłady i informacje zawarte w przytoczonej literaturze. Podjęcie zatem budowy nośnika transportowego umożliwi racjonalny rozwój mechanizacji prac w gospodarce stawowej.

Literatura

- Bednarczyk T., Madejski M. 1992: Czynniki wpływające na intensywność zamulania stawów rybnych. Zeszyty Naukowe Akademii Rolniczej we Wrocławiu, Melioracja, 40, s. 87–100.
- Brogowski Z., Burzyńska I., Eymontt A., Wierzbicki K. 2017: Możliwości wykorzystania osadów dennych w rolnictwie. Wiadomości Melioracyjne i Łąkarskie, 1, s. 37–43.
- Eymontt A., Wierzbicki K. 2013: Nowa technologia usuwania antropogenicznych osadów dennych. Problemy Inżynierii Rolniczej, 4(82), s. 129–138.
- Eymontt A., Wierzbicki K., Brogowski Z., Burzyńska I., Rossa L. 2017: Nowa technologia wydobywania osadów dennych z rowów na stawach rybnych i ich zastosowanie w rolnictwie. Komunikaty Rybackie IRS, 2, s. 7–13.
- Eymontt A., Wierzbicki K., Wardal W.J. 2019: Nowatorska metoda wydobywania i zagospodarowania osadów dennych ze zbiorników wodnych Część I, II. Gospodarka Wodna 7, s. 12–17, oraz Gospodarka Wodna, 8, s. 14–18.
- Madejski M. 1999: Charakterystyka reologiczna osadów stawowych. Zeszyty Naukowe Akademii Rolniczej w Krakowie. Inżynieria Środowiska, 19, s. 37–47.
- Madejski M. 2003a: Możliwości usunięcia osadów z dna stawów i zbiorników. Zeszyty Naukowe Akademii Rolniczej w Krakowie. Inżynieria Środowiska, 24, s. 89–96.
- Madejski M. 2003b: Zamulanie stawów rybnych. Wiadomości Melioracyjne i Łąkarskie, 3(46), s. 121–122.
- On-line: <http://narybek24.pl/wapnowanie> (dostęp: 16.11.2020).
- Parzonka W. 1961: Ruch rozwodnionego mułu w przewodach zamkniętych. Zeszyty Naukowe Wyższej Szkoły Rolniczej, Referaty z sesji naukowej Wydziału Melioracji Wodnych, Wrocław, s. 33–41.

- Parzonka W., Wierzbicki K. 1965: Transport namulów przy robotach melioracyjnych i hydrotechnicznych. [W:] Melioracja robót ziemnych. Materiały V Międzynarodowej konferencji. NOT. A-40, Warszawa, s. 13.
- Sołtyński A., Grzelecki A., Wierzbicki K., Ptaszyński S., Pawlik A., Jankowski H., Leszkiewicz O. 1965: Opracowanie założeń koncepcyjnych i modelu pojazdu przeznaczonego do rozsiewania wapna na dnie stawów rybnych. Sprawozdanie XI/115 Instytut Mechanizacji i Elektryfikacji Rolnictwa, Warszawa.
- Strępek F. 1981: Mieszanie i mieszalniki. Warszawa: Wydawnictwo Naukowo-Techniczne, s. 420.
- Wierzbicki K. 1963: Badania prototypów pogłębiarek ślimakowych typu „York” – PSP-251, 252, 253, 254, 255, 256, 40. Sprawozdanie IMER, symbol dok. XXVIII/67, s. 23.
- Wierzbicki K., Jarząbek Z. 1965: Maszyna pływakowa do oczyszczania rowów. Patent PL, nr 48776, s. 7.

**Adam BRYSIEWICZ¹, Michał ROGACKI¹, Jarosław DĄBROWSKI¹,
Agnieszka KOZIOŁ¹, Krzysztof FORMICKI²**

Wpływ użytkowania rolniczego zlewni na warunki fizykochemiczne wody w niewielkich śródpolnych zbiornikach wodnych

Streszczenie. Duża bioróżnorodność i potencjał do retencjonowania wody w śródpolnych oczkach wodnych świadczą, że te niedoceniane, małe zbiorniki wodne stanowią istotny składnik terenów rolniczych. Niestety wskutek postępujących zmian klimatu i silnej antropopresji, zwłaszcza w formie okresowych susz oraz powierzchniowego spływu zanieczyszczeń, coraz więcej tego typu siedlisk w Europie zanika. Celem niniejszej pracy była ocena wpływu rolniczego zagospodarowania zlewni na właściwości fizykochemiczne wód sześciu wybranych śródpolnych oczek wodnych. Pobrane próby wody oraz gleby z terenów badanych oczek oznaczano pod kątem odczynu pH i zawartości: N-NH₄, N-NO₃, P-PO₄, Pog, Cl⁻ oraz pierwiastków: Na, K, Mg, Ca, Fe, Mn i Zn. Wyniki ukazały wyższą zawartość makro- i mikroelementów w próbach glebowych niż w wodzie powierzchniowej analizowanych zbiorników wodnych. Uzyskane wyniki potwierdzają, że obecność i wielkość roślinnych stref buforowych wokół śródpolnych oczek wodnych mogą skutecznie ograniczać powierzchniowy spływ biogenów, opóźniając procesy zarostu zbiorników wodnych.

Słowa kluczowe: oczka wodne, obszary wiejskie, biogeny, woda, monitoring

Influence of the agricultural use on the physical and chemical conditions of water in small midfield water bodies

Abstract. High biodiversity and water retention in mid-field ponds prove that these underestimated small water reservoirs are an important component of agricultural land. Unfortunately, as a result of the progressive climate change and strong human pressure, especially in the form of periodic droughts and surface runoff, a significant number of these habitats are disappearing in Europe. The aim of this study was to assess the impact of agricultural management of the catchment area on the physicochemical properties of the waters of six selected ponds. The water and soil samples taken from the areas of the studied ponds were determined for pH and the content

¹ Instytut Technologiczno-Przyrodniczy, Falenty

² Zachodniopomorski Uniwersytet Technologiczny w Szczecinie, Katedra Hydrobiologii, Ichtiologii i Biotechnologii Rozrodu

of: $N-NH_4$, $N-NO_3$, $P-PO_4$, Pog , Cl^- and the elements: Na, K, Mg, Ca, Fe, Mn and Zn. The results showed a higher content of macro- and microelements in soil samples than in surface water of the analyzed water reservoirs. The obtained results confirm that the presence and size of plant buffer zones around mid-field ponds can effectively limit the surface runoff of nutrients, delaying the processes of overgrowing water reservoirs.

Keywords: ponds, rural areas, nutrients, water, monitoring

Wprowadzenie

Małe zbiorniki wodne zlokalizowane na obszarach użytkowanych rolniczo, popularnie nazywane śródpolnymi oczkami wodnymi, to najczęściej płytkie, niewielkie (do 1 ha) i bezodpływowe zagłębienia terenu o charakterze polodowcowym. Stanowią one nieodłączny element wielu terenów uprawnych, zwłaszcza w obrębie Polski Północnej, Kujaw czy Pojezierza Pomorskiego. Pomimo niewielkiej powierzchni, oczka wodne pełnią szereg istotnych funkcji w monotonnym krajobrazie rolniczym (Maślanko i in. 2010; Pietrzak 2014; Brysiewicz i in. 2019).

Ze względu na duży stopień zróżnicowania poszczególnych oczek wodnych, stanowią one ważne miejsca bytowania i rozrodu wielu zwierząt, zwłaszcza owadów, płazów oraz ptaków (Goławski, Kasprzykowski 2007; Symonides 2010). Pełnią zatem jednocześnie funkcję wysp (o lokalnie wysokiej bioróżnorodności) oraz korytarzy ekologicznych (Nagengast, Kuczyńska-Kippen 2013), które stanowią szlaki dla gatunków przemieszczających się drogą lądową oraz miejsca postoju migrującej awifauny. Ponadto oczka wodne poprzez hamowanie odpływu wody z obszarów o niewielkiej zlewni, zwiększają zdolność terenów rolniczych do jej retencjonowania, co w sposób pozytywny przekłada się na lokalny mikroklimat oraz bilans wodny (Kalbarczyk 2003; Cymes i in. 2010). Wpływają również na stopień uwilgotnienia terenów przyległych oraz stanowią bariery biogeochemiczne, które uczestniczą w oczyszczaniu wód (zarówno gruntowych, jak i powierzchniowych) z zanieczyszczeń pochodzenia rolniczego (Kalbarczyk 2003; Brysiewicz, Wesołowski 2015).

Pomimo niewątpliwie ważnych funkcji, jakie spełniają, siedliska te w znacznym stopniu zaczęły zanikać w sposób bezpowrotny. Szacuje się, że w poszczególnych krajach europejskich zanik ten objął od 40 do nawet 90% oczek wodnych (Pietrzak 2014). W Polsce przyczyną takiego stanu były niewłaściwie prowadzone w II połowie XX wieku intensywne prace melioracyjne, które dotkliwie naruszały lokalny reżim hydrologiczny (Nowicki 1997). W dzisiejszych czasach oczkom wodnym zagraża m.in. spływ pierwiastków biogennych oraz pozostałych mikroelementów (np. potasu i wapnia) z użytkowanych rolniczo zlewni. Użyźnianie wód przyspiesza proces ich eutrofizacji, prowadząc tym samym do zarastania i wypłykania śródpolnych oczek wodnych (Gałczyńska i in. 2013; Pietrzak 2014). Co więcej, wielu rolników świadomie niszczyło roślinność naturalną w otoczeniu tych siedlisk, celem zwiększenia bezpośrednich dopłat za uprawiane hektary ziemi (Aftek-Starczewska i in. 2010). Dodatkowo, w połączeniu z nasilającymi się zmianami klimatu, tj. globalne

ocieplenie oraz susze (Shukla i in. 2020), coraz więcej akwenów narażonych jest na bezpowrotny zanik. Konsekwencją tego okazuje się malejąca retencja zapasów wody w Polsce oraz innych krajach Równiny Północnoeuropejskiej.

Niemniej jednak coraz więcej osób zaczyna dostrzegać wielofunkcyjność i znaczenie śródpolnych oczek wodnych. Świadczą o tym m.in. projektowane w ostatnich latach (zwłaszcza w Skandynawii) niewielkie sztuczne zbiorniki (Pietrzak 2014), które mają, podobnie jak oczka wodne, sprzyjać dużej bioróżnorodności, urozmaiceniu krajobrazu, zatrzymywaniu spływających z pól uprawnych biogenów czy zwiększaniu zasobów wodnych, zwłaszcza w dobie ich wysokiego zapotrzebowania (Pulido i in. 2020). Zaczęto również zwracać większą uwagę na fitocenozy towarzyszące oczkom wodnym. Zespoły roślinne, które tworzą ich linię brzegową, determinują m.in. stopień uwilgotnienia sąsiadujących z nimi terenów rolniczych, odznaczają się bogatą różnorodnością biologiczną, a także szybkim przyrostem biomasy, co odzwierciedla wysoką żyzność krajobrazu rolniczego (Grzelak i in. 2016). Pasy roślinności zapobiegają zatem przedostawaniu się nadmiaru szkodliwych biogenów do oczka wodnego, co czyni z nich swoiste strefy buforowe.

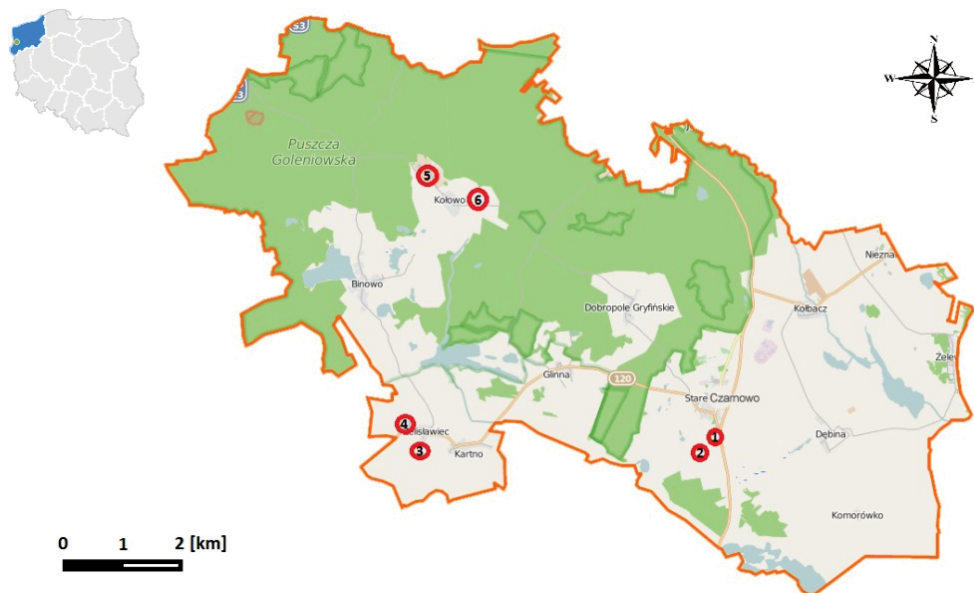
Fitocenozy śródpolnych zbiorników wodnych mogą zatem potencjalnie opóźniać procesy zarastania i wypływania oczek wodnych (co ma szczególne znaczenie w dobie kurczących się zapasów wody) wynikających z regularnego spływu biogenów z obrębu ich zlewni, a także pośrednio determinować ich charakter chemiczny. Stąd celem niniejszej pracy było określenie wpływu użytkowanej rolniczo zlewni na warunki fizykochemiczne wody w wybranych śródpolnych oczkach wodnych, zależnie od obecności (lub braku) oraz rozmiaru stref buforowych w formie przybrzeżnych pasów roślinności wraz z oceną stopnia ich biodegradacji.

I. Materiały i metody

Badania prowadzono na 6 wybranych śródpolnych zbiornikach wodnych zlokalizowanych w gminie Stare Czarnowo (woj. zachodniopomorskie). Monitoring i pobór prób realizowano w sezonie wegetacyjnym (III–IX) 2019 r. (rys. 1).

Zbiorniki podzielono na dwie grupy (D – duża, M – mała) ze względu na wielkość strefy buforowej oddzielającej oczko wodne od użytkowanych gruntów ornych. Pomiar strefy buforowej wykonano częściowo bezpośrednio w terenie, a częściowo w programie QGIS 2.18.10 na podstawie NMT oraz Ortofotomapy pozyskanej przez Geoportal.

W związku z tym, że badane akweny wodne nie przekraczały powierzchni 1 ha, próby wody pobierano z przypowierzchniowych warstw strefy pelagialu jako jedna próba mieszana. Pobrane bezpośrednio w terenie próby wody poddano analizom hydrochemicznym w laboratorium Badawczym Chemii Środowiska Instytutu Technologiczno-Przyrodniczego w Falentach. Wykonano analizy na zawartość N–NH₄, N–NO₃, P–PO₄, Pog, oraz Cl⁻. Zawartość azotu i fosforu oznaczono metodą automatyczną z segmentowym przepływem



Rysunek 1. Rozmieszczenie badanych oczek wodnych na obszarze gminy Stare Czarnowo (woj. zachodniopomorskie, Polska)

Źródło: opracowanie własne na podstawie:
[https://pl.wikipedia.org/wiki/Plik:Stare_Czarnowo_\(gmina\)_location_map.png](https://pl.wikipedia.org/wiki/Plik:Stare_Czarnowo_(gmina)_location_map.png)

strumienia (SFA) zgodnie z metodami Skalar i PN-EN ISO 13395: 2001; PN-EN ISO 6878: 2006; PN-EN 1484: 1999. Ponadto dokonano analiz zawartości Na, K, Mg, Ca, Fe, Mn, Zn przy użyciu metody emisyjnej spektrofotometrii atomowej (UNICAM 939 AAS).

Wiosną 2019 r. pobrano zbiorcze próby gleb do badań z warstwy orno-próchnicznej, od 0 do 30 cm z kilku punktów zlewni bezpośrednio każdego z oczek wodnych. Po przetransportowaniu prób gleby do laboratorium Badawczego Chemii Środowiska Instytutu Technologiczno-Przyrodniczego w Falentach, przygotowano z nich wyciągi wodne. Następnie oznaczono: N-NH₄, N-NO₃, P-PO₄. Pog metodą analizy przepływowej z segmentowanym strumieniem i detekcją spektrofotometryczną za pomocą autoanalyzera przepływowego firmy SKALAR. Ponadto oznaczono: Na, K, Mg, Ca, Fe, Mn, Zn za pomocą metody emisyjnej spektrofotometrii atomowej (UNICAM 939 AAS) oraz odczyn pH – metodą potencjometryczną (HACH multi-parameterportablemeter HQ40D).

Uzyskane wyniki poddano analizom statystycznym w programie PAST 3. W budowie dendrogramów przyjęto odległość euklidesową i UPGMA jako metodę grupowania. Analizę PCA zastosowano jako macierz do obliczeń wariancje-kowariancje.

2. Wyniki i dyskusja

Woda jest podstawowym elementem warunkującym życie na ziemi. Polska posiada bardzo małe zasoby wodne w Europie, dlatego niezwykle ważna jest racjonalna gospodarka nimi w skali kraju (Małecka, Staszewski 2015). Badania przeprowadzone na początku XXI wieku wykazały, że 40% wód podziemnych posiada niezadawalającą lub złą klasę jakości, natomiast wody powierzchniowe o złych parametrach stanowiły ponad 66%. Niestety duży odsetek wód płynących nadal nie jest objętych monitoringiem (Gromiec i in. 2014). Działalność rolnicza przyczynia się do transportu związków biogennych do wód, które w nadmiernej ilości prowadzą do ich eutrofizacji. W Kodeksie Dobrej Praktyki Rolniczej jedną z możliwości ochrony wód przed spływami powierzchniowymi są strefy buforowe, które hamują oraz redukują ilość zanieczyszczeń przemieszczających się do zbiorników wodnych (Izydorezyk i in. 2015).

W prowadzonych badaniach na niewielkich zbiornikach wodnych zlokalizowanych na obszarach rolniczych zanotowano zróżnicowanie w wynikach jakości wód powierzchniowych. W tabeli 1 przedstawiono wartości średnie dla trzech sezonów badawczych – wiosny, lata i jesieni 2019 roku, oszacowanych dla 6 zbiorników wodnych – trzech z dużą (oczka nr 1, 2 i 5) i trzech z małą (oczka nr 3, 4 i 6) strefą buforową. Przedstawione wskaźniki można podzielić na biogeny (N-NH₄, N-NO₃, P-PO₄), mikroelementy (Na, K, Mg, Ca) oraz metale ciężkie (Fe, Mn i Zn).

Porównując między sobą wyniki prób wody (wody powierzchniowe z oczek wodnych) oraz prób gleby (ze zlewni bezpośredniej każdego oczka wodnego) dla poszczególnych wskaźników, stwierdzono zależność, iż w glebie znajdowała się większa ilość związków biogennych oraz pozostałych parametrów w porównaniu do zawartości w wodach oczek, nie uwzględniając w tym odczynu pH. Wskazywać by to mogło na efektywne wychwytywanie pierwiastków przez rośliny strefy buforowej, co jest istotne szczególnie w przypadku biogenów (w 6 oczkach, jedynie w oczku nr 6 w przypadku azotu amonowego większe stężenie zanotowano w wodzie niż w glebie). Wielu autorów podaje, że zatrzymywanie większości pierwiastków w strefie buforowej poprzez porastającą roślinność, gdzie pasy buforowe oddzielają pola uprawne od oczek wodnych, wpływa na ograniczenie działania czynników zewnętrznych, a tym samym reguluje warunki środowiskowe na danym obszarze (Gałczyńska i in. 2009; Koc i in. 2004; Szyperek 2005). Wesołowski i Brysiewicz (2014) określają skuteczność akumulacji substancji biogennych w różnych gatunkach roślin stanowiących roślinność szuwarową porastającą oczka wodne. Według Wysockiej-Czubaszek i Banaszuka (2003) pas turzyc i innych traw o szerokości 6 m redukuje ilość azotu w wodzie o 47%, a 10 m o prawie 100%. Obecność pasa zadrzewień o szerokości około 20 m zmniejsza ilość dopływających do zbiornika biogenów o ponad 70–80% (Szpakowska i in. 2019; Budzyńska i in. 2019).

W badaniu analiza wyników wykazała wyższe zawartości potasu, wapnia i magnezu w oczkach nr 2, 3 oraz 6. Podczas badań terenowych zauważono również, że oczka te

charakteryzowały się większym stopniem porośnięcia w porównaniu do pozostałych zbiorników. Dodatkowo powyższe zbiorniki wodne wyróżniały się najniższym poziomem lustra wody. Należy nadmienić, że zbiornik nr 6 w okresie letnim całkowicie wysychł. Gałczyńska i in. (2013) w swoich wynikach wykazali, że wysoka zawartość K, Ca oraz Mg wpływa znacząco na wzrost makrofitów, co w przyszłości, przy niskim poziomie wód, bądź ich braku może sprzyjać zarastaniu zbiorników wodnych i prowadzić do ich zanikania.

Uwolnione z detrytus biogeny umożliwiają szybszy wzrost strefy buforowej w zbiornikach (pas trzciny, roślinności zanurzonej), ale także przybrzeżnej przez wodę wnikałą w głąb (Zalewski 2020). Pamiętać należy także o tym, że w zlewni rolniczej, jaką charakteryzują się badane oczka wodne, głównym medium doprowadzającym biogeny do wody są spływy powierzchniowe. Jak twierdzi Zalewski (2020), doskonałym przeciwdziałaniem przed spływami są strefy ekotonowe, które w najlepszym wypadku powinny mieć 10–30 m szerokości, jednakże już przy strefie wynoszącej około 7 m, widoczne jest ograniczenie ich następstw.

W powyższym badaniu nie stwierdzono wysokich zawartości metali ciężkich, co mogło wynikać ze znacznej obecności wapnia, który hamuje przemieszczanie się metali ciężkich w glebie i ogranicza ich przyswajalność u roślin (Burczyk i in. 2015).

Szydłowski oraz Podlasińska (2016) w swoich badaniach podkreślają znaczenie osadów dennych w ekosystemach wodnych, które pełnią rolę miejsca gromadzenia wszelkich pierwiastków. Wielu autorów podkreśla, iż skład fizykochemiczny osadów dennych w dużym stopniu uzależniony jest od sposobu oraz rodzaju zagospodarowania zlewni, a ponadto należy brać pod uwagę rodzaj utworów glebowych, z których zbudowana jest zlewnia małych zbiorników wodnych (Sidoruk, Potasznik 2013; Szydłowski 2016; Kazimierowicz, Kazimierowicz 2014). W badaniach Smal i in. (2012) wykazano, że w ocenie stopnia antropopresji wywierającej wpływ na dany ekosystem istotne znaczenie ma analiza chemiczna materii zalegającej na dnie badanych oczek wodnych. Ilość składników biogenych, które gromadzą się w wodach śródpolnych oczek, jest zależna od kształtowania się spływu powierzchniowego i często poziomy ich stężenia wahają się w dużych granicach.

Pietrzak (2014) dostrzegł, że ilość biogenów jest w dużym stopniu uzależniona od cyklu pomiarowego, a ich gromadzenie w wodach oczek może być zróżnicowane. Wynika to ze znacznej zależności pomiędzy usytuowaniem śródpolnych oczek wodnych, a wykorzystywaniem terenów uprawnych, na których się znajdują. W efekcie na każdy niewielki zbiornik wodny oddziałują różnorodne zespoły czynników, które kształtują ich warunki fizykochemiczne. Znaczna ilość oczek wodnych ulegających powolnemu procesowi eutrofizacji potwierdza zatem ich skuteczność w tworzeniu barier dla migracji biogenów.

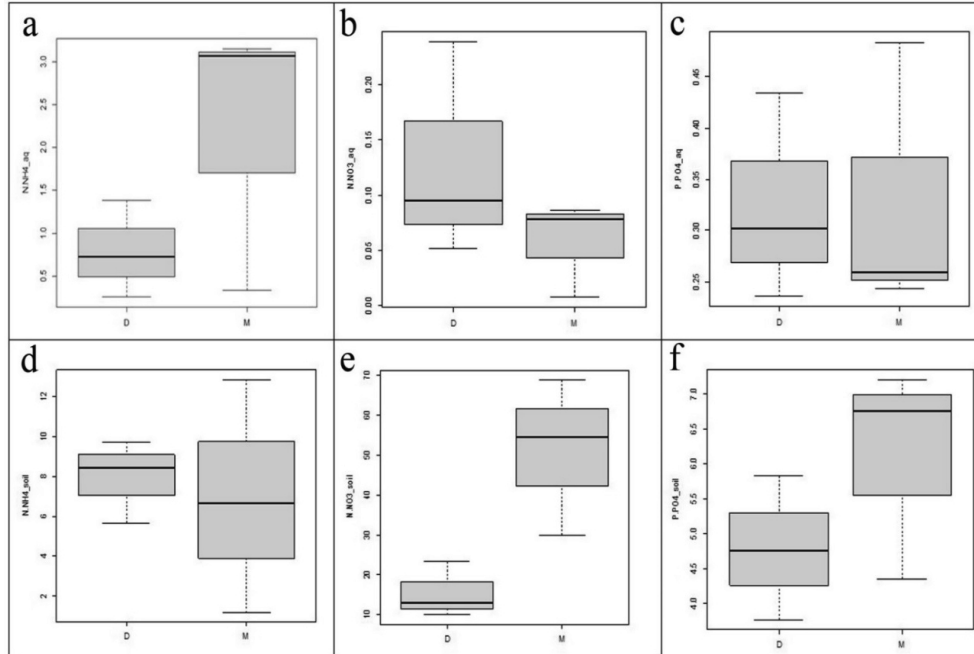
Szczegółowe analizy porównawcze dla oczek wodnych o dużej i małej strefie buforowej, bez podziału na oczka, przeprowadzono wyłącznie dla biogenów – N–NO₃, N–NH₄ i P–PO₄ i przedstawiono na rysunku 2. W toku analizy stwierdzono, że w przypadku azotu amonowego (w wodzie) zanotowano większe stężenia powyższych związków w oczkach o małej strefie buforowej (szczególnie oczko nr 6 i 3). W przypadku azotu azotanowego w wodzie,

największą zawartość ($0,24 \text{ mg NO}_3 \cdot \text{dm}^{-3}$) zanotowano w zbiorniku o dużej strefie buforowej (oczko nr 2), przy jednocześnie najniższej zawartości N-NO₃ w przylegających do zbiornika glebach. Tłumaczyć to można intensywnym zarastaniem zbiornika roślinnością wodną, a w okresach wiosenno-letnich okresowym podsychaniem części oczka wodnego. Zawartości fosforu fosforanowego w wodzie były zbliżone.

Tabela 1. Średnie wartości współczynników chemicznych wody powierzchniowej z oczek wodnych i gleb z terenów zlewni bezpośredniej

Oczko wodne		1	2	3	4	5	6
x		D	D	M	M	D	M
pH	woda	7,5	7,27	6,86	7,68	7,18	6,37
	gleba	5,82	6,28	5,42	7,43	6,48	7
N-NH ₄ [mg/dm ³]	woda	0,73	1,38	3,07	0,33	0,26	3,15
	gleba	9,75	8,46	12,89	6,64	5,66	1,17
P-PO ₄ [mg/dm ³]	woda	0,24	0,3	0,24	0,26	0,43	0,48
	gleba	5,83	4,76	7,21	6,75	3,77	4,35
N-NO ₃ [mg/dm ³]	woda	0,1	0,24	0,09	0,08	0,05	0,01
	gleba	23,44	10,03	54,55	68,9	13,18	30,08
Na [mg/dm ³]	woda	13,34	12,51	7,72	5,86	5,67	6,2
	gleba	30,38	28,69	35,03	89,29	31,47	50,43
K [mg/dm ³]	woda	26,04	18,17	19,62	26,98	2,76	22,6
	gleba	58,28	24,41	63,27	113,5	34,73	97,76
Mg [mg/dm ³]	woda	9,93	19,91	6,35	4,29	3,65	6,88
	gleba	2,33	0,84	9,75	10,07	1,72	5,4
Ca [mg/dm ³]	woda	27,61	42,83	12,92	16,58	17,22	10,39
	gleba	5,61	2,48	19,94	48,78	8,39	18,53
Fe [mg/dm ³]	woda	0,06	0,03	5,41	0,14	0,17	3,07
	gleba	8,54	3,2	7,12	6,93	4,68	3,78
Mn [mg/dm ³]	woda	0	0	0,04	0,01	0,01	0,01
	gleba	0,32	0,12	1,7	0,33	0,19	0,11
Zn [mg/dm ³]	woda	0,01	0,01	0,02	0,01	0,02	0,01
	gleba	0,11	0,08	0,19	0,11	0,1	0,07

x – wielkość strefy buforowej (D – duża, M – mała).



Rysunek 2. Różnice pomiędzy zawartością biogenów w wodzie i w glebie oczek wodnych w zależności od wielkości strefy buforowej (D – duża strefa buforowa, M – mała strefa buforowa)

Przeprowadzono dwie osobne analizy PCA dla czynników fizykochemicznych oznaczonych w próbach wody oraz gleby. Wyboru komponentu dokonano na podstawie wyników przedstawionych w tabelach 2 i 3, przy czym najwyższe wartości wyjaśnianej zmienności charakteryzowały pierwsze 3 komponenty.

W analizie PCA dla gleby wykorzystano komponent pierwszy i drugi (zgodnie z tabelą 2). Na podstawie wykresu z rysunku 2 stwierdzić można, że oczko 3 wyróżnia się wartością azotu azotanowego (najwyższa wartość tego pierwiastka – tabela 1). Oddalone od pozostałych oczko 4 charakteryzuje się najwyższymi wartościami wszystkich pierwiastków. Odrębność tę potwierdza także dendrogram podobieństw przedstawiony na rysunku 5.

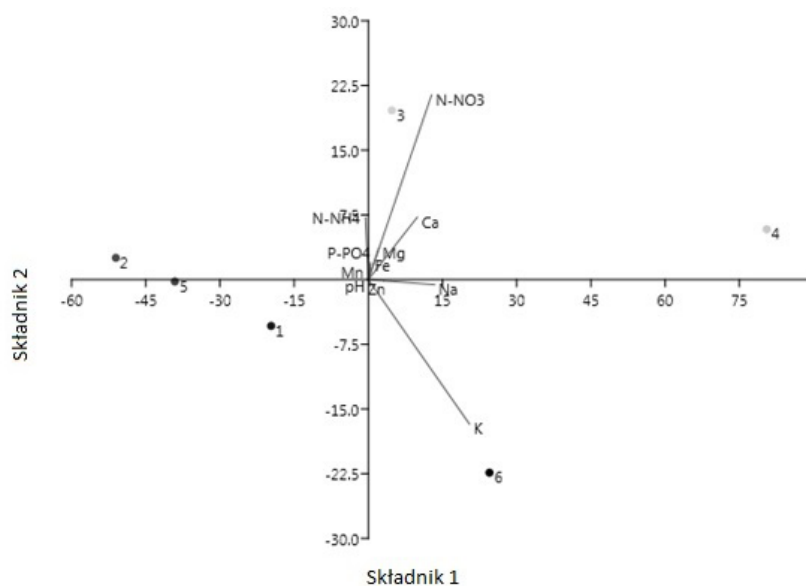
Wykres PCA dla wskaźników wyizolowanych z wody wskazuje istotność wapnia Ca dla oczka 2 (jest to także najwyższa wartość tego pierwiastka – tabela 1), a dla zbiornika 1 najwyższa jest zawartość potasu K, sodu Na i magnezu Mg, a także wapnia (dla sodu i magnezu w wodzie oczka 1 stwierdzono najwyższą zawartość tych pierwiastków, a dla potasu i wapnia drugą co do wysokości – tabela 1). Istotność wapnia dla oczka 2 zaznacza się także na dendrogramie podobieństw w postaci oddzielenia się tego oczka od pozostałych (rys. 6). Tutaj także wykorzystano komponent pierwszy i drugi zgodnie z wartościami z tabeli 3.

Tabela 2. Wartości istotności komponentów PCA dla czynników fizykochemicznych z gleby

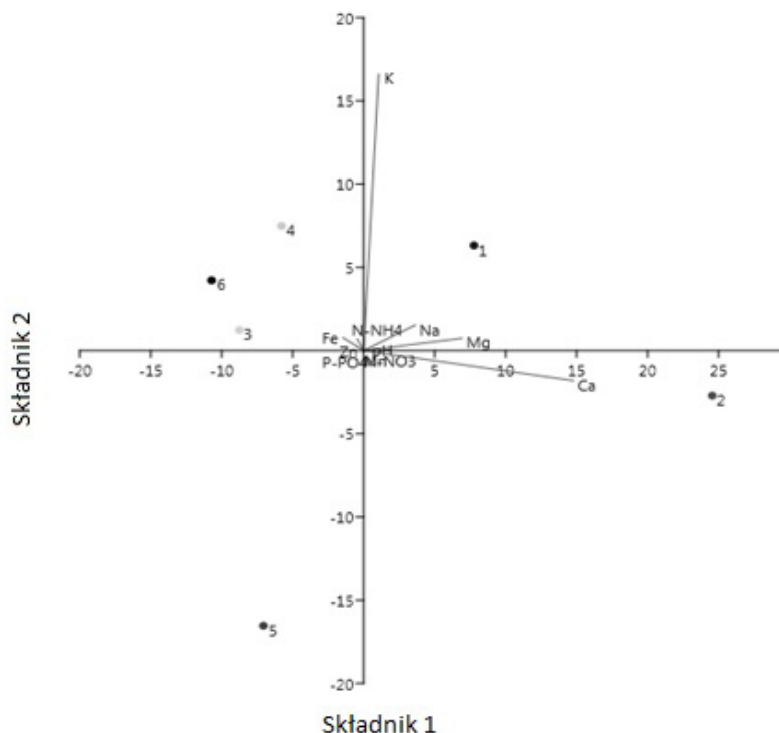
PC	Wartość własna	Zmienność [%]
1	2 326,42000	88,137000
2	190,94000	7,233800
3	114,63700	4,343100
4	6,02907	0,228410
5	1,51791	0,057507

Tabela 3. Wartości istotności komponentów PCA dla czynników fizykochemicznych z wody

PC	Wartość własna	Zmienność [%]
1	187,649	67,095
2	79,213	28,323
3	9,118	3,260
4	3,014	1,078
5	0,683	0,244



Rysunek 3. PCA dla wartości średnich współczynników z gleby

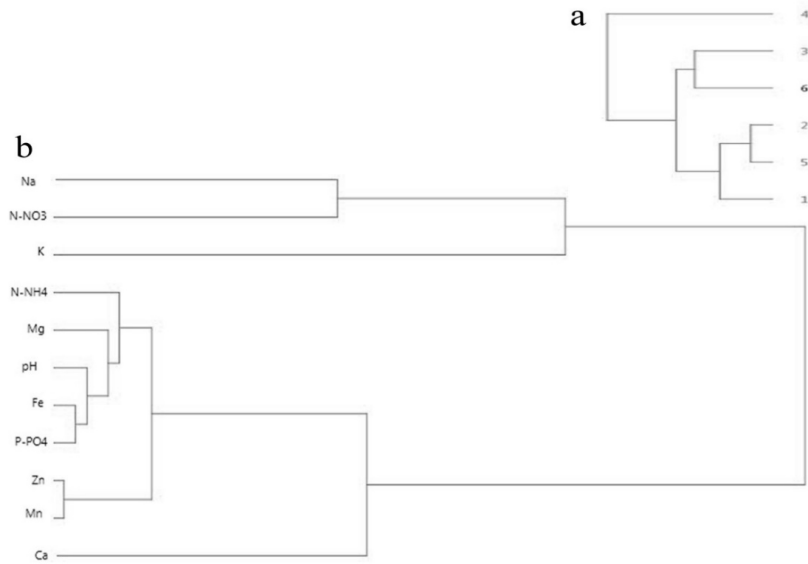


Rysunek 4. PCA dla wartości średnich współczynników z wody

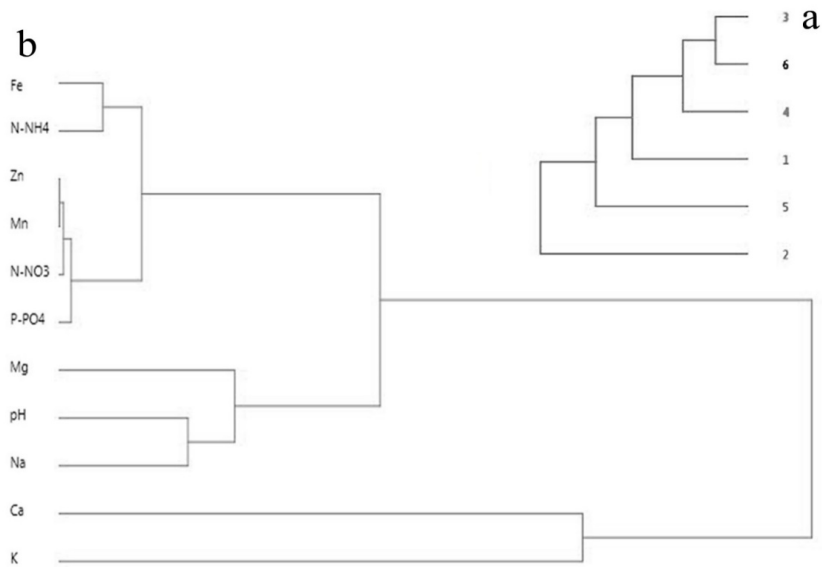
Na dendrogramie podobieństw dla gleb oddzielone od pozostałych wskaźników są sód, potas i azot azotanowy. Z drugiej grupy wydzielony jest wapń (rys. 5).

Dendrogramy podobieństw dla wody bardzo dobrze korespondują ze sobą – oddzielone od pozostałych oczko 2 i znajdujące się w środku oczko 1, a oddzielone od pozostałych zbiorników (oczka 4, 6 i 3), charakteryzują się wysokimi wartościami dla wapnia i potasu, które na dendrogramie podobieństw między pierwiastkami są oddzielone od pozostałych (rys. 6).

Powyższe analizy wykazały zróżnicowanie w zawartościach związków biogenych oraz makro- i mikroskładników wód powierzchniowych oczek wodnych w zależności od wielkości stref buforowych. Niejednoznaczne wyniki określające możliwości zatrzymywania spływających z gruntów ornych związków chemicznych przez roślinność szuwarową, świadczą, że na jakość wody w astatycznych zbiornikach wodnych ma wpływ wiele dodatkowych czynników środowiskowych, takich jak podsychanie oczek wodnych, hydrografia czy intensywność zarastania przez makrofity. Strefa buforowa w postaci zadrzewień oraz roślinności szuwarowej chroni wody z zbiornikach, jednakże, co potwierdzają przeprowadzone badania, nie zapewniają pełnej ochrony oczek wodnych przed zanikaniem.



Rysunek 5. Dendrogram podobieństw pomiędzy oczkami wodnymi (a) i współczynnikami fizykochemicznymi dla wartości uzyskanych z gleby (b)



Rysunek 6. Dendrogram podobieństw pomiędzy oczkami wodnymi (a) i współczynnikami fizykochemicznymi dla wartości uzyskanych z wody (b)

Wnioski

1. W przeprowadzonych badaniach stwierdzono większe zawartości badanych związków chemicznych w glebach zlewni rolniczych niż w wodach powierzchniowych oczek wodnych, co wskazywać by mogło na częściowe wychwytywanie pierwiastków przez roślinność stref buforowych.
2. Wielkość strefy buforowej oddzielającej wody powierzchniowe od użytkowanych rolniczo gruntów ma znaczenie dla zmniejszenia dopływu do wód biogenów i innych związków do oczek wodnych, jednakże nie jest wystarczająca w ich ochronie.
3. Zanikające z krajobrazu rolniczego Polski śródpolne oczka wodne powinny zostać objęte programami ochronnymi, gdyż brak stref buforowych w dobie intensyfikacji rolniczej będzie skutkowało wzrostem eutrofizacji i biodegradacją.

Literatura

- Aftek-Starczewska A., Starczewski K., Ługowska M. 2010: Różnorodność florystyczna zbiorowisk śródpolnego obiektu z oczkiem wodnym w Bujalach Mikoszach. *Fragmenta Agronomica*, 2(27), s. 7–18.
- Brysiewicz A., Wesołowski P. 2015: Wpływ nawożenia fosforowego na skład chemiczny wód w śródpolnym oczku wodnym oraz w wodzie gruntowej z przyległych terenów rolniczych. *Przemysł chemiczny*, 10, s. 1850–1853.
- Brysiewicz A., Wesołowski P., Bonisławska M. 2019: Content of selected macro- and microelements in surface water of in-field ponds and in groundwater from adjacent agricultural areas. *Journal of Elementology*, 1(24), s. 207–219.
- Budzyńska A., Dondajewska-Pielka R., Rosińska J., Kozak A., Kowalczevska-Madura K. 2019: Ekosystemy wodne: funkcjonowanie, znaczenie, ochrona i rekultywacja. Poznań: Bogucki Wydawnictwo Naukowe, s. 153–165.
- Burczyk P., Rawicki K., Gałczyńska M., Brysiewicz A., Marciniak A. 2015: Ocena stężenia magnezu i wapnia w wodach gruntowych na terenach rolniczych Pomorza Zachodniego. *Woda Środowisko Obszary Wiejskie*, 15(3), s. 15–23.
- Cymes I., Cymes I., Dragańska E., Szymczyk S. 2010: The influence of weather conditions on mid-field ponds situated in a reclaimed area in Śepopolska Plain. *Oceanological and Hydrobiological Studies*, 1(39), s. 75–84.
- Gałczyńska M., Burczyk P., Gamrat R. 2009: Próba określenia wpływu rodzaju uprawy na stężenie związków azotu i fosforu w wodach wybranych śródpolnych oczek wodnych na Pomorzu Zachodnim. *Woda Środowisko Obszary Wiejskie*, 9(4), s. 47–57.
- Gałczyńska M., Gamrat R., Burczyk P., Horak A., Kot M. 2013: Wpływ antropopresji i trwałości lustra wody na wielkość stężenia wybranych makroskładników pokarmowych w wodach śródpolnych oczek. *Woda Środowisko Obszary Wiejskie*, 13(3), s. 41–54.
- Goławski A., Kasprzykowski Z. 2007: Hydrobotaniczna charakterystyka śródpolnych oczek wodnych w dolinie rzeki Wisły na odcinku Sandomierz-Tarnobrzeg. *Wydawnictwo Akademii Podlaskiej*, s. 104–108.
- Gromiec M., Sadurski A., Zalewski M., Rowiński P. 2014: Zagrożenia związane z jakością wody. *Nauka* 1, s. 99–122.
- Grzelak M., Janyszek S., Murawski M., Kniola A. 2016: Różnorodność florystyczna i walory przyrodnicze eutroficznego śródpolnego oczka wodnego. *Łąkarstwo w Polsce*, 19, s. 109–120.
- Izidorczyk K., Michalska-Hejduk D., Frątczak W., Bednarek A., Łapińska M., Jarosiewicz P., Zalewski M. 2015: Strefy buforowe i biotechnologie ekohydrologiczne w ograniczaniu zanieczyszczeń obszarowych. *Europejskie Regionalne Centrum Ekohydrologii Polskiej Akademii Nauk*, s. 56–61.
- Kalbarczyk R. 2003: Oczka wodne w agrosystemach. *Aura*, 12, s. 24–25.

- Kazimierowicz Z., Kazimierowicz J. 2014: Badania zawartości metali ciężkich w zlewni rzeki Biebrzy i jej trzech dopływów. *Inżynieria Ekologiczna*, 40, s. 25–32.
- Koc J., Szyperek U. 2004: Skuteczność barier biogeochemicznych w ograniczaniu spływu azotu w środowisku rolniczym. *Annales Universitatis Mariae Curie-Skłodowska, Sectio E. Agricultura*, 59(1), s. 93–100.
- Małecka I., Staszewski Z. 2015: Woda czynnikiem życia każdego organizmu. *Zeszyty Naukowe, Inżynieria Łądowa i Wodna w Kształtowaniu Środowiska*, 13, s. 101–107.
- Maślanko W., Kułak A., Sender J. 2010: Hydrobotaniczna charakterystyka śródpolnych oczek wodnych w dolinie rzeki Wisły na odcinku Sandomierz–Tarnobrzeg. *Lublin: Wydawnictwo Uniwersytetu Rolniczego w Krakowie*, s. 369–376.
- Nagengast B., Kuczyńska-Kippen N. 2013: The effect of human impact on the vegetation of small water bodies in an agricultural landscape. *TEKA commission of protection and formation of natural environment*, 10, s. 274–283.
- Nowicki Z. 1997: Problematyka degradacji oczek wodnych na Pojezierzu Mazurskim. *Melior. Inż. Środ.*, 2(19), s. 365–371.
- Pietrzak S. 2014: Śródpolne oczka wodne jako pułapki biogenów. *Zagadnienia Doradztwa Rolniczego*, 2, s. 89–98.
- Pulido M., Torreño A. A., Barrera-González J., Robina-Ramírez R., Abdennour M. A. 2020: Identifying problems in watering ponds with different purposes. *Environments*, 7(63), s. 1–17.
- Shukla U.N., Singh S., Srivastava V. K. 2020: Climate change and agriculture. *Kisan World*, 12(39), s. 41–43.
- Sidoruk M., Potasznik A. 2013: Ocena stanu zanieczyszczenia ołowiem, cynkiem i chromem osadów dennych jeziora Sunia. *Proceedings of ECOpole*, 7(2), s. 713–720.
- Smal H., Ligeża S., Baran S. 2012: Odczyn i właściwości sorpcyjne osadów dennych zalewu Zembrzyckiego i zbiornika Brody Hżeckie. *Inżynieria Ekologiczna*, 29, s. 174–181.
- Symonides E. 2010: Znaczenie powiązań ekologicznych w krajobrazie rolniczym. *Woda Środowisko Obszary Wiejskie*, 10(4), s. 249–263.
- Szapakowska B., Pajchrowska M., Świerk D. 2019: Funkcjonowanie drobnych zbiorników wodnych w krajobrazie rolniczym. *Poznań: Bogucki Wydawnictwo Naukowe*, s. 153–165.
- Szydłowski K., Podlasińska J. 2016: Charakterystyka osadów dennych oczek wodnych. *Inżynieria Ekologiczna*, 47, s. 42–45.
- Szyperek U. 2005: Rola oczek wodnych jako bariery biogeochemicznej dla spływów wapnia i magnezu ze środowiska rolniczego. *Journal of Elementology*, 10(4), s. 1083–1090.
- Wesołowski P., Brysiewicz A. 2014: Zdolność przybrzeżnej roślinności szuwarowej śródpolnych oczek wodnych do kumulacji makro- i mikroskładników. *Woda Środowisko Obszary Wiejskie*, 14(1), s. 111–119.
- Wysocka-Czubaszek A., Banaszuk P. 2003: Migracja składników azotowych i bariery biogeochemiczne w zalewowych dolinach rzecznych na przykładzie doliny Górnej Narwi. *Acta Agrophysica*, 2(1), s. 349–354.
- Zalewski M. 2020: *Ekohydrologia*. Warszawa: Wyd. Nauk. PWN.

Analiza kosztorysowa w planowaniu inwestycji nawodnieniowej w terenach zieleni

Streszczenie. Celem pracy było przedstawianie analizy kosztorysowej na reprezentatywnym przykładzie wykonania fragmentu systemu automatycznego nawadniania trawnika dywanowego z wykorzystaniem wynurzalnych zraszaczy statycznych. Planowanie inwestycji w formie kosztorysu inwestorskiego daje możliwość sporządzenia opracowania przypuszczającego wartość wykonanych prac i oceny możliwości finansowych w planowaniu inwestycji w terenach zieleni. Wstępna analiza parametrów technicznych źródła wody oraz dobór komponentów stosowanych w nawodnieniach daje możliwość zaprojektowania optymalnych warunków nawodnieniowych z uwzględnieniem ekonomicznych aspektów inwestycji. Kosztorys inwestycji nawodnieniowych w terenach zieleni urządzonej, cechuje się innym charakterem niż kosztorys nawadniania pól uprawnych, dla których analizy ekonomiczne oparte są na opłacalności produkcji. Nawadnianie terenów zieleni ma wyłącznie charakter zaspokajania potrzeb społeczno-zdrowotnych, psychicznych i wizualnych obiektów architektury zieleni.

Słowa kluczowe: kosztorysowanie, nawadnianie, dysze rotacyjne, tereny zieleni

Cost analysis in the planning of the irrigation investment in green areas

Abstract. The aim of the work was to present a cost estimate analysis on a representative example of the automatic irrigation system with the use of emerging static sprinklers of a fragment of a carpet lawn. Planning investments in the form of an investor's cost estimate gives the opportunity to prepare a study assuming the value of the works performed and to assess the financial possibilities in planning investments in green areas. Initial analysis of the technical parameters of the water source and the selection of components used in irrigation, make it possible to design optimal irrigation conditions, taking into account the economic aspects of the investment. The cost estimation of irrigation investments in landscaped green areas is of a different nature than the cost estimation of irrigation of arable lands, the economic analyzes of which are based on the cost-effectiveness of production. Irrigation of green areas is only intended to meet the social, health, mental and visual needs of green architecture.

Keywords: costing, irrigation, rotating nozzles, green areas

¹ Uniwersytet Technologiczno-Przyrodniczy w Bydgoszczy

Wprowadzenie

Zieleń jest niezwykle ważnym elementem zrównoważonego rozwoju. Pełni funkcje: ekologiczne, techniczne i zdrowotne, z których najważniejsze to poprawa warunków aerasanitarnych, obniżenie temperatury w ramach „miejskiej wyspy ciepła”, infiltracja wód opadowych i tłumienie hałasu (Czerwieniec, Lewińska 2000). Przekształcanie miast zdegradowanych lub zaniedbanych w bardziej zielone ośrodki miejskie jest odpowiedzią na problemy środowiskowe, społeczne i ekonomiczne. Architekci coraz częściej zwracają uwagę na istotne powiązanie idei miast zielonych z koncepcją urbanistyczną miasta ogrodu. Obecnie zwraca się jednak uwagę nie tylko na tworzenie terenów zieleni, ale również na ograniczenie emisji pyłów i gazów, wykorzystanie odnawialnych źródeł energii, ograniczenie hałasu i odpadów, wdrażanie transportu zrównoważonego i promowanie zdrowego odżywiania (Hulicka 2015).

Jedną z wielu robót ogólnobudowlanych w terenach zieleni urządzonej wymagających znacznych nakładów pracy oraz środków finansowych jest wykonanie instalacji systemów automatycznego nawadniania. Celem montażu systemów nawadniających w terenach zieleni jest przede wszystkim racjonalne gospodarowanie wodą poprzez dostosowane dawek wody do potrzeb i wymagań roślin co wpisuje się w definicję *gospodarowania krajobrazem* mówiącą o działaniach podejmowanych w celu utrzymania krajobrazu, odpowiednio ukierunkowując i harmonizując jego zmiany wynikające z procesów społecznych, gospodarczych i środowiskowych z zasadami trwałego i zrównoważonego rozwoju (Garbulewski i in. 2015). Zastosowanie skutecznych technik i terminów nawadniania umożliwia ograniczenie zużycia wody oraz prawidłową regulację i konserwację urządzeń nawadniających. Niedobór wody wpływa w niekorzystny sposób nie tylko na wygląd roślin, ale i na spadek jej wartości użytkowej (Materiały szkoleniowe 2018). Kosztorys inwestycji nawodnieniowych w terenach zieleni urządzonej cechuje się innym charakterem niż kosztorys stosowany w rolnictwie. Kosztorys nawadniania pól uprawnych bazuje na analizie ekonomicznej opartej na wzroście wartości produkcji uzyskanej poprzez zastosowane nawadnianie, dlatego mają charakter bezpośrednio produkcyjny (Szoegge Manteuffel 2002). Nawadnianie terenów zieleni ma charakter zaspokajania potrzeb społeczno-zdrowotnych, psychicznych i wizualnych obiektów architektury zieleni. Tereny zieleni stanowią jeden z elementów układu przestrzeni miejskiej niezbędny dla prawidłowego rozwoju człowieka i pełnią funkcję wypoczynkową, estetyczną, osłonową i zdrowotną (Chojecka 2014). Jak wynika z ustawy o planowaniu przestrzennym (z dn. 27 marca 2003 r.) przestrzeń publiczna to „obszar o szczególnym znaczeniu dla zaspokojenia potrzeb mieszkańców, poprawy jakości ich życia i sprzyjający nawiązywaniu kontaktów społecznych ze względu na jego położenie oraz cechy funkcjonalno-przestrzenne”. Analizując tą definicję możemy wywnioskować, że przestrzeń publiczna jest szczególnym miejscem z punktu widzenia oddziaływania na potrzeby społeczne i zdrowotne mieszkańców, dlatego dbanie o aspekty wizualne w zagospodarowanych terenach zieleni (choćby poprzez pielęgnowanie trawników) przynosi pozytywne rezultaty w poprawie

jakości życia mieszkańców. Szacuje się, że trawniki w miastach stanowią ponad 50% terenów zieleni. Umożliwiają one właściwą kompozycję zieleni z architekturą i wskutek tego zakładane są zarówno na terenach zabudowanych, jak i otwartych (Materiały konferencyjne 2019). Niestety coraz częstszym problemem z jakim spotykamy się w Polsce są małe koszty przeznaczane na utrzymanie terenów zieleni powodujące, że wiele zakładanych trawników w ciągu kilku lat ulega zachwaszczeniu (Trzaskowska, Adamiec 2012) i zdegradowaniu. Utrzymanie trawników w optymalnej kondycji wymaga szeregu zabiegów agrotechnicznych, w tym nawożenia i nawadniania. Narzędziem ograniczającym koszty utrzymania jest właśnie system automatycznego nawadniania, który po dostosowaniu (np. użycie fertygatora) może służyć jako infrastruktura do aplikowania nawozów mineralnych. Sposób ten nazywamy fertygacją. Z roku na rok obserwujemy też wzrost kosztów wody, zarówno wodociągowej jak i pobieranej z własnych ujęć, co ma bezpośredni wpływ na wzrost cen energii elektrycznej oraz opłat za dostęp do wód. Dlatego sporządzanie analiz kosztorysowych w planowaniu inwestycji nawodnieniowych staje się niezbędnym elementem w procesach urządzania i pielęgnacji terenów zieleni celem racjonalnego gospodarowania dostępnymi środkami finansowymi.

W pracy podjęto próbę analizy kosztorysowej na przykładzie fragmentu trawnika dywanowego z zastosowaniem wynurzanych zraszaczy statycznych z dyszami rotacyjnymi Hunter MP Rotator i Rain-Bird V-RAN.

I. Kosztorys inwestorski w opracowaniach projektowych inwestycji nawodnieniowych

Kosztorysy sporządza się na różnych etapach danej inwestycji. W początkowej fazie prac projektowych kosztorys podaje nam wartość przybliżoną całego zlecenia. W miarę postępu prac i uszczegółowienia inwestycji jej koszt określa się z większą dokładnością (Jóźwik-Jaworska 2012). Najpopularniejszym rodzajem kosztorysu jest kosztorys inwestorski, który sporządza zamawiający (inwestor), w celu określenia przypuszczalnej wartości wykonania wszystkich prac (całej inwestycji), a jednocześnie oceny swoich możliwości finansowych planowania inwestycji. Zgodnie z Rozporządzeniem Ministra Infrastruktury (z 18 maja 2004 r) podstawę do sporządzania kosztorysu inwestorskiego stanowią:

- ◆ dokumentacja projektowa,
- ◆ specyfikacja techniczna wykonania i odbioru robót budowlanych,
- ◆ założenia wyjściowe do kosztorysowania,
- ◆ ceny jednostkowe robót podstawowych.

Analizując rozporządzenie w przypadku wykonania instalacji nawodnieniowej, inwestor może samodzielnie wykonać plan zagospodarowania terenu w celu określenia obszaru podlegającego inwestycji nawodnieniowej. Wykonując przedmiar, należy opracować zastawienie wszystkich robót w kolejności technologicznej ich wykonania wraz ze szczegółowym

opisem. W trakcie wykonywania przedmiaru robót, należy zwrócić szczególną uwagę na założenia wyjściowe inwestora (np. tymczasowe zdjęcie warstwy humusowej i przetransportowanie jej na konkretną odległość) oraz przeszkody terenowe mogące utrudnić prace wraz z montażem instalacji automatycznego nawadniania. Katalogi Nakładów Rzeczowych nie uwzględniają robót obejmujących typowych instalacji systemów automatycznego nawadniania, dlatego powszechną praktyką jest przypisywanie najbardziej przybliżonych pozycji katalogowych w branżowych Katalogach Nakładów Rzeczowych. Ponadto kalkulacja jednostkowa cen robocizny, materiału i sprzętu musi odbywać się w oparciu o aktualne, rynkowe stawki nakładów rzeczowych wyliczonych na podstawie kalkulacji własnej. Na rysunku 1 przedstawiono przykład przedmiaru robót instalacji systemu automatycznego nawadniania w oparciu o branżowe katalogi nakładów rzeczowych i kalkulację własną.

1	Element	INSTALACJA NAWADNIAJĄCA.		
1	KNR 708/203/1	Układ blokowy systemu hydraulicznej regulacji ciągłej, ciśnienia - ANALOGIA (urządzenia sterujące w studni odwadniającej i zewnętrzne - dla systemu nawadniania) R = 0,400 M = 1,000 S = 1,000	układ	1
2	KNR 201/701/2 (1)	Ręczne kopanie rowów dla rur, szerokość dna do 0.4 m, kategoria gruntu III, głębokość rowu do 0.6 m R = 0,700 M = 1,000 S = 1,000		
	Wyliczenie ilości robót:			
	uśredniony dla głęb.0,3-0,5m	179,0	179,0000	
	uśredniony dla głęb.0,5-0,6m	473,0	473,0000	
		RAZEM:	652,0000 m	652,0
3	KNR 201/701/5 (2)	Ręczne kopanie rowów dla rur, szerokość dna do 0.6 m, kategoria gruntu III, głębokość rowu do 0.8 m R = 0,700 M = 1,000 S = 1,000		
	Wyliczenie ilości robót:			
	dla głęb.0,6-0,8m	61,0	61,0000	
		RAZEM:	61,0000 m	61,0
4	KNRW 219/306/1 (2)	Rury ochronne (osłonowe), do Fi 50 mm, PVC		
	Wyliczenie ilości robót:			
	DN 32	3,0	3,0000	
	DN 40	3,0*2+4,0*2+5,0*2	24,0000	
	DN 50	3,0*2+3,5*2+4,0*2+4,5*2+6,5*2	43,0000	
		RAZEM:	70,0000 m	70,0
5	KNRW 215/103/2	Rurociągi stalowe ocynkowane o połączeniach gwintowanych, w wykopie, Dn 20 mm - ANALOGIA (rury z LDPE na złączki wciskane i skręcane)	m	89,0
6	KNRW 215/103/3	Rurociągi stalowe ocynkowane o połączeniach gwintowanych, w wykopie, Dn 25 mm - ANALOGIA (rury z LDPE na złączki wciskane i skręcane)	m	106,0
7	KNRW 215/103/4	Rurociągi stalowe ocynkowane o połączeniach gwintowanych, w wykopie, Dn 32 mm - ANALOGIA (rury z LDPE na złączki wciskane i skręcane)	m	321,0
8	KNRW 215/104/1	Rurociągi z PVC łączone metodą klejenia, w wykopie, Fi_zew. 20 mm - ANALOGIA (przewód łączący elastyczny)	m	197,0
9	KNR 211/915/1	Montaż elementów różnych deszczowni przenośnych, zraszacze - ANALOGIA (zraszacze systemowe wynurzalne + złączki systemowe) R = 1,500 M = 1,000 S = 1,000		
	Wyliczenie ilości robót:			
		32+26	58,0000	
		RAZEM:	58,0000 szt	58
10	Kalkulacja własna	Uruchomienie i regulacja systemu nawadniania oraz opracowanie dokumentacji powykonawczej wraz pomiarami geodezyjnymi oraz przeszkoleniem w zakresie obsługi	kpl	1

Rysunek 1. Fragment przedmiaru robót wykonania instalacji nawadniającej
Źródło: opracowanie własne na podstawie: ZGN dzielnicy Praga-Południe 2018.

2. Analiza kosztorysowa doboru komponentów nawodnieniowych

Obecnie na rynku możemy znaleźć szeroki asortyment urządzeń (przeznaczonych do profesjonalnego nawadniania jak również do użytku amatorskiego) i komponentów stosowanych przy projektowaniu instalacji systemów automatycznego nawadniania. Odpowiednie dopasowanie materiałów musi być poparte analizą parametrów źródła wody oraz indywidualnych uwarunkowań technicznych każdej instalacji. Dzięki wariantowaniu mamy możliwość wyboru najkorzystniejszego zestawu materiałów, które uwzględniają ekonomiczne aspekty inwestycji. Przedstawiona analiza kosztorysowa zakłada wykonanie systemu automatycznego nawadniania fragmentu trawnika dywanowego z wykorzystaniem dysz rotacyjnych wiodących producentów komponentów stosowanych w nawodnieniach.

W opracowanej analizie kosztorysowej, podstawowym kryterium materiałowym różnicującym przyjęte do analizy warianty składowe systemów nawadniających, był wybór rotacyjnych dysz zraszaczy wynurzalnych. W celu stworzenia porównywalnego zapotrzebowania materiałowego, skorzystano z komponentów oferowanych przez dwóch wiodących producentów instalacji nawadniających, najczęściej stosowanych w nawadnianiu trawników dywanowych. Podstawowe informacje dotyczące parametrów źródła wody, powierzchni obiektu będącego podstawą opracowania oraz dobranych dysz rotacyjnych przedstawiono w tabelach 1 i 2. Wybrane dysze rotacyjne charakteryzowały się takim samym promieniem zraszania tj. 5,2 m² (tab. 2), przy różnym wydatku wody oraz opadem na jednostkę powierzchni. Dysze firmy Hunter charakteryzowały się w czasie pracy mniejszym zużyciem wody oraz niższym ciśnieniem roboczym w porównaniu do dysz firmy Rain Bird, zachowując ten sam promień zraszania. Jednostkowe różnice w parametrach dobranych dysz (ciśnienie robocze, wydatek wody oraz opad jednostkowy na powierzchnię) wpłynęły na sumaryczne zapotrzebowanie wodne oraz materiałowe w zaprojektowanych sekcjach nawodnieniowych na analizowanej powierzchni trawnika (tab. 3 i 4). Stwierdzone różnice wpłynęły na koszty

Tabela 1. Parametry źródła wody i projektowanego obiektu

Parametr	Wartość
Ciśnienie statyczne	4 bar
Średnica rur irygacyjnych	32 mm
Wydajność źródła wody	2125 l/h
Projektowany wydatek sekcji	1700 l/h
Rezerwa wydajności	425 l/h
Projektowana powierzchnia trawnika dywanowego	324,48 m ²

Źródło: opracowanie własne.

Tabela 2. Parametry techniczne dysz rotacyjnych

Typ dyszy	Ciśnienie robocze [kPa]	Promień [m]	Przepływ [l/min]	Przepływ [l/h]	Opad [mm/h]
Hunter MP Rotator 2000 – 90°	175	5,2	1,18	71	11
Hunter MP Rotator 2000 – 180°	200	5,2	2,35	141	11
Hunter MP Rotator 2000 – 360°	200	5,2	4,72	283	11
Rain Bird V–RAN 18 – 90°	310	5,2	1,89	113,4	16
Rain Bird V–RAN 18 – 180°	310	5,2	3,82	229,2	16
Rain Bird V–RAN 18 – 360°	310	5,2	7,00	420	16

Źródło: opracowanie własne na podstawie dokumentacji technicznej producenta https://hunterpolska.pl/mp_2000_90210-p147.htm, <https://www.rainbird.pl/produkty/dysze-do-glowic-deszczujacych/seria-dysz-r-van>

Tabela 3. Zapotrzebowanie wodne dysz rotacyjnych w sekcjach nawodnieniowych

Typ dyszy	Ilość [szt.]	Przepływ [l/h]	Przepływ razem [l/h]	Rezerwa [l/h]
Wariant 1: trawnik z zastosowaniem dysz Hunter MP Rotator 2000				
Sekcja 1				
Hunter MP Rotator 2000 – 90°	4	71	284	x
Hunter MP Rotator 2000 – 180°	4	141	564	x
Hunter MP Rotator 2000 – 360°	3	283	849	x
Suma	11	x	1 697	428
Wariant 2: trawnik z zastosowaniem dysz Rain Bird V–RAN 18				
Sekcja 1				
Rain Bird V–RAN 18 – 90°	4	110	440	x
Rain Bird V–RAN 18 – 180°	2	220	440	x
Rain Bird V–RAN 18 – 360°	2	420	840	x
Suma	8	x	1 720	405
Sekcja 2				
Rain Bird V–RAN 18 – 90°	4	110	440	x
Rain Bird V–RAN 18 – 360°	1	420	420	x
Suma	11	x	860	1 265

Źródło: opracowanie własne.

Tabela 4. Zapotrzebowanie materiałowe wariantów nawadniania

Materiał	Ilość	Cena [zł]	Materiał	Ilość [szt.]	Cena [zł]
Wariant 1: trawnik dywanowy z zastosowaniem dysz Hunter MP Rotator 2000			Wariant 2: trawnik dywanowy z zastosowaniem dysz Rain Bird V-RAN 18		
Rura irygacyjna Ø32 PN6	113,5 m	283,52	Rura irygacyjna Ø32 PN6	142,1 m	354,96
Obejma siodłowa 32-3/4" PN10	11 szt	44,92	Obejma siodłowa 32-3/4" PN10	13 szt	53,09
Kolanko HSBE-075 3/4"	11 szt	14,10	Kolanko HSBE-075 3/4"	13 szt	16,66
Kolanko HSBE-050 1/2"	11 szt	14,32	Kolanko HSBE-050 1/2"	13 szt	16,92
Przewód elastyczny FLEXSG	6 m	26,95	Przewód elastyczny FLEXSG	7 mb	31,44
Głowica deszczująca PROS-04	11 szt	105,38	Głowica deszczująca PROS-04	13 szt	124,54
Dysza MP Rotator 2000	11 szt	394,90	Dysza V-RAN 18	13 szt	418,47
Elektrozawór PGV-100 GW	1	70,25	Elektrozawór PGV-100 GW	2	140,50
Złącze PE 32-1"GZ PN16	1	4,70	Złącze PE 32-1"GZ PN16	2	9,41
Sterownik Rain Bird	1	474,85	Sterownik Rain Bird	1	474,85
Cena ogółem		1 433,89	Cena ogółem		1 640,84

Źródło: opracowanie własne na podstawie kalkulacji średniej ceny detalicznej 2015–2020.

założenia instalacji nawodnieniowej trawnika. Różnica kosztów bazująca tylko na jednym komponencie składowym systemu nawodnieniowego (np. dysze MP Rotator), skutkowałą dla wybranej powierzchni trawnika będącej podstawą analizy, kosztami założenia systemu niższymi o prawie 207 zł, co stanowiło prawie 13% różnicy cenowej pomiędzy zastosowanymi wariantami systemu nawadniającego.

Podsumowanie

Zastosowanie analizy kosztorysowej w planowaniu inwestycji nawodnieniowej ma istotne znaczenie z punktu racjonalnego gospodarowania dostępnymi środkami finansowymi w ramach prowadzonych prac z zakresu urządzania i pielęgnacji terenów zieleni. Dzięki dobru odpowiednich komponentów stosowanych w nawodnieniach (np. dysz) możemy ograniczyć koszty całej inwestycji nawodnieniowej. Analizując przykład trawnika dywanowego można stwierdzić, iż jednostkowy koszt nawadniania z zastosowaniem dysz rotacyjnych Hunter MP Rotator wynosi 4,42 zł/m² natomiast wybranie dysz rotacyjnych firmy Rain Bird będzie wynosiło 5,06 zł/m² co stanowi prawie 13% różnicy cenowej pomiędzy

zastosowanymi wariantami systemu nawadniającego. Dodatkowymi korzyściami wynikającymi z wyboru techniki nawadniania jest jej kompatybilność z innymi elementami infrastruktury (np. fertygacji) wspomagającej utrzymanie terenów zieleni. Pomimo odrębnego charakteru kosztorysu nawadniania terenów zieleni względem kosztorysu nawadniania pól uprawnych pełni on ważną rolę w kontekście projektowania i budowy obiektów architektury zieleni.

Literatura

- Chojacka A. 2014: Znaczenie terenów zielonych w przestrzeni publicznej oraz ich wpływ na jakość życia miejskiego. Rynek–Społeczeństwo–Kultura, 1, s. 48–54.
- Czerwieniec M., Lewińska J. 2000: Zieleń w mieście. Kraków: Instytut Gospodarki Przestrzennej i Komunalnej.
- Dokumentacja przetargowa Zakładu Gospodarowania Nieruchomościami dzielnicy Praga-Południe m. st. Warszawy. 2018: Przedmiar robót – System nawadniający istniejącą zieleni na terenie skwerku „Seniora”.
- Garbulewski K., Mosiej J., Poppek Z. 2015: Inżynieria Krajobrazu. Warszawa: Wyd. SGGW.
- Hulicka A. 2015: Miasto zielone – miasto zrównoważone. Sposoby kształtowania miejskich terenów zieleni w nawiązaniu do idei Green City. Prace Geograficzne, 141, Kraków.
- Józwik-Jaworska K. 2012: Podstawy kosztorysowania w architekturze krajobrazu. Warszawa: Wyd. Hortpress.
- Materiały konferencyjne. 2019: Nawadnianie roślin w świetle zrównoważonego rozwoju obszarów wiejskich. Bydgoszcz: Wydawnictwo Uczelniane Uniwersytetu Technologiczno-Przyrodniczego.
- Materiały szkoleniowe. 2018: Systemy nawodnień Greenmill Aquasystem. Floraland, Nieporęt.
- On-line: https://hunterpolska.pl/mp_2000_90210-p147.html (dostęp: 19.11.2020).
- On-line: <https://www.rainbird.pl/produkty/dysze-do-glowic-deszczujacych/seria-dysz-r-van> (dostęp: 19.11.2020).
- Rozporządzenie Ministra Infrastruktury z dnia 18 maja 2004 r.: W sprawie określenia metod i podstaw sporządzania kosztorysu inwestorskiego, obliczania planowanych kosztów prac projektowych oraz planowanych kosztów robót budowlanych określonych w programie funkcjonalno-użytkowym, art. 3 pkt 1, Dz.U. z 2004 r., nr 19, poz. 177.
- Szoegi Manteuffel H. 2002: Elementy ekonomiki gospodarowania wodą w rolnictwie. Warszawa: Wyd. SGGW.
- Trzaskowska E., Adamiec P. 2012: Wartość estetyczna trawników ekstensywnych na wybranych obiektach Lublina. Łąkarstwo w Polsce, 15, s. 193–203.
- Ustawa z dnia 27 marca 2003 r. o planowaniu i zagospodarowaniu przestrzennym, art. 2, pkt. 6, Dz.U. z 2003 r., nr 80, poz. 717.

**Anna FIGAS¹, Barbara JAGOSZ², Stanisław ROLBIECKI³,
Roman ROLBIECKI⁴, Piotr STACHOWSKI⁴**

Wpływ przewidywanych zmian klimatu na potrzeby wodne kalafiora późnego w rejonie Bydgoszczy (centralna Polska)

Streszczenie. Celem podjętych badań była próba oszacowania potrzeb wodnych kalafiora późnego w latach 2021–2050 w rejonie Bydgoszczy (centralna Polska) na podstawie przewidywanych zmian temperatur powietrza. W pracy wykorzystano prognozowane wartości średnich miesięcznych temperatur powietrza dla rejonu Bydgoszczy w latach 2011–2050 według scenariusza zmian klimatu dla Polski SRES: A1B (Bąk, Łabędzki 2014). Potrzeby wodne kalafiora późnego obliczono korzystając z dwóch metod (m. Klatta oraz m. Pressa) dla trzech rodzajów gleb o zróżnicowanej pojemności wodnej: lekkie, średnie, ciężkie (Rolbiecki, Chmura 2014). Obliczono wielkości potrzeb wodnych w okresie lipiec–wrzesień dla każdego roku w rozpatrywanym 30-leciu (2021–2050). Jako okres referencyjny przyjęto 30-lecie 1981–2010. Z przeprowadzonych obliczeń i analiz wynika, że w okresie 2021–2050 w rejonie Bydgoszczy – w świetle przewidywanych scenariuszy zmian temperatury powietrza – należy oczekiwać zwiększenia potrzeb wodnych kalafiora późnego w okresie wegetacji (lipiec–wrzesień) w granicach 16–18%. W odniesieniu do okresu referencyjnego (1981–2010), potrzeby wodne kalafiora późnego w okresie wegetacji – odpowiednio na glebach ciężkich, średnich i lekkich – zwiększą się w zakresie 39–42 mm, 48 mm oraz 55–58 mm. Największy wzrost (o 24–25%) może wystąpić we wrześniu, mniejszy (15%) w sierpniu, a najmniejszy (11–15%) w lipcu.

Słowa kluczowe: kalafior późny, potrzeby wodne, zmiany klimatu, rejon Bydgoszczy, centralna Polska

¹ Uniwersytet Technologiczno-Przyrodniczy w Bydgoszczy, Wydział Rolnictwa i Biotechnologii, Katedra Biotechnologii Rolniczej

² Uniwersytet Rolniczy w Krakowie, Wydział Biotechnologii i Ogrodnictwa, Katedra Biologii Roślin i Biotechnologii

³ Uniwersytet Technologiczno-Przyrodniczy w Bydgoszczy, Wydział Rolnictwa i Biotechnologii, Katedra Przyrodniczych Podstaw Rolnictwa i Ogrodnictwa

⁴ Uniwersytet Przyrodniczy w Poznaniu, Wydział Inżynierii Środowiska i Inżynierii Mechanicznej, Instytut Melioracji, Kształtowania Środowiska i Geodezji

The impact of anticipated climate changes on the water needs of late cauliflower in Bydgoszcz area (central Poland)

ABSTRACT. The aim of the study was to estimate the water needs of late cultivars of cauliflower in the years 2021–2050 in the Bydgoszcz region (central Poland). The calculations, based on the expected changes of air temperature, covered the forecasted thirty-years period (2021–2050). The forecasted mean monthly values of temperature in the region of central Poland, in the years 2021–2050, according to the climate change scenario for Poland SRES: A1B (Bąk, Łabędzki 2014), were used in the estimations. Water needs of late cauliflower were calculated using two methods (Klatt and Press) for three types of soils with different water capacity (light soil, medium soil, heavy soil) (Rolbiecki and Chmura 2014). As the reference period, in July–September the thirty-years interval from 1981 to 2010 was applied. The calculations and analyzes carried out show that in the period 2021–2050 in the Bydgoszcz region – in the light of the predicted scenarios of air temperature changes – an increase in water needs of late cauliflower during the growing season (July–September) should be expected by 16–18%. With regard to the reference period (1981–2010), the water needs of late cauliflower during the growing season – on heavy, medium and light soils will increase in the range of 39–42 mm, 48 mm and 55–58 mm, respectively. The highest increase (by 24–25%) may occur in September, a smaller (15%) in August, and the smallest (11–15%) in July.

Keywords: late cauliflower, water requirements, climate change, Bydgoszcz region, central Poland

Wprowadzenie

W świetle oczekiwanych zmian klimatycznych przewiduje się wzrost ryzyka produkcji rolniczej i ogrodniczej. Związane jest to z tym, że przykładowo, według scenariusza A2 (uważanego za najbardziej prawdopodobny) pod koniec XXI wieku nastąpi wzrost temperatury globalnej o około 4°C. W Polsce natomiast należy się spodziewać wzrostu temperatury w zakresie od 2 do 4°C. Przy czym, co jest bardzo istotne, w większości scenariuszy dla Polski nie przewiduje się wzrostu sumy opadów w ciągu roku (Łabędzki i in. 2013). Może to w konsekwencji powodować nadmierne przesuszenie gleb w okresie letnim i potrzebę stosowania nawodnień. Przewiduje się zatem, że wraz z nasilaniem się negatywnych skutków zmian klimatu wzrastać będzie znaczenie nawodnień w polskim rolnictwie i ogrodnictwie (Łabędzki 2009a, b). Stosowanie nawodnień ciśnieniowych, szczególnie nawadniania kropłowego jest niezwykle istotne w kształtowaniu środowiska glebowego. Systemy te spełniają wymogi tzw. rolnictwa precyzyjnego. Poprzez bardzo dużą energo- i zasobooszczędność (niskie zużycie wody pod niskim ciśnieniem) oraz miejscowe zaopatrywanie roślin w wodę, pozwalają na tworzenie precyzyjnych układów przyrodniczo-techniczno-ekonomicznych, harmonijnie wkomponowanych w środowisko rolnicze. Układy te wpisują się w gospodarkę o obiegu zamkniętym, szczególnie w zakresie ochrony zasobów naturalnych i środowiska jako całości.

Kalafior późny zaliczany jest do roślin o bardzo dużych wymaganiach wodnych (Buczak 1989; Dzieżyc 1974, 1988; Kaniszewski 2005, 2006). Szacuje się, że – w zależności od ter-

minu uprawy – potrzeby wodne kalafiora wynoszą od 250 mm do 340 mm wody w okresie wegetacji (Kaniszewski 1987; Kaniszewski 2005; Rolbiecki, Chmura 2014). Ze względu na duże wymagania wodne kalafiora powinno się uprawiać na glebach o dużej pojemności wodnej (Kaniszewski 2005). Na glebach lżejszych zadowalające plony kalafiora można uzyskać tylko stosując nawadnianie (Kaniszewski, Rumpel 1998; Kaniszewski 2005, 2006).

Celem podjętych badań była próba oszacowania potrzeb wodnych kalafiora późnego w latach 2021–2050 w rejonie Bydgoszczy (centralna Polska) na podstawie przewidywanych zmian temperatur powietrza (Bąk, Łabędzki 2014). Rejon Bydgoszczy jest rejonem szczególnie zagrożonym brakiem opadów atmosferycznych w okresie wegetacji (Durau, Żarski 2013; Grabarczyk 1986; Łabędzki, Bąk 2011; Łabędzki, Złonkiewicz 2008; Musiał, Kamińska 2008; Żarski 2012; Żarski, Dudek 2009).

I. Materiał i metody

Potrzeby wodne kalafiora późnego obliczono korzystając z dwóch metod (m. Klatta oraz m. Pressa) dla trzech rodzajów gleb o zróżnicowanej pojemności wodnej: lekkie, średnie, ciężkie (Rolbiecki, Chmura 2014; Żakowicz, Hewelke 2002; Żakowicz i in. 2009). Obliczono wielkości potrzeb wodnych w okresie wegetacji kalafiora późnego (lipiec–wrzesień) dla każdego roku w rozpatrywanym 30-leciu (2021–2050). Jako okres referencyjny przyjęto 30-lecie 1981–2010. W pracy wykorzystano prognozowane wartości średnich miesięcznych temperatur powietrza dla rejonu Bydgoszczy w latach 2011–2050 według scenariusza zmian klimatu dla Polski SRES: A1B (Bąk, Łabędzki 2014).

2. Wyniki i dyskusja

Potrzeby wodne kalafiora późnego na glebie średniej oszacowane metodą Klatta w przyjętym okresie wegetacji (lipiec–wrzesień) wahały się w zakresie od 264,0 do 327,5 mm w okresie referencyjnym, zaś w okresie przewidywanym od 302,5 do 384,5 mm (tab. 1). Obliczane drugą z metod (m. Pressa), potrzeby te mieściły się w zakresie odpowiednio: 244,0–307,5 mm oraz 282,5–364,5 mm.

Potrzeby wodne kalafiora późnego na glebach lekkich były – w odniesieniu do gleb średnich – wyższe, mieszcząc się w okresie referencyjnym w zakresie od 303,6 do 376,6 mm, gdy obliczono je metodą Klatta, bądź – przy wykorzystaniu metody Pressa – w zakresie od 292,8 do 369,0 mm (tab. 2). W okresie przewidywanym potrzeby wodne kalafiora były jeszcze wyższe, mieszcząc się – odpowiednio dla metod Klatta i Pressa – w zakresie: 347,9–442,2 mm i 339,0–437,4 mm.

W okresie referencyjnym potrzeby wodne kalafiora późnego na glebach ciężkich wyznaczone metodą Klatta mieściły się w okresie wegetacji w przedziale 224,4–278,4 mm bądź

Tabela 1. Charakterystyka statystyczna zapotrzebowania na wodę kalafiora późnego w okresie wegetacji na glebach średnich [mm]

Miesiąc	Minimum		Maximum		Mediana		SD	
	K	P	K	P	K	P	K	P
1981–2010								
Lipiec	76,5	56,5	114,5	94,5	92,7	72,7	9,4	9,4
Sierpień	100,5	100,5	132,5	132,5	114,0	114,0	6,6	6,6
Wrzesień	58,0	58,0	98,0	98,0	83,7	83,7	8,6	8,6
Lipiec–wrzesień	264,0	244,0	327,5	307,5	292,5	272,5	16,2	16,2
2021–2050								
Lipiec	84,0	64,0	119,0	99,0	103,5	83,5	8,5	8,5
Sierpień	110,5	110,5	149,5	149,5	131,2	131,2	8,7	8,7
Wrzesień	90,5	90,5	116,5	116,5	103,2	103,2	7,2	7,2
Lipiec–wrzesień	302,5	282,5	384,5	364,5	337,7	317,7	18,8	18,8

K – Klatt, P – Press, SD – odchylenie standardowe.

Tabela 2. Charakterystyka statystyczna zapotrzebowania na wodę kalafiora późnego w okresie wegetacji na glebach lekkich [mm]

Miesiąc	Minimum		Maximum		Mediana		SD	
	K	P	K	P	K	P	K	P
1981–2010								
Lipiec	88,0	67,8	131,7	113,4	106,7	87,3	10,9	11,3
Sierpień	115,6	120,6	152,4	159,0	131,1	136,8	7,6	7,9
Wrzesień	66,7	69,6	112,7	117,6	96,3	100,5	9,9	10,4
Lipiec–wrzesień	303,6	292,8	376,6	369,0	336,4	327,0	18,7	19,5
2021–2050								
Lipiec	96,6	76,8	136,8	118,8	119,0	100,2	9,8	10,2
Sierpień	127,1	132,6	171,9	179,4	150,9	157,5	10,0	10,4
Wrzesień	104,1	108,6	134,0	139,8	118,7	123,9	8,3	8,6
Lipiec–wrzesień	347,9	339,0	442,2	437,4	388,4	381,3	21,7	22,6

K – Klatt, P – Press, SD – odchylenie standardowe.

195,2–246,0 mm, gdy wyznaczono je metodą Pressa (tab. 3). W okresie przewidywanym potrzeby wodne wahały się w większym zakresie, wynosząc odpowiednio 257,1–326,8 mm oraz 226,0–291,6 mm.

Potrzeby wodne kalafiora późnego w przyjętym okresie wegetacji (lipiec–wrzesień) – tak w okresie przewidywanym (2021–2050) jak i w okresie referencyjnym (1981–2010) – charakteryzowały się raczej niewielką zmiennością (współczynnik zmienności w zakresie 5,6–6,0%) – tabela 4. Wśród trzech rozpatrywanych miesięcy okresu wegetacji, większą zmiennością (współczynnik zmienności w zakresie 6,9–13,0%) cechowały się potrzeby wodne w lipcu i wrześniu.

Tabela 3. Charakterystyka statystyczna zapotrzebowania na wodę kalafiora późnego w okresie wegetacji na glebach ciężkich [mm]

Miesiąc	Minimum		Maximum		Mediana		SD	
	K	P	K	P	K	P	K	P
1981–2010								
Lipiec	65,0	45,2	97,3	75,6	78,8	58,2	8,0	7,6
Sierpień	85,4	80,4	112,6	106,0	96,9	91,2	5,6	5,3
Wrzesień	49,3	46,4	83,3	78,4	71,2	67,0	7,3	6,9
Lipiec–wrzesień	224,4	195,2	278,4	246,0	248,6	218,0	13,8	13,0
2021–2050								
Lipiec	71,4	51,2	101,1	79,2	88,0	66,8	7,2	6,8
Sierpień	93,9	88,4	127,1	119,6	111,6	105,0	7,4	6,9
Wrzesień	76,9	72,4	99,0	93,2	87,8	82,6	6,1	5,8
Lipiec–wrzesień	257,1	226,0	326,8	291,6	287,1	254,2	16,0	15,1

K – Klatt, P – Press, SD – odchylenie standardowe.

Tabela 4. Współczynnik zmienności (VC) zapotrzebowania na wodę kalafiora późnego w okresie wegetacji [%]

Okres		Lipiec	Sierpień	Wrzesień	Lipiec–wrzesień
1981–2010	K	10,2	5,7	10,3	5,6
	P	13,0	5,7	10,3	6,0
2021–2050	K	8,2	6,6	6,9	5,6
	P	10,2	6,6	6,9	5,9

K – Klatt, P – Press.

Z obliczeń przeprowadzonych dla prognozowanych w wieloleciu 2021–2050 warunków termicznych wynika, że w tym okresie zwiększy się zapotrzebowanie na wodę w uprawie kalafiora późnego (tab. 5 i 6). W wieloleciu tym – odpowiednio dla gleb ciężkich, średnich i lekkich – należy spodziewać się wzrostu potrzeb wodnych kalafiora późnego w okresie wegetacji (lipiec–wrzesień) o 39–42, 48 i 55–58 mm (wzrost w granicach 16–18%). Spośród miesięcy okresu wegetacji, największy wzrost (o 24–25%) może wystąpić we wrześniu, mniejszy (15%) w sierpniu, a najmniejszy (11–15%) w lipcu.

Z przeprowadzonych obliczeń i analiz wynika, że przewidywane zmiany klimatyczne spowodują wzrost potrzeb wodnych roślin warzywnych – m.in. takich, jak kalafior późny – w uprawie polowej. Wpłyne to z pewnością na konieczność podejmowania szeregu działań adaptacyjnych. Przewiduje się w związku z tym, że jednym z takich działań będą przypuszczalnie nawodnienia, których znaczenie – wraz z nasilaniem się niekorzystnych zmian klimatycznych – będzie wzrastać (Kuchar, Iwański 2011, 2013; Kuchar i in. 2015, 2017; Łabędzki 2009a, b; Stachowski, Markiewicz 2011; Żarski i in. 2013). Warto w tym miejscu podkreślić, że nawadnianie jest uważane za jeden z ważniejszych zabiegów w polowej

Tabela 5. Zapotrzebowanie na wodę [mm] kalafiora późnego w okresie kwiecień–lipiec, średnio w latach 1981–2010 oraz 2021–2050 według metody Klatta

Lata	Lipiec	Sierpień	Wrzesień	Lipiec–wrzesień
Gleby ciężkie				
1981–2010	79	97	71	247
2021–2050	88	112	89	289
Różnica				
(2021–2050) – (1981–2010)	9	15	18	42
Gleby średnie				
1981–2010	93	114	84	291
2021–2050	104	131	104	339
Różnica				
(2021–2050) – (1981–2010)	11	17	20	48
Gleby lekkie				
1981–2010	107	131	97	335
2021–2050	119	151	120	390
Różnica				
(2021–2050) – (1981–2010)	12	20	23	55

Tabela 6. Zapotrzebowanie na wodę [mm] kalafiora późnego w okresie kwiecień–lipiec, średnio w latach 1981–2010 oraz 2021–2050 według metody Pressa

Lata	Lipiec	Sierpień	Wrzesień	Lipiec–wrzesień
Gleby ciężkie				
1981–2010	58	91	67	216
2021–2050	67	105	83	255
Różnica				
(2021–2050) – (1981–2010)	9	14	16	39
Gleby średnie				
1981–2010	73	114	84	271
2021–2050	84	131	104	319
Różnica				
(2021–2050) – (1981–2010)	11	17	20	48
Gleby lekkie				
1981–2010	87	137	101	325
2021–2050	100	158	125	383
Różnica				
(2021–2050) – (1981–2010)	13	21	24	58

uprawie warzyw (Kaniszewski 2005, 2006). Potwierdzają to wyniki uzyskane w szeregu doświadczeń ścisłych, przeprowadzonych w okolicy Bydgoszczy, gdzie stwierdzono bardzo pozytywny wpływ nawodnień na plonowanie różnych gatunków warzyw uprawianych na glebach lekkich (Rolbiecki i in. 2000, 2015; Rolbiecki, Rolbiecki 2007, 2008).

W przeprowadzonych analizach uwzględniono wyłącznie wpływ prognozowanego wzrostu temperatury powietrza (Bąk, Łabędzki 2014) na potrzeby wodne kalafiora późnego. Wiadomym jest, że na kształtowanie się potrzeb wodnych roślin oddziałują także inne elementy meteorologiczne takie, jak: usłonecznienie, promieniowanie słoneczne, prędkość wiatru, wilgotność powietrza (Łabędzki i in. 2013).

Podsumowanie i wnioski

Z przeprowadzonych obliczeń i analiz wynika, że w okresie 2021–2050 w rejonie Bydgoszczy – w świetle przewidywanych scenariuszy zmian temperatury powietrza – należy

oczekiwać zwiększenia potrzeb wodnych kalafiora późnego w okresie wegetacji (lipiec–wrzesień) w granicach 16–18%. W odniesieniu do okresu referencyjnego (1981–2010), potrzeby wodne kalafiora późnego w okresie wegetacji – odpowiednio na glebach ciężkich, średnich i lekkich – zwiększą się w zakresie 39–42, 48 oraz 55–58 mm. Największy wzrost (o 24–25%) może wystąpić we wrześniu, mniejszy (15%) w sierpniu, a najmniejszy (11–15%) w lipcu.

Literatura

- Bąk B., Łabędzki L. 2014: Thermal conditions in Bydgoszcz region in growing seasons 2011–2050 in view of expected climate change. *Journal of Water and Land Development*, 23, s. 21–29.
- Buczak E. 1989: Potrzeby wodne roślin warzywnych. [W:] Dzieżyc J. red. *Potrzeby wodne roślin*. Warszawa: PWN.
- Durau B., Żarski J. 2013: Niedobory opadów atmosferycznych w uprawie kapusty głowiastej białej i marchwi w rejonie Bydgoszczy w latach 1981–2010. *Infrastruktura i Ekologia Terenów Wiejskich*, 1(2), s. 3749.
- Dzieżyc J. 1974: Nawadnianie roślin. Warszawa: PWN.
- Dzieżyc J. 1988: Rolnictwo w warunkach nawadniania. Warszawa: PWN.
- Grabarczyk S. 1986: Efekty, potrzeby i możliwości nawodnień deszczownianych w różnych regionach kraju. *Zesz. Probl. Post. Nauk Rol.*, 314, s. 49–64.
- Kaniszewski S. 1987: Nawadnianie warzyw. Warszawa: PWRiL.
- Kaniszewski S. 2005: Nawadnianie warzyw polowych. Kraków: Plantpress.
- Kaniszewski S. 2006: Nawadnianie warzyw [W:] Karczmarczyk S. i L. Nowak L. red., *Nawadnianie roślin* Poznań: PWRiL, s. 295–332.
- Kaniszewski S., Rumpel J. 1998: Effects of irrigation, nitrogen fertilization and soil type on yield and quality of cauliflower. *Journal of Vegetable Crop Production*, 4(1), s. 67–75.
- Kuchar L., Iwański S. 2011: Rainfall simulation for the prediction of crop irrigation in future climate. *Infrastructure and Ecology of Rural Areas*, 5, s. 7–18.
- Kuchar L., Iwański S. 2013: Rainfall evaluation for crop production until 2050–2060 and selected climate change scenarios for North Central Poland. *Infrastructure and Ecology of Rural Areas*, 2(1), s. 187–200.
- Kuchar L., Iwański S., Diakowska E., Gąsiorek E. 2015: Simulation of hydrothermal conditions for crop production purpose until 2050–2060 and selected climate change scenarios for North Central Poland. *Infrastructure and Ecology of Rural Areas*, 2(1), s. 319–334.
- Kuchar L., Iwański S., Diakowska E., Gąsiorek E. 2017: Assessment of meteorological drought in 2015 for North Central part of Poland using hydrothermal coefficient (HTC) in the context of climate change. *Infrastructure and Ecology of Rural Areas*, 1(2), s. 257–273.
- Łabędzki L. 2009a: Foreseen climate changes and irrigation development in Poland. *Infrastructure and Ecology of Rural Areas*, 3, s. 7–18.
- Łabędzki L. 2009b: Expected development of irrigation in Poland in the context of climate change. *Journal of Water and Land Development*, 13b, s. 17–29.
- Łabędzki L., Złonkiewicz M. 2008: Uwarunkowania i kierunki rozwoju nawodnień w regionie kujawsko-pomorskim. *Zesz. Probl. Post. Nauk Rol.*, 532, s. 153–162.
- Łabędzki L., Bąk B. 2011: System monitorowania suszy na Kujawach. *Zesz. Probl. Post. Nauk Rol.*, 561, s. 109–118.
- Łabędzki L., Bąk B., Liszewska M. 2013: Wpływ przewidywanej zmiany klimatu na zapotrzebowanie ziemniaka późnego na wodę. *Infrastructure and Ecology of Rural Areas*, 2(1), s. 155–165.
- Musiał E., Kamińska J. 2008: Zmienność klimatu Bydgoszczy w wieloletniu 1945–1996. *Zesz. Probl. Post. Nauk Rol.*, 526, s. 113–120.

- Rolbiecki R., Rolbiecki S. 2007: Effects of micro-irrigation systems on lettuce and radish production. *Acta Hort.*, 729, s. 331–335.
- Rolbiecki R., Rolbiecki S. 2008: Effect of surface drip irrigation on asparagus cultivars in central Poland. *Acta Hort.*, 776, s. 45–50.
- Rolbiecki S., Rolbiecki R., Rzekanowski C., Żarski J. 2000: The influence of sprinkler irrigation on yields of some vegetable crops in the region of Bydgoszcz, Poland. *Acta Hort.*, 537(2), s. 871–877.
- Rolbiecki S., Chmura K. 2014: Optimal precipitation for field-cultivated vegetables. *Infrastructure and Ecology of Rural Areas*, 4(3), s. 1397–1405.
- Rolbiecki S., Rolbiecki R., Dudek S., Kuśmierek-Tomaszewska R., Żarski J., Rzekanowski C. 2015: Requirements and effects of drip irrigation of mid-early potato on a very light soil in moderate climate. *Fresenius Environmental Bulletin*, 11b(24), s. 1–8.
- Stachowski P., Markiewicz J. 2011: The need of irrigation in central Poland on the example of Kutno county. *Annual Set of Environment Protection*, 13, s. 1453–1472.
- Żakowicz S., Hewelke P., Gnatowski T. 2009: *Podstawy infrastruktury technicznej w przestrzeni produkcyjnej*. Warszawa: SGGW.
- Żakowicz S., Hewelke P. 2002: *Podstawy inżynierii środowiska*. Warszawa: SGGW.
- Żarski J. 2012: Tendencje zmian agroklimatu rejonu Bydgoszczy w latach 1981–2010. [W:] Bieliński M. red. *Bydgoskie Kolokwium Wiedzy o Ziemi 2002–2012*. Bydgoszcz: BTN, s. 85–103.
- Żarski J., Dudek S. 2009: Zmienność czasowa potrzeb nawadniania wybranych roślin w regionie Bydgoszczy. *Infrastruktura i Ekologia Terenów Wiejskich*, 3, s. 141–149.
- Żarski J., Dudek S., Kuśmierek-Tomaszewska R., Rolbiecki R., Rolbiecki S. 2013: Forecasting effects of plants irrigation based on selected meteorological and agricultural drought indices. *Annual Set The Environment Protection*, 15, s. 2185–2203.

The response of lisianthus (*Eustoma grandiflorum* Raf. Shinn.) on different irrigation strategies

Abstract. This study was carried out to determine the effect of different irrigation intervals (IF1: 2 days and IF2: 4 days) and soil moisture levels (I1 = 11 × 1.00, I2 = 11 × 0.75, I3 = 11 × 0.50, I4 = 11 × 0.25) on yield and quality parameters of lisianthus (*Eustoma grandiflorum* Raf. Shinn.). The amount of irrigation water applied was 180.25–493.58 mm, and the measured evapotranspiration ranged between 283.13–493.58 mm. Different irrigation levels statistically affected the stem length, stem diameter, stem weight, the number of flowers, dry matter, leaf area index, and the number of buds in lisianthus. In the study, stem length, stem diameter, stem weight, the number of flowers, dry matter, leaf area index and the number of buds ranged from 46.40–77.76 cm, 3.86–6.09 mm, 34.99–70.14 g, 5.21–8.57 number/stem, from 12.57% to 15.48%, from 1.10 to 3.91, and from 7.03 to 9.39 stems/stem, respectively. As a result of the research, considering the marketable yield and stem length, which is the most important quality parameter, where all the moisture decreasing from the field capacity is applied at two- or four-days intervals, was determined as the most suitable irrigation program in experimental conditions.

Keywords: lisianthus, irrigation interval, evapotranspiration

Wpływ różnych strategii nawadniania na plonowanie i parametry jakościowe eustomy (*Eustoma grandiflorum* Raf. Shinn.)

Streszczenie. Badania przeprowadzono w celu określenia wpływu różnych interwałów nawadniania (IF1: 2 dni i IF2: 4 dni) oraz wilgotności gleby (I1 = 11 × 1,00, I2 = 11 × 0,75, I3 = 11 × 0,50, I4 = 11 × 0,25) na parametry plonu i jakości eustomy (*Eustoma grandiflorum* Raf. Shinn.). Ilość zastosowanej wody do nawadniania wynosiła 180,25–493,58 mm, a zmierzona ewapotranspiracja zawierała się w granicach 283,13–493,58 mm. Różne dawki nawadniania statystycznie wpływały na długość łodygi, średnicę łodygi, masę łodygi, liczbę kwiatów, suchą masę, wskaźnik powierzchni liści oraz liczbę pąków eustomy. W przeprowadzonych badaniach długość łodygi, średnica łodygi, masa łodygi, liczba kwiatów, sucha masa, wskaźnik powierzchni liści i liczba pąków zawierały się

¹ State Hydraulic Works, Ankara-Turkey

² Isparta University of Applied Sciences, Faculty of Agriculture, Departments of Agricultural Structures and Irrigation, Isparta-Turkey

w granicach od 46,40 do 77,76 cm, 3,86–6,09 mm, 34,99–70,14 g, 5,21–8,57 sztuk na łodygę oraz od 12,57 do 15,48%, od 1,10 do 3,91 i od 7,03 do 9,39 pędów na łodygę. W wyniku badań, biorąc pod uwagę plon handlowy i długość łodygi, będący najważniejszym parametrem jakościowym, gdzie cała wilgoć jest aplikowana w odstępach dwu- lub czterodniowych, określono jako najbardziej odpowiedni system nawadniania w warunkach doświadczalnych.

Słowa kluczowe: *eustoma*, nawadnianie interwałowe, ewapotranspiracja

Introduction

Lisianthus is a comparatively new cut flower plant when compared with other commercial ornamental plants like cut roses, carnations and chrysanthemums that have been grown as commercial cut flowers for recent years (Lakshmaiah et al. 2019). Lisianthus (*Eustoma grandiflorum*) is an annual plant from the genus „*eustoma*” of the gentian (*gentianaceae*) family. Lisianthus, originating from South America (Anonymous 2019). *Eustoma* is named after the two Greek words *Eu* (beautiful, good, well), and *stoma* – mouth (Ahmad et al. 2017). It has become an important cut flower species because of its long vase life and its flowers that resemble Rose flowers and their multiple colors worldwide it is expected to become even more popular in the next century (Valdez-Aguilar 2013; Anonymous 2015).

In Lisianthus cultivation, the pH value of the soil should be around 6.7 in order to develop a good root system (Harbaugh and Woltz 1991). In order to increase quality in lisianthus production, the suitable growth temperature range of the plant should be between 20–24°C (Harbaugh et al. 1992). Lisianthus, as in other ornamental plants, needs a high amount of fertilizer especially during the budding phase (Harbaugh et al. 1997).

One of the most important cultural practices in agriculture, especially in arid and semi-arid regions, is irrigation. However, little research has been conducted though as to the water requirements of lisianthus. The knowledge about the water requirement to be supplied to the plants, it is possible to achieve a rational water management, reducing costs and avoiding waste or deficit. Achieving the expected benefit from irrigation can be achieved by giving the plant an appropriate amount of water at the appropriate time. Irrigation scheduling is possible with studies on irrigation in the plants concerned. Therefore, an attempt has been made in present study was to evaluate the effects of different irrigation programs on the yield and quality parameters of the lisianthus under plastic-covered greenhouse conditions in Isparta–Turkey.

1. Material and methods

The research was carried out in unheated plastic greenhouse of 255 m² on the Research and Application Farm of the Faculty of Agriculture at Süleyman Demirel University

(lat. 37.83° N, long. 30.53° E, altitude 1020 m). According to the long-term data of the study area, annual total precipitation is 539.5 mm, temperature, relative humidity, and wind speed are 12.3°C, 60.6%, and 2.01 m/s, respectively (Anonymous 2014).

The bulk density of the 0–50 cm layer of the greenhouse soil is between 1.34–1.40 g/cm³, the field capacity is between 26.17–29.01%, and the wilting point is between 11.43% and 12.79%. The water holding capacity in the 0–50 cm soil layer, which is the plant root depth, was calculated as 106.15 mm. *Eustoma grandiflorum* Raf. (Shinn.), a variety of *lisianthus* named „Arena White” with decorative, white and layered flowers was used as a plant material.

Table 1. Some properties of greenhouse soil

Soil Layer	Bulk density	Field capacity		Wilting point		Available water holding capacity		Texture
		%	mm	%	mm	%	mm	
0–25	1.34	26.17	87.67	11.43	38.29	14.74	49.38	CL
25–50	1.40	29.01	101.54	12.79	44.77	16.22	56.77	CL
Total			189.21		83.06		106.15	

Lisianthus were planted into plots (1.05 m length, 1.00 m width) with four rows (15 × 20 cm spacing, 35 plants/m²). One-meter space is left between the plots in order not to be affected by different irrigation practices.

Treatments comprised of two different irrigation frequency (IF₁: 2 days; IF₂: 4 days) and four different irrigation water levels. Treatments were arranged according to split-split plots experimental design with three replications. Irrigation water was applied to the IF₁I₁, IF₂I₁ trials at intervals of 2 and 4 days to be increased the soil moisture to the field capacity. Irrigation water was applied to IF₁I₂ and IF₂I₂ at intervals of 2 and 4 days, 75% of irrigation water applied to IF₁I₂ and IF₂I₂, 50% to IF₁I₃ and IF₂I₃, and 25% to IF₁I₄ and IF₂I₄.

The amount of irrigation water applied to the trial parcels IF₁I₁ and IF₂I₁, whose irrigation water needs were fully met, was calculated with the help of equation (1).

$$Q = \frac{(Pv_{FC} - Pv_{RM})}{100} \times D \times P \times A \quad (1)$$

where:

- Q – amount of irrigation water applied to each parcel [liters],
- Pv_{FC} – volumetric field capacity [%],
- Pv_{RM} – volumetric moisture measured before each irrigation [%],

- D* – depth of wetted soil [mm],
P – percentage of wetted area [100%],
A – parcel area [m²].

Irrigation water was applied using the drip irrigation method. The lateral spacing was taken equal to the row spacing of the plant (20 cm), and the dripper spacing was arranged to equal the lateral spacing so that the wetting rate (*P*) was 100% (Yıldırım 2008). Irrigation water was measured using water meters. TDR (FieldScout, Model: TDR100) and Watermarks (Irrometer, Model; Watermark 200SS, USA) were used to determine the moisture in the plant root zone. The moisture in the 0–25 cm layer of the plant root zone was measured with TDR and the moisture in the 25–50 cm layer with Watermark. When the limit values of the devices are exceeded or when the reading cannot be made due to malfunction, soil moisture was determined by the gravimetrically. Equation 2 was used to determine evapotranspiration (Allen et al. 1998).

$$ET = I + P - RO - DP + CR \pm \Delta SF \pm \Delta SW \quad (2)$$

where:

- ET* – evapotranspiration [mm],
I – amount of irrigation water [mm],
P – precipitation [mm],
RO – surface runoff [mm],
DP – deep percolation [mm],
CR – capillary rise [mm],
 ΔSF – subsurface flow [mm],
 ΔSW – change in root zone moisture content [mm].

Since there is no problem in terms of salinity, depth and drainage in the greenhouse soil (Akgül, Başayığit 2005), it has been accepted that there is no water intake (*CR*) and subsurface flow (ΔSF) in the evapotranspiration calculation. In addition, since drip irrigation method was used in irrigation, there was no surface runoff (*RO*). Therefore, the precipitation (*P*) value was taken as zero (0) since the trial was conducted in the greenhouse.

Humic acid (EC Fertilizer NPK Fertilizer) and foliar fertilizer were applied as a plant growth regulator. In addition, a pinch process was applied to obtain more than one shoot from the root and increase the resistance of plants.

Harvesting started when the plants in the inner parts of the trial plot completed flower formation. Plants were harvested from the second node (Mengüç 1996). Plants on the outer edge of the plot were not evaluated.

Variance analysis of the data obtained was made with MINITAB 16 computer software, and Tukey comparison test was applied if the differences between applications were important.

2. Results

2.1. The amount of irrigation water and evapotranspiration

In the research, the pinch was applied in order to increase more stems number per unit area. The water requirement of all trials, from planting to pinch application, has been fully met (76.4 mm). While the total amount of irrigation water applied during the vegetation period was 493.6 mm, 390.6 mm, 287.7 mm, and 184.8 mm in the trials I_1 , I_2 , I_3 , and I_4 in IF_1 , it was 491.7 mm, 387.9 mm, 284.1 mm, and 180.2 mm in IF_2 , respectively. Until the pinching process was performed, irrigation was implemented at intervals of two days (76.4 mm) to all the trials, so no difference was observed between the trials in terms of evapotranspiration during this period. The highest evapotranspiration in both irrigation intervals was measured in I_1 , where the amount of water reduced from the field capacity is applied as irrigation water. Evapotranspiration was measured in IF_1I_1 is 493.6 mm, while it is 491.7 mm in IF_2I_1 . I_1 irrigation subject was followed by I_2 (IF_1I_2 : 460.9 mm, IF_2I_2 : 446.2 mm), I_3 (IF_1I_3 : 371.6 mm, IF_2I_3 : 374.3 mm) and I_4 (IF_1I_4 : 296.0 mm, IF_2I_4 : 286.1 mm), respectively (fig. 1).

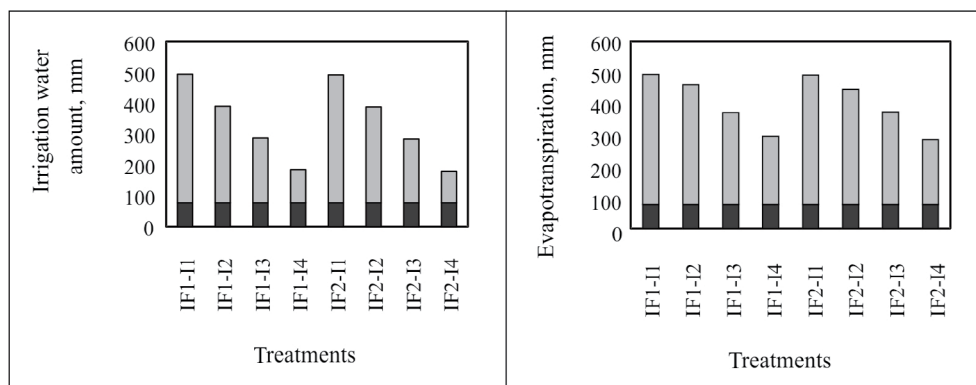


Figure 1. Irrigation water amount and evapotranspiration

2.2. Total number of stems and marketable stems

In the study, the yield evaluation was made in two different ways: the total number of stems obtained from a unit area and the number of marketable stems. The effect of irrigation intervals and different irrigation levels on the total number of stems per unit area was not statistically significant, whereas the effect of different irrigation levels on the number of the marketable stem was statistically significant ($P < 0.01$) – table 2.

When the number of marketable stems is evaluated in terms of irrigation water levels, the highest number of stems was obtained from I_1 (65.56 numbers/m²), followed by I_2 (54.44 numbers/m²), I_3 (41.75 numbers/m²), and I_4 (24.44 numbers/m²). All irrigation water levels were statistically in different groups. In terms of irrigation interval, the highest marketable yield was obtained from IF_1 (48.3 numbers/m²) trials, followed by IF_2 (44.8 numbers/m²) (table 3 and 4).

Table 2. The variance analysis results of the mean values of the investigated parameters

Variation sources	df	Mean square				
		Number of total stems [number/m ²]	Number of marketable stems [number/m ²]	Stem length [cm]	Stem diameter [mm]	Stem weight [g]
I	1	0.60	69.88	114.16**	2.6793	135.53
IF	3	90.20	1870.53**	827.22**	4.3961**	1278.56**
I×IF	3	53.51	21.20	8.30	0.7099	22.11
Error	16	70.86	59.11	5.29	0.6752	39.99
Total	23	1565.53	6690.82	2705.40	28.801	4677.34
Variation sources	df	Mean square				
		Number of flowers in stem [number/stem]	Dry matter rate [%]	Leaf area index	Number of buds in stem [number/stem]	
I	1	4.317	1.746	0.0005	0.0034	
IF	3	7.685*	8.656**	8.2142**	4.5254**	
I×IF	3	2.959	0.799	0.0058	0.2104	
Error	16	1.796	0.540	0.1169	0.2260	
Total	23	64.983	38.7599	26.5309	17.8262	

2.3. Stem length

Stem length, which is an important quality criterion, was significantly affected by both different irrigation intervals and different irrigation water amounts ($P < 0.01$). Irrigation interval × irrigation water level interaction was not found statistically significant (table 2). While the longest stem lengths were obtained from the IF_2 irrigated with 2-day intervals with an average of 62.40 cm in terms of irrigation intervals, the average stem length was

determined as 58.0 cm in IF₁ with an irrigation interval of four days. When the stem length was examined in terms of the amount of irrigation water applied, the longest stem length was measured in I₁ (74.68 cm), followed by I₂ (63.17 cm), I₃ (56.02 cm) and I₄ (46.87 cm) – table 4.

2.4. Stem diameter

According to the results of variance analysis, the effect of irrigation interval on stem diameter is insignificant and the effect of irrigation water levels is significant ($P < 0.01$) – table 2. The interaction between irrigation intervals and irrigation water levels is not important. When stem diameter was evaluated in terms of irrigation water amount, the stem diameter was obtained in I₁ with 6.08 mm, followed by I₂ with 5.48 mm, I₃ with 4.40 mm and I₄ with 4.32 mm. When the irrigation intervals were examined, the stem diameter was found in IF₁ with an average of 5.40 mm, followed by IF₂ with 4.70 mm (table 4).

Table 3. Number of total stem and number of marketable stem according to treatments, numbers/m²

Length [cm]	Number [%]	Irrigation treatments							
		IF ₁				IF ₂			
		I ₁	I ₂	I ₃	I ₄	I ₁	I ₂	I ₃	I ₄
< 39.9	number	0.0	2.2	5.4	7.0	0.0	2.5	11.4	17.8
	%	0.0	3.4	8.9	13.4	0.0	4.1	19.4	29.3
40–49.9	number	0.0	5.7	10.2	21.3	0.0	7.0	9.5	17.8
	%	0.0	8.8	16.7	40.9	0.0	11.4	16.1	29.3
50–59.9	number	0.6	7.6	16.2	22.2	1.3	18.1	20.3	16.2
	%	1.0	11.7	26.6	42.7	2.0	29.5	34.4	26.7
60–69.9	number	6.3	23.2	19.4	1.3	23.5	21.3	16.5	8.9
	%	9.5	35.6	31.8	2.4	36.5	34.7	28.0	14.7
> 70	number	59.7	26.3	9.8	0.3	39.7	12.4	1.3	0.0
	%	89.5	40.5	16.1	0.6	61.6	20.2	2.2	0.0
Number of total stems	number/m ²	66.7	65.1	61.0	52.1	64.4	61.3	59.0	60.6
Number of marketable stems	number/m ²	66.7	57.1	45.4	23.8	64.4	51.7	38.1	25.1
Percentage of number of total stems		100.0	87.8	74.5	45.7	100.0	84.5	64.5	41.4

Table 4. The effects of irrigation water amount and irrigation water intervals on the number of stem and some quality parameters

Irrigation treatments	Number of total stems [number/m ²]			Number of marketable stems [number/m ²]		
	IF ₁	IF ₂	Average	IF ₁	IF ₂	Average
I ₁	66.67	64.44	65.56	66.67	64.44	65.56 A*
I ₂	64.76	60.95	62.86	57.14	51.75	54.44 AB
I ₃	62.86	59.05	60.95	45.40	38.10	41.75 B
I ₄	52.06	60.64	56.35	23.81	25.08	24.44 C
Average	61.00	56.30		48.3	44.8	
	Stem length [cm]			Stem diameter [mm]		
I ₁	77.76	71.60	74.68 A*	6.09	6.08	6.08 A*
I ₂	65.56	60.78	63.17 B	5.59	5.36	5.48 AB
I ₃	58.80	53.24	56.02 C	5.16	3.65	4.40 B
I ₄	47.34	46.40	46.87 D	4.78	3.86	4.32 B
Average	62.40 A*	58.0 B		5.40	4.70	
	Stem weight [g]			Number of flowers in stem [number/stem]		
I ₁	70.14	64.67	67.41 A*	8.57	8.26	8.42 A*
I ₂	62.31	57.06	59.69 A	7.28	7.60	7.44 AB
I ₃	48.49	39.72	44.11 B	8.10	5.21	6.66 AB
I ₄	34.99	35.47	35.23 B	6.02	5.50	5.76 B
Average	53.98	49.23		7.49	6.65	
	Dry matter rate [%]			Leaf area index		
I ₁	12.60	12.57	12.58 C*	3.84	3.91	3.88 A*
I ₂	13.56	13.33	13.45 BC	2.99	3.06	3.02 B
I ₃	15.28	13.66	14.47 AB	2.24	2.20	2.22 C
I ₄	15.48	15.20	15.34 A	1.16	1.10	1.13 D
Average	14.23	13.70		2.56	2.57	
	Number of buds [number/stem]					
I ₁	9.39	9.06	9.22 A*			
I ₂	8.83	8.48	8.66 AB			
I ₃	7.90	8.17	8.04 B			
I ₄	7.03	7.36	7.19 C			
Average	8.29	8.26				

2.5. Stem weight

It is seen that stem weights, as in stem diameter results, the effect of irrigation interval on stem weight was insignificant but the effect of irrigation water amounts was significant ($P < 0.01$). The interaction between irrigation interval and water levels was insignificant (table 2). When evaluated in terms of stem weight, irrigation water levels, and irrigation intervals, the highest stem weight within irrigation water levels was determined as 67.41 g in I_1 and followed by I_2 (59.69 g), I_3 (44.11 g), and I_4 (35.23 g). Within the irrigation intervals, the highest stem weight was obtained in IF_1 with an average of 53.98 g, followed by IF_2 with an average of 49.23 g (table 4).

2.6. Number of flowers in stem

One of the quality criteria for cut flowers is the number of flowers per stem. The high number of flowers increases the marketing chances regardless of the type. According to variance analysis results regarding the number of flowers in a stem, the effect of irrigation intervals on flower number was statistically insignificant. On the other hand, different irrigation water amounts significantly affected the number of flowers ($P < 0.05$). When the number of flowers was examined in terms of irrigation water amount, the maximum number of flowers was determined in I_1 with an average of 8.42 numbers/stem, followed by 7.44 numbers/stem in I_2 , 6.66 numbers/stem in I_3 , and 5.76 numbers/stem in I_4 . When the number of flowers is examined in terms of irrigation intervals, the differences are statistically insignificant, and the maximum number of flowers was obtained from IF_1 (7.49 numbers/stem) subject with 2 days of irrigation, followed by IF_2 (6.65 numbers/stem) with 4 days irrigation interval (table 4).

2.7. Dry matter

It is seen that the statistical results regarding the dry matter are similar to the results of other quality parameters. While the dry matter ratio was not statistically affected by different irrigation intervals, it was significantly ($P < 0.01$) affected by different irrigation water amounts. When the dry matter ratios were evaluated in terms of irrigation water amount, the highest dry matter was obtained from I_4 with 15.34% and I_3 with 14.47%. I_4 and I_3 were followed by I_2 (13.45%), and I_1 (12.58%). While the dry matter was 14.23% in IF_1 , this value is 13.70% in IF_2 (table 4).

2.8. Leaf area index

Vegetative growth and acceleration of leaf development in plants are important criteria that increase the number of leaves and leaf area index. In plants with increased leaf area, large area index is a factor that is effective in increasing evapotranspiration. While the measured leaf area index in our study did not affect the irrigation intervals statistically, but the irrigation water levels significantly ($P < 0.01$) effected on the leaf area. The leaf area index was determined in I_1 , I_2 , I_3 and I_4 as a 3.88, 3.02, 2.22 and 1.13, respectively. It is seen that in terms of irrigation intervals, remarkably close values obtained in I_1 (2.56) and I_2 (2.57) – table 4.

2.9. Number of buds

According to the results of the variance analysis regarding the number of buds in stems, the effect of different irrigation intervals on the number of buds is insignificant, while the effect of water levels is significant ($P < 0.01$). When the number of buds was considered in terms of irrigation water level, the highest number of buds was determined in I_1 with an average of 9.22 number/stem, followed by I_2 with 8.66 number/stem. The difference between I_1 and I_2 is statistically insignificant. These were followed by I_3 and I_4 which have significantly different from each other. The difference between I_1 – I_2 and I_3 – I_4 was statistically significant (table 4).

Discussion

In our study, although there was no significant difference in the amount of irrigation water applied in different irrigation intervals, more water was applied to the treatments irrigated at two-day intervals compared to the treatments that were irrigated at four-day intervals. Similarly, there was no significant difference in terms of evapotranspiration which the same amount of irrigation water was applied in different irrigation intervals. On the other hand, in I_3 irrigated every two days; evapotranspiration is higher than I_3 , which is irrigated every four days. Ucar et al. (2011) in carnation, Turan et al. (2015) and Ucar and Kazaz (2016) in chrysanthemum and Ucar and Kazaz (2015) in liliium reported that decreasing the amount of irrigation water and increasing the irrigation interval caused a decrease in evapotranspiration. Our evapotranspiration values have resembled the references mentioned above, varied between 296.0–493.6 mm for the treatments irrigated at two-day intervals and 286.1–491.7 mm for the treatments irrigated at four-day intervals. Marques et al. (2019) stated that the amount of irrigation water applied in the irrigation strategies they formed according to different soil matrix potentials ranged between 362.4–565.2 mm, and the evapotranspi-

ration varied between 3.12–4.87 mm/day. The difference in evapotranspiration between our results and Marques et al. (2019) is thought to be since the study was performed in pots and the varieties were different.

In cut flower cultivation, although there are quality parameters such as the number of flowers in stem, stem length, stem weight and stem diameter, the main determining parameter in terms of marketable yield is the stem length. In *lisianthus*, stem lengths of 50+ are considered as marketable, while flower stem lengths of 70+ cm are considered as good quality. In our study, all the stems in I_1 in both irrigation intervals was >50 cm, so the whole stems harvested from I_1 was evaluated as marketable yield. Marketable yield has decreased with reduced evapotranspiration due to the decrease in irrigation water applied. The reduction of marketable stems in I_2 , which is irrigated at intervals of two days, is 12.2–15.5%, while the reduction in I_3 is 25.5–35.5%. In both irrigation intervals, the highest decrease in marketable stems was realized in I_4 . The 75% reduction in the irrigation water applied resulted in a reduction of approximately 75% in the marketable stems. The highest proportionally decrease in the marketable stems occurred in IF_2 irrigated at four-day intervals. Stem length of *lisianthus* is significantly affected by cultivation practice such as growth media 57.4–68.7 cm (Facella et al. 2009), pinch application (41.3–58.7 cm) to increase the number of stems per unit area (Jamal Uddin et al. 2015), irrigation water salinity 30–40 cm (Ashrafi, Nejad 2018), and fertilization 69.8–79.0 cm (Mendoza et al. 2015). Stem lengths in our study was higher than the above studies except for Medoza et al. (2015). The differences between the stem length; it is thought to be due to the fact that water levels were not applied in the mentioned above studies and the differences between cultural practices.

Stem diameter like stem length was also higher than IF_2 compared IF_1 irrigated two days intervals. Facella (2009) found stem diameters between 8.1–9.3 mm in four different *lisianthus* varieties under full irrigation conditions, while Jamal Uddin et al. (2015) determined it to be 4 mm in applications without pinch, 5.2 mm with a single pinch, and 4.2 mm with two pinches. Although there is a small difference between our full irrigation trial results and the results given by Facella et al. (2009) but resembles the results reported by Jamal Uddin et al. (2015).

Stem weight is especially important in point of post-harvest strength. Therefore, one of the quality parameters of cut flowers in European Auction is stem weight. In our study, stem weights were significantly affected by different irrigation water levels ($P < 0.01$). Stem weight obtained from the trials with short irrigation intervals and whereas more water applied is much more. Marques et al. (2019) stated that the highest fresh and dry flower weight was determined in the –40 kPa trial with no water stress. It is seen that the results obtained from the research are compatible with the literature.

Stems with more flowers are more admired by consumers in terms of aesthetics and appearance. As in other quality parameters, a decrease was observed in the number of flowers per stem in parallel with the decreased amount of water applied. Although the effect of irrigation intervals on the number of flowers per stem is statistically insignificant, the number of

flowers per stem is higher in the trials irrigated at two-day intervals (IF₁: 6.65 numbers; IF₂: 7.49 numbers) – table 4. Sheehan and Joiner (1964), Baştuğ et al. (2006), Turan et al. (2015), and Yeşil (2017) concluded that the number of flowers per stem can be increased when irrigated at frequent intervals with irrigation water needs fully met in lily, gladiolus, chrysanthemum, and lisianthus. Our findings are consistent with the literature presented above.

After harvest, it is desirable that the cut flowers have a long vase life. The high dry matter is a parameter that directly increases the durability of cut flowers (Saygılı 2012). According to this approach, it can be said that the vase life of the plants obtained from limited irrigation conditions may be longer. Unlike other quality parameters, the dry matter increased as the amount of irrigation water applied decreased. Although the irrigation intervals did not affect the dry matter, the highest dry matter was obtained from the trials irrigated at two-day intervals with 14.23%.

Since the decrease in soil moisture in the plant root zone reduces the amount of water taken with the roots, this causes the cells to shrink and the cell wall is softened. This decrease in cell volume causes a decrease in turgor pressure and the amount of solute. When the decrease of turgor pressure, the first and important biophysical effect of water stress is turgor-dependent activities such as leaf expansion and root elongation that the most susceptible to water stress (Taiz, Zeiger 2008). According to the leaf area index results, all four different water levels were statistically in different groups. Obtaining higher leaf area index values in trials that irrigation water need is fully met, confirms the above physiological explanation in terms of lisianthus.

The number of buds, which is one of the vegetative growth parameters in cut flowers, varied depending on irrigation levels, as in other quality parameters, and there was a significant ($P < 0.01$) decrease in the number of buds in parallel with decreased water levels and varied between 9.22 and 7.19. The number of buds in our study is higher than grown in a soilless culture which ranged from 4.22 to 5.39. Many researchers have reported that the number of buds is affected by the plant type and variety, greenhouse conditions, cultivation techniques, and cultural practices such as irrigation and fertilization (Kazaz et al. 2010; Uçar, Kazaz 2016; Yeşil 2017). The fact that the number of buds is significantly affected by water levels in the study confirms the mentioned references.

In this study conducted in order to determine the effect of different irrigation intervals and irrigation water amounts on the yield and quality parameters of the lisianthus in greenhouse conditions, the highest evapotranspiration was measured from the I₁ trials which water needs of lisianthus fully met. A decrease was observed in evapotranspiration due to the decrease in the amount of irrigation water applied. Our results confirm that the increase in evapotranspiration has a positive effect on total yield, marketable yield, and flower quality. As a result of our study, considering the marketable yield and stem length, which is the most important quality parameter, the I₁ was determined the most suitable irrigation program in which the soil moisture decreasing from the field capacity was applied as irrigation water at intervals of two or four days. It was concluded that the I₂ irrigation program could

be applied by making some concessions from the quality parameters without a significant decrease in yield under limited water conditions. In this case, it will be possible to save approximately 103 mm of irrigation water.

This study was summarized from the Master's Thesis titled „The Effect of Different Soil Moisture Levels On Yield and Some Quality Parameters of *Lisianthus*” supported by The Scientific Research Projects Coordination Unit of Süleyman Demirel University with project numbered 4011-YLI-14.

References

- Ahmad H., Rahul Hk., Mahbuba S., Jahan M.R., Jamal Uddin A.F.M. 2017: Evaluation of *lisianthus* (*Eustoma grandiflorum*) lines for commercial production in Bangladesh. *Int. J. Bus. Soc. Sci. Res.*, 5(4), p. 156–167.
- Akgül M., Başayığit L. 2005: Süleyman Demirel Üniversitesi Çiftlik Eğitim Arazisinin Detaylı Toprak Etüdü ve Haritalanması. Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi, p. 9–3, 54–63.
- Allen R.G., Pereria L.S., Raes D., Smith M. 1998: Crop evapotranspiration. Guidelines for computing crop water requirements. Food and Agriculture Organization Irrigation and Drainage Paper 56, Rome, Italy.
- Anonymous 2014: Devlet Meteoroloji İşleri Genel Müdürlüğü (DMİGM), Isparta Meteoroloji Bölge Müdürlüğü Kayıtları. Isparta.
- Anonymous 2015: *Lisianthus* Yetiştiriciliği. On-line: http://hbogm.meb.gov.tr/modulerprogramlar/kursprogramlari/bahcecilik/moduller/lisianthus_yetistiriciligi (Access date: 21.03.2015).
- Anonymous 2019: On-line: <https://kadirbekci53.blogspot.com/2010/08/guzel-bir-cicek.html> (Access date: 18.07.2019).
- Ashrafi N., Nejad A.R. 2018: *Lisianthus* Response to Salinity Stress. *Photosynthetica*, 56(2), p. 487–494, DOI: 10.1007/s11099-017-0709-0.
- Baştuğ R., Büyüktaş D., Karagüzel O., Aydınşakir K. 2006: The effects of drip irrigation on flowering and flower quality of glasshouse gladiolus plant. *Agricultural Water Management*, 81, p. 132–144.
- Fascella G., Agnello S., Delmonte F., Sciortino B., Giardina G. 2009: Crop response of *lisianthus* (*Eustoma grandiflorum* Shinn.) hybrids grown in soilless culture. *Acta Horticulturae*, 807, p. 559–564.
- Harbaugh B.K., Woltz S.S. 1991: *Eustoma* quality is adversely affected by low pH of root medium. *HortScience*, 26(10), p. 1279–1280.
- Harbaugh B.K., McGovern R.J., Price J.F. 1997: Potted *lisianthus*: Secrets of success for plug production. *Greenhouse Grower*, 15(14), p. 28–37.
- Harbaugh B.K., Roh M.S., Lawson R.H., Pemberton B. 1992: Rosetting of *Lisianthus* Cultivars Exposed to High Temperatures. *Horticultural Science*, 27(8), p. 885–887.
- Jamal Uddin A.F.M., Shahrin S., Ahmad H., Rahman Sk.S., Shimasaki K. 2015: Influence of Terminal Bud Pinching on Growth and Flowering of *Lisianthus* (*Eustoma grandiflorum*). *International Journal of Business, Social and Scientific Research*, 4(1), p. 37–40.
- Kazaz S., Uçar Y., Aşkin M.A., Aydınşakir K., Şenyiğit U., Kadayifçi A. 2010: Effects of Different Irrigation Regimes on Yield and Parameters of Carnation. *Scientific Research and Essays*, 5(19), p. 2921–2930.
- Lakshmaiah K., Subramanian S., Ganga M., Jeyakumar P. 2019: Optimization of pinching and GA3 application to improve growth and flowering of *lisianthus* (*Eustoma grandiflorum*). *Journal of Pharmacognosy and Phytochemistry*, 8(6), p. 614–616.
- Marques P.A.A., do Amaral Richter M.E., Moreno M.A., dos Santos H.T., de Sousa Neto O.N. 2019: Effect of water stress on production of *lisianthus* flowers. I Congresso Luso-Brasileiro de Horticultura Sessão Horticultura Ornamental. 29 Actas Portuguesas de Horticultura 1a, Edição.

- Mengüç A. 1996: Kesme Çiçek Yetiştiriciliği 3 (Kasımpatı). Anadolu Üniversitesi Yayınları 904, Açıköğretim Fakültesi Yayınları, 486, p. 112–126, Eskişehir.
- Rosalinda Mendoza-Villarreal Luis A. Valdez-Aguilar, Alberto Sandoval-Rangel, Valentín Robledo-Torres, Adalberto Benavides-Mendoza 2015: Tolerance of Lisianthus to High Ammonium Levels in Rockwool Culture. Journal of Plant Nutrition, 38(1), p. 73–82, DOI: 10.1080/01904167.2014.920379.
- Saygılı L. 2012: Liliüm yetiştiriciliğinde farklı agregatların ve besin solusyonlarının kullanım olanakları. (Master's thesis, Adnan Menderes Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü).
- Sheehan T.J., Joiner J.N. 1964: Effects of watering frequencies and dwarfing chemicals on growth, flowering and chemical composition of Liliüm longiflorum „Georgia”. Production. Proceeding of the Florida State Horticultural Society, 77, p. 520–523.
- Taiz T., ve Zeiger E. 2008: Plant Physiology. Sinauer Associates, Inc., Publishers.
- Turan A., Uçar Y., Kazaz S. 2015: Effects of different irrigation treatments on quality parameters of cut chrysanthemum. Scientific Papers. Series B, Horticulture, 59, p. 419–426.
- Uçar Y., Kazaz S. 2016: Farklı Sulama Programlarının Krizantemin Kalitesi Üzerine Etkileri. Tarım Bilimleri Dergisi, 22, p. 385–397.
- Uçar Y., Kazaz S. 2015: The effects of different irrigation schedulings on the cut flower performance of oriental lily 'Casa Blanca'. Research for Rural Development, 1, p. 82–87.
- Uçar Y., Kazaz S., Aşkin M.A., Aydınşakir K., Kadayıfçı A., Şenyiğit U. 2011: Determination of Irrigation Water Amount and Interval for Carnation (*Dianthus caryophyllus* L.) with Pan Evaporation Method. Hortscience, 46(1), p. 102–107.
- Valdez-Aguilar L.A., Grieve C.M., James A., Poss J.A. 2013: Response of Lisianthus to Irrigation with Saline Water: Ion Relations. Journal of Plant Nutrition, 37, p. 546–561.
- Yeşil T. 2017: Farklı Sulama Programlarının Lisianthus (*Eustoma grandiflorum*)'un Verim ve Bazı Kalite Parametrelerine Etkisi. (Yüksek Lisans Tezi, Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü).
- Yıldırım O. 2008: Sulama sistemlerinin tasarımı. Ankara Üniversitesi Ziraat Fakültesi Yayınları No.1565. Ankara.

Sibel IPEKESEN¹, Fatma BASDEMIR², Murat TUNC¹, Seval ELIS¹,
Sevgi SAYLAK¹, B.Tuba BICER¹

The effect of fertilization on the above-ground and underground plant parts in chickpea varieties

Abstract. This study investigated the effects of phosphorus, nitrogen fertilizer applications and bacteria inoculation on underground and aboveground parts of the plant at flowering stage on chickpea varieties under greenhouse conditions. Plants harvested at 45 DAS (pre-flowering), 64 DAS (full-flowering) and 80 DAS (post flowering). Plant biomass, fresh and dry root, nodule and leaf weight per plant, plant height, number of nodules and leaves per plant and leaf area were measured. Dry root weight, root length and root nodule weight were more affected by phosphorus fertilizer application. Plant traits were less affected by bacteria inoculation. The effect of fertilizer applications and inoculation was significant ($p < 0.05$) for fresh and dry root nodule weight and number of nodule per plant. P fertilizer application was positively affect the fresh and dry root nodule weight, and number of nodule per plant at all flowering stages. At pre-flowering and full flowering stages, the highest fresh root nodule weight was observed from phosphorus (0.49 g and 0.9 g, respectively) and nitrogen (0.46 g and 0.8 g, respectively) applications.

Keywords: nitrogen, phosphorus, bacteria, fertilizer, inoculation, root nodule

Wpływ nawożenia na nadziemne i podziemne części różnych odmian ciecierzycy

Streszczenie. W pracy poddano analizie wpływ zastosowania fosforu, azotu i inokulacji bakterii na podziemne i nadziemne części rośliny (różne odmiany ciecierzycy) w fazie kwitnienia w warunkach szklarniowych. Rośliny zbierano w celu poddania ich analizie w 45. (przed kwitnieniem), 64. (pełne kwitnienie) i 80. (po kwitnieniu) dniu wegetacji. Zakres wykonanych pomiarów obejmował: masę roślin, masę świeżego i wysuszonego korzenia oraz masę guzków i liści w przeliczeniu na roślinę, wysokość rośliny, liczbę guzków i liści w przeliczeniu na roślinę oraz powierzchnię liścia. W badania wykazano, że na masę suchego korzenia, długość korzenia i masę guzków korzeniowych wpływało zastosowanie nawożenia fosforowego. Inokulacja bakteriami posiadała mniejszy wpływ na cechy roślin. Wpływ stosowania nawozu i inokulacji był istotny ($p < 0,05$) dla masy świeżego i suchego guzka

¹ Dicle University, Faculty of Agriculture, Department of Field Crops, Diyarbakir, Turkey

² Harran University, Ceylanpınar Agriculture Vocational School, Sanlıurfa, Turkey

korzeniowego oraz liczby guzków w przeliczeniu na roślinę. Stosowanie nawozu P pozytywnie wpłynęło na masę świeżych i suchych guzków korzeniowych oraz liczbę guzków w przeliczeniu na roślinę we wszystkich fazach kwitnienia. Największą masę świeżego guzka korzeniowego w fazie przed- i pełnego kwitnienia zaobserwowano po zastosowaniu fosforu (odpowiednio 0,49 g i 0,9 g) i azotu (odpowiednio 0,46 g i 0,8 g).

Słowa kluczowe: azot, fosfor, bakterie, nawóz, inokulacja, guzek korzeniowy

Introduction

Chickpea (*Cicer arietinum* L.) is the third most important pulse in the world (after beans and peas). Its seeds have been eaten by humans since around 7,000 BC. It is widely cultivated for its nutritious seeds, which are harvested when immature and eaten raw, roasted, or boiled or when mature and dry processed into flour. Chickpea is currently grown on about 14 million hectares worldwide. India and Australia rank the first and second with the shares of 65% and 7.3%, respectively. Average annual production of chickpea is about 14 million tons with 95% of chickpea cultivation and consumption occurring in the developing countries (Fao 2018). The chickpea area in Turkey is about 514 000 ha with a production of 630 000 tons and an average yield of 1230 kg/ha (Tuik 2018). Chickpea acreage and productivity in Turkey increased in last decades. The use of improved cultivars and agronomic techniques by the farmers and government supports had an increasing effect on total chickpea production. Even last four-year data shows that harvested area and production in Turkey increased by 31 and 40%, respectively. Chickpea is less labor-intensive and requires fewer external inputs as compared to cereals. Chickpea is a major protein source for poor communities in many parts of the semi-arid tropical areas of Africa and Asia. A hallmark trait of chickpea, like other legumes, is the capability to convert atmospheric nitrogen (N_2) into ammonia (NH_3) in symbiotic association with *Mesorhizobium ciceri* (Kant et al. 2016). Nitrogen (N) is unique among the major elements required for life, in that its cycle includes a vast atmospheric reservoir (N_2) that must be fixed before it can be used by most organisms. The supply of this fixed nitrogen controls the productivity, carbon storage, and species composition of many ecosystems. Before the extensive human alteration of the nitrogen cycle, 90 to 130 million metric tons of nitrogen (Tg N) were fixed biologically on land each year. Cultivation of soybeans, alfalfa, and other legume crops that fix nitrogen symbiotically enhances fixation by another; 40 Tg/year (Vitousek et al. 1997). Rhizobia is the group of soil bacteria that infect the roots of legumes to form root nodules. Rhizobia are found in the soil and after infection, produce nodules in the legume where they fix nitrogen gas from the atmosphere turning it into a more readily useful form of nitrogen. From here, the nitrogen is exported from the nodules and used for growth in the legume (Herridge et al. 2014). Chickpea obtains its nitrogen through nitrogen fixation. It requires optimum amounts of phosphorus, potash, sulfur, and other nutrients. The response to nutrient application in chickpea depends on the nutrient status of the soil, agro-climatic conditions, and the genotype (Singh,

Diwakar 1995). Plants dependent on symbiotic nitrogen (e.g., cowpea) suffer from temporal nitrogen deficiency during seedling growth when cotyledon reserves are exhausted. The application of starter nitrogen fertilizer gives seedlings a good start, enhances early vegetative growth which results in increased branches, higher number of pods, seeds, and grain yield. Other authors have also reported significant effect (Abayomi et al. 2008). Starter N fertilizer in cowpea increased grain and fodder yields, nitrogen use efficiency (AbdulRahman et al. 2018).

Small amounts of available soil or fertilizer N have often been shown to have a stimulatory effect on legume nodulation and N_2 -fixation, the so-called “starter effect”. This is mainly due to the stimulatory effect of N on growth and plant establishment during the period between root emergence and the onset of active N_2 -fixation (Giller, Cadisch 1995).

The response to phosphate application depends on the available soil phosphorus (P) and other edaphic factors. On terrarosa soils, with an available soil P level of less than 2.5 mg/kg, application of 22 kg P/ha has been quite effective. Phosphorus (P) application significantly increased dry matter production and resulted in greater diversion of dry matter to pods (Saxena 1984). Lemma et al. (2013) reported that low P applications (30 kg/ha) were no effect on the nodulation, but application P beyond 10 kg P/ha will bring no addition improvement in the nodulation of chickpea. Also, they reported that nitrogen treatments had stimulating effect on nodulation of chickpea. Shewangizaw (2017) reported that root length and root dry weight, nodule number, nodule volume, nodule dry weight were significantly affected by sulphur and zinc nutrients and rhizobium inoculation treatments. David and Khan (2001) showed that an important increase in plant height and dry root and shoot weights, but decline in nodulation in chickpea due to nitrogen application. The first developmental stages and especially flowering stage are important development circuits in which the relationship between nutrition and growth is observed. The information obtained during the flowering stage provides data on which plant parts the nutrients used by the plant are stored.

This study was carried out to determine the effect of plant nutrients, nitrogen, phosphorus, bacteria, on the plant traits during the flowering stage.

1. Material and methods

A greenhouse experiment was conducted at Dicle University, Agriculture Faculty, Diyarbakir, southeastern of Turkey during the 2019 spring season. The soil was collected at 0–20 cm depth of the field from the research area of the faculty. The soil was air-dried, ground, passed through a 2 mm sieve and mixed thoroughly. Soil sample was taken and analyzed for physico-chemical properties which showed that the soil was loam in texture with pH 7.6, organic matter 0.63%, NO_3-N 6.2 mg/kg and phosphorus 10.0 mg/kg. The experimental design was split-plot in randomized complete block design with three replications. Inoculation applications included the application of control (C), nitrogen (N) – 50 kg/ha as form of urea,

phosphorus (P) – 80 kg/ha as form of triple superphosphate and bacteria (R) – *Rhizobium ciceri*. Four chickpea varieties (Gokce, Diyar–95 (D.95), Aziziye–94 (A.94) and Taek–Sagel (Taek)) were used. Gokce and Aziziye–94 are a medium-seeded kabuli–type, were commonly grown on the Turkey due to tolerance to Anthracnose. Taek–Sagel is a small-seeded mutant kabuli–type. The soil was transferred into polyethylene pots of 5.0 lt in size. Nitrogen and phosphorus fertilizers were applied to soil and mixed thoroughly with hand. Seeds of chickpea varieties were inoculated by compatible strain of *Rhizobium cicerii* before sowing. Eight seeds on 11 February were sown in each pot and thinned to three seedlings per pot after germination. The pots were irrigated at regular intervals to maintain the soil moisture. The plants were grown as close as possible to 25–27/19–21°C day/night temperature.

Pots were harvested at three different plant growth stages, pre-flowering 45 DAS (03.27.2019), full-flowering (04.16.2019) and post-flowering (05.05.2019) stages. Data on plant biomass (stem, leaves + root), fresh and dry root, leaf and nodule weight, plant height, root length, leaf area, number of nodules and leaves per plant were recorded at three different stages. Plant were taken out completely from the pots. After washing carefully to remove the adhering soil particles, plant was cut off separately into roots, leaves and shoots, and all parts were weighed, then, nodules were removed from root for fresh weight. The samples (root, leaf, stem, nodule) were oven dried at 70°C for 24 hours (Wood, Roper 2000), and dry weights were recorded.

Over dry plant parts weight, proportional leaf area [cm²/g], specific leaf area [cm²/g], proportional leaf weight [g/g], proportional root weight [g/g], proportional stem weight [g/g] and leaf thickness [cm²/g] in fertilizer applications and at three different flowering stages were calculated by Excel. Specific leaf area = total leaf area [cm²]/total leaf dry weight [g], proportional leaf weight = total leaf dry weight [g]/total plant dry weight [g], proportional root weight = total root weight [g]/total plant dry weight [g], proportional stem weight = total stem weight [g]/total plant dry weight [g] and leaf thickness = 1/specific leaf area (Uzun 1996).

Data were subjected to analysis of variance (ANOVA) using MSTAT-C (Freed et al. 1991). Means were compared at the 5% level of significance using Duncan.

2. Results and discussion

The effects of nitrogen, phosphorus fertilizer applications and bacteria inoculation on plant traits at flowering growth stages were determined in pots.

The effect of fertilizer applications and inoculation on fresh plant biomass was significant ($p < 0.05$) only at post-flowering stage (80 DAS), was no significant at pre-flowering (45 DAS) and full-flowering (64 DAS). Maximum fresh plant biomass (28.0 g/plant) was observed from N fertilizer application. At full-flowering and post-flowering, application x variety interaction was significant, and varieties Gokce, Diyar–95 and Aziziye–94 had response to fertilizer applications. At full-flowering stage, varieties Diyar–95 (21.0 g) and

Aziziye-94 (20.7 g), at post-flowering variety Diyar-95 (28.2 g) were showed high response to bacteria inoculation.

The effect of fertilizer applications and inoculation on dry plant biomass was no significant at all three flowering stages (table 1). However, Das et al. (2012) reported that *rhizobium* sp. inoculation gave significant increases of 15.59, 14.25 and 1.90 per cent in plant dry weight at 45, 75 and 120 DAS. Moreover, Abdalla et al. (2011) revealed that chemical fertilizers significantly increased shoot dry weight. Habibzadeh (2015) reported that between different levels of phosphorus application, 15, 10 and 5 mg was produced the most above-ground dry matter.

Table 1. The effect of fertilizer applications and inoculation on fresh and dry plant biomass [g/plant]

	Fresh plant biomass [g/plant]					Dry plant biomass [g/plant]				
	Gokce	D.95	Taek	Az.94	Mean	Gokce	D.95	Taek	Az.94	Mean
Pre-flowering										
C	9.8	7.8	7.3	13.9	9.7	1.3	1.2	1.2	1.3	1.3
P	10.5	8.9	9.0	11.9	10.1	1.3	1.3	1.3	1.3	1.3
N	10.6	9.7	8.5	13.8	10.7	1.4	1.2	1.2	1.4	1.4
R	9.3	8.0	9.3	9.6	9.1	1.3	1.2	1.2	1.3	1.3
Mean	10.1ab	8.6 b	8.5 b	12.3 a		1.3	1.2	1.2	1.3	
Full-flowering										
C	20.5 a	14.0 b	17.2	14.4b	16.5	2.9	2.3	2.4	2.4	2.5
P	19.8 a	18.2ab	17.6	11.4b	16.7	2.3	3.9	2.4	2.3	2.7
N	14.8 b	24.5 a	13.4	15.0b	16.9	3.0	2.8	2.7	2.1	2.7
R	13.6 b	21.0 a	11.6	20.7a	16.7	2.3	3.0	1.9	3.2	2.6
Mean	17.1	19.4	14.9	15.4		2.6	3.0	2.4	2.5	
Post-flowering										
C	22.9 b	24.2ab	26.3	23.8 b	24.3b	4.8	5.3	5.1	4.0	4.8
P	29.2 b	20.6 b	21.4	21.6 b	23.2b	5.9	4.2	4.0	4.1	4.5
N	42.6 a	20.9 b	18.8	29.5 a	28.0a	8.5	3.9	3.7	5.9	5.5
R	17.4 b	28.2 a	21.2	23.3 b	22.5b	4.0	5.1	3.8	4.1	4.3
Mean	28.0	23.5	21.9	24.6		5.8 a	4.6b	4.1 b	4.5 b	

F-test significant at the P = 0.05 level, respectively, ns: non-significant. Means followed by the same letter within a column are not significant different according to Duncan (0.05).

The effect of fertilizer applications and inoculation on fresh and dry root weight were no significant at all flowering stages. Only at post-flowering stage, dry root weight was affected by applications. Application x variety interaction for fresh root weight was significant at full and post-flowering stages. At full-flowering stage, varieties Gokce, Diyar-95 and Aziziye-94 were response to fertilizer applications, but at post-flowering stage, variety Gokce was affected by fertilizer applications. Applications x variety interaction for dry root weight was significant at full and post-flowering stages. The application x variety interaction showed that P and N among fertilizer applications had a positive and high effect on fresh and

Table 2. The effect of fertilizer applications and inoculation on fresh and dry root inoculation weight [g/plant]

	Fresh root weight [g/plant]					Dry root weight [g/plant]				
Pre-flowering										
	Gokce	D.95	Taek	Az.94	Mean	Gokce	D.95	Taek	Az.94	Mean
C	5.3	5.0	3.7	9.1	5.8	0.46	0.49	0.27	0.75	0.52
P	5.0	6.4	4.7	7.3	5.9	0.45	0.44	0.58	0.61	0.49
N	6.0	5.7	5.1	6.3	5.8	0.47	0.45	0.51	0.53	0.49
R	4.7	5.3	5.7	5.0	5.2	0.38	0.30	0.52	0.42	0.40
Mean	5.3 ab	5.6 ab	4.8 b	6.9 a		0.44	0.42	0.47	0.58	
Full-flowering										
C	7.2 b	11.4 a	9.6	6.9 b	8.8	0.61 b	0.60 b	0.79 a	0.67 b	0.67
P	12.1 a	13.2 b	10.8	8.3 ab	11.1	0.91 a	1.32 a	0.64 ab	0.98 a	0.96
N	11.3 a	13.9 a	9.2	7.5 b	9.5	1.25 a	1.21 a	0.76 a	0.55 b	0.94
R	7.1 b	8.8 b	7.5	11.6 a	8.8	0.59 b	1.05 a	0.49 b	0.54 b	0.67
Mean	9.4	11.8	9.3	8.6		0.84	1.04	0.67	0.69	
Post-flowering										
C	9.6 b	10.9	13.6	13.6	11.9	0.83 bc	1.50	1.40	1.02 b	1.19ab
P	18.5 a	11.0	10.1	14.8	13.6	1.93 a	1.31	1.10	1.51 a	1.46 a
N	13.7ab	10.0	10.7	10.9	11.3	1.08 b	0.98	0.86	0.97 b	0.97 b
R	5.4 b	14.8	11.9	13.0	11.3	0.52 c	1.39	1.04	0.66 b	0.91 b
Mean	11.8	11.7	11.6	13.0		1.09	1.30	1.10	1.04	

F-test significant at the $P = 0.05$ level, respectively, ns: non-significant. Means followed by the same letter within a column are not significant different according to Duncan (0.05).

dry root weight, but was generally decreased by bacteria inoculation (table 2). Similarly, Abdalla et al. (2011) reported that nitrogen, phosphorus fertilization separately and combination of nitrogen and phosphorus significantly increased root dry weight at 4, 6, 8 and 10 weeks after sowing.

The effect of applications on root length was significant at full and post-flowering stages. At full and post-flowering stages, the highest root length (38.3 cm and 46.4 cm respectively) was observed from P fertilizer application. Control group (34.2 cm and 36.6 cm respectively) and bacteria inoculation (33.1 cm and 29.4 cm respectively) showed low the root length at both flowering stages (table 3).

Table 3. The effect of fertilizer applications and inoculation on root length and dry plant height [cm]

	Root length [cm]					Plant height [cm]				
Pre-flowering										
	Gokce	D.95	Taek	Az.94	Mean	Gokce	D.95	Taek	Az.94	Mean
C	27.0	40.7	26.3	33.3	31.8	39.3	26.7	32.4	38.4	34.2
P	30.7	27.3	35.3	32.7	31.5	40.0	31.3	31.1	40.5	35.7
N	36.7	37.3	26.7	27.7	32.1	42.1	34.8	36.2	38.3	37.9
R	35.3	24.0	22.0	29.3	27.7	41.8	32.0	29.5	40.0	35.8
Mean	32.4 a	32.3 a	27.6 b	30.8 a b		40.8	31.2	32.3	39.3	
Full-flowering										
C	44.0	21.7	42.3	28.7	34.2 b	62.3	45.0	52.3	42.0b	50.4 b
P	41.3	37.0	28.3	46.7	38.3 a	55.7	47.7	52.0	59.0 a	53.6 a b
N	41.7	38.7	32.7	27.0	35.0 b	58.3	56.0	50.0	61.0 a	56.3 a
R	36.7	28.7	32.0	35.0	33.1 b	54.0	50.7	44.3	55.7 a	51.2 b
Mean	40.9 a	31.5 b	33.8 b	34.3 b		57.6	49.8	49.7	54.4	
Post-flowering										
C	46.7	34.0	24.7	41.0	36.6 b	65.7	50.7	63.3	57.7	59.3
P	63.7	44.3	37.3	40.3	46.4 a	64.0	55.7	53.7	66.7	60.0
N	38.0	50.0	34.0	30.3	38.1 a b	67.3	54.7	61.0	62.7	61.4
R	29.0	23.7	30.0	35.0	29.4 b	63.3	58.0	57.0	57.3	58.9
Mean	44.3 a	38.0 a b	31.5 b	36.7 a b		65.1	54.8	58.8	61.1	

F-test significant at the P = 0.05 level, respectively, ns: non-significant. Means followed by the same letter within a column are not significant different according to Duncan (0.05).

Plant height was affected by fertilizer applications at only full-flowering stage, plant height was increased by N (56.3 cm) and P (53.3 cm) fertilizer applications, but control group (50.4 cm) and rhizobium inoculation 51.2 cm) showed low plant height at the stage. Application x variety interaction was significant at full-flowering stage. Variety Aziziye-94 was response to all applications compared to control (table 3). David and Khan (2001) reported that a marked increase in plant height and oven dry root and shoot weights of chickpea plants due to 100 kg/ha nitrogen applications. However, we have not achieved such a result due to only 50 kg/ha nitrogen application in this study. Walley et al. (2005) revealed that phosphorus (40 kg/ha) enhanced chickpea vegetative growth. Namvar et al. (2011) reported that plant height increased with application of N fertilizer, Rh. inoculation had no significant effects on plant height.

The effect of fertilizer applications and inoculation was significant ($p < 0.05$) for fresh and dry root nodule weight and number of nodule per plant. P fertilizer application was positively affect the fresh and dry root nodule weight, and number of nodule per plant at all flowering stages. At pre-flowering and full flowering stages, the highest fresh root nodule weight was observed from phosphorus (0.49 g and 0.9 g, respectively) and nitrogen (0.46 g and 0.8 g, respectively) applications (table 4).

At pre and full flowering stages, all applications showed higher dry nodule weight than control group, but at post-flowering stage, the highest dry root nodule weight (0.28 g) was observed from P fertilizer application (table 4).

At pre-flowering and post flowering stages, the highest number of nodules per plant was observed from P fertilizer application (57.6 and 88.3, respectively) and bacteria inoculation (54.6 and 74.0, respectively). At full-flowering stage, P (78.3) and N (71.6) fertilizer applications showed high number of nodules per plant (table 1). Das et al. (2012) reported that *rhizobium* sp. inoculation gave significant increases of 33.72, 26.11 and 4.56 per cent in nodule dry weight at 45, 75 and 120 DAS. Giller and Cadisch (1995) reported that small amounts of available soil or fertilizer N have often been shown to have a stimulatory effect on legume nodulation and N_2 -fixation. Similarly, Lemma et al. (2013) revealed that low P applications (30 kg/ha) were no effect on the nodulation, but, if P application is beyond 10 kg/ha, it will be improvement in the nodulation. We showed that root nodule traits showed response to all fertilization applications compare to control group.

Gokce among varieties had high the root nodule performance. Significant application x variety interaction for fresh and dry nodule weight and number of nodules per plant revealed that some varieties were no showed response to fertilizer application (table 4). Lemma et al. (2013) reported that N and P fertilizer were significantly affected the number of nodule per plant and nodule weight compare to the control. However, Namvar et al. (2011) revealed that the presence of high rates of N can inhibit the nodulation and symbiotic N fixation in legumes, similarly David and Khan (2001) reported that addition of nitrogen to the soil severely depressed the nodulation on chickpea.

Table 4. The effect of fertilizer applications and inoculation on fresh and dry nodule weight [g/plant] and number of nodules per plant

	Fresh root nodule weight [g/plant]					Dry root nodule weight [g/plant]				
Pre-flowering										
	Gokce	D.95	Taek	Az.94	Mean	Gokce	D.95	Taek	Az.94	Mean
C	0.08	0.09	0.47	0.31	0.23 b	0.01 b	0.01 b	0.04	0.02 b	0.02 b
P	0.44	0.36	0.38	0.79	0.49 a	0.07 a	0.06 a	0.06	0.07 a	0.06 a
N	0.50	0.35	0.40	0.61	0.46 a	0.05 a	0.04ab	0.09	0.06 a	0.06 a
R	0.43	0.18	0.30	0.51	0.36ab	0.06 a	0.02 b	0.08	0.05 a	0.05 a
Mean	0.36 b	0.24b	0.39 b	0.55 a		0.05	0.03	0.07	0.05	
Full-flowering										
C	0.9 a	0.4 b	0.4	0.6	0.6 b	0.11 b	0.05 b	0.06	0.03	0.06 b
P	0.8 a	1.1 a	0.6	0.9	0.9 a	0.39 a	0.16 a	0.08	0.12	0.19 a
N	0.9 a	0.7ab	0.7	0.9	0.8 a	0.20 b	0.07 b	0.09	0.11	0.12 a
R	0.4 b	0.8ab	0.4	1.0	0.6 b	0.09 c	0.10 b	0.06	0.13	0.09ab
Mean	0.8	0.7	0.5	0.8		0.20 a	0.09 b	0.07b	0.10 b	
Post-Flowering										
C	1.2 b	0.7 b	0.7	1.2	1.0	0.18 b	0.15	0.13b	0.17	0.16 b
P	2.2 a	1.2 b	1.3	1.2	1.5	0.49 a	0.18	0.28a	0.16	0.28 a
N	1.0 b	1.0 b	1.4	1.0	1.1	0.10 b	0.09	0.26a	0.21	0.17 b
R	1.0 b	1.7 a	1.1	1.2	1.2	0.11 b	0.20	0.13b	0.14	0.15 b
Mean	1.3	1.1	1.1	1.2		0.22	0.16	0.20	0.17	
Number of nodules per plant										
Pre-flowering					Full-flowering					
C	52.3 b	29.0	27.7 b	31.3 b	35.1 b	98.3 b	38.3	50.7	49.3	59.2 b
P	80.7 a	37.3	36.0ab	76.3 a	57.6 a	123.7a	54.7	50.0	85.0	78.3 a
N	67.7ab	37.0	30.3ab	55.0ab	47.5 b	86.3 b	69.0	56.7	74.3	71.6 a
R	84.0 a	30.3	41.0 a	63.0 a	54.6 a	72.7 b	46.0	40.0	91.3	62.5 b
Mean	71.2 a	33.4c	33.8 c	56.4 b		95.3 a	52.0 b	49.3b	75.0 b	
Post-flowering										
C	66.3 b	80.0a	43.0 b	63.7 b	63.3 b					
P	142.0a	68.7b	66.0 a	76.7ab	88.3 a					
N	87.0 b	37.7	32.3 b	83.0 a	60.0 b					
R	72.3 b	61.0b	68.6 a	94.0 a	74.0ab					
Mean	91.9 a	61.8b	52.5 c	79.3 b						

F-test significant at the P = 0.05 level, respectively, ns: non-significant. Means followed by the same letter within a column are not significant different according to Duncan (0.05).

We observed that both bacteria inoculation and nitrogen fertilizer application were a little depressed the nodulation on root stem. This showed that the presence of adequate nitrogen or suit rhizobial strain in the soil decreased nodulation. Rawsthorne et al. (1985) reported that nitrate at 0.71 and 1.43 mM stimulated early nodulation and nodule growth but larger concentrations of nitrate (2.86 mM) decreased significantly nodulation and symbiotic N₂ assimilation.

Nodule dry weights in pots, we attained in this study, varied between 0.05 g/plant (45 DAS), 0.12 g/plant (64 DAS) and 0.187 (80 DAS). Rawsthorne et al. (1985) reported

Table 5. The effect of fertilizer applications and inoculation on fresh and dry leaf weight [g/plant], number of leaves per plant and leaf area [cm²/plant]

	Fresh leaf weight [g/plant]					Dry leaf weight [g/plant]				
	Gokce	D.95	Taek	Az.94	Mean	Gokce	D.95	Taek	Az.94	Mean
Pre-flowering										
C	2.0	1.3	2.0	1.7	1.8	0.39	0.37	0.46	0.46	0.44
P	2.3	2.0	2.0	2.0	2.1	0.46	0.51	0.48	0.53	0.50
N	3.0	1.7	2.0	2.3	2.3	0.50	0.42	0.50	0.72	0.55
R	2.3	1.3	1.3	2.0	1.8	0.45	0.26	0.30	0.55	0.40
Mean	2.4 a	1.6 b	1.8ab	2.0 a		0.45	0.39	0.43	0.57	
Full-flowering										
C	4.9	3.3	3.8 a	4.0	4.0	1.13	0.93	0.88	0.92	0.97
P	4.0	5.9	3.4 a	4.2	4.4	0.91	1.51	0.81	0.97	1.05
N	5.3	4.1	4.4 a	3.4	4.3	1.16	1.02	1.10	0.82	1.03
R	4.0	4.6	2.9 b	5.3	4.2	0.90	0.92	0.67	1.27	0.94
Mean	4.6	4.5	3.7	4.2		1.02	1.10	0.87	1.00	
Post-flowering										
C	6.4 b	7.5	6.8	6.3	6.7	1.95 b	2.12	2.11	1.42 b	1.90
P	10.7 a	5.3	4.7	8.4	7.3	2.67ab	1.73	1.70	1.68 b	1.95
N	11.3 a	6.2	6.1	5.6	7.3	3.08 a	1.47	1.34	3.15 a	2.26
R	5.8 b	8.8	4.9	6.4	6.5	1.66 b	2.27	1.45	1.91 b	1.82
Mean	8.5 a	7.0 a	5.6 b	6.7 a			1.90	1.65	2.04	

F-test significant at the P = 0.05 level, respectively, ns: non-significant. Means followed by the same letter within a column are not significant different according to Duncan (0.05).

that nodule dry weights ranged from 0.34 g to 0.8 g in the hot and warm regimes. In Turkey, nodule dry weight in plants inoculated from wild chickpea varied between 0.023 g to 0.261 g (Ogutcu et al. 2008).

The effect of fertilizer applications and inoculation on fresh and dry leaf weight was no significant at all flowering stages. The differences among varieties for fresh leaf weight were significant ($p < 0.05$) at pre-flowering and post-flowering stages, and fresh leaf weight ranged from 1.6 g/plant in Diyar-95 to 2.4 g/plant in Gokce at pre-flowering stage. At post-flowering stage, fresh leaf ranged from 5.6 g/plant in Taek-Sagel to 8.5 g/plant in Gokce (table 5).

Table 6. The effect of fertilizer applications and inoculation on number of leaves per plant and leaf area [cm²/plant]

	Number of leaves per plant					Leaf area [cm ²]				
Pre-flowering										
	Gokce	D.95	Taek	Az.94	Mean	Gokce	D.95	Taek	Az.94	Mean
C	12.3	20.3	19.7	14.7	16.8	118	103	121	147	123
P	17.0	23.7	22.3	13.3	19.1	142	112	92	181	132
N	15.0	22.3	19.7	20.0	19.3	132	143	152	139	142
R	12.3	18.7	20.0	15.0	16.5	129	98	119	141	122
Mean	14.2 b	21.3 a	20.4 a	15.8 b		130 b	114 b	121 b	152 a	
Full-flowering										
C	30.7	34.0	28.3	21.3	28.6	270.9	193 b	203	222	222
P	23.0	45.0	32.3	21.0	30.3	215	356 a	216	221	252
N	35.7	35.3	35.7	26.7	33.3	264	225 b	251.6	190	233
R	26.7	40.7	27.0	33.0	31.8	221	261 b	172.4	274	232
Mean	29.0 b	38.8 a	30.8 b	25.5 b		243	259	211	227	
Post-flowering										
C	33.7	55.0	44.0	33.7	41.6 b	361 b	281 b	269 b	255 b	291 b
P	44.0	44.7	40.3	34.7	40.9 b	297 c	352 a	331 a	247 b	307 a
N	61.7	38.7	34.7	52.0	46.8 a	475 a	241 b	218 b	379 a	328 a
R	31.0	59.0	36.3	40.0	41.6 b	256 c	382 a	213 b	274 b	281 b
Mean	42.6 b	49.3 a	38.8 b	40.1 b		347 a	314 a	258 b	288 b	

F-test significant at the $P = 0.05$ level, respectively, ns: non-significant. Means followed by the same letter within a column are not significant different according to Duncan (0.05).

The effect of fertilizer applications and inoculation on number of leaves per plant and leaf area was significant ($p < 0.05$) at post-flowering stage. At post-flowering stage, the highest number of leaf and leaf area per plant was recorded in N fertilizer application, but other all applications were similar to control group for number of leaves per plant (table 6).

At post-flowering stage, leaf area was response to significantly N (328.4 cm^2) and P (306.7 cm^2) fertilizer applications, and bacteria inoculation (281.3 cm^2) for leaf area was similar to control group (291.3 cm^2). Significant application x variety interaction showed that varieties had different response to fertilizer applications. Yahiya and Fatma (1995) reported that application of P in general significantly increased leaf area, shoot dry weight. Habibzadeh (2015) reported that between different levels of phosphorus application, 15, 10 and 5 mg was produced the most above-ground dry matter. Das et al. (2012) reported that *rhizobium* sp. inoculation gave significant increases of 15.59, 14.25 and 1.90 per cent in plant dry weight at 45, 75 and 120 DAS.

Plants were harvested at pre-flowering (45 DAS) days to after sowing, full flowering (64 DAS) and post flowering (80 DAS) stages. Fresh and dry plant biomass, fresh and dry root, leaf, nodule weight, plant height, number of leaves and nodules per plant, specific leaf area, proportional leaf, root and stem weight and leaf thickness calculated at flowering stages based on average experiment data (fig. 1–5).

While the number of leaves per plant was increased by 73% between pre-flowering period and full-flowering period, it was increase about 37% at between full-flowering and post-flowering. The leaf area increased by about 81% at between pre-flowering and full-flowering, but the increase in the post-flowering stage was about 30%. Proportional stem weight and proportional leaf weight increased as the periods progressed, but proportional root weight, specific leaf area and leaf thickness decreased.

Proportional stem weight [g/g], proportional root weight [g/g], proportional leaf area [cm^2/g], specific leaf area [cm^2/g] and leaf thickness [cm^2/g] were calculated at flowering stages based on fertilizer applications (fig. 1–5).

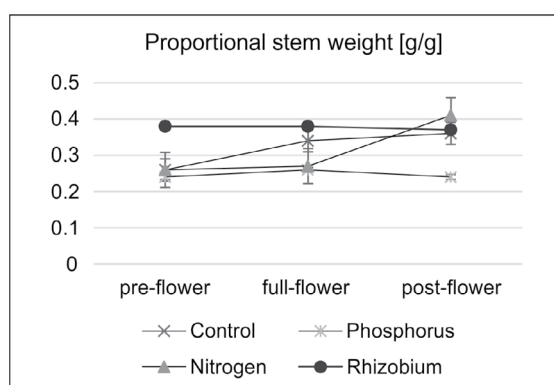


Figure 1. Proportional stem weight and root weight for fertilizer applications and inoculation at flowering stages

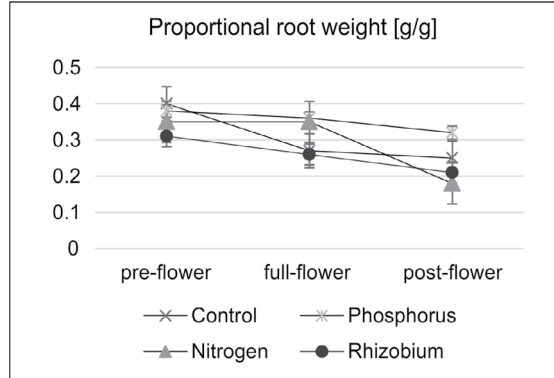


Figure 2. Proportional stem weight and root weight for fertilizer applications and inoculation at flowering stages

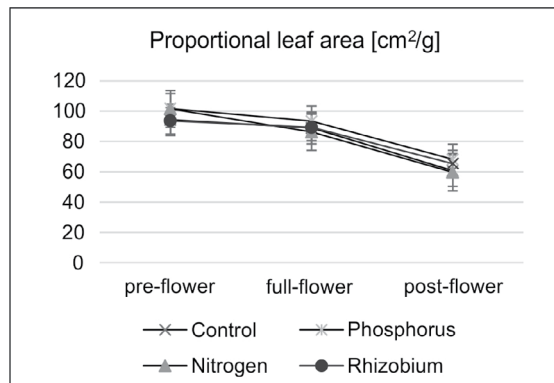


Figure 3. Proportional leaf area and specific leaf area for fertilizer applications and inoculation at flowering stages

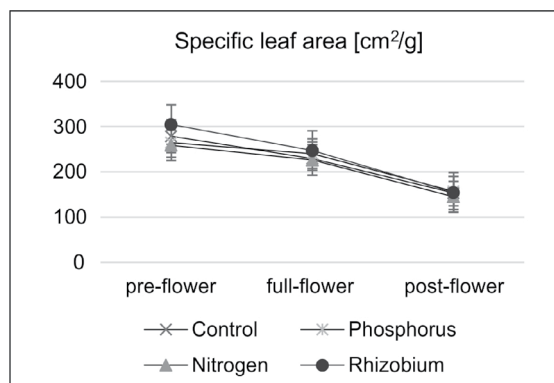


Figure 4. Proportional leaf area and specific leaf area for fertilizer applications and inoculation at flowering stages

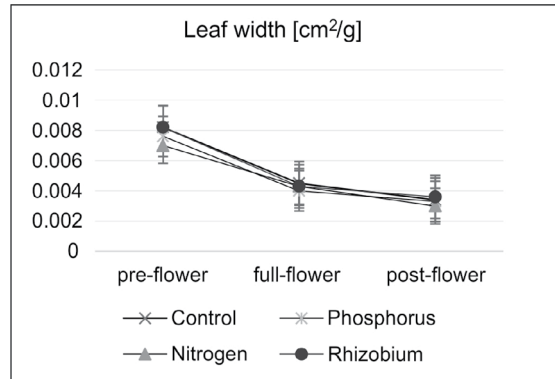


Figure 5. Leaf width for fertilizer applications and inoculation at flowering stages

As the stage changed, the effect of N fertilizer applications was more than the others for proportional stem weight, it was no response to phosphorus fertilizer Application. Proportional root weight was decreased, and N fertilizer applications was differ from other applications. Proportional leaf area, specific leaf area and leaf thickness were decreased at both fertilizer applications and progressive flowering stages, but differences were no significant.

Conclusions

The effects of nitrogen, phosphorus fertilizers and bacteria inoculation on the underground and aboveground parts of the plant were investigated on some chickpea varieties. Above ground parts of the plant were generally affected by nitrogen application, and underground parts were affected by phosphorus application. Fertilizer applications had significant effect on root nodule properties, especially phosphorus application was important. The bacteria inoculation had little effects on plant parts.

References

- Abayomi Y.A., Ajibade T.V., Sammuell O.F., Saadudeen B.F. 2008: Growth and yield responses of cowpea (*Vigna unguiculata* (L.) Walp) genotypes to nitrogen fertilizer (npk) application in the southern guinea savanna zone of Nigeria. *Asian Journal of Plant Sciences*, 7, s. 170–176.
- Abdall A.S., Osman A.G., Abdelgani M.E., Rugheim A.M.E. 2011: Effects of biological and mineral fertilization on nodulation, nitrogen and phosphorus content and yield of chick pea (*Cicer arietinum* L.). *Advances in Environmental Biology*, 5(9), s. 2886–2894.

- AbdulRahman N., Larbi A., Kotu B., Marthy Tetteh F., Hoeschle–Zeledon I. 2018: Does nitrogen matter for legumes? starter nitrogen effects on biological and economic benefits of cowpea (*Vigna unguiculata* L.) in Guinea and Sudan Savanna of West Africa. *Agronomy*, 8(7), s. 120.
- Das S., Pareek N., Raverkar K.P., Chandra R., Kaustav A. 2012: Effectiveness of micronutrient application and Rhizobium inoculation on growth and yield of Chickpea. *International Journal of Agriculture, Environment and Biotechnology*, 5(4), s. 445–452.
- David J.K., Khan S. 2001: Effect of Nitrogen Application on Nodulation in Inoculated Chickpea (*Cicer arietinum* L.). *Journal of Biological Sciences*, 1, s. 87–89.
- FAO 2018. On-line: <http://www.fao.org/faostat/en/#data/QC>.
- Freed R., Eisensmith S.P., Goetz S., Reicosky D., Smail V.W., Wolberg P. 1991: User's Guide to MSTAT. C. Michigan State University, East Lansing, Michigan.
- Giller K., Cadisch G. 1995: Future benefits from biological nitrogen fixation an ecological approach to agriculture. *Plant and Soil*, 174(1), s. 255–277.
- Habibzadeh Y. 2015: Effects of phosphorus levels on dry matter production and root traits of chickpea plants in presence or absence of Arbuscular mycorrhizal fungi. *J. Agric. Sci. Food Tech*, 1(1), s. 1–6.
- Herridge D., Hartley E., Gemell L. 2014: Rhizobial counts in peat inoculants vary amongst legume inoculant groups at manufacture and with storage: Implications for quality standards. *Plant and Soil*, 380(1/2), s. 327–336.
- Kant C., Pradhan S., Bhatia S. 2016: Dissecting the root nodule transcriptome of chickpea (*Cicer arietinum* L.). *PloS one*, 11(6), DOI: 10.1371/journal.pone.0157908.
- Lemma W., Wassie H., Sheleme B. 2013: Response of chickpea to nitrogen and phosphorus fertilizers in Halaba and Taba. Southern Ethiopia. *Ethiopian J. Nat Resources*, 13, s. 115–128.
- Namvar A., Sharifi R.S., Sedghi M., Zakaria R.A., Khandan T., Eskandarpour B. 2011: Study on the effects of organic and inorganic nitrogen fertilizer on yield, yield components, and nodulation state of Chickpea (*Cicer arietinum* L.). *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 42(9), s. 1097–1109.
- Ogutcu H., Algur O., Elkoca E., Kantar F. 2008: The determination of symbiotic effectiveness of Rhizobium strains isolated from wild chickpeas collected from high altitudes in Erzurum. *Turkish Journal of Agriculture and Forestry*, 32(4), s. 241–248.
- Rawsthorne S., Hadley P., Summerfield R.J., Roberts E.H. 1985: Effects of supplemental nitrate and thermal regime on the nitrogen nutrition of chickpea (*Cicer arietinum* L.). *Plant and Soil*, 83(2), s. 279–293.
- Saxena N.P. 1984: Chickpea In the Physiology of Tropical Field Crops (Goldsworthy P.R. and Fisher N. M., eds.). John Wiley and Sons Ltd, UK, s. 419–452.
- Shewangizaw B. 2017: Response of chickpea (*Cicer arietinum* L.) to sulphur and zinc nutrients application and rhizobium inoculation in north western Ethiopia. Doctoral dissertation, Haramaya University.
- Singh F., Diwakar B. 1995: Chickpea botany and production practices. Skill Developments Series, ICRISAT Training and Fellowship Program 16.
- TUIK 2018. On-line: <http://www.tuik.gov.tr/UstMenu.do?metod=temelist>.
- Uzun S. 1996: The quantitative effects of temperature and light environment on the growth, development and yield of tomato and Aubergine (Unpublished Phd Thesis). The Univ. Of Reading, England.
- Vitousek P.M., Mooney H.A., Lubchenco J., Melillo J.M. 1997: Human domination of earth's ecosystems. *Science* 277(5325), s. 494–9.
- Yahiya M., Samiullah, Fatma A. 1995: Influence of phosphorus on nitrogen fixation in chickpea cultivars. *Journal of Plant Nutrition*, 18(4), s. 719–727.
- Walley F.L., Kyei-Boahen S., Hnatowich G., Stevenson C. 2005: Nitrogen and phosphorus fertility management for desi and kabuli chickpea. *Canadian Journal of Plant Science*, 85(1), s. 73–79.
- Wood A.J., Roper J. 2000: A simple and nondestructive technique for measuring plant growth and development. *American Biology Teacher*, 62(3), s. 215–17.

Wykorzystanie cyfrowych narzędzi grafiki inżynierskiej w urządzaniu terenów zieleni

Streszczenie. Zieleń, zwłaszcza w rozrastających się, silnie zurbanizowanych aglomeracjach miejskich, spełnia wiele funkcji, m.in. estetycznych, społecznych, prozdrowotnych i proekologicznych. Odpowiednie zagospodarowanie terenów zieleni nabiera szczególnego znaczenia w kontekście globalnego poszukiwania skutecznych sposobów ograniczania ilości CO₂. Celem pracy było przedstawianie wykorzystania możliwości wybranych aplikacji graficznych stosowanych w planowaniu i zagospodarowaniu terenów zieleni jako narzędzi pracy w realizacji i prezentacji koncepcji przestrzennych. Umiejętności posługiwania się narzędziami graficznymi odgrywają istotną rolę w procesie projektowania oraz pracy zawodowej m.in. architektów krajobrazu. Dzięki modelowaniu trójwymiarowemu, koncepcje przestrzenne są bardziej czytelne i interesujące z perspektywy odbiorców.

Słowa kluczowe: grafika inżynierska, AutoCAD, architektura krajobrazu, tereny zieleni

The use of digital engineering graphics tools in the design of green areas

Abstract. Greenery, especially in the growing, highly urbanized urban agglomerations, fulfills many functions, including aesthetic, social, pro-health and pro-ecological. Appropriate management of green areas is of particular importance in the context of the global search for effective ways to reduce the amount of CO₂. The aim of the work was to present the use of the possibilities of selected graphic applications used in the planning and development of green areas as work tools in the implementation and presentation of spatial concepts. The ability to use graphic tools play an important role in the design process and professional work, among others landscape architects. Thanks to three-dimensional modeling, spatial concepts are more readable and interesting from the perspective of the audience.

Keywords: engineering graphics, AutoCAD, landscape architecture, green areas

¹ Uniwersytet Technologiczno-Przyrodniczy w Bydgoszczy

Wprowadzenie

Zieleń, zwłaszcza w rozrastających się, silnie zurbanizowanych aglomeracjach miejskich, spełnia wiele funkcji, m.in. estetycznych, społecznych, prozdrowotnych i proekologicznych. Odpowiednie zagospodarowanie terenów zieleni nabiera szczególnego znaczenia w kontekście globalnego poszukiwania skutecznych sposobów ograniczania ilości CO₂ w atmosferze m.in. poprzez sekwestrację w biomacie roślinnej C pochodzącego ze spalin samochodowych, przemysłowych czy komunalnych. Zielone strefy w miastach w sposób korzystny wpływają na zdrowie psychiczne mieszkańców i postrzeganie estetyczne przestrzeni. Zieleń sprzyja tłumieniu wielkomiejskich hałasów a także wykazuje właściwości bakteriobójcze w odniesieniu do niektórych bakterii i pierwotniaków (Banaszak, Izdebska 1995).

Współcześnie obserwujemy dynamiczny rozwój grafiki inżynierskiej w procesach kształcenia oraz prezentacji wyników pracy w obrębie grup zawodowych takich jak: architekci, architekci krajobrazu, architekci wnętrz oraz planiści i urbaniści. Rosnącą tendencją na rynku pracy jest odchodzenie od tradycyjnych, manualnych technik wykonywania projektów ze względu na trudność w przedstawianiu złożonych koncepcji projektowych angażujących zastosowanie wielkoformatowych ręcznych przyrządów kreślarskich (Kersys, Pilkaite 2006). Opracowania związane z zagospodarowaniem terenów zieleni, wizualizacjami przestrzennymi oraz projektami drobnych form architektonicznych wymagają od projektantów nowoczesnych sposobów realizacji i prezentacji prac projektowych. Powszechną praktyką projektową jest projektowanie wspomagane komputerowo tj. CAD (computer aided design). Wykorzystując odpowiedni *hardware* i *software* oraz środowisko sieciowe, projektowanie CAD umożliwia dostęp do zdigitalizowanych zasobów opracowań normatywnych i przepisów prawnych, pozwala na pracę zespołową nad projektem nawet w warunkach znaczącej dyslokacji geograficznej jego członków (członków zespołu), usprawnia procesy weryfikacji, korekty i akceptacji projektu w interakcji projektant–zleceniodawca.

Odpowiedni plan kształcenia, niezależnie od aktualnych trendów w gospodarce, powinien wymagać od przyszłych architektów umiejętności posługiwania się zarówno manualnymi technikami jak i wybranym oprogramowaniem graficznym obejmującym technikę CAD/CAM. Umiejętnie wykonane szkice odręczne nierzadko okazują się niezastąpione w początkowych fazach projektowania, natomiast tworzenie cyfrowych szkiców oraz grafik to wymóg współczesnego projektowania (Molga, Wójtowicz 2012). Grafika komputerowa powinna ułatwiać projektowanie i przekazywanie w sposób czytelny i klarowny przyjętych w projekcie zagospodarowania krajobrazu rozwiązań. Wśród oprogramowania, które ułatwia projektowanie, znajdują się zarówno programy grafiki wektorowej, jak i rastrowej (Widelska 2018).

W pracy podjęto próbę opisanie możliwości wybranych programów graficznych stosowanych w procesach projektowania 2D, 3D oraz wizualizacji projektów zagospodarowania terenu jako metody prezentacji stosowanych w grafice inżynierskiej.

I. Grafika inżynierska w projektowaniu terenów zieleni

Komputerowe projektowanie graficzne jest procesem wieloetapowym, który powinien być poprzedzony analizą przydatności zastosowania określonych cyfrowych, narzędzi projektowych. Trafność wyboru odpowiedniego oprogramowania graficznego umożliwi uzyskanie optymalnego efektu końcowego w postaci cyfrowej mapy numerycznej oraz wizualizacji lub wideo prezentacji projektu zagospodarowania terenu.

Etapy procesu projektowania to:

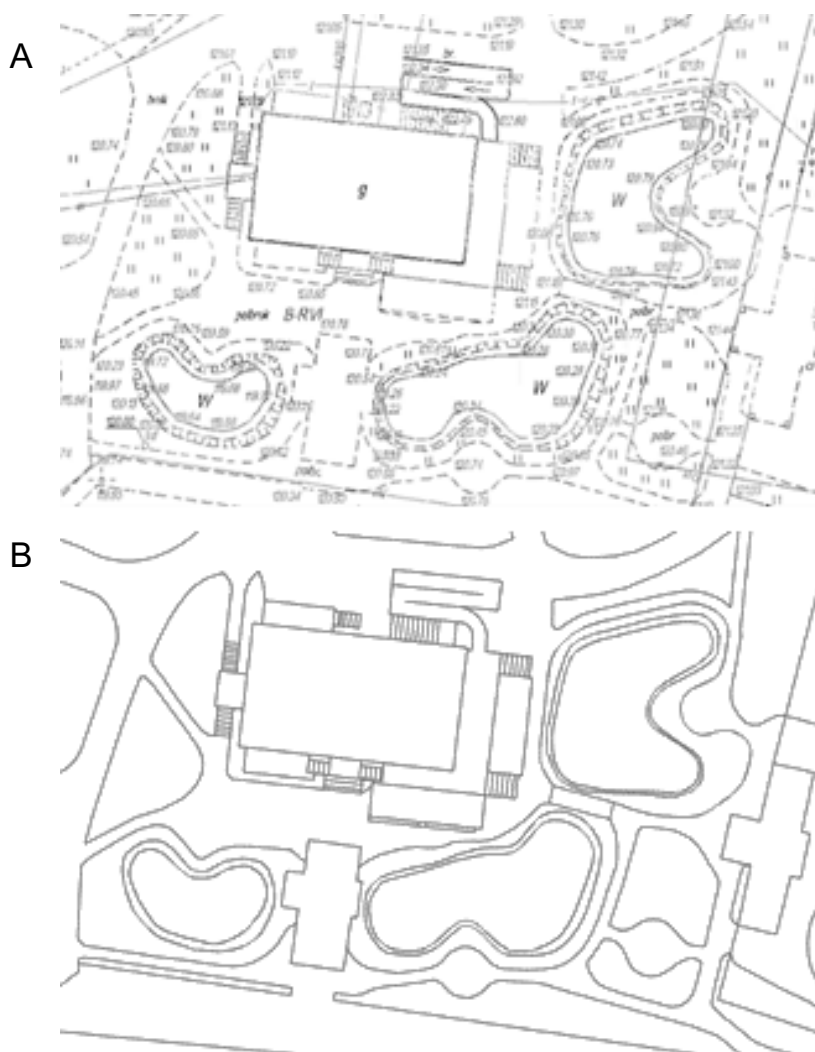
1. Tworzenie planu CAD jako podstawowego elementu projektowego precyzującego rozmieszczenie przestrzenne obiektów budowlanych wraz z infrastrukturą towarzyszącą zabudowie.
2. Przygotowanie trójwymiarowych modeli drobnych form architektonicznych i modeli szaty roślinnej.
3. Renderowanie wizualizacji i wideoprezentacji projektów zagospodarowania terenu.

Aby efektywnie wykorzystać potencjał komputerowego wspomagania projektowania należy poznać specyfikę wybranego oprogramowania CAD i jego funkcjonalność w zależności od wersji oprogramowania. AutoCAD to wektorowy program graficzny, operujący na obiektach umieszczonych w określonej przestrzeni. Każdy z obiektów złożony jest z odcinków prosto- i krzywoliniowych, rozpiętych między punktami charakterystycznymi o określonych współrzędnych. Ogromną zaletą rysowania w AutoCAD jest łatwość dokonywania złożonych operacji na pojedynczych obiektach i ich grupach, stąd program ten stał się podstawą programów typu CAD i GIS (Praca zbiorowa 2006). Warunkiem efektywnego wykorzystania możliwości programu jest przygotowanie elektronicznego arkusza z predefiniowanymi warstwami, na których będą tworzone obiekty o tym samym charakterze lub właściwościach (Montusiewicz 2011). Warstwy przypominają przezroczyste folie nakładane na rysunek. Na osobnych warstwach można umieszczać obiekty powiązane ze sobą konstrukcyjnie lub funkcjonalnie. I tak na osobnych warstwach można umieszczać np. teksty wielowierszowe, wymiarowanie obiektów architektonicznych, elementy określonego typu lub też elementy tworzące jedną kondygnację budynku (Pikoń 1996).

I.1. Tworzenie planu CAD na podstawie map analogowych

W celu sprawnego wykonania wektorowego planu dwuwymiarowego należy przygotować skan dowolnie wybranej mapy, szkicu lub planu – popularne wśród architektów są mapy zasadnicze lub mapy do celów projektowych wykonane przez uprawnionych geodetów. Następnie umieszczamy plik graficzny z wykonanym skanem jako obraz rastrowy w dowolnym miejscu obszaru roboczego programu AutoCAD (rys. 2). Ostatni krok stanowi dopasowanie rastra do wybranej skali rysunkowej. Tak przygotowany podkład nadaje się

do wektoryzacji czyli ręcznego, za pomocą narzędzi rysunkowych dostępnych w programie AutoCAD, wykonania obrysu obiektów znajdujących się w obszarze obrazu rastrowego. Szkic może posłużyć do kolejnych etapów projektowania (rys. 1). Aktualnie mapy opracowuje się wyłącznie w formacie cyfrowym, co umożliwia szybką integrację i import danych do innych programów CAD dostępnych na rynku.



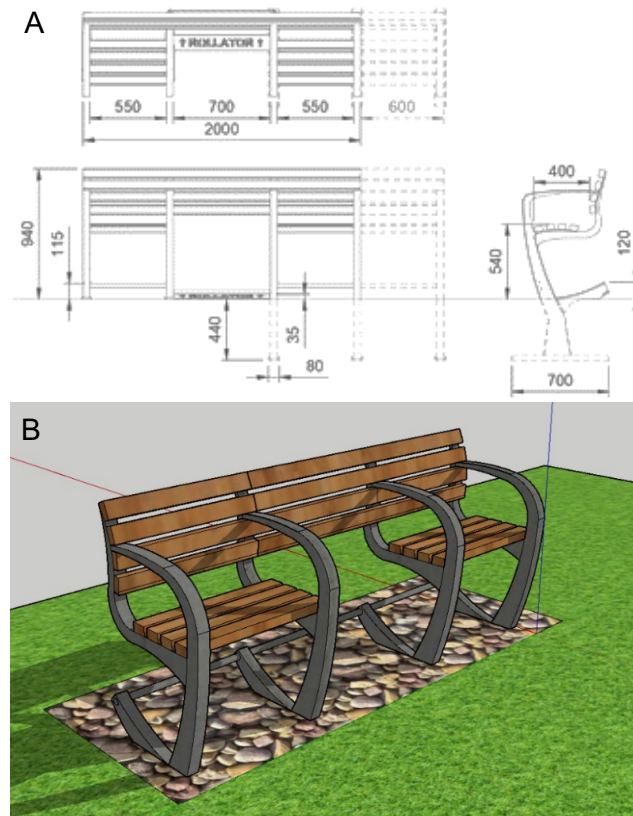
Rysunek 1. Tworzenie szkicu CAD na podstawie obrazu rastrowego

A – obraz rastrowy fragmentu mapy zasadniczej, B – odwzorowanie obiektów w trakcie ręcznej wektoryzacji

Źródło: opracowanie własne na podstawie: Łangowski 2015

I.2. Przygotowanie trójwymiarowych modeli drobnych form architektonicznych i szaty roślinnej

SketchUp jest jednym z najpopularniejszych rozwiązań do modelowania 3D – użytkownikami są architekci, projektanci, inżynierowie, osoby związane z budownictwem a także przedstawiciele innych branż. Zaletą programu SketchUp jest łatwość obsługi, która nie ogranicza możliwości projektowania w 3D. Rozpoczynając prace od rysowania linii i kształtów, wykorzystując dostępne w SketchUp narzędzia, szybko przechodzimy do kreacji form przestrzennych. Program jest intuicyjny i szybki (www.procad.pl). Dzięki szerokiej integracji formatów wektorowych mamy możliwość połączenia programu SketchUp z innymi aplikacjami stosowanymi w projektowaniu terenów zieleni. Wykonany szkic 2D w standardowym formacie zapisu programu AutoCAD (dwg) jest kompatybilny z programem SketchUp, dzięki czemu w prosty sposób możemy kontynuować pracę nad modelami 3D drobnych form architektonicznych. Funkcjonalność programu możemy rozszerzyć poprzez instalację



Rysunek 2. Modelowanie obiektów 3D uzyskanych z importowanych przekrojów konstrukcyjnych CAD

A – przekrój konstrukcyjny ławki wykonany za pomocą programu AutoCAD,

B – model 3D uzyskany po zaimportowaniu i wyciągnięciu krawędzi tworzących obiekt w programie SketchUp

Źródło: opracowanie własne na podstawie: Drychta 2020

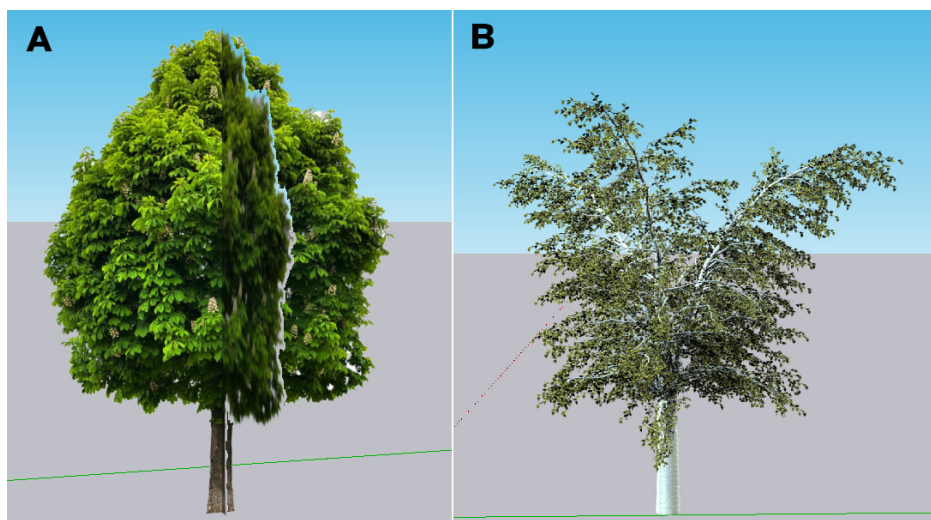
dedykowanych aplikacji tzw. „wtyczek” poszerzających możliwości edycyjne oprogramowania. SketchUp umożliwia tworzenie dowolnych obiektów przestrzennych i udostępnianie ich wszystkim użytkownikom oprogramowania. Pozwala również na pobieranie gotowych modeli stworzonych już przez innych użytkowników oprogramowania. Do transferu tych obiektów wykorzystywana jest platforma internetowa 3D Warehouse funkcjonująca jako otwarty bank modeli 3D tworzonych za pomocą SketchUp. Użytkownik omawianego oprogramowania ma więc możliwość samodzielnego budowania obiektów lub skorzystania z gotowych rozwiązań dedykowanych do zagospodarowywania terenów zieleni. W tym kontekście warto zwrócić uwagę na coraz powszechniejszą tendencję udostępniana przez producentów urządzeń i sprzętu wyposażenia form architektonicznych, gotowych produktów cyfrowych (np. modeli 3D) do wykorzystania w projektowaniu.

Aplikacja umożliwia ponadto samodzielne tworzenie modeli szaty roślinnej, które urzeczywistnią w dużym stopniu wygląd cyfrowej wizji architektonicznej. Program SketchUp posiada niewielką, wbudowaną bibliotekę podstawnych elementów drobnych form architektonicznych. Powszechną praktyką użytkowników jest jednak pobieranie darmowych modeli udostępnionych w bibliotekach 3D Warehouse lub zakup dedykowanych bibliotek cyfrowych modeli drzew i krzewów. Samodzielnie, użytkownik może wykonać modele roślin na kilka sposobów. Najprostszym rozwiązaniem jest stworzenie dwóch przecinających się płaszczyzn wraz z nałożeniem na obie płaszczyzny odpowiedniej tekstury fotograficznej imitującej przekrój poprzeczny odpowiedniego gatunku (rys. 3). Inną formą tworzenia własnych form drzew i krzewów są dedykowane wtyczki (plug-in). Przykładem takiego rozwiązania jest aplikacja RpTreeMaker Free – darmowy dodatek do SketchUp, generujący drzewa fraktalne na podstawie określonych parametrów np. typu drzewa, liczby pni, liczby korzeni, wieku, parametrów zginania, tekstury kwiatostanów, liści oraz kory itp. Następnie aplikacja tworzy obraz drzewa i umieszcza je jako komponent 2D. Ponieważ wirtualna kamera aplikacji jest skierowana na obiekt zawsze wg zasady „twarzą w twarz”, to w momencie przesuwania widoku projektowany model rośliny podąża za aktualnym widokiem obszaru roboczego (www.renderplus.com) – rysunek 3.

1.3. Renderowanie wizualizacji

Ostatnim etapem tworzenia projektów zagospodarowania terenu jest ich realistyczne przedstawienie w formie grafik, wizualizacji lub wideoprezentacji. Przykładem oprogramowania renderującego zarówno wizualizacje i wideoprezentacje jest Lumion. Aplikacja umożliwia dodawanie obiektów wyposażenia m.in. drobnych form architektonicznych, wnętrz, ludzi, elementów fauny i flory, wysokorozdzielczych tekstur z wbudowanej biblioteki oraz edycję obiektów 3D uzyskanych z innych programów CAD. Jest to efekt możliwości nadawania wysokorozdzielczych tekstur istniejącym obiektom. Oprogramowanie dysponuje predefiniowanymi stylami ustawień wizualizacji i filmów co przekłada się na przyspieszenie

procesów renderingowych. Na rysunku 4 przedstawiono wizualizację uzyskaną na podstawie modelu 3D stworzonego w programie SketchUp i importowanego do aplikacji Lumion w celu korekcji tekstur oraz wzbogacenia renderowanej sceny w elementy towarzyszące zabudowie tj. sylwetki ludzi, rośliny, oświetlenie i drobne formy architektoniczne.



Rysunek 3. Przykłady technik modelowania drzew
A – model uzyskany z przecięcia dwóch teksturowanych płaszczyzn,
B – model fraktalny uzyskany za pomocą wtyczki RpTreeMaker Free
Źródło: opracowanie własne na podstawie: Łangowski 2015



Rysunek 4. Fotorealistyczny rendering
Źródło: opracowanie własne na podstawie: Drychta 2020

Podsumowanie

Zastosowanie grafiki inżynierskiej w projektowaniu terenów zieleni ma istotne znaczenie z punktu widzenia architektów i projektantów zielonej branży. Dzięki zastosowaniu elektronicznego obiegu informacji dane o projektowanym obiekcie mogą zostać w bardzo szybki sposób przetworzone i udostępnione w szeregu kompatybilnych ze sobą aplikacjach. Priorytetowa jeszcze do niedawna pozycja ręcznego projektowania z użyciem narzędzi kreślarskich, ze względu na relatywnie długi czas oczekiwania na rezultat prac, w warunkach globalnej presji szybkiego transferu danych, jest już przeszłością. Na rynku nie funkcjonuje program „idealny” z perspektywy projektantów, dlatego umiejętności posługiwania się szeregiem zbliżonych technicznie aplikacji z działy grafiki inżynierskiej pozwalają w maksymalny sposób wykorzystać potencjał każdej z nich. Proces projektowania trójwymiarowego wymaga od użytkownika zapoznania się z techniką używania odpowiednich funkcji rysunkowych, narzędzi do modelowania i obróbki obiektów trójwymiarowych, tworzenia tekstur i renderowania. Zastosowanie programów takich jak AutoCAD, SketchUp oraz Lumion umożliwia uzyskanie zarówno kompleksowej dokumentacji technicznej oraz fotorealistycznych wizualizacji i filmów przedstawiających wizję architektoniczną projektowanych obiektów terenów zieleni. Analizowane oprogramowanie, dzięki możliwości edycji danych poprzez akceptację formatów plików daje możliwość wariantowania koncepcji na każdym etapie jej projektowania tzn. nie wymagana jest korekta danych wyjściowych z poprzednich etapów projektowania zapisanych w pojedynczych programach graficznych.

Literatura

- Banaszak J., Izdebska B. 1995: Eekologiczny aspekt lokalizacji i jakości zieleni na przykładzie miasta Bydgoszczy. ZN WSP, Stud. Przynr., 11, s. 117–125.
- Drychta J. 2020: Projekt ogrodu sensorycznego przy Centrum Akceptacji i Aktywności Społecznej w Paterku. Praca inż., Promotor Woźny A., Bydgoszcz.
- Kersys R., Pilkaite T. 2006: Multimedia in engineering graphics. Journal of Polish Society for Geometry and Engineering Graphics, 16, s. 20–23.
- Łangowski A. 2015: Projekt zagospodarowania terenu zieleni z uwzględnieniem systemów automatycznego nawadniania w Zajeździe Fojutowo koło Legbąda. Praca inż. Promotor Rolbiecki R., Bydgoszcz.
- Molga A., Wójtowicz M. 2012: Computer-aided design system. Edukacja–Technika–Informatyka, 2. Wyd. 2, s. 291–297.
- Montusiewicz J. 2011: Projektowanie i wizualizacja 3D ogrodów przydomowych w programie AutoCAD. Postęp Nauki i Techniki, s. 124–139.
- On-line: <https://www.procad.pl/autodesk/animacja-i-wizualizacja/sketchup-pro/> (dostęp: 19.11.2020).
- On-line: http://www.renderplus.com/wp2/wk/RpTreeMaker_Free.htm (dostęp: 19.11.2020).
- Pikoń A. 1996: AutoCAD 12 dla Windows. Gliwice: Helion.
- Praca zbiorowa. 2006: AutoCAD w architekturze krajobrazu–wprowadzenie. Warszawa: Wyd. SGGW.
- Widelska E. 2018: Komputerowe metody opracowania dokumentacji w architekturze krajobrazu. Przestrzeń miejska, 6, s. 8–10.

Aneta BODZIONY¹, Anna LIS¹, Maciej GLINIĄK¹

Unieszkodliwianie zanieczyszczeń ropopochodnych w glebie – porównanie metod chemicznych i mikrobiologicznych

Streszczenie. Problem skażenia gruntów i wód gruntowych substancjami ropopochodnymi to bardzo istotne zagadnienie, ze względu na negatywne oddziaływanie tego typu zanieczyszczeń na środowisko. Szkodliwość związków ropopochodnych wynika zarówno z ich właściwości chemicznych jak i fizycznych, które powodują pogorszenie warunków natlenienia i naruszeniem równowagi biologicznej w glebie. Celem badań było porównanie przydatności zastosowania chemicznych środków powierzchniowo czynnych oraz mikrobiologicznych poprawiających proces desorpcji zanieczyszczeń organicznych oraz ropopochodnych z matrycy mineralnej gleby. Zakres pracy obejmował przeprowadzenie procesu unieszkodliwiania zanieczyszczeń organicznych i ropopochodnych z wykorzystaniem chemicznego preparatu powierzchniowo czynnego oraz preparatu mikrobiologicznego. Wyniki przeprowadzonych badań porównano ze standardami jakościowymi dla gleby oraz standardami jakościowymi ziemi obowiązującymi w Polsce. Na podstawie analizy zebranych danych stwierdzono, iż użyte preparaty poprawiają proces desorpcji zanieczyszczeń organicznych i ropopochodnych, przyczyniając się do ich szybszego rozkładu. Na podstawie analizy zebranych danych można stwierdzić, że użycie zarówno chemicznych środków powierzchniowo czynnych, jak i konsorcjum mikrobiologicznego poprawia proces desorpcji zanieczyszczeń organicznych i ropopochodnych przyczyniając się do ich szybszego rozkładu.

Słowa kluczowe: unieszkodliwianie, zanieczyszczenia ropopochodne, metoda *in situ*

Disposal of petroleum pollutants in soil – comparison of chemical and microbiological methods

Abstract. The problem of soil and groundwater contamination with petroleum substances is a very important issue due to the negative impact of this type of environmental pollution. The harmfulness of petroleum compounds results both from their chemical and physical properties, which deteriorate the oxygenation conditions and disturb the biological balance in the soil. The aim of the research was to compare the usefulness of the use of chemical surfactants and microbiological agents improving the desorption process of organic and petroleum pollutants

¹ Uniwersytet Rolniczy w Krakowie, Wydział Inżynierii Produkcji i Energetyki

from the soil mineral matrix. The scope of the work included the process of neutralizing organic and petroleum pollutants with the use of a chemical surfactant preparation and a microbiological preparation. The results of the research were compared with the soil quality standards and soil quality standards in force in Poland. Based on the analysis of the collected data, it was found that the preparations used improve the desorption process of organic and petroleum pollutants, contributing to their faster decomposition. Based on the analysis of the collected data, it can be concluded that the use of both chemical surfactants and a microbiological consortium improves the desorption process of organic and petroleum pollutants, contributing to their faster decomposition.

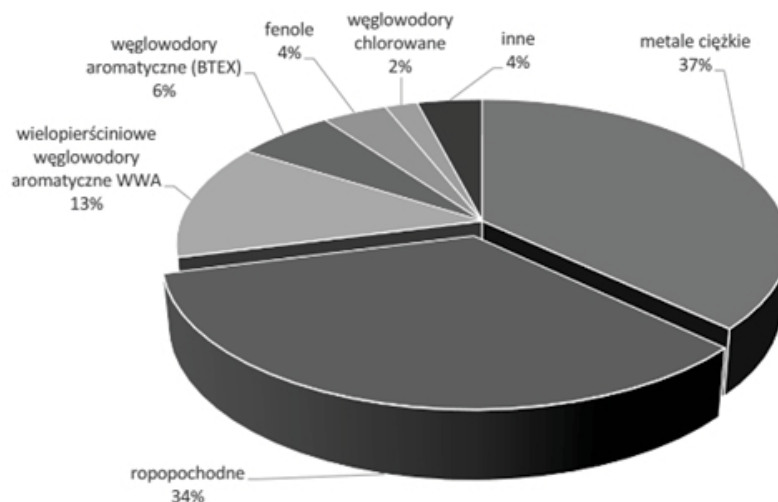
Keywords: usefulness (disposal), petroleum pollutants, method in situ

Wprowadzenie

Zapobieganie i walka z zanieczyszczeniami gleby, w tym także zanieczyszczeniami ropopochodnymi, wpisuje się w działania promowane przez model gospodarki o obiegu zamkniętym. Gleba o wysokiej klasie bonitacyjnej, gleba o przeznaczeniu pod uprawy polowe jest zasobem ograniczonym, a jej postępujące zanieczyszczenie od dawna jest powodem do niepokoju dotyczącego ochrony środowiska przyrodniczego (Gliniak, Sobczyk 2017). Gleba pokryta substancjami niewystępującymi w niej naturalnie, takimi jak asfalteny, oleje, benzyny, parafiny itp., posiada ograniczone zdolności do świadczenia usług ekosystemowych. Obecność tych substancji zakłóca funkcjonowanie ekosystemu, wpływa na cykle biochemiczne składników odżywczych i wody, regulację klimatu i przestrzeń do rekreacji. Poprzez recykling gleby można poprawić stan ekologiczny terenów wcześniej zdegradowanych. Dlatego recykling gleby może być kluczem do utrzymania i rozwoju terenów zielonych, które są ważne dla usług ekosystemowych (Gliniak, Sobczyk 2016).

Terminem „substancje ropopochodne” nazywa się produkty powstałe z ropy naftowej w wyniku jej podziału na frakcje. W ujęciu chemicznym zanieczyszczenia ropopochodne gruntu to przede wszystkim węglowodory (Karczewska 2009). Stanowią one ponad 1/3 wszystkich zanieczyszczeń występujących w glebie (rys. 1). Wyższym udziałem cechują się jedynie metale ciężkie (37%). Substancje ropopochodne należą do związków lipofilnych i niepolarnych stanowiąc mieszaniny o podobnych właściwościach, ale o różnym składzie chemicznym. Kluczową cechą substancji ropopochodnych jest ich zróżnicowana rozpuszczalność w wodzie. Wynika to ze składu chemicznego oraz ilości pierścieni aromatycznych w cząsteczce związku organicznego. Im więcej pierścieni tym rozpuszczalność węglowodorów aromatycznych maleje. Jednocześnie wraz ze wzrostem wielkości cząstek węglowodorów maleje lotność, a rośnie temperatura wrzenia. Rozpatrując skład chemiczny ropy naftowej można wyróżnić przede wszystkim węglowodory pochodzące z różnych grup: alkanów, cykloalkanów, węglowodorów nienasyconych oraz aromatycznych (Karczewska 2009; Rakowska i in. 2012).

Wpływ zanieczyszczenia substancjami ropopochodnymi na glebę jest ściśle związany z właściwościami tych substancji i właściwościami podłoża glebowego. Wyniki ba-



Rysunek 1. Główne rodzaje zanieczyszczeń występujących w glebie
 Źródło: opracowanie własne na podstawie www.eionet.europa.eu

dań Izdebskiej-Muchy (2005) wskazują, że adsorpcja zanieczyszczeń hydrofobowych na powierzchni gruntów negatywnie wpływa na ich właściwości mechaniczne oraz fizyczne. W konsekwencji następuje spadek gęstości objętościowej i właściwej szkieletu gleby, dodatkowo zmiany te wpływają na porowatość i wytrzymałość podłoża glebowego. W powierzchniowej warstwie gleby, gdzie występuje wysoka zawartość próchnicy substancje ropopochodne tworzą warstwę wołoku, utrudniając przepływ powietrza i przepuszczalność wody. Skutkuje to pogorszeniem warunków natlenienia i naruszeniem równowagi biologicznej. Według Siuta (2003) zapotrzebowanie na tlen w glebie zanieczyszczonej węglowodorami ciekłymi rośnie proporcjonalnie do intensywności zanieczyszczenia i podatności węglowodorów na biodegradację. Intensywne zaolejanie poziomu próchniczego może podwoić lub potroić w nim zawartość substancji organicznych. Rozprzestrzenianie się związków organicznych następuje dzięki działaniu sił grawitacji i sił kapilarnych. Początkowo przesiąkające węglowodory migrują w strefie aeracji w kierunku pionowym w dół, aż do osiągnięcia przez czoło zanieczyszczenia strefy wzniosu kapilarnego. Węglowodory docierają do wnętrza warstwy wodonośnej tworząc rozlewiska przemieszczające się w kierunku poziomym przy udziale wód podziemnych. Proces ten zachodzi dzięki występującemu w wodzie gradientowi hydraulicznemu. Substancje ropopochodne gromadzone w porach gruntu stanowią zanieczyszczenia długoterminowe (Pastewski i in. 2009; Rakowska i in. 2012; Rychlicki 2006; Siuta 2003). Odporność gleb na degradację zwiększa się w miarę przyrostu cząstek koloidalnych. Gleba posiada wtedy większą pojemność sorpcyjną. Pojemność sorpcyjna w znacznym stopniu zależy od ilości próchnicy w glebie. Biorąc pod uwa-

gę te zależności najszybciej oczyszczalnymi glebami są gleby lekkie, zbudowane głównie z materiałów mineralnych.

W gruntach zwięzłych penetracja produktów ropopochodnych zachodzi proporcjonalnie do zawartości ilitu koloidalnego. Gleby o dużej zawartości próchnicy lub minerałów ilastych mają zdolność szybkiego zaabsorbowania związków ropopochodnych, przez co mogą być one łatwiej rozkładane oraz przetwarzane. Obecność w poziomie próchnicznym gleb CaCO_3 czyni je bardziej odpornymi na degradację. Na pojemność wodną i powietrzną gleby ma wpływ sorpcja oraz jej skład ziarnowy. Z tego powodu największą zdolnością usuwania związków ropopochodnych wykazują piaski, czyli gleby o dużej średnicy ziaren. Zachodzi w nich lepszy proces wentylacji przekładający się na wzrost aktywności znajdujących się w glebie mikroorganizmów. Odwrotna sytuacja następuje w glebach gliniastych i piaszczystych. Potencjał biodegradacji jest w nich znacznie obniżony, przez co wpływ substancji niebezpiecznych odgrywa większą rolę (Karczewska 2009; Rakowska i in. 2012). Szybkość biodegradacji zależy między innymi od obecności szczepów mikroorganizmów zdolnych do rozkładu danych substancji oraz podaży składników pokarmowych zwłaszcza azotu i fosforu w formach przyswajalnych dla tych mikroorganizmów. Nadrzędność zawartości węgla organicznego nad azotem w glebach mineralnych wynosi średnio 10. Zanieczyszczenia ropopochodne powodują zwielokrotnienie tej przewagi zwłaszcza w bez próchnicznych częściach gleby. Analogiczna sytuacja dotyczy przewagi zawartości węgla organicznego nad zawartością fosforu. Jak podaje Liste i Felgentreu (2010) do najczęściej oznaczanych mikroorganizmów występujących w środowiskach zanieczyszczonych ropopochodnymi należą między innymi bakterie z rodzaju *Pseudomonas*, *Acetobacter*, *Corynebacterium* oraz grzyby takie jak *Candida* i *Aspergillus*.

Celem nadrzędnym w wielu skażonych chemicznie rejonach kraju jest dążenie do odtworzenia środowiska przyrodniczego. Istota tych działań wynika z potrzeby usprawniania procesów unieszkodliwiania zanieczyszczeń obecnych w glebie. Ciekawym z poznawczego punktu widzenia jest analiza rzeczywistego wpływu wybranych preparatów chemicznych i mikrobiologicznych na degradację różnych rodzajów zanieczyszczeń obecnych w glebie. Celem rozdziału jest opis weryfikacji możliwości zastosowania chemicznego preparatu zawierającego substancje powierzchniowo czynne i preparatu mikrobiologicznego zawierającego naturalne szczepy mikroorganizmów do procesu rozkładu zanieczyszczeń organicznych i ropopochodnych. Postawiona przez nas hipoteza zakładała, że istnieje możliwość przyspieszenia procesu rozkładu zanieczyszczeń ropopochodnych i organicznych w glebie bez konieczności jej przemieszczania i stosowania fizycznych metod neutralizacji.

I. Materiał i metody

Pierwszym etapem pracy było pobranie próbki (20 kg) gleby brunatnej o uziarnieniu gliny lekkiej pylastej z pola uprawnego w miejscowości Morzychna. Próbkę pobrano we-

dług wytycznych norm PN-EN 14899:2006 i PN-ISO 10381:2008. Pobraną próbkę rozdzielono na dwie części i oznaczono symbolami I i II, a następnie wymieszano z olejem silnikowym 0W40:

- ♦ próbka I zawierała dodatek 1% wagowego oleju,
- ♦ próbka II zawierała dodatek 5% wagowych oleju.

Po wymieszaniu każdą próbkę podzielono na dwie podpróbki oznaczone symbolami 1 i 2, i poddano działaniu preparatów unieszkodliwiających poprzez wymieszanie:

- ♦ próbka 1 zawierała dodatek preparatu chemicznego,
- ♦ próbka 2 zawierała dodatek preparatu mikrobiologicznego.

Ilość zastosowanych preparatów została określona na podstawie instrukcji stosowania. Po wymieszaniu gleby z preparatami odstawiono ją do kondycjonowania na 7 dni. W każdym dniu przechowywania próbka była jednokrotnie mieszana w całej objętości. Do unieszkodliwiania substancji ropopochodnych zawartych w oleju silnikowym wykorzystano:

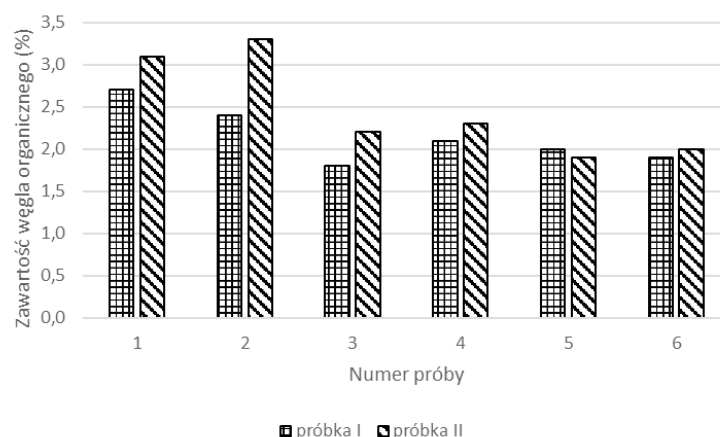
- ♦ chemiczny preparat powierzchniowo czynny, specjalny środek dyspergujący, który jest płynnym, mocno stężonym, alkalicznym produktem złożonym z silnie działających niejonowych środków powierzchniowo czynnych, kompleksów fosforanowych i komponentów wzmacniających jego skuteczność. Miesza się z wodą w każdej proporcji, a jako roztwór użytkowy jest nieszkodliwy, biologicznie rozkładalny i nie niszczy środowiska. Nadaje się do każdego rodzaju powierzchni utwardzonej. Z rozlanym olejem łatwo tworzy emulsję, która ulega naturalnej biodegradacji. Końcowymi produktami rozkładu są wyłącznie dwutlenek węgla, woda i inne składniki mineralne. Preparat podczas stosowania nie wydziela toksycznych par i gazów. Nie tworzy stabilnej emulsji z ropopochodnymi i nie zakłóca pracy separatora lub odstożnika olejowego. Nie zawiera substancji zapachowych. Odczyn 7 ± 1 (wg PN-EN 1262:2004).
- ♦ preparat mikrobiologiczny – koncentrat efektywnych mikroorganizmów, bakterii kwasu mlekowego, bakterii fotosyntezujących, bakterii saprofitycznych, drożdży, grzybów, promieniowców oraz wody. Preparat ten wykorzystywany jest jako ekologiczny środek do usprawniania procesów oczyszczania ścieków i przetwarzania osadów pofermentacyjnych oraz skratek. Wspomaga procesy technologiczne. Zaletami jego działania jest eliminacja odorów (emisji środków złoonych) podczas przetwarzania materii organicznej (ulegającej biodegradacji) oraz usuwanie nadmiaru związków organicznych z wód powierzchniowych. Preparat jest produktem bezpiecznym dla ludzi, zwierząt i środowiska. Nie zawiera GMO.

W trakcie kondycjonowania, po każdym procesie mieszania pobierano 1 próbkę analityczną o masie 10g, którą poddawano analizom laboratoryjnym na zawartość ogólnego węgla organicznego, zawartość węglowodorów frakcji benzyn i olejów (po 6 szt. na każdy parametr). Oznaczenie zawartości węgla organicznego wykonano poprzez utlenienie dwuchromianem (VI) – w nadmiarze – w środowisku kwasu siarkowego (VI) zgodnie z normą PN-ISO 14235. Pomimo zastosowania nadmiaru dwuchromianu potasu skuteczność utle-

niania zależy zarówno od masy próbki analitycznej, jak i masy zawartego w niej węgla. Oznaczenie substancji ropopochodnych wykonano w oparciu o normę PN-C-04643. Przygotowaną próbkę poddano odwirowaniu (5 min, 5000 obr./min) w celu oddzielenia fazy ciekłej. W odwirowanym osadzie wykonano oznaczenie na zawartość suchej masy. Równoległe z tej samej próbki pobierano 10 g tego osadu i umieszczono w naczynku z nakrętką z tworzywa i membraną PTFE. Do naczynka dodano 5 cm³ ekstrahenta (pentanu) o czystości chromatograficznej, szczelnie zamknięto, całość dokładnie wymieszano w celu uzyskania zawiesiny i pozostawiono na 24 godziny do ekstrakcji substancji. Analiza chromatograficzna polegała na ustaleniu warunków chromatografowania i uzyskano linię bazową chromatogramu. Wykonano chromatogram ekstrahenta (pentanu) i chromatogramy kontrolne roztworów wzorcowych o odpowiednich stężeniach w celu uzyskania krzywej kalibracyjnej. Następnie w takich samych warunkach chromatogram ekstraktu z osadu. Za miarę zawartości substancji ropopochodnych przyjęto sumaryczną powierzchnię S wszystkich pików leżących w zakresie czasów retencji powyżej pików ekstrahenta.

2. Wyniki

Analiza zawartości węgla organicznego (rys. 2) pozwala stwierdzić, że w próbce I i II największe wartości osiągnięto w 1. i 2. dniu od dodania 1% dawki preparatu mikrobiologicznego, a najmniejsze w 5. i 6. dniu przy 5% dawce preparatu. W każdej próbie (dniu) zawartość węgla organicznego osiąga wyższe wartości w próbce I, gdzie dodatek oleju był większy. Zwiększona dynamika zmian węgla organicznego jest wywołana obecnością większej ilości węgla dostępnego dla mikroorganizmów pochodzącego z zanieczyszczenia

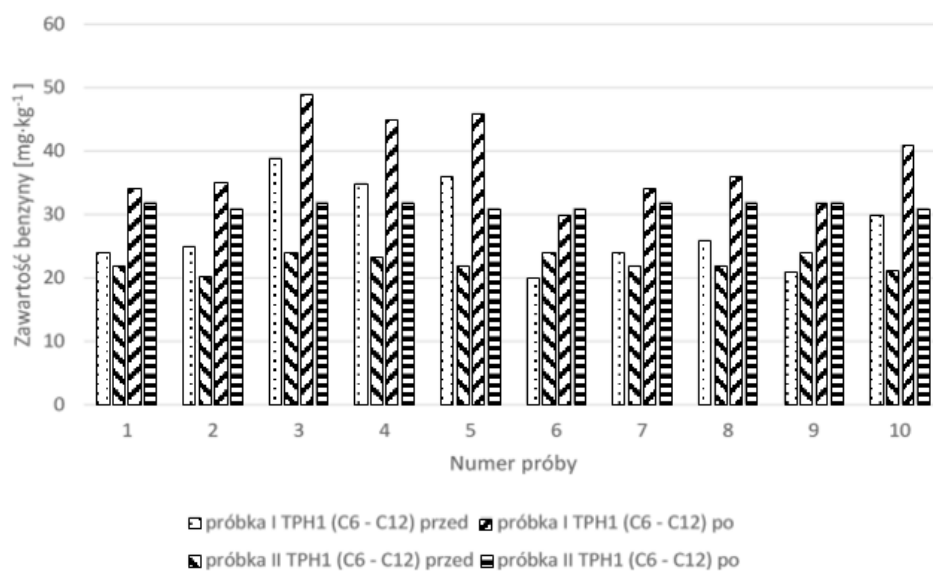


Rysunek 2. Zawartość węgla organicznego TOC dla próbki I i II po zastosowaniu preparatu mikrobiologicznego
Źródło: opracowanie własne na podstawie przeprowadzonych badań

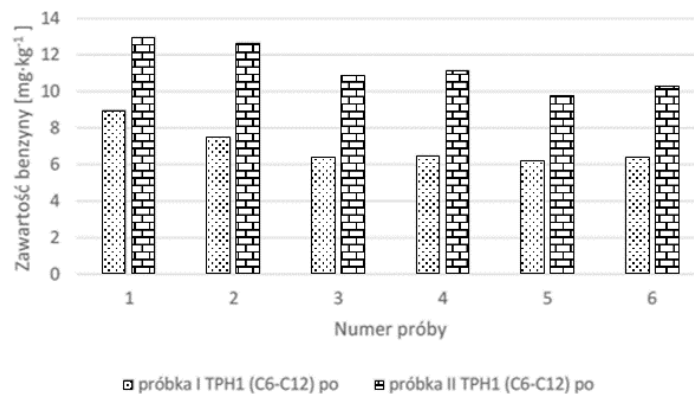
olejowego. W przeprowadzonym procesie neutralizacji istotne jest wyrównanie zawartości węgla organicznego w 5 i 6 dniu prowadzenia eksperymentu, co może świadczyć o powstaniu swoistej homeostazy pomiędzy mikroorganizmami a zanieczyszczeniem.

Ze względu na niską zmienność zawartości frakcji benzyn (C6–C12) w czasie prowadzenia neutralizacji chemicznej, przeprowadzono uśrednioną analizę ubytku olejów w ciągu 7 dni prowadzenia procesu dla wszystkich próbek. Analiza chromatograficzna węglowodorów ropopochodnych (TPH1) wykazała, że ilość benzyn zarówno w próbce I jak i próbce II po zastosowaniu preparatu chemicznego uległa znacznemu obniżeniu (rys. 3). Otrzymane wyniki badań wyraźnie wskazują na redukcję od 17 do 20% początkowej ilości zanieczyszczeń ropopochodnych. Zaobserwowana redukcja jest spowodowana mieszaniami próbek i odprowadzaniem nagromadzonego w glebie dwutlenku węgla. Obecność tego gazu w przypadku zastosowania preparatu chemicznego obniża kinetykę reakcji rozkładu zanieczyszczeń ropopochodnych i prowadzi do zahamowania procesów rozkładu. W kilku omawianych przypadkach stopień redukcji jest znacząco niższy niż zakładano. Otrzymany rezultat wynika z obecności minerałów ilastych w próbce gleby oraz części organicznych, które bardzo szybko potrafią stabilizować chemicznie niewielkie ładunki zanieczyszczeń ropopochodnych.

Neutralizacja frakcji benzyn przy użyciu preparatu mikrobiologicznego spowodowała wzrost ich zawartości w glebie (rys. 4). Wzrost ten jest spowodowany rozkładem frakcji olejów na węglowodory proste o krótkim łańcuchu. Mikroorganizmy obecne w preparacie zostały dobrane w sposób selektywny w kierunku rozkładu wielkocząsteczkowych związków.

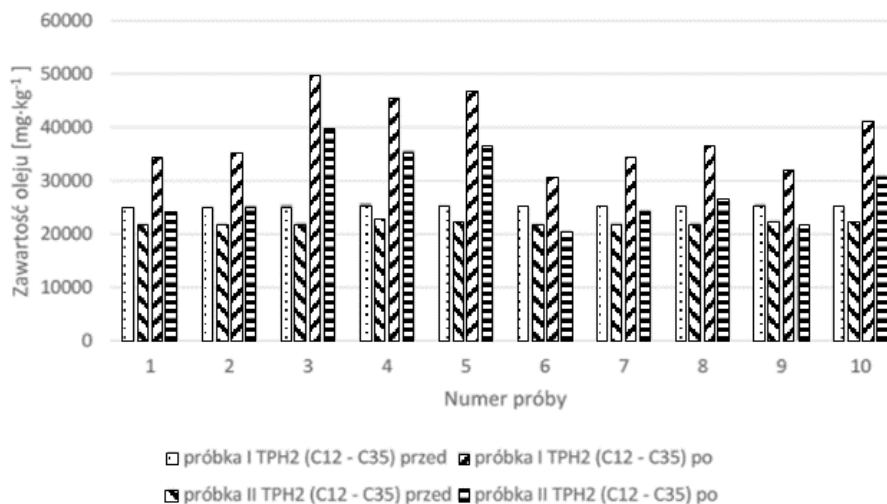


Rysunek 3. Zawartość frakcji benzyn w próbce I i II przed i po zastosowaniu preparatu chemicznego
Źródło: opracowanie własne na podstawie przeprowadzonych badań



Rysunek 4. Zawartość frakcji benzyn w próbce I i II po zastosowaniu preparatu mikrobiologicznego
 Źródło: opracowanie własne na podstawie przeprowadzonych badań

ków organicznych. Analiza zawartości benzyn w poszczególnych dniach eksperymentu jednoznacznie wskazuje na ich podwyższoną zawartość średnio o 40%. Istotnym rezultatem prowadzonego procesu jest osiągnięcie stabilizacji zawartości tej frakcji w glebie i jej stopniowe obniżanie się. Prawdopodobnie mikroorganizmy w przypadku braku olejów rozkładają benzyny czerpiąc z nich substancje odżywcze niezbędne do życia. W pracy Kopytko i Mojica (2009), w której analizowano gleby pochodzące z pola naftowego w Santander w Kolumbii stwierdzono również, że dodatek mieszanki drobnoustrojów polepsza biodegradację TPH1.

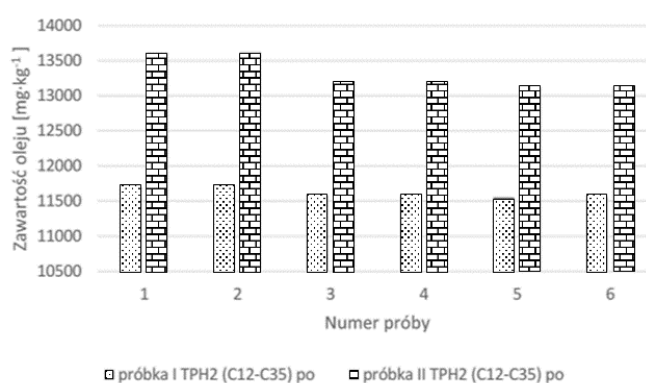


Rysunek 5. Zawartość frakcji oleju w próbce I i II przed i po zastosowaniu preparatu chemicznego
 Źródło: opracowanie własne na podstawie przeprowadzonych badań

Analizę zawartości frakcji olejów (C12–C35) przeprowadzono analogicznie do frakcji benzyn. Preparat chemiczny (rys. 5) uzyskał bardzo dobre wyniki rozkładu wielkocząsteczkowych węglowodorów (TPH2) prowadząc do zmniejszenia ich zawartości w glebie. Zaobserwowany ubytek około 10% wartości początkowych jest spowodowany rozkładem cząsteczek oleju do węglowodorów prostych i dwutlenku węgla. Preparat chemiczny posiada również właściwości wspomagające proces hydrofilizacji związków organicznych, przez co mogą one być również usuwane z gleby podczas procesu parowania. Poprawa właściwości hydrofilowych olejów powoduje też możliwość ich reagowania z innymi składnikami gleby prowadząc do immobilizacji lub dalszego rozkładu.

Wykorzystanie preparatu mikrobiologicznego do neutralizacji frakcji olejów w niskich stężeniach (1%) nie osiąga zakładanych rezultatów. Analizując dane na rysunku 6 wyraźnie widać, że ubytek zanieczyszczeń nie przekracza 2% podczas prowadzenia procesu neutralizacji. Znacznie lepsze wyniki osiągnięto przy obecności większej ilości zanieczyszczeń frakcjami oleju. Prowadzenie procesu neutralizacji tych substancji w ilości co najmniej 5% wskazuje na kilku procentowy poziom redukcji, który przebiega skokowo. Oleje jako związki wielkocząsteczkowe nie są bezpośrednio przyswajalne dla mikroorganizmów. W celu ich rozkładu i wykorzystania jako źródło węgla mikroorganizmy rozkładają cząsteczki oleju na prostsze związki, które następnie przetwarzają w sposób bezpośredni. W przypadku wyższego stężenia zanieczyszczeń preparat mikrobiologiczny początkowo wykazuje wysoka reaktywność względem substancji ropopochodnych, która maleje z czasem i po 6 dniu prowadzenia procesu praktycznie ulega zahamowaniu. Jest to efekt braku odpowiedniej ilości substancji odżywczych takich jak azot i fosfor, które są niezbędne do procesów życiowych dla mikroorganizmów i w trakcie procesu remediacji biologicznej skażeń ropopochodnych niezbędna jest ich suplementacja.

Z przedstawionych analiz wynika, że dodatek mieszanki drobnoustrojów polepsza biodegradację TPH. Dla przykładu w próbce II wartość średnia przed zastosowaniem preparatu



Rysunek 6. Zawartość oleju w próbce I i II po zastosowaniu preparatu mikrobiologicznego

Źródło: opracowanie własne na podstawie przeprowadzonych badań

wynosiła 38 600 mg/kg, natomiast po zastosowaniu 28 481 mg/kg. W badaniach przeprowadzonych przez Kaszyckiego i Kołoczek (2012), początkowe średnie stężenie zanieczyszczeń ze stacji paliw w Nowym Sączu wyniosło 3647 mg/kg, natomiast po neutralizacji 1204 mg/kg. W obu przypadkach zastosowanie preparatów obniżyło zawartość substancji ropopochodnych w glebie. Analiza wykazała, że cechą charakterystyczną węglowodorów ropopochodnych jest ich zróżnicowana zawartość w glebie po skażeniu tą samą dawką oleju. Dla przykładu próbka II: zakres od 30 570 mg/kg do 49 810 mg/kg. Potwierdzają to także badania przeprowadzone przez Steliga i in. (2006) na odpadach wiertniczych pochodzących z dołów urobkowych z kopalni Grabownica. Ich zawartość mieściła się w granicach od 61 240 mg/kg do 123 280 mg/kg.

Podsumowanie

Na podstawie analizy zebranych danych można stwierdzić, że użycie zarówno chemicznych środków powierzchniowo czynnych, jak i preparatu mikrobiologicznego poprawia proces desorpcji zanieczyszczeń ropopochodnych przyczyniając się do ich szybszego rozkładu, prowadząc do optymalizacji procesu unieszkodliwiania substancji ropopochodnych w glebie. Zastosowane metody chemiczne i biologiczne *in situ* wykazują największą efektywność unieszkodliwiania zanieczyszczeń ropopochodnych znajdujących się w glebie.

Literatura

- Gliniak M., Sobczyk W. 2016: Proposal of brownfield land development on the example of the landfills of former Krakow soda works "Solvay". *Journal of Ecological Engineering*, 17(5), s. 96–100.
- Gliniak M., Sobczyk W. 2017: Zawartość metali toksycznych w glebach na terenach poprodukcyjnych. *Przemysł Chemiczny*, 96(10), s. 53–57.
- Izdebska-Mucha D. 2005: Influence of oil pollution on selected geological–engineering properties of clay soils. *Przegląd Geologiczny*, 53, s. 766–769.
- Kaszycki P., Kołoczek H. 2005: Biotechnologie stosowane w odnowie gleby zanieczyszczonej substancjami ropopochodnymi. *Wydział Ogrodniczy Akademii Rolniczej im. H. Kołłątaja w Krakowie*, s. 41–56.
- Karczewska A. 2009: Ochrona gleb i rekultywacja terenów zdegradowanych. *Wydawnictwo Uniwersytetu Przyrodniczego we Wrocławiu*, s. 103–160.
- Kopytko M., Mojica D. 2009: Możliwość biodegradacji węglowodorów ropopochodnych w glebach zanieczyszczonych przez przemysł naftowy. *Journal of the Polish Mineral Engineering Society*, 10(2), s. 31–48.
- Liste H., Felgentreu D. 2006: Crop growth, culturable bacteria, and degradation of petrol hydrocarbons in a long-term contaminated field solid. *Applied Soil Ecology*, 31(1–2) s. 43–52.
- Pastewski S., Czacharowski P., Mędrzycka K. 2009: Usuwanie hydrofobowych zanieczyszczeń ropopochodnych z gleby metodą odmywania za pomocą roztworów związków powierzchniowoczynnych. *Polska Inżynieria Środowiska*, 1(58), s. 183–189.

- Rakowska J., Radwan K., Ślosorz Z., Pietraszek E., Łudzik M., Suchorab P. 2012: Usuwanie substancji ropopochodnych z dróg i gruntów. Państwowy Instytut Badawczy, s. 16–19, 23–36, 45–64.
- Rychlicki S. red. 2006: Metody usuwania zanieczyszczeń węglowodorowych ze środowiska gruntowo-wodnego. Kraków: Uczelniane Wydawnictwo Naukowo-Dydaktyczne AGH, s. 149.
- Siuta J. 2003: Ekologiczne, technologiczne i prawne aspekty rekultywacji gruntów zanieczyszczonych produktami ropy naftowej. Polskie Towarzystwo Inżynierii Ekologicznej, 8, s. 7–26.

Transport i logistyka

Mateusz MALINOWSKI¹, Jacek SALAMON¹,
Anna KRAKOWIAK-BAL¹, Klaudia KWIECIEŃ¹

Środowiskowa ocena transportu intermodalnego

Streszczenie. Transport intermodalny jednostek ładunkowych stanowi wciąż niewielki udział w strukturze transportu krajowego (około 1,5%). Wraz z rosnącą liczbą i przepustowością krajowych terminali intermodalnych oraz ciągłym rozwojem wymiany międzynarodowej udział tego typu transportu będzie jednak bardzo dynamicznie wzrastał. Największym determinantem rozwoju transportu intermodalnego jest skrócenie czasu transportu, przy jednoczesnej minimalizacji kosztów tego procesu. Stosowanie tego typu niekapitałochłonnych rozwiązań powinno wpływać na zmniejszenie oddziaływania na środowisko procesu międzynarodowego transportu ładunków. Celem pracy jest wykorzystanie środowiskowej oceny (*life cycle assessment – LCA*) do określenia oddziaływania na środowisko przyjętych do analizy wariantów transportu intermodalnego 1 Mg ładunku z Azji (Pekin, Chiny) do Europy (Kraków, Polska). W wyniku przeprowadzonej środowiskowej oceny LCA (metoda TRACI, baza Ecoinvent 3.3) stwierdzono, że największym negatywnym oddziaływaniem na środowisko cechuje się wykorzystanie transportu lotniczego, który powoduje kilkakrotnie wyższe szkody w środowisku (w zależności od kategorii wpływu) niż wykorzystanie kombinacji transportu morskiego lub transportu kolejowo-drogowego na analizowanym odcinku. Najmniejszym wpływem na środowisko w zależności od kategorii wpływu cechuje się bezpośredni transport kolejowy i wykorzystanie transportu morskiego.

Słowa kluczowe: transport intermodalny, ocena cyklu życia (LCA), oddziaływanie na środowisko

Environmental assessment of intermodal transport

Abstract. Intermodal freight transport still has a small share in the structure of domestic transport (about 1.5%). Along with the growing number and capacity of domestic intermodal terminals and the continuous development of international exchange, the share of this type of transport will increase very dynamically. The important determinants of intermodal transport development are shortening the transport time while costs minimization of this process. The use of such low-cost solutions should reduce the environmental impact of international cargo transport. The aim of this paper was to use the environmental assessment (*life cycle assessment – LCA*) to determine the environmental impact of various analyzed variants of intermodal cargo transport of 1 Mg from

¹ Uniwersytet Rolniczy w Krakowie, Wydział Inżynierii Produkcji i Energetyki

Asia (Beijing, China) to Europe (Kraków, Poland). As a result of the LCA analysis (TRACI method, Ecoinvent 3.3 database), it was found that the use of air transport has the greatest negative impact on the environment, which causes several times higher environmental damage (depending on the impact category) than the combination of a maritime or rail–road transport along the analyzed route. The lowest environmental impact, depending on the impact category, has direct rail and maritime transport.

Keywords: intermodal transport, life cycle assessment (LCA), environmental impact

I. Transport intermodalny, jego rola i miejsce w handlu międzynarodowym

Transport warunkuje rozwój wielu gałęzi przemysłu, rolnictwa oraz usług, umożliwia zaspokajanie naturalnej potrzeby mobilności ludzi, a ponadto łączy przepływ materiałów pomiędzy głównymi działami systemu logistycznego tj. działami zaopatrzenia, produkcji i dystrybucji. Funkcjonowanie i rozwój transportu musi być podporządkowany celom i zasadom polityki społeczno-gospodarczej państwa. W szczególności zadaniem państwa jest właściwe kształtowanie szeroko rozumianej infrastruktury transportowej. Świadczenie usług wykorzystujących infrastrukturę transportową musi odbywać się w miejscach, gdzie jest na nie popyt, a zatem infrastrukturę transportową należy rozwijać tam, gdzie jest zapotrzebowanie na usługi transportowe. Szczególną rolę odgrywa tu infrastruktura transportu drogowego i kolejowego. Te dwie gałęzie transportu zaspokajają, w warunkach europejskich, zasadniczą część potrzeb transportowych generowanych przez gospodarkę i społeczeństwo (Pietrewicz 2011). W 2018 r. transport drogowy stanowił 75,3% całkowitego lądowego transportu towarowego, podczas gdy kolej i żegluga śródlądowa stanowiły odpowiednio 18,7 i 6,0% (Eurostat 2020). Wraz z rozwojem systemu transportowego uwaga użytkowników infrastruktury transportowej kierowana jest na czynniki środowiskowe (ekologia), bezpieczeństwo oraz energochłonność poszczególnych gałęzi transportu. Dotychczasowy model rozwoju transportu był krytykowany ze względu na zagrożenie środowiska przyrodniczego. Proces transportowy jest bowiem jedną z przyczyn degradacji środowiska przyrodniczego, ponadto negatywnie oddziałuje także na samego człowieka (Badyda 2010).

Działania zmierzające do zmiany charakteru transportu na bardziej proekologiczny są prowadzone od kilkudziesięciu lat. W działaniach tych wyróżnia się dwa nurty. Pierwszy z nich obejmuje bieżące działania, których celem jest ochrona środowiska przez likwidację lub ograniczenie do minimum zagrożeń pochodzących od transportu, drugi nurt cechuje się działaniami perspektywnymi, wskazując na zmiany w hierarchii wartości. Ma to doprowadzić w konsekwencji do wyeliminowania (zminimalizowania) zagrożeń związanych z transportem. Koncepcja ta nazywana jest zrównoważonym rozwojem i w sposób harmonijny kojarzy ład przyrodniczy, gospodarczy i społeczny. Idea ta doskonale wpisuje

się w problematykę transportu, dla którego podstawowym wyzwaniem jest oszczędność energii, ograniczenie emisji szkodliwych substancji, efektywne wykorzystanie zasobów (np. infrastruktury transportowej, środków transportowych), właściwe wykorzystanie przestrzeni i konsensus społeczny. Relacje przyrodnicze, gospodarcze i społeczne w koncepcji zrównoważonego rozwoju transportu traktowane są równorzędnie (Transport – nowe wyzwania 2016). Wyzwaniem zrównoważonego sektora transportu, który ma służyć potrzebom gospodarki i obywateli, jest jednocześnie spełnianie wymagań związanych z niedoborem ropy, rosnącymi zatorami komunikacyjnymi oraz koniecznością ograniczenia emisji CO₂ i zanieczyszczeń w celu poprawy jakości powietrza, zwłaszcza w miastach. Do 2050 r. emisje gazów cieplarnianych z transportu mają być zmniejszone o co najmniej 60% w porównaniu z 1990 r. Wśród priorytetów strategii Europejskiego Zielonego Ładu do 2050 r. jednoznacznie wskazano rozwój transportu multimodalnego (Komunikat Komisji 2019).

Dla realizacji polityki zrównoważonego transportu koniecznym stało się wprowadzenie koncepcji komodalności transportu. Transport komodalny to transport, który (System logistyczny Polski 2012):

- ◆ cechuje się najmniejszym negatywnym wpływem na środowisko przyrodnicze,
- ◆ jest efektywny ekonomicznie,
- ◆ wykorzystuje optymalnie istniejące zasoby.

Nie ulega wątpliwości, że rozwój infrastruktury transportowej powinien preferować te formy transportu, które są przyjazne środowisku i zarazem bardziej efektywnie wykorzystują dostępne zasoby. Należy zatem wskazać na konieczność zwiększania udziału w systemie transportowym transportu kolejowego, morskiego, wodnego śródlądowego i rurociągowego.

Aspekty bezpieczeństwa, ochrony środowiska oraz rosnące zatłoczenie dróg kołowych w Polsce i Europie powodują potrzebę znalezienia alternatywnej formy transportu towarów lub łączenia transportu drogowego z innymi gałęziami transportu. Transport kombinowany należy do złożonych procesów transportowych. Przemieszczanie ładunków odbywa się tu środkami przewozowymi różnych gałęzi transportu (Wronka 2002).

W celu zachowania równowagi pomiędzy poszczególnymi gałęziami transportu i ograniczenia negatywnych efektów środowiskowych transportu Unia Europejska podjęła działania dotyczące wspierania rozwoju transportu intermodalnego w ramach polityki zrównoważonego rozwoju transportu w UE. Transport intermodalny pozwala połączyć mocne strony różnych gałęzi transportu. Globalne łańcuchy transportowe realizowane w technologii przewozów intermodalnych (głównie kontenerowych) wymagają ogromnych nakładów (pracy ludzi i środków technicznych). Zaangażowanie to wymaga koordynacji wielu ogniw całego łańcucha transportowego, zarówno pod względem technicznym, informacyjnym, jak i organizacyjno-prawnym. Potrzeba rozwoju systemu transportowego z uwzględnieniem transportu intermodalnego wynika między innymi z prognoz potrzeb przewozowych oraz potrzeby dostosowania infrastruktury systemu do standardów i wymogów wszystkich uczestników systemu transportowego. Nieodzownym warunkiem istnienia system transportu intermo-

dalnego jest społeczne zapotrzebowanie na jego funkcjonowanie. W gospodarce rynkowej jest to możliwe, gdy transport ten stanie się konkurencyjny dla innych gałęzi transportu, w szczególności transportu samochodowego – drogowego (Technologie transportowe 2014).

Podstawowe znaczenie w prawidłowej realizacji procesów transportowych w przewozach intermodalnych ma infrastruktura, zarówno liniowa, punktowa, informatyczna, jak i suprastruktura. Przemieszczanie ładunków pomiędzy poszczególnymi rodzajami transportu jest możliwe pod warunkiem odpowiednio rozwiniętej infrastruktury punktowej, takiej jak: punkty przeładunkowe, centra logistyczne, czy terminale intermodalne.

Intermodalne terminale przeładunkowe są obiektami o szczególnym znaczeniu. Celem ich działania jest wykonanie sprawnego przeładunku pomiędzy środkami transportu różnych gałęzi oraz wykonanie czynności manipulacyjnych w obszarze stref i pól składowych. Przeładunek oraz czynności manipulacyjne dotyczą intermodalnych jednostek ładunkowych: kontenery, nadwozia wymienne, naczepy samochodowe, zestawy pojazdów drogowych (Jacyna, Pyza 2016).

Z uwagi na to, że w intermodalnym transporcie ładunki są przekazywane fizycznie co najmniej między dwiema gałęziami transportu, to przewóz powinien być realizowany na duże odległości, by utracony czas na wykonywanie operacji ładunkowych mógł być zrekomensowany skróceniem czasu przewozu bądź obniżką kosztów przewozów z tytułu zastosowania efektywniejszej gałęzi transportu. Zatem transport intermodalny powinien znaleźć zastosowanie przede wszystkim w przewozach międzynarodowych. Na zwrócenie uwagi na przewozy międzynarodowe z wykorzystaniem transportu intermodalnego przemawiały duże odległości oraz stosowane powszechnie przez państwa UE (w szczególności Europy Zachodniej) ograniczenia przewozów transportem samochodowym – uznane za mało efektywne z punktu widzenia ogólnospołecznego. Tymczasem przeładunek towarów w terminach intermodalnych oprócz czysto fiskalnych aspektów, pozwala także na zwiększenie bezpieczeństwa na drogach i zmniejszenie zagrożeń powstających w sytuacji katastrof pojazdów drogowych.

Do głównych zalet transportu intermodalnego należą (Jacyna i in. 2017):

- ♦ obsługa transportowa w relacji drzwi–drzwi, czyli ładunek (przedmiot przewozu) raz umieszczony w naczyniu transportowym (kontenerze, nadwoziu wymiennym, naczepie lub innej jednostce ładunkowej transportu intermodalnego) nie podlega żadnym bezpośrednim manipulacjom, natomiast wszelkie czynności przeładunkowe przenoszą się na jednostkę ładunkową,
- ♦ szybkie przemieszczanie jednostek ładunkowych środkami transportu dalekiego (w transporcie lądowym głównie koleją) na odległość co najmniej 250–400 km, chyba że inne względy uzasadniają stosowanie przewozów kolejowych również na mniejsze odległości,
- ♦ wysoki stopień bezpieczeństwa transportu (i przesyłki), dzięki kontrolowanemu przebiegowi operacji przeładunkowo-składowych na terminalach (wyeliminowa-

nie narażenia na mechaniczne uszkodzenia), ten aspekt jest szczególnie ważny przy przemieszczaniu ładunków niebezpiecznych,

- ♦ ociążenie tras drogowych poprzez przejęcie przez transport kolejowy przewozu jednostek ładunkowych transportu kombinowanego na duże odległości, dzięki temu istnieje możliwość zwiększenia bezpieczeństwa ruchu drogowego na zatłoczonych drogowych szlakach komunikacyjnych (szczególnie na dojazdach do aglomeracji miejskich), zdecydowanego ograniczenia tempa degradacji nawierzchni dróg kołowych przez ciężkie pojazdy drogowe, a także znacznego ograniczenia skażenia środowiska przyrodniczego przez związki chemiczne zawarte w spalinach (Jacyna, Merkisz 2014),
- ♦ możliwości obsługi transportowej w systemie *just in time*, a więc dostawy do odbiorców w ściśle określonym czasie, oraz korzystania z obsługi centrów logistycznych,
- ♦ w ruchu międzynarodowym, możliwość przeniesienia odprawy celnej z granicy na terminal początkowy i końcowy jazdy pociągu międzynarodowego, a tym samym zminimalizowanie postoju pojazdów drogowych na przejściach granicznych,
- ♦ unifikacja technologii transportu, z jednoczesną wysoką specjalizacją wyposażenia (szczególnie taboru przewozowego kolejowego i punktów obsługi przeładunkowej transportu intermodalnego).

1.1. Cel pracy

Biorąc pod uwagę wszystkie wyżej wymienione zalety transportu intermodalnego i ich zdecydowaną przewagę nad wadami, istotnym z poznawczego punktu widzenia wydaje się być określenie wpływu na środowisko wykorzystania różnych gałęzi transportu oraz terminali intermodalnych służących operacji przewozu i przeładunków tego samego ładunku. Chłopek i Lasocki (2013) podają, że w ocenie możliwego wpływu pojazdów i transportu na środowisko należy wziąć pod uwagę m.in. warunki pracy silników spalinowych, emisję zanieczyszczeń, emisję gazów cieplarnianych, uwzględniając zarówno okres użytkowania, jak i zagospodarowania pojazdu po jego zużyciu. Ocena ta może zostać dokonana przy zastosowaniu techniki LCA. Celem pracy jest ocena środowiskowa transportu intermodalnego ładunku o masie 1 Mg realizowanego z Pekinu (Chiny) do Krakowa (Polska) z wykorzystaniem transportu lotniczego, morskiego, kolejowego i drogowego w różnych kombinacjach z uwzględnieniem istniejących terminali intermodalnych. Przeprowadzone badania umożliwią wskazanie rozwiązań quasioptymalnych, które mogą w przyszłości stanowić rekomendację do zastosowania praktycznego lub dalszych badań i analiz wielokryterialnych.

2. Metodyka analiz

2.1. Analizowane warianty transportu

W celu przeprowadzenia analizy zaproponowano kilka wariantów transportu ładunku z Pekinu do Krakowa opisanych poniżej. Do obliczenia wpływu na środowisko wykorzystano program SimaPro 8.1 z bazą danych Ecoinvent 3.3. Jednostką funkcjonalną analizy jest 1 tkm, a więc miara pracy przewozowej w transporcie (iloczyn masy ładunku i odległości na jakiej został przetransportowany). Granice systemu obejmują operacje załadunku, przeładunku i rozładunku (operacje manipulacyjne, które wykonywane są za pomocą suwnic, żurawi i wozów wciągnikowych lub podsiębiernych w zależności od rodzaju terminala) jednostki ładunkowej w terminalach intermodalnych oraz proces przemieszczania ładunku.

Oprócz rozwiązań typowo intermodalnych określono również wpływ na środowisko bezpośredniego transportu ładunków z wykorzystaniem transportu lotniczego, kolejowego i drogowego. Analizowane warianty przedstawiały się następująco:

- ◆ Wariant 1 – bezpośredni transport lotniczy ładunku z Pekinu do Krakowa (wariant teoretyczny) w tym 2 operacje manipulacyjne,
- ◆ Wariant 2 – bezpośredni transport drogowy ładunku z Pekinu do Krakowa w tym 2 operacje manipulacyjne,
- ◆ Wariant 3 – bezpośredni transport kolejowy ładunku z Pekinu do Krakowa kolejowym korytarzem zachodnim w tym 4 operacje manipulacyjne, związane między innymi ze zmianą prześwitu toru (w Chinach i Europie – 1435 mm, natomiast w Rosji, Kazachstanie, Mongolii i na Białorusi – 1520 mm),
- ◆ Wariant 4 – transport lotniczy ładunku z Pekinu do Moskwy i transport drogowy do Krakowa, w tym 3 operacje manipulacyjne,
- ◆ Wariant 5 – transport lotniczy ładunku z Pekinu do Moskwy i transport kolejowy do Krakowa, w tym 5 operacji manipulacyjnych,
- ◆ Wariant 6 – transport kolejowy ładunku z Pekinu do Małaszewicz i transport drogowy do Krakowa, w tym 4 operacje manipulacyjne,
- ◆ Wariant 7 – transport morski ładunku z Pekinu do Hamburga i transport kolejowy do Krakowa, w tym 3 operacje manipulacyjne,
- ◆ Wariant 8 – transport morski ładunku z Pekinu do Hamburga i transport drogowy do Krakowa, w tym 3 operacje manipulacyjne.

2.2. LCA jako metoda analizy wpływu na środowisko procesów transportowych

Początki Ekologicznej Oceny Cyklu Życia (LCA) produktów, procesów i usług sięgają lat sześćdziesiątych i siedemdziesiątych XX wieku. Badania prowadzone wówczas nad

zużyciem energii i masą wytwarzanych odpadów w procesach produkcyjnych zaowocowały opracowaniem formalnego schematu analitycznego, który legł u podstaw omawianej techniki (Kowalski i in. 2007). LCA stała się metodą określania wpływu produktów, procesów i usług na środowisko (Kulczycka 2001; Grzesik 2006; Dębicka, Żygadło 2013; Kwiecień i in. 2019) i jest szeroko stosowana w różnych sektorach gospodarki (Gliniak, Lis 2019; Szafranko 2019; Vaverková 2019). W wyniku stosowania LCA zarządzający przedsiębiorstwem identyfikują obszary, które są źródłem szczególnych obciążeń dla środowiska, bądź zdrowia ludzi (Guzdek i in. 2020). Celem LCA jest zbadanie realnego jak również potencjalnego wpływu produktów, procesów lub obiektów na środowisko w sposób kompleksowy. „Życie” produktu, procesu lub systemu złożone jest zasadniczo z kilku faz: tj. wydobycia surowców, ich przetwarzania na materiały lub surowce np. paliwowe, wodę itp, wytwarzania dóbr i usług, dystrybucji (transportu), użytkowania (eksploatacji) i zagospodarowania odpadów po wycofaniu produktu, procesu lub systemu (Szafranko 2019; Guzdek i in. 2020). Wyszczególniając zalety i korzyści płynące z oceny cyklu życia LCA należy stwierdzić, że metoda ta nie jest wolna od wad, które mogą wpłynąć na ograniczenie stosowania wyżej wymienionej analizy u części wytwórców. Jest to technika czasochłonna i wymagająca sporych nakładów finansowych. Za wadę uznawana jest również złożoność analiz oraz konieczność posiadania bardzo szczegółowych danych na temat badanego procesu (Grzesik, Malinowski 2016).

Transport jest jednym z głównych źródeł zanieczyszczeń powietrza. Odpowiedzialny jest za emisję przede wszystkim tlenków azotu, tlenku węgla i zanieczyszczeń pyłowych, co negatywnie oddziałuje na zdrowie ludzi i cały ekosystem. Jednym z najczęściej analizowanych problemów transportowych z wykorzystaniem LCA jest transport odpadów. Grzesik (2015) oraz Guzdek i in. (2020) w wyniku przeprowadzonych ocen środowiskowych (LCA) stwierdzają, że znaczącymi kategoriami wpływu dla transportu odpadów są: tworzenie się ozonu fotochemicznego: wpływ na zdrowie ludzi i wegetację roślin, eutrofizacja, zakwaszenie, toksyczność dla ludzi oraz zmiany klimatu. Grzesik i Malinowski (2016) podają, że etap odbierania i transportu odpadów powoduje około 40% całkowitego wpływu na środowisko w systemie produkcji paliwa alternatywnego z odpadów w Polsce. Z wykorzystaniem LCA analizowano także cykl życia pojazdów mechanicznych (Chamier-Gliszczyński 2010), a także wpływ procesu budowy infrastruktury transportowej. Z dokonanego przeglądu literatury wynika ponadto, że metoda LCA do analizowania transportu intermodalnego ogranicza się albo do konkretnego obszaru (Merchan i in. 2017), albo do wybranego czynnika wpływającego na degradację środowiska np. emisja dwutlenku węgla (Vihermaa i in. 2006; Kim, Van Wee 2009).

2.3. Model oceny środowiskowej

Wpływ i szkody wywołane przez proces transportowy w programie SimaPro 8.1 ocenia się za pomocą szacowania obciążeń przypisanych poszczególnym kategoriom wpływu i kategoriom szkód. Dla ułatwienia interpretacji wyników uznaje się, że środowisko to zestaw

biologicznych, fizycznych i chemicznych parametrów wpływających na warunki funkcjonowania człowieka i przyrody. Przeprowadzanie analizy cyklu życia jest procesem wymagającym wielu, bardzo dokładnych danych (baz danych), a także metodyk modelujących mechanizmy środowiskowe oraz efekty powodowane przez uwalniane emisje. Dlatego analizę cyklu życia prowadzi się z zastosowaniem specjalnie opracowanych modeli (Grzesik 2015).

Środowiskową analizę wariantów przeprowadzono z wykorzystaniem modelu TRACI. Model ten został opracowany w celu uzyskania wskaźników zrównoważonego rozwoju, a także oceny wpływu cyklu życia i wpływu na proces projektowania złożonych systemów technicznych. Model TRACI umożliwia rozszerzoną kwantyfikację czynników, które mają potencjalne skutki w zakresie: niszczenia warstwy ozonowej, globalnego ocieplenia, zakwaszenia, eutrofizacji, powstawania smogu, zaburzenia zdrowia u ludzi, ekotoksyczności oraz o czym warto wspomnieć w dłuższej perspektywie zubożenia paliw kopalnych.

3. Wyniki i ich omówienie

W tabeli 1 zestawiono wyniki środowiskowej oceny transportu bezpośredniego ładunku z Pekinu do Krakowa z wykorzystaniem transportu lotniczego, kolejowego i drogowego

Tabela 1. Wpływ na środowisko operacji bezpośredniego transportu 1 Mg ładunku z Pekinu do Krakowa

Kategoria wpływu	Jednostka	Wariant 1	Wariant 2	Wariant 3
Zmniejszenie stężenia ozonu w warstwie ozonowej	kg CFC ⁻¹¹ eq	0,002029	0,000188	0,0000406
Globalne ocieplenie	kg CO ₂ eq	8363,824	746,304	386,588
Smog	kg O ₃ eq	880,73	58,38	31,08
Zakwaszenie	kg SO ₂ eq	36,49	2,93	2,46
Eutrofizacja	kg N eq	4,294	0,406	0,257
Kancerogenność	CTUh**	0,0000137	0,000005	0,0000112
Inne choroby (nienowotworowe)	CTUh	0,000133	0,000124	0,0000399
Skutki dla układu oddechowego	kg PM _{2.5} eq	1,615	0,502	0,407
Ekotoksyczność	CTUe	1043,978	2244,578	247,156
Wyczerpywanie się paliw kopalnych	MJ surplus	18064,5	1680,5	393,4

* CFC – chlorofluorowęglowodór.

** CTU (Comparative Toxic Unit) – wyraża szacowany wzrost zachorowalności populacji (np. ludzi) wskutek emisji substancji chemicznych do środowiska (liczba przypadków na kilogram).

Źródło: opracowanie własne.

oraz uwzględnieniem określonej liczby operacji manipulacyjnych. Spośród tych trzech wariantów zdecydowanie największym negatywnym wpływem na środowisko cechował się transport lotniczy. W analizie nie uwzględniono transportu morskiego ze względu na brak bezpośredniego połączenia drogą morską analizowanych miast.

Zdecydowanie najmniejszym negatywnym oddziaływaniem na środowisko cechował się transport kolejowy (wariant 3), gdzie pomimo wykorzystania większej liczby operacji manipulacyjnych (realizowanych za pomocą suwnic i innych urządzeń do transportu poziomego i pionowego w terminalach intermodalnych), całkowity efekt na środowisko określony np. emisją CO₂ jest dwukrotnie niższy niż dla transportu drogowego (wariant 2) i ponad 20-krotnie niższy niż dla transportu lotniczego (wariant 1).

Skrócenie odległości transportu lotniczego i zastąpienie go na odcinku Moskwa–Kraków transportem drogowym lub kolejowym przynosi około 20% zmniejszenie negatywnego wpływu na środowisko we wszystkich analizowanych kategoriach wpływu (tabela 2).

Zastąpienie transportu kolejowego transportem drogowym na odcinku Małaszewicze–Kraków (wariant 6) spowodowało zwiększenie oddziaływania całego procesu transportowego na środowisko w każdej analizowanej kategorii wpływu. W zakresie globalnego ocieplenia, emisji smogu, czy eutrofizacji był to wzrost o około 15–18%.

Tabela 2. Wpływ na środowisko transportu intermodalnego I Mg ładunku z Pekinu do Krakowa – wariant 4, 5 i 6

Kategoria wpływu	Jednostka	Wariant 4	Wariant 5	Wariant 6
Zmniejszenie stężenia ozonu w warstwie ozonowej	kg CFC ⁻¹¹ eq	0,001627	0,001599	0,0000552
Globalne ocieplenie	kg CO ₂ eq	6700,556	6635,615	456,028
Smog	kg O ₃ eq	701,64	696,72	36,56
Zakwaszenie	kg SO ₂ eq	29,18	29,12	2,78
Eutrofizacja	kg N eq	3,445	3,419	0,297
Kancerogenność	CTUh**	0,0000117	0,000013	0,0000121
Inne choroby (nienowotworowe)	CTUh	0,000128	0,000112	0,0000503
Skutki dla układu oddechowego	kg PM2.5 eq	1,364	1,350	0,461
Ekotoksyczność	CTUe	1252,167	868,745	412,156
Wyczerpywanie się paliw kopalnych	MJ surplus	14487,7	14248,9	525,7

* CFC – chlorofluorowęglowodór.

** CTU (Comparative Toxic Unit) – wyraża szacowany wzrost zachorowalności populacji (np. ludzi) wskutek emisji substancji chemicznych do środowiska (liczba przypadków na kilogram).

Źródło: opracowanie własne.

Warianty 7 i 8 cechowały się niskimi wartościami oddziaływań w zakresie emisji CO₂, eutrofizacji, wpływu na zdrowie ludzkie oraz ekotoksyczności w porównaniu do reszty wariantów. W wariantach 7 i 8 wykorzystano transport morski w połączeniu z transportem kolejowym (wariant 7) oraz transportem drogowym (wariant 8). Zmiana transportu kolejowego na rzecz drogowego spowodowała jednak wzrost emisji o około 12% w przypadku CO₂, o około 6% w przypadku eutrofizacji i o około 73,5% w przypadku ekotoksyczności (tabela 3).

Tabela 3. Wpływ na środowisko transportu intermodalnego 1 Mg ładunku z Pekinu do Krakowa – wariant 7 i 8

Kategoria wpływu	Jednostka	Wariant 7	Wariant 8
Zmniejszenie stężenia ozonu w warstwie ozonowej	kg CFC ⁻¹¹ eq	0,0000567	0,0000715
Globalne ocieplenie	kg CO ₂ eq	281,596	318,684
Smog	kg O ₃ eq	79,22	82,03
Zakwaszenie	kg SO ₂ eq	5,38	5,43
Eutrofizacja	kg N eq	0,252	0,268
Kancerogenność	CTUh**	0,00000231	0,00000172
Inne choroby (nienowotworowe)	CTUh	0,0000116	0,0000201
Skutki dla układu oddechowego	kg PM _{2.5} eq	0,384	0,395
Ekotoksyczność	CTUe	72,327	272,727
Wyczerpywanie się paliw kopalnych	MJ surplus	509,3	639,8

* CFC – chlorofluorowęglowodór.

** CTU (Comparative Toxic Unit) – wyraża szacowany wzrost zachorowalności populacji (np. ludzi) wskutek emisji substancji chemicznych do środowiska (liczba przypadków na kilogram).

Źródło: opracowanie własne.

Wnioski

Największym negatywnym wpływem na środowisko spośród wszystkich analizowanych wariantów cechował się wariant 1, czyli bezpośredni transport lotniczy z Pekinu do Krakowa, gdzie dla 9 z 10 kategorii wpływu wyliczone zostały maksymalne wartości. Natomiast najmniejszym negatywnym oddziaływaniem cechowały się warianty 3 (bezpośredni transport kolejowy) i 7 (transport morski + kolejowy). Największe zróżnicowanie pomiędzy wariantami dotyczy kategorii zmniejszenia stężenia ozonu oraz wyczerpywania się paliw kopalnych. Analiza różnych wariantów transportu bezpośredniego i intermodalnego wyka-

zała, że wykorzystanie terminali intermodalnych i środków transportowych należących do różnych gałęzi transportu np. transportu kolejowego i morskiego są dla środowiska, ludzi i zasobów naturalnych najkorzystniejszym rozwiązaniem w zakresie transportu ładunków w handlu międzynarodowym.

Literatura

- Badyda A.J. 2010: Zagrożenia środowiskowe ze strony transportu. Poznań.
- Chamier-Gliszczyński N. 2010: Analiza cyklu życia obiektów technicznych w transporcie. *Autobusy: technika, eksploatacja, systemy transportowe*, 6, s. 1–8.
- Chłopek Z., Lasocki J. 2013: Zastosowane metody oceny cyklu istnienia do analizy właściwości ekologicznych samochodów. *Zeszyty Naukowe Instytutu Pojazdów*, 1(92), s. 57–66.
- Dębicka M., Żygadło M. 2013: The LCA as a method to support waste management system. *Archives of Waste Management and Environmental Protection*, 15(1), s. 37–46.
- Eurostat. 2020. Freight transport statistics – modal split. On-line: https://ec.europa.eu/eurostat/statisticsexplained/index.php?title=Freight_transport_statistics_-_modal_split#Modal_split_in_the_EU (dostęp 16.12.2020).
- Gliniak M., Lis A. 2019: Transportation of waste in the life cycle analysis. *Earth and Environmental Science*, 362(1).
- Grzesik K. 2006: Wprowadzenie do oceny cyklu życia (LCA) nowej techniki w ochronie środowiska. *Inżynieria Środowiska*, 11(1), s. 101–113.
- Grzesik K., 2015: Oddziaływanie na środowisko zbiórki i transportu odpadów w systemach gospodarki odpadami komunalnymi. *Logistyka*, 4, s. 8902–8910.
- Grzesik K., Malinowski M. 2016: Life cycle assessment of refuse – derived fuel production from mixed municipal waste. *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects*, 38(21), s. 3150–3157.
- Guzdek S., Malinowski M., Religa A., Liszka D., Petryk A. 2020: Economic and Ecological Assessment of Transport of Various Types of Waste. *Journal of Ecological Engineering*, 21(5), s. 19–26.
- Jacyna M., Merkisz J. 2014: Kształtowanie systemu transportowego z uwzględnieniem zanieczyszczeń w rzeczywistych warunkach ruchu drogowego. Warszawa: Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej.
- Jacyna M., Pyza D. 2016: Rola intermodalnych terminali przeładunkowych w przewozach kolejowo-drogowych. *Problemy kolejnictwa*, 59(169). Warszawa: Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, s. 15–27.
- Jacyna M., Pyza D., Jachimowski R. 2017: Transport intermodalny. Projektowanie terminali przeładunkowych. Warszawa: Wydawnictwo Naukowe PWN.
- Kim N.S., Van Wee B. 2009: Assessment of CO₂ emissions for truck-only and rail-based intermodal freight systems in Europe. *Transportation Planning and Technology*, 32(4), s. 313–333.
- Komunikat Komisji do Parlamentu Europejskiego 2019: Europejski Zielony Ład (2019).
- Kowalski Z., Kulczycka J., Góralczyk M. 2007: Ekologiczna ocena cyklu życia procesów wytwórczych (LCA). Warszawa: Wydawnictwo Naukowe PWN.
- Kulczycka J. 2001: LCA – definicje i założenia. [W:] Ekologiczna ocena cyklu życia (LCA) nową techniką zarządzania środowiskowego. Kulczycka J. red. Kraków: Wyd. IGSMiE PAN.
- Kwiecień K., Kania G., Malinowski M. 2019: The life cycle assessment (LCA) of selected TV models. *Mendel-Net2019*, s. 522–527.
- Merchan A.L., Belboom S., Leonard A. 2017: Life cycle assessment of freight transport in Belgium. *Proceedings of the BIVEC-GIBET Transport Research Days*.
- Pietrewicz J.W. 2011: Ochrona środowiska w warunkach procesów globalizacji. Warszawa: Oficyna Wydawnicza SGH w Warszawie.
- System logistyczny Polski. 2012: Jacyna M. red. Warszawa: Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej.
- Szafranko E. 2019: Selected Problems of the Environmental Impact Analysis of Investment Projects Based on Life Cycle Assessment Procedure. *Journal of Ecological Engineering*, 20(9), s. 87–94.

- Technologie transportowe 2014: Mindura L. red. ITE – Instytut Technologii Eksploatacji – Państwowy Instytut Badawczy, Radom.
- Transport – nowe wyzwania 2016: Wojewódzka-Król K., Załoga E. red. Warszawa: Wydawnictwo Naukowe PWN.
- Wronka J. 2002: Transport kombinowany w aspekcie wymogów zrównoważonego rozwoju. Warszawa–Szczecin: Wydawnictwo Naukowe Ośrodka Badawczego Ekonomiki Transportu PP.
- Vaverková M.D. 2019: Landfill impacts on the environment – review. *Geosciences, Switzerland*, 9(10), s. 431.
- Vihermaa L., Lettenmeier M., Saari A. 2006: Natural resource consumption in rail transport: A note analysing two Finnish railway lines. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 11(3), s. 227–232.

**Karolina BRZOZA¹, Justyna OBRZUT¹, Klaudia KWIECIEN¹,
Mateusz MALINOWSKI¹, Jacek SALAMON¹, Anna KRAKOWIAK-BAL¹**

Aspekty projektowe terminali intermodalnych – studium przypadku: terminal lądowy

Streszczenie. Transport jest podstawowym elementem łączącym różne gałęzie gospodarki krajowej w zakresie przepływu dóbr i materiałów, jak i czynnikiem od którego zależy efektywny rozwój handlu międzynarodowego. Zwiększająca się presja na dostarczanie towarów w krótkim czasie i w odpowiednich warunkach, wiąże się niejednokrotnie z wysokimi kosztami procesu transportowego, ale i dużym obciążeniem dla środowiska związanym z emisją tlenków azotu, węgla i innych. Poszukiwanie rozwiązań ekonomicznych i ekologicznych (szczególnie w transporcie międzynarodowym) powoduje dynamiczny rozwój transportu intermodalnego oraz pociąga za sobą budowę kolejnych terminali morskich i lądowych. Właściwa organizacja terminalu umożliwia efektywne wykorzystanie zalet transportu intermodalnego. Celem niniejszego rozdziału jest przedstawienie podstawowych aspektów związanych z projektowaniem lądowego (kolejowo-drogowego) terminala intermodalnego. Przedstawiona uniwersalna metodyka, pozwala na wyznaczenie podstawowych parametrów terminala intermodalnego, w taki sposób, aby obsługiwał on określoną liczbę jednostek ładunkowych przy szczytowej wydajności przeładunkowej.

Słowa kluczowe: transport intermodalny, terminal intermodalny, projektowanie terminala

Intermodal terminal design aspects – case study: land terminal

Abstract. Transport is the basic element which connects various branches of the national economy in the field of the flow of goods and materials, and it is a factor that determines the effective development of international trade. The increasing pressure to deliver goods in a short time and in the right conditions is often associated with high cost of the transport process, but also with a heavy environmental burden related to the emission of nitrogen and carbon oxides and the others. The search for economic and ecological solutions (especially in international transport) causes a dynamic development of intermodal transport and entails the construction of further sea and land terminals. Proper terminal organization enables an effective use of the intermodal transport advantages. The

¹ Uniwersytet Rolniczy w Krakowie, Wydział Inżynierii Produkcji i Energetyki

aim of this study is to present the basic aspects related to the land (rail–road) intermodal terminal design. The presented universal methodology allows determination of the basic parameters of an intermodal terminal suitable to handle a certain number of load units at the peak handling efficiency.

Keywords: intermodal transport, intermodal terminal, terminal design

Wprowadzenie

Jednym z podstawowych elementów dobrze funkcjonującego systemu gospodarczego jest wysoko wyspecjalizowany transport wraz z rozwiniętą siecią infrastruktury komunikacyjnej (drogowej, kolejowej, lotniczej) umożliwiającej realizowanie procesów logistycznych (zarówno na poziomie przedsiębiorstwa jak i skali makro) zgodnie z zasadami zrównoważonego rozwoju. Transport w ujęciu czynnościowym polega na przemieszczaniu dóbr (materiałów) i osób w czasie i przestrzeni przy użyciu odpowiednich środków technicznych. W znaczeniu rzeczowym transport traktować należy jako wyposażenie materialne służące procesom przemieszczania (Wierzejski, Kędzior-Laskowska 2014). Efektywne zarządzanie procesami przepływu ładunków (towarów), szczególnie pomiędzy krajami lub pomiędzy kontynentami decyduje o sukcesie dynamicznie rozwijającej się wymiany międzynarodowej w zglobalizowanym świecie. Ze względu na konieczność pokonywania dużych odległości w krótkim czasie rośnie znaczenie transportu lotniczego (kosztem morskiego, kolejowego i drogowego), który wywołuje negatywne zmiany w środowisku naturalnym (Kamiński i in. 2016) W krajach UE transport jest źródłem 54% całkowitej emisji tlenków azotu, 45% tlenku węgla, 23% nie metanowych lotnych związków organicznych, 23% pyłów PM10, 28% pyłów PM2,5 i 23% emisji CO₂ (Badyda 2010).

Poszukiwanie rozwiązań optymalnych lub quasi-optymalnych, w których podstawowe cele transportu będą równoważone wpływem na środowisko jest zgodne z wdrażanymi rozwiązaniami gospodarki o obiegu zamkniętym (GOZ). Istotą koncepcji GOZ jest między innymi utrzymanie możliwie jak najdłuższej wysokiej wartości i jakości zasobów, materiałów i produktów w gospodarce (KE 2015). Sobiecki (2016) oraz Głowacki i in. (2019) podają, że jednym z obszarów zainteresowania GOZ jest mobilność, która w ujęciu konsumenckim dotyczy przejścia od modelu posiadania do modelu w którym pojazdy są wypożyczane, a w ujęciu makroekonomicznym dotyczy rozwoju elektro-mobilności, minimalizacji zużycia energii i paliw oraz ochrony środowiska. Ponadto wymagania Unii Europejskiej w zakresie promowania gospodarki efektywnej, korzystającej z zasobów przyjaznych środowisku i bardziej konkurencyjnej, także wpływa na wykorzystywanie w transporcie technologii, które ograniczałyby zanieczyszczenie środowiska (Jacyna, Pyza 2015). Transport intermodalny jest jednym z alternatywnych (ekonomicznych i ekologicznych) rozwiązań w tworzeniu nowoczesnych łańcuchów transportowo-logistycznych łączących co najmniej dwie gałęzie transportu w jeden system (Stokłosa i in. 2014). Antonowicz (2018) oraz Poliński (2015)

wskazują na kluczową rolę przewozów intermodalnych, w tym wykorzystaniu infrastruktury kolejowej w zmniejszeniu negatywnego oddziaływania transportu na środowisko oraz zmniejszeniu zużycia paliw i energii w procesie transportu ładunków, szczególnie na trasach interkontynentalnych.

Podstawowym elementem transportu intermodalnego są terminale intermodalne. Według definicji przyjętej przez Europejską Komisję Gospodarczą Organizacji Narodów Zjednoczonych (UNECE), Europejską Konferencję Ministrów Transportu (ECMT) oraz Organizację Współpracy Gospodarczej i Rozwoju (OECD) terminal jest obszarem przeznaczonym do magazynowania intermodalnych jednostek ładunkowych (ustandaryzowanych kontenerów lub naczep samochodowych), który jest wyposażony w maszyny i urządzenia przeładunkowe służące do obsługi intermodalnych jednostek ładunkowych (Pyza 2016). Wyróżnia się morskie i lądowe przeładunkowe terminale intermodalne (Jacyna i in. 2018). Wśród lądowych terminali dominują układy kolejowo-drogowe (kontener lub naczepa samochodowa jest przeładowywana z wagonu kolejowego na samochód lub odwrotnie) lub kolejowo-kolejowe (kontener zmienia wagony poruszające się po torowiskach o różnym rozstawie szyn: 1520 lub 1435 mm). W ostatnich latach przewozy intermodalne (przede wszystkim kolejowo-drogowe) cechuje stały sukcesywny rozwój (Antonowicz 2018; Poliński 2015), który inicjuje budowę kolejnych terminali intermodalnych.

I. Charakterystyka terminali kolejowo-drogowych

Połączenie transportu drogowego z kolejowym jest jednym z najbardziej popularnych rozwiązań w transporcie intermodalnym. W tym przypadku transport towarów na większe odległości prowadzony jest za pomocą połączeń kolejowych (tam, gdzie jest to możliwe), natomiast trasy krótkie, realizowane są z wykorzystaniem transportu drogowego. Jest to spowodowane niską emisją z transportu szynowego. Jak podaje Zamkowska (2013) i Pörner (2008), przewożąc towary koleją emituje się prawie 75% mniej CO₂ niż transportując tą samą masę i objętość towaru z wykorzystaniem pojazdów drogowych.

Podstawowym zadaniem lądowego terminala przeładunkowego jest obsługa manipulacyjno-transportowa jednostek transportu intermodalnego (kontenerów lub naczep samochodowych) przybyłych do terminala zarówno środkami transportu kolejowego, jak i drogowego.

Podstawowe relacje przejścia jednostek transportu intermodalnego przez terminal kontenerowy przedstawione zostały w następujący sposób: C1 – wagon kolejowy – pojazd drogowy (W–S), C2 – pojazd drogowy – wagon kolejowy (S–W), C3 – wagon kolejowy – wagon kolejowy (W–W), C4 – wagon kolejowy – plac składowy (W–P), C5 – pojazd drogowy – plac składowy (S–P), C6 – plac składowy – pojazd drogowy (P–S), C7 – plac składowy – wagon kolejowy (P–W) (Nader, Kostrzewski 2014; Stokłosa 2011; Kwaśniewski i in. 2008).

Projektując nowe terminale intermodalne trzeba wziąć pod uwagę zawsze dwa aspekty: lokalizacyjny i techniczny. Aspekt lokalizacyjny (często związany ze środowiskowym)

dotyczy oszacowania i analizy potencjalnego rynku usług transportowo-logistycznych (Stokłosa i in. 2014) oraz wyboru potencjalnych lokalizacji w oparciu o wielokryterialne analizy środowiskowe (McCalla i in. 2001). Założenia lokalizacyjne powinny uwzględnić położenie terminalu względem ośrodków zabudowy mieszkalnej, obszarów składowo-magazynowych oraz węzłów komunikacyjnych np. dostęp do głównej drogi czy też torów kolejowych (Pyza, Piątek 2017; Jacyna i in. 2018). Analizując aspekt techniczny podczas projektowania nowych terminali kolejowo-drogowych należy wziąć pod uwagę (Nader, Kostrzewski 2014; Stokłosa 2011):

- ◆ liczbę dni roboczych w roku dla lądowej bazy przeładunkowej,
- ◆ zdolność przepustową terminala kontenerowego (dobową oraz roczną),
- ◆ rodzaj obsługiwanych jednostek transportu intermodalnego,
- ◆ dobór systemów przewozowo-przeładunkowych,
- ◆ układ przestrzenno-funkcjonalny projektowanej bazy przeładunkowej,
- ◆ przeznaczenie oraz rozmiary placów manipulacyjno-składowych,
- ◆ układ drogowy oraz kolejowy,
- ◆ układ pasów ruchu dla środków transportu zewnętrznego oraz urządzeń ładunkowych,
- ◆ zaplecze administracyjno-techniczne,
- ◆ wielkość stref parkingowych dla pojazdów osobowych oraz zestawów drogowych.

Podstawowe wyposażenie terminali intermodalnych stanowi (Jacyna i in. 2018; Jacyna 2012): układ drogowy, układ torowy, place składowe i pasma manipulacyjne oraz fronty ładunkowe. Układ drogowy terminala intermodalnego, o odpowiednich parametrach technicznych poszczególnych elementów, gwarantuje sprawne, bezpieczne i bezkolizyjne poruszanie się pojazdów drogowych po terminalu, bezkolizyjny i sprawny wjazd pojazdów z sieci dróg publicznych na teren terminala oraz włączenie się do ruchu publicznego pojazdów wyjeżdżających z terminala. Ponadto układ drogowy zapewnia właściwe warunki do poruszania się pojazdów drogowych oraz maszyn ładunkowych na froncie ładunkowym (Pyza, Piątek 2017). Zadaniem układu torowego terminala jest zapewnienie sprawnej obsługi ruchowej na frontach ładunkowych. Między poszczególnymi grupami torów powinny występować właściwe połączenia torowe, a całość układu musi być projektowana zgodnie z odpowiednimi wytycznymi i spełniać warunki do bezpiecznej pracy. Jednocześnie układ torowy terminala powinien spełniać wymagania umowy AGTC o ważniejszych międzynarodowych liniach transportu kombinowanego i obiektach im towarzyszących (Jacyna, Pyza 2015). Place składowe na terminalach wykorzystywane są do składowania operacyjnego (krótkoterminowego) kontenerów i nadwozi wymiennych oraz ich porządkowania i sortowania. Pasma manipulacyjne przeznaczone są do pracy urządzeń przeładunkowych przejezdnych m.in. wysięgnikowych wozów samojezdnych do przeładunku kontenerów, tzw. reach-stackerów, ciągników terminalowych do pracy z naczepami, suwnic, żurawi, wozów podsiębiernych i innych (Pyza, Piątek 2017). Place składowe dla kontenerów powinny mieć powierzchnię równą, płaską i poziomą. Najkorzystniej jest, gdy znajdują się w zasięgu

głównego urządzenia przeładunkowego, gdyż ogranicza to liczbę czynności ładunkowych do niezbędnego minimum (Jacyna, Pyza 2015). Czynności ładunkowe są realizowane w relacji bezpośredniej lub pośredniej. Relacja bezpośrednia to relacja, w przypadku której oba środki przewozowe są już podstawione na froncie ładunkowym. Natomiast relacja pośrednia to taka, w przypadku której należy uwzględnić konieczność tymczasowego składowania jednostek ładunkowych na odpowiednio do tego przeznaczonych placach manipulacyjno-składowych (Nader, Kostrzewski 2014).

Front ładunkowy jest najważniejszym elementem terminala, miejscem wykonywania operacji ładunkowych w określonym czasie wraz z zespołem niezbędnych urządzeń technicznych. Może on pracować, jako samodzielny układ ładunkowy lub w połączeniu z placami odstawczymi. Place odstawcze pełnią funkcje pomocnicze i odciążają front ładunkowy w zakresie składowania intermodalnych jednostek ładunkowych i części operacji związanych z obsługą pojazdów drogowych (Pyza, Piątek 2017). Front ładunkowy umożliwia realizację podstawowej funkcji terminala, jaką jest przeładunek intermodalnych jednostek ładunkowych (Pyza, Piątek 2017). Front ładunkowy można podzielić na cztery obszary: torowy, drogowy, manipulacyjny oraz składowania. W praktyce jednak trudno określić wyraźną granicę pomiędzy tymi obszarami (Grulkowski, Zariczny 2013).

Celem tego rozdziału jest przedstawienie podstawowych aspektów projektowania terminali intermodalnych ze szczególnym uwzględnieniem frontów ładunkowych. W pracy przedstawiono autorską koncepcję terminala dla przyjętych założeń technicznych.

2. Materiał i metody

Koncepcja terminala została zaprojektowana według założeń przedstawionych w tabeli 1 i kroków obliczeniowych przedstawionych poniżej.

Wytyczne do zaprojektowania terminala kolejowo-drogowego zostały opracowane zgodnie z zasadami opisanymi między innymi przez Nader i Kostrzewski (2014). Krok 1 stanowi obliczenie przepustowości dziennej terminala, która wyrażona jest w TEU (*twenty-feet equivalent unit* – jednostka miary odpowiadająca pojemności jednego kontenera 20-stopowego o wymiarach 2,591 m wysokości, 2,438 m szerokości oraz 6,058 m długości). Przepustowość (A) to średnioroczna liczba kontenerów (1TEU), która może być obsłużona przez terminal w ciągu jednej doby, wyznaczona według zależności (1).

$$A = \frac{U}{d} \quad [\text{TEU/dobę}] \quad (1)$$

gdzie:

- U – roczna przepustowość terminala,
- a – liczba dni roboczych.

Tabela I. Przykładowe założenia (wytyczne) do zaprojektowania terminala intermodalnego

Lp.	Opis cechy projektowej	Jednostka	Wartość
1.	Roczna przepustowość (u)	[TEU/rok]	260 000
2.	Liczba dni roboczych (d)	[doba]	210
3.	Liczba wagonów z kontenerami 40' (n_{wag})	[-]	18
4.	Współczynnik nierówności przepływu ładunków (α)	[-]	1,3
5.	Zapas kontenerów (γ)	[-]	40
6.	Współczynnik przeładunku pośredniego (ρ_p)	[-]	0,7
7.	Współczynnik przeładunku bezpośredniego (ρ_b)	[-]	0,3
8.	Uśredniony czas trwania cyklu przeładunkowego (t_c)	[min.]	4
9.	Średni czas oczekiwania na przeładunek (t_d)	[doba]	0,75
10.	Liczba rzędów (n_r)	[-]	3
11.	Liczba warstw kontenerów na placu składowym (n_w)	[-]	3
12.	Liczba torowisk	[-]	3
13.	Współczynnik nierówności pracy suwnicy (θ)	[godz.]	0,75

Źródło: opracowanie własne.

W związku z nieregularnością przepływu intermodalnych jednostek ładunkowych przez terminal, należy w kroku nr 2 obliczyć przepustowość dzienną szczytową, która stanowi iloczyn przepustowości dziennej i współczynnika nierównomierności przepływu ładunków. Bazowanie w obliczeniach jedynie na średniej przepustowości dziennej mogło by w następstwie doprowadzić do braku możliwości obsłużenia większej liczby kontenerów w niektórych dniach roku.

$$A_{\max} = A \cdot \alpha \quad [\text{TEU/dobę}] \quad (2)$$

gdzie:

A – przepustowość dzienna,

α – współczynnik nierównomierności przepływu ładunków.

Obliczenie długości torów ładunkowych (L_w) znajdujących się na froncie ładunkowym często decyduje o długości (rozmiarze) całego frontu ładunkowego. Najdłuższe pociągi intermodalne w Polsce osiągają 600 metrów, dlatego terminale intermodalne powinny być przygotowane na przyjęcie takiego składu. Długość torów oblicza się głównie w oparciu

o analizę potrzeb lokalnych przedsiębiorstw, aby ograniczyć koszty budowy przewymiarowanych terminali.

$$L_w = (n_{wag} \cdot l_w \cdot \alpha) + l_{lok} + l_{bezp} \quad [\text{m}] \quad (3)$$

gdzie:

- n_{wag} – liczba wagonów,
- l_w – długość jednego wagonu,
- α – współczynnik nierównomierności przepływu ładunków.
- l_{lok} – długość lokomotywy,
- l_{bezp} – zapas bezpieczeństwa.

Obliczenie liczby kontenerów (oczekujących na przeładunek) na polu składowym znajdującym się na froncie ładunkowym również może ostatecznie decydować o rozmiarach całego frontu ładunkowego, będzie to jednak zależało od liczby rzędów i warstw w blokach układanych kontenerów oraz przepustowości całego terminala.

$$C_{skl} = A_{max} \cdot \rho_p \cdot t_d + \gamma \quad [\text{szt.}] \quad (4)$$

gdzie:

- ρ_p – współczynnik przeładunku pośredniego,
- t_d – średni czas oczekiwania na przeładunek [doba],
- γ – zapas kontenerów [szt].

W kolejnym kroku (5) należy obliczyć długość pola składowego (L_{skl}), przyjmując liczbę warstw i liczbę rzędów oraz długości kontenera 1 TEU – 6,5 m (uwzględniając przestrzeń pomiędzy kontenerami).

$$L_{skl} = \frac{C_{skl}}{n_w \cdot n_r} l_{kont} \quad [\text{m}] \quad (5)$$

gdzie:

- n_w – liczba warstw,
- n_r – liczba rzędów,
- l_{kont} – długość kontenera.

Poniżej przedstawiono formułę (6) na obliczenie pola powierzchni zajmowanej przez pole składowe kontenerów z ładunkami (P_{pskl}) przy uwzględnieniu liczby rzędów, liczby warstw i odległości pomiędzy kontenerami w rzędach, która powinna wynosić 0,5 m, a także odległości buforowej od placu manipulacyjnego i torowiska suwnicy 0,6 m.

$$P_{pskl} = L_w \cdot (w_{kont} \cdot n_r + 2 \cdot (0,5 + 0,6)) \quad [\text{m}^2] \quad (6)$$

gdzie:

w_{kont} – szerokość kontenera.

Przed przystąpieniem do obliczenia liczby urządzeń ładunkowych należy oszacować efektywność pracy suwnicy (g), a więc hipotetyczną liczbę kontenerów, którą jedna suwnica może przeładować w ciągu dnia.

$$g = \theta \cdot l_c \quad (7)$$

gdzie:

θ – współczynnik nierównomierności pracy suwnicy – przyjęto 0,75,

l_c – liczba cykli na dobę, obliczona na podstawie uśrednionego czasu trwania cyklu ładunkowego.

Obliczenie liczby urządzeń ładunkowych (suwnic) (U_{lad}) odbywa się zgodnie ze wzorem (8), w którym uwzględniono współczynnik przeładunku pośredniego i bezpośredniego. Ponieważ przeładunek bezpośredni stanowi jedną operację przeładunkową jego współczynnik mnożony jest razy 1, natomiast w przeładunku pośrednim, w którym kontener z ładunkiem oczekuje na placu składowym wykonywane są dwie operacje i współczynnik mnożony jest przez 2.

$$U_{lad} = \frac{\#_{\max} \cdot (\rho_p \cdot 2 + \rho_b \cdot 1)}{g} \quad [\text{szt.}] \quad (8)$$

gdzie:

ρ_p, ρ_b – współczynniki przeładunku pośredniego i bezpośredniego,

g – efektywność pracy suwnicy [TEU/dobę].

Terminal intermodalny ponadto powinien być wyposażony w bramę wjazdową/wyjazdową, stację kontroli pojazdów i pociągów intermodalnych, parking dla ciągników siodłowych i terminalowych oraz naczep, plac pustych kontenerów oraz budynków socjalno-administracyjnych.

Przedstawiona koncepcja jest podstawowym modelem terminala intermodalnego. Należy pamiętać, że wciąż rozwijają się nowe technologie pozwalające na transport ładunków w systemach np. typu ruchoma droga.

3. Wyniki

Koncepcję terminala kolejowo-drogowego obliczonego na podstawie powyżej przedstawionej metodyki obrazuje rysunek 1. Zaprojektowany terminal intermodalny (drogowo-kolejowy) pracuje przez 210 dni w roku. Roczna przepustowość wynosi 260 000 TEU, co przekłada się na przepustowość szczytową kształtującą się na poziomie 1610 TEU. Front ładunkowy terminala stanowią 3 tory kolejowe o długości minimum 672 m każdy, pasa drogowego oraz 3 rzędów pasów składowych dla kontenerów z ładunkiem oczekujących na przeładunek. Na pasie składowym obsługiwanym przez suwnice można pomieścić maksymalnie 885 sztuk kontenerów. Zgodnie z wytycznymi, szerokość torów wynosi 1,435 m, a pomiędzy osiami torowisk została zachowana odległość 4,5 m. Układ zaprojektowanego terminala (rys. 1) jest przelotowy, co pozwala na możliwość wjazdu i wyjazdu pojazdów samochodowych z każdej strony, dzięki czemu uniknie się tworzenia kolejek w poszczególnych ciągach komunikacyjnych. Jako urządzenia przeładunkowe zaproponowano suwnice typu RMG. Ruch pod suwnicami odbywa się w jedną stronę ze względu na zachowanie bezpieczeństwa. Nie powinno się prowadzić prac wyładowczo-załadowniczych na torach, nad którymi rozwieszona jest elektryczna sieć trakcyjna, dlatego zaprojektowano dodatkową grupę torów, umożliwiającą zmianę trakcji i ewentualnie zmianę czoła pociągu – objazd lokomotyw. Nad bezkolizyjną zmianą toru nadzór sprawowany jest z posterunku kontrolującego (centrali) wjazd i wyjazd pociągów intermodalnych. W skład układu drogowego wchodzi droga łącząca obiekt z siecią dróg publicznych i pasma jezdne oraz manipulacyjne.

Wjazd na terminal odbywa się przez wielostanowiskową bramę. Zaproponowano osobny wjazd i osobny wyjazd, aby zminimalizować tworzenie się zatorów. Przejazd jest nadzorowany z posterunku kontrolnego (centrala). W tym miejscu następuje kontrola pojazdów drogowych, a kierowca przedstawia odpowiednią dokumentację przewozową. Większość kontroli jest przeprowadzana zdalnie za pomocą urządzeń technicznych – takich jak kamery, skanery, wagi i inne – dzięki którym pracownik może określić numer kontenera, numer rejestracyjny pojazdu oraz jego masę.

Każda wydzielona droga jest drogą dwupasmową o szerokości 7,5 m. Ustalając szerokość drogi ładunkowej, wchodzącej w skład pasma manipulacyjnego przy froncie ładunkowym wzięto pod uwagę pasy ruchu, maszty oświetleniowe, przestrzeń niezbędną do pracy maszyn ładunkowych z uwzględnieniem luzu manipulacyjnego oraz technologie przeładunku związaną ze sposobem ustawienia pojazdu.

W obrębie terminala znajduje się parking z wydzielonymi miejscami postojowymi dla 140 zestawów drogowych oczekujących na wyjazd. Szerokość miejsca wynosi 3,5 m – uwzględnia maksymalną szerokość samochodu ciężarowego wynoszącą 2,5 m oraz luzu manipulacyjne. Liczba miejsc postojowych została zaprojektowana przy uwzględnieniu wdrożonego systemu awizacji, który pozwala na ograniczenie zatorów zestawów samochodowych czekających na wjazd. System taki powinien być wprowadzony z powodu dużego natężenia ruchu przy terminalu. Dzięki niemu usprawniono całą organizację pracy terminala

i ruch w kompleksie bramowym. Wyznaczono również parking dla samochodów osobowych, z którego mogą korzystać pracownicy terminalu.

Zgodnie z sugestiami z publikacji Nader, Kostrzewski (2014) każda ze stref składowania (tj. ładowne, próżne oraz specjalne) oddzielona jest od sąsiadujących o odległość co najmniej 5 m, natomiast jednostki transportu intermodalnego tego samego typu oddzielone są od siebie o 0,5 m. Jest to związane z koniecznością zachowania wymaganej wolnej przestrzeni pomiędzy jednostkami ładunkowymi oraz, aby nie zahaczały o siebie przy dokonywaniu czynności ładunkowych. Uwzględniono również minimalny promień skrętu dla zestawów drogowych (ciągnik siodłowy z naczepą), tj. 15 m na jednym łuku.

W projekcie uwzględniono także zaplecze administracyjno-socjalne, gwarantujące odpowiednie warunki dla załogi obsługującej terminal. Są to: magazyn paliwa dla maszyn ładunkowych i przewozowych, warsztaty usługowo-naprawcze z placem postojowym, pomieszczenie gospodarcze z węzłem sanitarnym dla personelu, również dla personelu utrzymującego porządek, pomieszczenia dla kierowców pojazdów drogowych w tym szatnia oraz ogólnodostępna jadalnia, pomieszczenia hydro-sanitarne dla kierowców pojazdów drogowych, toalety, umywalnie, natryski, suszarnie, poczekalnie.

Fronty ładunkowe terminala transportu intermodalnego są oświetlone za pomocą masztów z opuszczanymi koronami. Oświetlenie jest trwałe i bezpieczne w obsłudze. Instalacja odwodnienia zabezpiecza przed niszczącym działaniem wód wszystkie elementy infrastruktury. Instalacja energetyczna zapewnia pokrycie pełnego zapotrzebowania na energię elektryczną obiektu w układzie docelowym. Instalacja wodociągowa zapewnia pełne pokrycie potrzeb terminala w zakresie zaopatrzenia w wodę do celów: sanitarnych, przeciwpożarowych, higieny pracy oraz utrzymania terenu terminala. Terminal jest podłączony do lokalnej sieci ciepłowniczej co powoduje brak konieczności wydzielenia przestrzeni kotłowni wraz z pomieszczeniem dla obsługi.

Podsumowanie

Zaprojektowanie ładowego kolejowo-drogowego intermodalnego terminala przeładunkowego jest zadaniem złożonym, wymagającym w praktyce rozpoznania terenu (działki) oraz wytycznych inwestora odnośnie wyboru technologii oraz układu funkcjonalno-przestrzennego terminala. Jego forma będzie zazwyczaj przybierała kształt prostokąta, co spowodowane jest koniecznością zachowania prostolinijnego układu torowisk, nad którymi pracuje suwnica (często typu RMG – jak w zaproponowanym przykładzie). Przyjęte rozwiązanie w długofalowy sposób rzutuje na funkcjonalność terminala, dla tego ich projektowanie wymaga podejścia systemowego. Przedstawiona w rozdziale metodyka, pozwala na wyznaczenie podstawowych parametrów terminala intermodalnego, w taki sposób, aby obsługiwał on określoną liczbę jednostek ładunkowych przy szczytowej wydajności przeładunkowej.

Literatura

- Antonowicz M. 2018: Czynniki rozwoju przewozów intermodalnych w Polsce. *Studia i Prace Kolegium Zarządzania i Finansów / Szkoła Główna Handlowa*, 170, s. 105–120.
- Badyda A.J. 2010: Zagrożenia środowiskowe ze strony transportu. Poznań.
- Chłopek Z., Lasocki J. 2013: Zastosowane metody oceny cyklu istnienia do analizy właściwości ekologicznych samochodu. *Zeszyty Naukowe Instytutu Pojazdów*, 1(92), s. 57–66.
- Głowacki J., Kopyciński P., Mamica Ł., Malinowski M. 2019: Identyfikacja i delimitacja obszarów gospodarki o obiegu zamkniętym w ramach „zrównoważonej konsumpcji”. [W:] Kulczycka J. red. 2019: *Gospodarka o obiegu zamkniętym w polityce i badaniach naukowych*, s. 167–179.
- Grulkowski S., Zariczny J. 2013: Kryteria doboru parametrów projektowych wybranych elementów terminali intermodalnych. *Technika Transportu Szynowego*, 10, s. 49–58.
- Jacyna M. red. 2012: *System Logistyczny Polski. Uwarunkowania techniczno-technologiczne komodalności transportu*. Warszawa: Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej.
- Jacyna M., Pyza D., Jachimowski R. 2018: *Transport intermodalny. Projektowanie terminali przeładunkowych*. Warszawa: PWN.
- Jacyna M., Pyza D. 2015: Rola intermodalnych terminali przeładunkowych w przewozach kolejowo-drogowych. *Problemy Kolejnictwa*, 58(169). Warszawa: Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, s. 15–27.
- Kamiński M., Pospolita W., Cholewiński M., Łagocka A. 2016: Emisja zanieczyszczeń z sektora transportu lotniczego i jej wpływ na zdrowie człowieka. *Kosmos*, 65(4), s. 487–493.
- Komisja Europejska (KE). 2015: *Closing the Loop – An EU Action Plan for the Circular Economy*. Communication From the Commission to the European Parliament. The Council, the European Economic and Social Committee and the Committee of the Regions.
- Kwaśniewski S., Nowakowski T., Zając M. 2008: *Transport intermodalny w sieciach logistycznych*. Wrocław: Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej.
- McCalla R., Slack B., Comtois C. 2001: Intermodal Freight Terminals: locality and Industrial Linkages. *Canadian Geographer*, 45(2), s. 404–413.
- Nader M., Kostrzewski A. 2014: Podstawowe założenia struktury procedury projektowania centrum przeładunkowego dla transportu intermodalnego. *Eksploatacja*, 10, s. 21–26.
- Poliński J. 2015: *Rola kolei w transporcie intermodalnym*. Warszawa: Instytut Kolejnictwa.
- Pörner R. 2008: Innovative Bahntechnik stärkt den Klimavorteil der Schiene. *Eisenbahntechnische Rundschau*, 9.
- Pyza D. 2016: *Transport intermodalny – uwarunkowania techniczno-technologiczne, organizacyjne i funkcjonalne*. [W:] Feliks J. red. 2016: *Wybrane zagadnienia logistyki stosowanej IV*, s. 168–179.
- Pyza D., Piątek M. 2017: *Wybrane aspekty projektowania terminali intermodalnych*. *Prace Naukowe Politechniki Warszawskiej, Transport*, 119, s. 389–399.
- Sobiecki G. 2016: *Sharing economy – dylematy pojęciowe*. [W:] Poniatowska-Jaksch M., Sobiecki R. red. 2016: *Sharing economy (gospodarka współdzielenia)*. Warszawa: Oficyna Wydawnicza SGH, s. 27–38.
- Stokłosa J. 2011: *Transport intermodalny. Technologia i organizacja*. Lublin: Wydawnictwo Naukowe Wyższej Szkoły Ekonomii i Innowacji.
- Stokłosa J., Cisowski T., Erd A. 2014: Terminale przeładunkowe jako element infrastruktury sprzyjające rozwojowi łańcuchów transportu intermodalnego. *Logistyka–nauka*, 3, s. 5991–5999.
- Wierzejski T., Kędzior-Laskowska M. 2014: *Transport i spedycja*. Olsztyn: Wyd. Uniwersytet Warmińsko-Mazurski w Olsztynie.
- Zamkowska S. 2013: *Transport intermodalny – szansą na zwiększenie udziału kolei w rynku*. *Autobusy: Technika, Eksploatacja, Systemy Transportowe*, 3, s. 97–106.

Aleksandra SZCZEPAŃSKA¹, Anna KRAKOWIAK-BAL¹,
Urszula ZIEMIAŃCZYK¹

Racjonalne wykorzystanie zasobów na przykładzie gospodarki magazynowej – studium przypadku

Streszczenie. Tworzenie i utrzymywanie zasobów materialnych w przedsiębiorstwie wiąże się z procesami zaopatrzenia, produkcji, zbytu. Głównym czynnikiem mającym wpływ na ich wielkość jest popyt na dany asortyment. Kluczowym działaniem jest zaplanowanie odpowiedniej nadwyżki zasobów, w celu uniknięcia niezasadnych kosztów oraz doskonalenia zarządzania magazynem. Celem pracy była analiza i ocena gospodarki magazynowej wybranego przedsiębiorstwa z branży rolniczo-ogrodniczej. W celu oceny badanego przedsiębiorstwa, wybrano analizę: ABC, XYZ oraz metodę EOQ. W wyniku przeprowadzonych analiz stwierdzono, że dotychczasowa gospodarka zapasami w badanej firmie wymaga usprawnień. Wskazano działania, które pozwolą na ograniczenie gromadzonych zasobów i znacząco zmniejszą koszty ich utrzymania.

Słowa kluczowe: gospodarka magazynowa, zapas, zarządzanie zapasami, koszty zapasów

Rational use of resources based on warehouse management – a case study

Abstract. The creation and maintenance of material stocks in an enterprise are related to the processes of supply, production and sale. The main factor influencing their size is the demand for a certain product. The key action is to plan an appropriate surplus of resources to avoid unreasonable cost and improve warehouse management. The work aimed to analyze and evaluate the warehouse management in a selected enterprise form the agricultural and horticultural industry. The following methods were selected for evaluation: ABC, XYZ and the EOQ. It was found that the existing inventory management in the examined company can be improved. Actions have been indicated that allow to limit the accumulated resources and significantly reduce their maintenance cost.

Keywords: warehouse management, inventory, inventory management, inventory cost

¹ Uniwersytet Rolniczy w Krakowie, Wydział Inżynierii Produkcji i Energetyki

Wprowadzenie

W gospodarce o obiegu zamkniętym, opierającej się na kształtowaniu procesów projektowania i wytwarzania produktów umożliwiających ponowne użycie, regenerację i recykling, logistyka i transport mają szczególne znaczenie, jednocześnie otwierają się nowe perspektywy i szanse rozwoju tych sektorów. Gospodarka cyrkularna wpływa na przyspieszenie procesu wdrażania innowacyjnych rozwiązań i pozyskanie nowych klientów, dla których ważne są aspekty zrównoważonego rozwoju (EMF 2015). Logistyka ma posłużyć jako ważny czynnik sukcesu w nowo rozwijających się modelach biznesowych. Największymi wyzwaniami logistycznymi w gospodarce cyrkularnej są słaba przewidywalność przepływu materiałów, ich niska wartość finansowa i różnorodne właściwości (tsl-biznes.pl).

Modele biznesowe gospodarki obiegu zamkniętego wskazują na konieczność poprawy wydajności materiałów i procesów na poziomie zakładu ale także potrzebę zmiany w produkcji i konsumpcji (Bondaruk i in. 2017).

Jednym z cyrkularnych modeli biznesowych jest produkcja na zamówienie, tj. produkcja jedynie w przypadku występowania konkretnych potrzeb popytowych. W modelu produkcji na zamówienie minimalizuje się wymagania materiałowe i unika potencjalnych strat spowodowanych nadmiernym magazynowaniem produktów. Stąd konieczne jest sprawne i precyzyjne zarządzanie zapasami, którego celem jest realizacja oczekiwań klientów przy minimalnym zaangażowaniu kapitału. Dotychczasowe modele wytwarzania w systemie push czyli produkowanie na magazyn, na zapas przekształcają się na strategię pull, czyli produkowanie na zamówienie, pod wymagania klienta.

Kluczowym zagadnieniem jest w tym zakresie określenie odpowiedniej wielkości zapasów, która zależy od wielu czynników. Głównym powodem ich tworzenia, jest brak możliwości dostarczania materiałów na bieżąco. Ilość zapasów determinuje m.in. wielkość powierzchni magazynowych i koszt ich utrzymania. Rozmiar magazynu zależy od wielkości składowanego zapasu. Ten z kolei zależy od wielkości zamówienia. Natomiast wielkość zamówienia uwarunkowana jest popytem, jak również częstotliwością dostaw. Stąd, celem właściwie zorganizowanej gospodarki magazynowej jest utrzymanie optymalnego poziomu zapasów oraz obsługa klienta na jak najwyższym poziomie a także minimalizacja kosztów (Kaczorowska i in. 2019).

Istnieje wiele metod pozwalających na ocenę procesów zarządzania magazynem, a także wyznaczenie odpowiedniej wielkości dostaw. Dzięki poprawnemu gospodarowaniu powierzchnią magazynu oraz optymalizacją wielkości zapasów możliwe jest lepsze wykorzystanie zasobów firmy czy ograniczenie jej kosztów.

W niniejszej pracy uwagę poświęcono problemom racjonalizacji gospodarki zapasami.

I. Racjonalna gospodarka zapasami

Utrzymywanie zapasów w przedsiębiorstwie wiąże się przede wszystkim z koniecznością zapewnienia ciągłości procesu produkcyjnego, ciągłości sprzedaży czy zaspokojeniem potrzeb klientów (Kuboń 2010; Murphy, Wood 2011). Odpowiednia ilość dóbr materialnych – zapasów zapewnia nieprzerwaną działalność gospodarczą przedsiębiorstwa. Zapasy jednak nie tylko zapewniają ciągłość sprzedaży, ale także powodują zamrożenie środków kapitałowych, generując w ten sposób koszty oraz zaburzając płynność finansową przedsiębiorstwa (Emerling 2014). Stąd, zadaniem gospodarki zapasami jest maksymalna możliwa redukcja poziomu zapasów i optymalizacja przepływów materiałowych. Natomiast racjonalna gospodarka zapasami jest więc ważnym elementem redukcji kosztów całego przedsiębiorstwa (Furman i in. 2015).

Znajomość struktury zapasu wspomaga podejmowanie decyzji dotyczących obniżenia poziomu zapasu przy zachowaniu odpowiedniego poziomu obsługi. Wskazuje się, że na poziom zapasów w przedsiębiorstwach mają zasadniczy wpływ dwie grupy przyczyn (Baran i in. 2011; Krzyżaniak 2008):

- ♦ brak możliwości pełnego zsynchronizowania strumieni dopływu i odpływu dóbr;
- ♦ niepewność dotycząca wielkości rzeczywistego popytu oraz zgodności ilościowej, jakościowej i terminowej dostaw.

Rozwiązania prowadzące do zmniejszenia poziomu zapasów w przedsiębiorstwach mogą dotyczyć (Baran i in. 2011; Krzyżaniak 2008):

- ♦ redukcji zapasów, głównie zabezpieczających, dzięki zmniejszeniu niepewności, co do rzeczywistego popytu w cyklu uzupełnienia zapasów;
- ♦ redukcji zapasów, głównie cyklicznych, przez zmniejszenie wielkości dostaw;
- ♦ redukcji zapasów w łańcuchu dostaw dzięki innym formom współpracy dostawcy i odbiorcy.

Zapasy, ze względu na ich wartość, są głównym aktywem przedsiębiorstwa, a koszty zapasów są podstawowym składnikiem kosztów logistyki. Koszty zapasów obejmują koszty: tworzenia zapasów, utrzymania zapasów oraz wyczerpania zapasów. Najważniejszą pozycją wśród tych kosztów stanowią koszty utrzymywanie zapasów, które obejmują cztery grupy kosztów: koszty kapitałowe, koszty magazynowania (utrzymania powierzchni magazynowych), koszty obsługi zapasów, koszty ryzyka.

Optymalizowanie kosztów logistycznych, jest możliwe także dzięki wprowadzaniu narzędzi służących do klasyfikacji produktów według ich wartości. Prowadzi to do redukcji wielkości zapasów, czyli zmniejszenia kosztów ich utrzymania. Bardzo ważnym aspektem pozwalającym zredukować koszty jest bieżące monitorowanie i kontrolowanie poziomu i struktury zapasów (Mroczko 2016). Istotny w tym zakresie jest również proces składania zamówień w optymalnej ilości i czasie. Pomocne jest wdrażanie systemu dostaw na czas JiT oraz wyznaczanie optymalnej wielkości zamówienia EOQ.

Celem pracy jest przeprowadzenie oceny gospodarki magazynowej wybranego przedsiębiorstwa w kontekście racjonalności gospodarowania materiałami.

2. Materiał i metody

Przedmiotem analizy jest przedsiębiorstwo branży rolniczo-ogrodniczej, prowadzące sprzedaż nawozów, środków ochrony roślin, artykułów i akcesoriów ogrodniczych i rolniczych. Przedsiębiorstwo dysponuje jednym magazynem o powierzchni 300 m², w którym znajduje się 69 różnych produktów. Badania przeprowadzono dla 12 miesięcy. W ocenie racjonalności gospodarowania materiałami wykorzystano analizy ABC i XYZ oraz metodę optymalnej wielkości zamówienia EOQ.

Analizę ABC można wykorzystać do klasyfikacji magazynowanych artykułów według przyjętych kryteriów, tj. okresu przydatności czy wartości produktów. Narzędzie to, jest uniwersalną metodą stosowaną do grupowania różnych produktów, posiadających podobną własność, w zakresie danego przedsiębiorstwa. Aby tego dokonać, wyróżnia się najważniejszą cechę, którą zwykle jest wartość (Józwiak, Guciewski 2017). Klasyfikację przeprowadzono zgodnie z następującymi parametrami:

- ♦ grupa A – 80% wartości zapasów;
- ♦ grupa B – 15% wartości zapasów;
- ♦ grupa C – 5% wartości zapasów.

Do grupy A zalicza się asortyment zwykle najmniej liczny, lecz mający największy udział w wartości zamówienia (magazynu) ogółem. W grupie C występują artykuły, które mają niewielki udział w wartości ogółem, pozostałe produkty klasyfikowane są do grupy B (Domański i in. 2011). W procesie poprawy efektywności wykorzystania zasobów czy optymalizacji zapasów należy przede wszystkim skupić się na najistotniejszych pozycjach stanowiących 80% udziału badanego zjawiska.

Zakładając, że w ciągu jednego miesiąca w magazynie znajduje się n artykułów, które zostały oznaczone jako A_1, A_2, \dots, A_n , ich wartość oblicza się według wzoru 1 (Szyszał i in. 2005).

$$w_n = x_n \cdot c_n \quad (1)$$

gdzie:

- n – oznacza numer artykułu (1, 2, ..., n),
- w – wartość artykułu [zł],
- x – liczba magazynowanych artykułów [szt.],
- c – cena jednostkowa poszczególnych wyrobów [zł].

Ogólną wartość artykułów wyznaczono jako:

$$W = \sum_{i=1}^n w_i \quad (2)$$

gdzie:

$$i = 1, 2, \dots, n.$$

Udział procentowy wartości to:

$$p_i = \frac{w_i}{W} \cdot 100\% \quad (3)$$

Następnie wyliczono skumulowaną wartość produktów:

$$z_1 = w_1; \quad z_k = z_{(k-1)} + w_k \quad (4)$$

dla:

$$k = 2, 3, \dots, n$$

oraz skumulowany udział procentowy:

$$z_{1\%} = p_1; \quad z_{k\%} = z_{(k-1)\%} + p_k \quad (5)$$

Przyporządkowanie produktów do odpowiednich klas przeprowadzono według wspomnianych wyżej kryteriów.

Jako rozszerzenie analizy ABC, wykorzystano metodę XYZ. Uwzględnia ona zmienność wybranych parametrów klasyfikacji, którymi zwykle są: systematyczność, regularność wielkości bądź wartości sprzedaży lub regularność popytu i możliwość i jakość przyszłej prognozy (Szyszal i in. 2005). Poza regularnością dostaw, zapasy klasyfikuje się również, według staranności prognozy (Nowotyńska 2012). Do klasyfikacji wykorzystuje się wartość współczynnika zmienności V_i .

Według metody XYZ wyodrębnione są trzy grupy produktów:

- ◆ X, do której zalicza się asortyment o stałym zapotrzebowaniu, niskiej okresowej zmienności, co sprzyja precyzyjności prognozowania;
- ◆ Y, obejmująca artykuły o średniej zmienności zapotrzebowania (sprzedaży, popytu) oraz umiarkowanej szczegółowości prognozowania;
- ◆ Z, którą tworzą materiały o niesystematycznym zapotrzebowaniu, przez co prognozowanie jest trudne, a jego dokładność jest znikoma (Nowotyńska 2012).

W klasyfikacji przyjęto następujące wartości współczynnika zmienności zapotrzebowania V_i :

- ♦ dla klasy X, współczynnik zmienności poniżej 0,25;
- ♦ w klasie Y, współczynnik zmienności w zakresie 0,26 – 0,50;
- ♦ klasę Z, stanowią produkty, dla których wartość V_i jest większa niż 0,51.

W przypadku klasyfikacji XYZ, dokonuje się grupowania zapasów zgodnie z regularnością popytu oraz precyzji prognozowania (Szymański 2007).

Dokonano także klasyfikacji zapasów w oparciu o połączenie metod ABC i XYZ. Obydwie są strategiami jednokryterialnymi, natomiast ich połączenie jako analiza dwukryterialna umożliwia pełniejszą syntezę gospodarki magazynowej. Analizowane artykuły dzieli się na 9 klas, którymi są wszelkie kombinacje grup A, B, C z klasami X, Y oraz Z (Józwiak, Guciewski 2017). Zastosowanie tego schematu postępowania pomaga w odpowiednim zarządzaniu zapasami (Budniak i in. 2010).

W analizie wykorzystano także klasyczny model sterowania zapasami (według wzoru Wilsona) jakim jest optymalna wielkość zamówienia (ang. EOQ – *economic order quantity model*). Jest to model służący wyznaczeniu optymalnej wielkości jednej partii dostawy. EOQ umożliwia zredukowanie kosztów magazynowania, do których należą głównie koszty utrzymania zapasów oraz ich tworzenia. Metoda ta jest szczególnym przypadkiem modelu stałej wielkości zamówienia. Wielkość zamówienia jest ustalana na podstawie rachunku ekonomicznej wielkości dla której łączne koszty utrzymania i tworzenia zapasów są najmniejsze (Emerling 2014; Domański i in. 2018).

W celu wyznaczenia optymalnej wielkości zamówienia EOQ, obliczono sumę kosztów zakupów na podstawie zależności (Grzelak, Ziółkowski 2014):

$$K_z = K_s + c \cdot D + K_m = k_s \cdot \left(\frac{D}{Q} \right) + c \cdot D + c_h \cdot \left(\frac{Q}{2} \right) \quad (6)$$

gdzie:

- K_s – całkowity koszt złożenia zamówienia [zł],
- c – cena jednostkowa [zł],
- D – popyt w ciągu analizowanego okresu [szt.],
- K_m – całkowity koszt utrzymania zapasów [zł],
- k_s – stała wartość jednostkowego kosztu złożenia zamówienia [zł],
- c_h – jednostkowy koszt składowania [zł],
- Q – wielkość zamówienia [szt.].

Jednostkowy koszt składania zamówienia w oparciu o dane z poprzednich okresów wyznaczono:

$$k_s = \frac{\sum_{i=1}^n a_i}{n} \quad (7)$$

gdzie:

a_i – koszt złożenia i -tego zamówienia [zł],

n – liczba złożonych zamówień tj.:

$$n = \frac{D}{Q} \quad (8)$$

a następnie obliczono całkowity koszt złożenia zamówienia:

$$K_s = n \cdot k_s = n \cdot \left(\frac{D}{Q} \right) \quad (9)$$

Jednostkowy koszt magazynowania :

$$c_h = i \cdot c \quad (10)$$

gdzie:

i – to współczynnik kosztów utrzymania zapasów [%].

W związku z tym, że koszt magazynowania zapasów jest wielkością zmienną w czasie, uznaje się, że średni poziom zapasów w magazynie dla każdego okresu jest równy $0,5 \cdot Q$.

Koszt utrzymania zapasów obliczono jako:

$$K_m = c_h \cdot \left(\frac{Q}{2} \right) = i \cdot c \cdot \left(\frac{Q}{2} \right) \quad (11)$$

Wyznaczenie odpowiedniej wielkości zamówienia, czyli takiej, dla której ten koszt będzie minimalny, jest istotą zarządzania kosztami składania zamówień. Ze wzoru 6 wynika, że wartość kosztu zakupu zależna jest od wielkości zamówienia. W celu obliczenia wartości minimalnej, wyznacza się ekstremum lokalne, którego pochodna funkcji kosztu zakupów wynosi zero (wzór 12).

$$\frac{dK_z}{dQ} = \frac{k_s \cdot D}{Q} + c_h \cdot \frac{Q}{2} + c \cdot D = 0 \quad (12)$$

Stąd optymalna wielkość zamówienia wynosi (Grzelak, Ziółkowski 2014):

$$EOQ = Q = \sqrt{\frac{2 \cdot D \cdot k_s}{c_h}} = \sqrt{\frac{2 \cdot D \cdot k_s}{c \cdot i}} \quad (13)$$

Wyznaczono też odstępy czasowe składania zamówień jako (Sulka 2012):

$$t = \frac{1}{n} \cdot l = \frac{D}{EOQ} \cdot l \quad (14)$$

gdzie:

l – liczba dni pracujących w badanym okresie.

W analizowanym przedsiębiorstwie zamówienia są składane 3 razy w tygodniu. Koszt tworzenia zapasu jednej partii wynosi 250 zł, a liczba dni pracujących w okresie analizy wyniosła 212. Na potrzeby obliczeń, wielkość współczynnika kosztów utrzymania zapasów przyjęto na poziomie 15% (Skowronek, Sarjusz-Wolski 2003; Murphy, Wood 2011). Należy pamiętać, że stosowanie formuły EOQ wymaga spełnienia określonych założeń tj.: znany popyt na produkt, znany i stały koszt zamówienia, stały koszt jednostkowy zakupu, stały koszt przechowywania w magazynie oraz dostawy produktu realizowane w jednej partii.

3. Wyniki

Na podstawie analizy średniej wielkości zapotrzebowania (sprzedaży) oraz w oparciu o procedurę klasyfikacji ABC, stwierdzono, że spośród 69 artykułów, 30% z nich należy do grupy A. Są to produkty, których udział w wartość sprzedaży wynosi ponad 79%. Natomiast 29 produktów zostało zaklasyfikowanych do grupy C, stanowiącej tylko 5% wartości średniej sprzedaży. Stąd, w procesie realizacji zamówień, należy przeprowadzać częste kontrole poziomu zapasów, istotne jest monitorowanie wielkości dostaw produktów z grupy A, aby uniknąć zbędnego zamrożenia znacznego kapitału przedsiębiorstwa, ograniczając jego płynność finansową. Rekomendowanym rozwiązaniem dla produktów z grupy A jest realizacja dostaw na bieżąco.

Kolejnym etapem była weryfikacja stanu magazynu na koniec okresu analizy. Celem jest określenie wartości zapasów w magazynie oraz wskazanie działań racjonalizujących procesy magazynowania. Przeprowadzona analiza stanów magazynowych w przedsiębiorstwie wskazała, że spośród 69 rotujących pozycji, w magazynie pozostają 32 produkty. Ich wartość na koniec okresu wyniosła ponad 29,5 tys. zł, z czego prawie 23 tys. zł to wartość 5 produktów z grupy A.

Sumaryczne zestawienie wyników klasyfikacji ABC i XYZ zamieszczono w tabeli 1.

Dla ponad 1/3 wszystkich produktów w magazynie wyznaczono współczynnik zmienności wielkości zamówień poniżej 0,25, co oznacza, że charakteryzują się one regularnością zapotrzebowania, niewielkimi wahaniami i wysoką dokładnością prognozowania sprzedaży. Dla materiałów tej grupy sugerowane są dostawy w określonej względnie stałej wielkości

Tabela I. Podsumowanie klasyfikacji ABC i XYZ dla zapasów magazynowanych w analizowanym przedsiębiorstwie

Klasa	X		Y		Z	
	liczba artykułów [szt.]	wartość [zł]	liczba artykułów [szt.]	wartość [zł]	liczba artykułów [szt.]	wartość [zł]
A	2	7 869,5	1	4 732,2	2	10 191,8
B	4	2 651,2	1	713,0	2	1 669,8
C	8	779,2	2	176,2	10	757,8
Suma	14	11 299,8	4	5 632,4	14	12 619,4

Źródło: opracowanie własne.

realizowane na bieżąco. Dla dwóch produktów z grupy AX zalecaną metodą zarządzania zapasami jest zamawianie tych produktów dokładnie w ilości i w czasie koniecznym do realizacji zamówienia klienta. Zapotrzebowanie na te produkty cechuje regularna powtarzalność i niewielkie wahania, a także możliwość łatwego przewidzenia zużycia w przyszłości.

Analiza wskazała także znaczną grupę Z, obejmującą produkty o nieregularnym, trudnym do jednoznacznego oszacowania zapotrzebowaniu.

Natomiast dla 3 produktów z grupy AZ, które są drogie i charakteryzują się nieregularnością popytu i niską dokładnością prognozy zapotrzebowania, należy dokonać wyboru pomiędzy utrzymaniem zapasu przez dłuższy okres czasu lub zamówieniami na żądanie. W wyniku analizy ABC stwierdzono, że magazynowanie produktów zaklasyfikowanych do grupy A, wiąże się z zamrożeniem ponad 20 tys. zł i stanowi to niemal 80% wartości wszystkich zapasów. Natomiast magazynowanie produktów z grupy X, to ponad 11 tys. zł kapitału ulokowanego w zapasach.

Stąd, w celu wyznaczenia optymalnej wielkości zamówienia i ograniczenia zbędnych kosztów magazynowania przeprowadzono analizę EOQ, dla 12 produktów z grupy BX i CX, charakteryzujących się w miarę przewidywalnym i stałym popytem, oraz stosunkowo niewielkimi błędami prognoz. Otrzymane wyniki zamieszczono w tabeli 2.

Z uzyskanych obliczeń wynika, że dwukrotną dostawę należy realizować dla dwóch produktów a pozostałe powinno zamawiać się raz w roku, ze względu na niewielki popyt. Należałoby także rozważyć weryfikację oferowanego asortymentu. Uzyskane wyniki EOQ zestawiono z rzeczywistymi dostawami W w okresie 5 miesięcy (tab. 3).

W oparciu o wskazania EOQ, dla 10 produktów zredukowano wielkość dostaw i utrzymywanych zapasów. Wyniki analizy pokazały, że istnieją produkty, dla których wielkości dostaw wielokrotnie przekraczają zapotrzebowanie. Sumarycznie, redukcja wielkości zamówień dla wybranych 12 artykułów pozwoli na uwolnienie ponad 8,7 tys. zł, co w pełni uzasadnia potrzebę prowadzenia bieżących analiz gospodarki magazynowej.

Tabela 2. Analiza EOQ wybranych produktów

Artykuł	D	c	k_s	EOQ	n	t
1	625	11,1	1,67	433	2	147
2	467	17,0	2,55	302	2	137
3	226	8,8	1,32	293	1	275
4	161	9,0	1,35	244	1	321
5	239	18,3	2,75	209	1	185
6	60	5,2	0,78	60	1	212
7	20	11,8	1,77	20	1	212
8	10	6,9	1,03	10	1	212
9	12	14,0	2,10	12	1	212
10	5	10,0	1,50	5	1	212
11	1	12,6	1,89	1	1	212
12	1	17,5	2,62	1	1	212

Źródło: opracowanie własne.

Tabela 3. Porównanie wielkości EOQ z wielkością zamówień

Artykuł	EOQ	W1	W2	W3	W4	W5
1	433	540	85	–	–	–
2	302	10	95	95	152	115
3	293	204	68	72	36	10
4	244	60	50	70	155	50
5	209	233	196	–	–	–
6	60	228	480	–	–	–
7	20	60	78	–	–	–
8	10	29	30	6	4	–
9	12	29	30	6	4	–
10	5	63	–	–	–	–
11	1	48	4	–	–	–
12	1	9	10	5	3	–

Źródło: opracowanie własne.

Wnioski i podsumowanie

Celem pracy była ocena racjonalności gospodarowania materiałami w oparciu o powszechnie stosowane metody zarządzania zapasami. Na podstawie zaprezentowanego studium przypadku wskazano, że niewłaściwa gospodarka magazynowa prowadzi do utrzymywania zbędnych poziomów zapasów, pozostających stale w firmie. Tego typu działania narażają przedsiębiorstwo na nieuzasadnione koszty związane m.in. z utrzymaniem magazynu. Przeprowadzenie klasyfikacji ABC, XYZ oraz wyznaczenie ekonomicznej wielkości zamówienia pozwoliło na ograniczenie jednorazowych wielkości zapasów oraz zmianę częstotliwości dostaw niektórych produktów.

Wśród rekomendacji i sugestii dotyczących funkcjonowania gospodarki magazynowej należy wskazać przede wszystkim realizację dostaw dla produktów z grupy A, w systemie JiT, w celu minimalizacji wielkości i kosztów zapasów, które wynoszą niemal 23 tys. zł. Dodatkowo, klasyfikację produktów ABC i XYZ należy wykorzystać w planowaniu wykorzystania przestrzeni magazynu i rozmieszczenia w niej produktów. Asortyment o najmniejszym zapotrzebowaniu oraz małej wartości można lokować w miejscach bardziej odległych od strefy wydawania. Być może lepiej zagospodarowana przestrzeń magazynu, pozwoli na wprowadzenie nowych produktów, poszerzając lub zmieniając asortyment firmy zgodnie z oczekiwaniami klientów. Większą uwagę należy skupić także na prognozowaniu popytu i regularności dostaw, w oparciu o bieżącą i systematyczną analizę wielkości sprzedaży.

Jak wykazano, odpowiednia klasyfikacja zasobów materiałowych z wykorzystaniem kilku prezentowanych metod, pozwala racjonalnie zarządzać poziomem zapasów. Podział asortymentu na określone grupy, umożliwia wyróżnienie pozycji strategicznych, determinujących wynik finansowy firmy. W efekcie przeprowadzonej analizy wskazane zostały także główne źródła powstawania kosztów, ograniczono liczbę zbędnych zamówień poprzez celowe planowanie wielkości i ilości zakupów, co przekłada się na mierzalne ograniczenie kosztów w przedsiębiorstwie. Istotna jest również uniwersalność przedstawionych metod, których implementacja nie wymaga skomplikowanych narzędzi i technik obliczeniowych.

Literatura

- Baran J., Wysokiński M., Jałowiecki P. 2011: Rozwiązania w zakresie sterowania zapasami w wybranych branżach agrobiznesu. *Logistyka*, 2, s. 45–54.
- Bondaruk J., Kruczek M., Zawartka P. 2017: Koncepcyjne ujęcie modeli biznesowych w gospodarce o obiegu zamkniętym. W kierunku gospodarki o obiegu zamkniętym. *Perspektywa przemysłu*, s. 9–18.
- Budniak E., Czechura S., Grybowski W. 2010: Zarządzanie zapasami w małym przedsiębiorstwie o profilu handlowym (studium przypadku). *Zeszyty naukowe Uniwersytetu Szczecińskiego, Ekonomiczne problemy usług*, 51, s. 395–402.
- Domański R., Adamczak M., Cyplik P. 2011: Klasyfikacja sortymentu w małych przedsiębiorstwach – rzeczywista potrzeba czy strata czasu? *Zeszyty naukowe Uniwersytetu Szczecińskiego, Ekonomiczne problemy usług*, 80, s. 343–353.

- Domański R., Adamczak M., Hadaś Ł., Cyplik P. 2018: Uwarunkowania kosztowo-logistyczne przepływu materiałów w łańcuchu dostaw. Poznań: Wyższa Szkoła Logistyki.
- Emerling I. 2014: Management of inventories in an enterprise in the context of production continuity. *Management Systems in Production Engineering*, 2, s. 49–54.
- EMF – Ellen MacArthur Foundation. 2015: *Circularity Indicators – An Approach to Measure Circularity. Methodology & Project Overview*, Cowes, UK.
- Furman J., Szymuszal J., Błoński B. 2015: Optymalizacja wielkości zapasów asortymentu odlewniczego przy dysponowaniu ograniczonym kapitałem. *Logistyka*, 6, s. 89–94.
- Grzelak M., Ziółkowski J. 2014: Model ekonomicznej wielkości zamówienia (EOQ). *Systemy Logistyczne Wojsk*, 41, s. 379–388.
- Jóźwiak A., Guciewski Ł. 2017: Zastosowanie analizy ABC w magazynach wysokiego składowania. *Gospodarka Materiałowa i Logistyka*, 5, s. 240–257.
- Kaczorowska Z., Staniec I., Szczygieł N. 2019: Klasyfikacja ABC/XYZ w zarządzaniu gospodarką materiałową w przedsiębiorstwie produkcyjnym. *Zeszyty Naukowe. Organizacja i Zarządzanie, Politechnika Łódzka*.
- Krzyżaniak S. 2008: Zapasy we współczesnych rozwiązaniach logistycznych. *Logistyka*, 4, s. 6–9.
- Kuboń M. 2010: Racjonalna gospodarka zapasami w opinii rolników. *Inżynieria Rolnicza*, 14, s. 97–102.
- Mroczo F. 2016: *Logistka*. Wałbrzych: WSZiP.
- Murphy Jr. P.R., Wood D.F. 2011: *Contemporary Logistics*, 10th edition. Upper Saddle River, Prentice Hall.
- Nowotyńska I. 2012: Zastosowanie analizy XYZ w gospodarowaniu zapasami firmy. *Logistyka*, 5, s. 153–157.
- Skowronek C., Sarjusz-Wolski Z. 2003: *Logistyka w przedsiębiorstwie*, Wyd. 3. Warszawa: Polskie Wydawnictwo Ekonomiczne.
- Sulka M. 2012: Modelowanie optymalnej wielkości zamówienia. *Logistyka*, 6, s. 589–593.
- Szymański P. 2007: *Zarządzanie majątkiem obrotowym w procesie kreowania wartości przedsiębiorstwa*. Łódź: Wydawnictwo Petros.
- Szymuszal J., Gierek A., Piątkowski J., Pucka A. 2005: Wykorzystanie klasyfikacji ABC i XYZ do optymalizacji produkcji w odlewni. *Archiwum odlewnictwa*, 17, s. 313–318.
- TSL Biznes. Miesięcznik profesjonalistów branży Transport–Spedycja–Logistyka (dostęp 10.12.2020).

Podsumowanie

Mateusz MALINOWSKI¹, Jakub GŁOWACKI²,
Piotr KOPYCIŃSKI², Łukasz MAMICA²

Ocena transformacji kraju w kierunku gospodarki o obiegu zamkniętym – propozycja wskaźników pomiaru dla obszaru „zrównoważona konsumpcja”

Streszczenie. Unia Europejska (UE) w 2015 roku zintensyfikowała wdrażanie zasad zrównoważonej konsumpcji opartych na idei gospodarki o obiegu zamkniętym (GOZ) poprzez publikację komunikatów Komisji Europejskiej dotyczących gospodarki cyrkularnej. Każde państwo członkowskie UE powinno opracować własny plan działania w zakresie transformacji kraju w kierunku GOZ. Postępy we wdrażaniu tej idei należy monitorować i systematycznie oceniać. W tym celu niezbędne jest wykreowanie stosownych narzędzi pomiarowych. W wielu krajach, regionach, a nawet miastach opracowano własne, unikatowe i przystosowane do lokalnych warunków wskaźniki oceny wdrażania GOZ. W niniejszym opracowaniu przedstawiono propozycję i charakterystykę wskaźników będących składowymi zagregowanego indeksu weryfikacji przekształcania gospodarki liniowej (linearnej) na cyrkularną (o obiegu zamkniętym) w Polsce. Wskaźniki oceny transformacji zaproponowano dla 5 obszarów zrównoważonej konsumpcji tj.: minimalizacja odpadów, ograniczenie marnotrawienia żywności, edukacja w zakresie GOZ, gospodarka współdzielenia w zakresie mobilności oraz wdrażanie odnawialnych źródeł energii.

Słowa kluczowe: gospodarka o obiegu zamkniętym, zrównoważona konsumpcja

Assessment of the country transformation towards circular economy – proposed measurement indicators for “sustainable consumption”

Abstract. In 2015, the European Union (EU) intensified the implementation of the principles of sustainable consumption based on the idea of the circular economy (CE) by publishing the European Commission's announcements. Each EU Member State should develop its own action plan for the transformation of the country towards circular economy. Progress in implementation of this idea should be monitored and systematically assessed. For this purpose, it is necessary to create appropriate measurement tools. Many countries, regions and cities have

¹ Uniwersytet Rolniczy w Krakowie, Wydział Inżynierii Produkcji i Energetyki

² Uniwersytet Ekonomiczny w Krakowie, Kolegium Gospodarki i Administracji Publicznej

developed their unique, local indicators for assessing the implementation of CE. This study presents a proposal and characteristics of indicators that are components of the aggregate verification index for the transformation of a linear economy into a circular economy in Poland. Transformation assessment indicators have been proposed for 5 areas of sustainable consumption, i.e. waste minimization, food waste reduction, education in the field of CE, sharing economy in the field of mobility and the implementation of renewable energy sources.

Keywords: circular economy, sustainable consumption

Wprowadzenie

Zwrot gospodarka o obiegu zamkniętym (GOZ) jest powszechnie używany w krajach członkowskich Unii Europejskiej (UE) od momentu ogłoszenia przez Komisję Europejską komunikatu: *Closing the loop – An EU action plan for the Circular Economy* (COM 2015). Wdrożenie GOZ ma na celu zmianę aktualnego liniowego modelu gospodarek krajowych EU na taki, w którym obieg zasobów będzie zamknięty (Jaworski i Grochowska 2017). GOZ polega na jak najdłuższym zachowaniu w obiegu produktów i zasobów na jak najwyższym poziomie gotowości technicznej (Głowacki i in. 2019) oraz minimalizacji masy wytwarzanych odpadów na każdym etapie życia produktu (Pesce i in. 2020). Ponadto GOZ jest ważnym elementem budowy innowacyjnej i konkurencyjnej gospodarki, która opiera się na niskoemisyjności i oszczędności zasobów.

GOZ jest także formą budowania odpowiedzialnego społeczeństwa (Smol i in. 2018), które wymaga głębokiej reorganizacji w zakresie postępowania z dostępnymi zasobami. Dlatego postępy w rozwoju świadomości społecznej o GOZ należy monitorować i systematycznie oceniać, tak aby cały czas identyfikować bariery w jego wdrażaniu (Guo i in. 2017).

W ostatnich latach poszczególne kraje, naukowcy i instytucje przedstawili szereg wytycznych (założeń) do budowy wskaźników oraz wzorów (modeli) stanowiących podstawę do oceny działań w zakresie wdrażania modelu gospodarki o obiegu zamkniętym na różnych poziomach systemów gospodarczych (krajowych, regionalnych i miejskich). Komisja Europejska w swoim planie działania dla GOZ (COM 2015), stwierdziła, że aby ocenić postęp w kierunku gospodarki o obiegu zamkniętym oraz skuteczności działań na szczeblu UE i krajowym, ważne jest, aby posiadać zestaw wiarygodnych wskaźników. W tym kontekście w ostatnich latach opracowano szeroki zakres indeksów oceny obiegu zamkniętego (Saidani i in. 2019). Większość z nich dotyczy analizy trendów w zakresie aktywności przemysłowej (w tym przede wszystkim przetwórstwa surowców) i tworzenia nowych modeli biznesowych. Wspólną cechą tych wskaźników jest ich unikalność i dopasowanie do lokalnych uwarunkowań.

Warto zauważyć, że w centrum GOZ znajduje się konsument, który użytkuje produkty i korzysta z usług dostępnych na rynku, a jego wybory (decyzje) mogą być mniej lub bardziej zgodne z ideą GOZ. W warunkach polskiej gospodarki Głowacki i in. (2019) proponu-

ją, aby transformację kraju w obszarze zrównoważonej konsumpcji monitorować w ramach 5 filarów: zapobieganie powstawaniu odpadów komunalnych, odpowiedzialna konsumpcja żywności (ograniczanie marnotrawienia żywności), edukacja w zakresie GOZ, gospodarka współdzielenia (*sharing economy*) w zakresie mobilności oraz energetyka oparta o odnawialne źródła energii (OZE).

Niemal każda światowa organizacja, zajmująca się aktualnie problematyką GOZ, zaproponowała swoje rozwiązania w zakresie monitorowania zrównoważonej konsumpcji. Wśród tych organizacji można wymienić: OECD, World Bank, EUROSTAT, Yale and Columbia Universities, Ellen MacArthur Foundation oraz EURES (EASAC 2016). Global Reporting Initiative (GRI 2016) opracowało kompleksowy zestaw wskaźników dotyczący raportowania zrównoważonego rozwoju w przedsiębiorstwach. Obejmuje on trzy filary zrównoważonego rozwoju (ekonomiczny, środowiskowy i społeczny), wśród których wyróżnia się wskaźniki związane ze zużyciem materiałów, energii, wody oraz odpadów (EASAC 2016). Fundacja Ellen MacArthur (EMF 2015) proponuje aby monitorowanie GOZ odbywało się poprzez ocenę: wydajności zasobów, poziomu recyklingu i ekoinnowacji, generowanie odpadów w przeliczeniu na PKB lub 1 mieszkańca, zużycie energii (elektrycznej i ciepłej) oraz emisji gazów cieplarnianych. W holenderskiej strategii GOZ skupiono się na pięciu elementach GOZ tj. biomasa i żywność, budownictwo, tworzywa sztuczne, produkcja i produkty konsumenckie. Ostatecznie zdecydowano się na mierzenie: wielkości zużycia surowców i materiałów, wykorzystania materiałów wtórnych, bezpieczeństwa dostaw surowców, skutkach środowiskowych (zużycia wody i emisji gazów cieplarnianych), poziomu zatrudnienia w odniesieniu do tematów priorytetowych Holandii (Nowaczek i in. 2019). W Austrii transformacja w kierunku GOZ w obszarze zrównoważonej konsumpcji będzie mierzona m.in. następującymi wskaźnikami: redukcja zużycia paliw kopalnych, udział energii odnawialnej w strukturze zużycia energii, recykling odpadów nadających się do tego procesu (Nowaczek i in. 2019). W Hiszpanii określono aż 187 wskaźników oceniających transformację kraju w kierunku GOZ, między innymi: zużycie energii wytwarzanej ze źródeł odnawialnych w całkowitym zużyciu energii brutto (%), zużycie oleju napędowego w sektorze transportu (KTep), liczba studentów przeszkolonych w zakresie GOZ, liczba szkoleń w zakresie źródeł energii odnawialnych. We Francji GOZ w odniesieniu do zrównoważonej konsumpcji oceniany jest: popularnością *car-sharingu* (ekomobilności), ograniczaniem marnotrawienia żywności, wydatkami ponoszonymi przez gospodarstwa domowe na naprawy i konserwację, masę wytwarzanych odpadów oraz poziomem zatrudnienia w GOZ (Ministry Of The Environment, Energy And Marine Affairs 2017). W Słowenii opracowano mapę drogową, która dzieli gospodarkę na 4 sektory: żywność, łańcuchy wartości, przemysł wytwórczy oraz mobilność. Dla każdego z tych sektorów zidentyfikowano wskaźniki. Niektóre z tych wskaźników to: masa odpadów żywności w przeliczeniu na mieszkańca, udział energii odnawialnej w końcowym zużyciu energii, udział paliwa neutralnego pod względem emisji CO₂ (z drewna), wykorzystanie odnawialnych źródeł energii, liczba pojazdów (samochodów

osobowych) na 1000 mieszkańców, liczba pasażerów transportu zbiorowego, wykorzystanie car-sharingu oraz korzystanie z rowerów (Nowaczek i in. 2019).

Różnorodność wyżej wymienionych wskaźników wskazuje bezpośrednio na konieczność wyboru indeksów lub budowy jednego syntetycznego indeksu oceny transformacji Polski do modelu GOZ, który będzie uwzględniał specyfikę polskiego społeczeństwa, jego stylu konsumpcji oraz świadomości ekologicznej.

I. Cel rozdziału

Niniejszy rozdział powstał w ramach projektu pn.: „Opracowanie systemu wskaźników pomiarowych, umożliwiających ocenę postępu w transformacji w kierunku gospodarki o obiegu zamkniętym oraz wpływu gospodarki o obiegu zamkniętym na rozwój społeczno-gospodarczy na poziomie mezoekonomicznym (regionów) i makroekonomicznym (gospodarki narodowej) („oto-GOZ”). Projekt realizowany jest w okresie od 1.04.2018 do 30.11.2021 w następującym partnerstwie: Ministerstwo Rozwoju (MR; lider), Instytut Gospodarki Surowcami Mineralnymi i Energią Polskiej Akademii Nauk (IGSMiE PAN; lider finansowy), Uniwersytet Ekonomiczny w Krakowie (UEK) oraz Główny Urząd Statystyczny (GUS) w ramach strategicznego programu badań naukowych i prac rozwojowych „Społeczny i gospodarczy rozwój Polski w warunkach globalizujących się rynków” GOSPOSTRATEG. Celem projektu jest opracowanie systemu wskaźników pomiarowych, umożliwiających ocenę: postępu w transformacji w kierunku gospodarki o obiegu zamkniętym oraz wpływu gospodarki o obiegu zamkniętym na rozwój społeczno-gospodarczy na poziomie mezoekonomicznym (regionów) i makroekonomicznym (gospodarki narodowej).

Celem niniejszego rozdziału jest charakterystyka i przedstawienie propozycji wskaźników pomiaru transformacji polskiego modelu gospodarczego w kierunku GOZ w obszarze zrównoważonej konsumpcji.

2. Propozycje wskaźników

2.1. Zapobieganie powstawaniu odpadów

Zgodnie z Dyrektywą ramową o odpadach, będącą kluczowym aktem prawa UE w dziedzinie gospodarki odpadami, dążeniem UE jest stworzenie „społeczeństwa recyklingu”, którego celem będzie „unikanie wytwarzania odpadów oraz wykorzystywanie odpadów jako zasobów” (Dyrektywa 2018). W dyrektywie wielokrotnie podniesiono wagę zapobiegania powstawaniu odpadów, jako nadrzędnego celu w programach gospodarki odpadami komunalnymi. Co więcej państwa członkowskie UE zostały zobowiązane do opracowania

programów zapobiegania powstawaniu odpadów (KPZPO 2014). Polska posiada taki program. Jego głównym celem jest przerwanie powiązania pomiędzy wzrostem gospodarczym, a wytwarzaniem odpadów. Poprzez zapobieganie powstawaniu odpadów należy rozumieć środki zastosowane w odniesieniu do produktu, materiału lub substancji, zanim staną się one odpadami, zmniejszające:

- ◆ ilość odpadów, w tym również przez ponowne użycie lub wydłużenie okresu dalszego używania produktu,
- ◆ negatywne oddziaływanie wytworzonych odpadów na środowisko i zdrowie ludzi,
- ◆ zawartość substancji szkodliwych w produkcie i materiale.

Postęp w zakresie zapobiegania powstawaniu odpadów jest uzależniony od wielu czynników społecznych, takich jak: wzrost gospodarczy, dochody, miejsce zamieszkania, czy też wiek. Na ilość wytwarzanych odpadów mają także wpływ wzorce konsumpcji i świadomość ekologiczna (KPZPO 2014). Obszar ten jest bardzo istotny w ocenie wdrażania GOZ w Polsce w obszarze zrównoważonej konsumpcji i został wpisany do Mapy drogowej transformacji kraju w kierunku GOZ (MPiT 2019).

Pierwszą grupę proponowanych wskaźników stanowią te, które najczęściej wykorzystywane są w krajach UE, a więc masa wytworzonych odpadów komunalnych w odniesieniu do krajowej konsumpcji towarów, efektywność segregacji oraz wskaźnik masowego nagromadzenia odpadów. Jak podaje GUS w 2017 r. w Polsce zebranych zostało 11 968,7 tys. Mg odpadów komunalnych (wzrost o 2,7% w porównaniu z 2016 r.). Na jednego mieszkańca Polski przypadało średnio 312 kg zebranych odpadów komunalnych. W porównaniu z rokiem 2016, masa odpadów komunalnych wytworzonych przypadających na 1 mieszkańca wzrosła o 9 kg, a więc jest niezgodna założonym kierunkiem zmian.

Kolejna grupa wskaźników jest związana z zagospodarowaniem odpadów komunalnych. To ile z nich zostanie poddanych recyklingowi, ponownemu użyciu czy składowaniu determinowane jest nie tylko zasobnością kraju w instalacje do przetwarzania odpadów, ale przede wszystkim modelem konsumpcji i stylem życia mieszkańców.

Pozostałe proponowane wskaźniki mają charakter postulatyczny (ich ocena będzie możliwa jedynie w wyniku systematycznych badań konsumenckich) i należą do nich:

- ◆ udział poniesionych nakładów na naprawy i konserwację produktów w strukturze wydatków gospodarstwa domowego
- ◆ udział wydatków gospodarstw domowych na rzeczy używane,
- ◆ skłonność do zakupu produktów wytworzonych z lub zawierających materiały z recyklingu.

2.2. Odpowiedzialna konsumpcja żywności

Żywność jest marnowana na każdym etapie łańcucha żywnościowego „od pola do stołu” począwszy od tzw. produkcji podstawowej – rolnej, poprzez przechowalnictwo, produkcję

i przetwórstwo spożywcze, a skończywszy na dystrybucji i konsumpcji żywności. W gospodarstwach domowych odpady żywności to substancje wytworzone przed, w trakcie lub po przygotowaniu żywności, takie jak: obierki z warzyw, zepsute mięso, nadmiar składników, itp. (KPZPO 2014). Dodatkowo do tej szczególnej grupy zaliczane są także odpady, które powstają w handlu czy usługach gastronomicznych. Z tego faktu, odpady spożywcze i ograniczenie ich marnotrawienia powinno być traktowane jako osoby obszar wdrażania zasad GOZ w Polsce, w stosunku do obszaru zapobiegania powstawaniu odpadów komunalnych.

Jak podaje Kopeć i in. (2018) wzrost świadomości społeczeństwa w zakresie zasad i możliwości przetwarzania odpadów spożywczych jest istotny, ponieważ pozwala na zwiększenie efektywności tego procesu. Odpady spożywcze na ogół nie stanowią problemu z punktu widzenia środowiska. Znana jest ich wartość nawozowa. Odpady żywności to materia organiczna, która powinna wrócić do gleb uprawnych zamykając cykle obiegu pierwiastków.

Do czynników, które w największym stopniu determinują marnotrawstwo żywności w gospodarstwach domowych, zalicza się wzrost zamożności mierzony np. udziałem wydatków na żywność i napoje bezalkoholowe w strukturze wydatków konsumpcyjnych gospodarstw domowych oraz zmiany demograficzne polegające na zmniejszeniu liczby osób w gospodarstwach domowych (Bilska i in. 2015). Biorąc pod uwagę rozwój polskiego społeczeństwa należy zakładać, że kluczem do ograniczenia marnowania żywności jest tak zwana idea zrównoważonej konsumpcji i produkcji (Stępień i Dobrowolski 2017). Jej realizacja musi uwzględniać działania edukacyjne na znacznie szerszą skalę upowszechnianie wśród konsumentów wiedzy na temat przeciwdziałania marnowaniu żywności i wdrażania podstawowych zasad, takich jak na przykład zasada 4P tj. planowania zakupów z wyprzedzeniem, przetwarzania żywności w celu wydłużenia jej trwałości, przechowywania produktów w odpowiednich warunkach oraz podzielenia się zbędną żywnością z potrzebującym (MPiT 2019).

Przypisanie konkretnych wskaźników oceny tego obszaru pod względem wdrażania GOZ jest utrudnione ze względu na brak wiarygodnych danych o masie tych odpadów. Dlatego też zaproponowane poniżej wskaźniki mają charakter postulatywny:

- ◆ udział masowy wyrzucanej żywności w gospodarstwach domowych w strukturze wytwarzanych odpadów,
- ◆ masa wyrzucanej żywności w przeliczeniu na masę (lub wartość) zakupionej żywności przez gospodarstwo domowe,
- ◆ udział gospodarstw domowych kompostujących odpady żywnościowe,
- ◆ udział odebranych odpadów żywnościowych (powstających w gospodarstwie domowym) przekazanych do odzysku (procesy R1-R12),
- ◆ udział odpadów żywności nadających się do spożycia przekazanej potrzebującym, np. OPP lub Bankom żywności.

2.3. Edukacja w GOZ

Edukacja odgrywa bardzo dużą rolę w procesie transformacji społeczeństwa w kierunku gospodarki o obiegu zamkniętym. Jej znaczenie zostało dostrzeżone już wiele lat temu, jeszcze na przełomie lat osiemdziesiątych i dziewięćdziesiątych XX wieku, kiedy to budowano ideę zrównoważonego rozwoju. Znaczenie edukacji było podkreślane w pierwszych publikacjach w tym temacie (Brundtland, 1987) oraz wydarzeniach, które definiowały i promowały koncepcję zrównoważonego rozwoju (m.in. Szczyt Ziemi 1992 w Rio de Janeiro). Zatem tzw. edukacja na rzecz zrównoważonego rozwoju (ang. education for sustainable development – ESD) jest dobrym punktem wyjścia do prowadzenia analizy. Warto sięgnąć do wypracowanych doświadczeń w tym zakresie w procesie wypracowywania zestawu wskaźników w niniejszym obszarze.

Edukacja może być z jednej strony celem analizy ze względu na jej istotną horyzontalną rolę w rozwijaniu wiedzy i świadomości na temat podejść do gospodarki o obiegu zamkniętym. Może być jednak traktowana także jako sektor gospodarki zużywający określone zasoby oraz wytwarzający odpady i zanieczyszczenia. O tym drugim aspekcie nie należy zapominać, gdyż zgodnie z wynikami analiz przeprowadzonych w Glasgow w Szkocji (Circular Economy Strategies and Roadmaps in Europe 2019) sektor ten został uznany za jeden z trzech najważniejszych gospodarczo sektorów w mieście i stwierdzono, że wpływa on na zużycie materiałów, emisję i ścieki w podobnym stopniu jak inny kluczowy sektor, czyli opieka zdrowotna. Do wskaźników oceny transformacji kraju w kierunku GOZ, pod względem działań edukacyjnych, proponowane są:

1. Działania edukacyjne w zakresie GOZ.
2. Środki finansowe przeznaczane na promowanie i informowanie o GOZ.
3. Publikacje naukowe dotyczące GOZ w prestiżowych wydawnictwach.
4. Aktywność naukowa w zakresie GOZ.
5. Udział projektów badawczych finansowanych przez NCN i NCBiR dotyczące GOZ w projektach ogółem.
6. Innowacyjność w zakresie GOZ.

2.4. Gospodarka współdzielenia (sharing economy) w zakresie mobilności

Współdzielenie obejmuje różne obszary, zarówno konsumpcji, jak i produkcji oraz finansowania. Gospodarka współdzielenia obejmuje trzy kategorie uczestników (Poniatowska-Jaksch i Sobiecki 2016):

- ♦ dostawcy usług, którzy dzielą się aktywami, zasobami, czasem lub umiejętnościami (mogą to być jednostki prywatne okazjonalnie oferujące usługi lub usługodawcy zawodowi, funkcjonujący w ramach swojej profesjonalnej działalności),
- ♦ użytkownicy,

- ♦ pośrednicy łączący za pomocą działających online platform internetowych usługodawców z użytkownikami, którzy obsługują transakcje pomiędzy nimi.

W literaturze przedmiotu nie odnaleziono propozycji kompleksowego wskaźnika dotyczącego opisu relacji pomiędzy GOZ a mobilnością. W opracowaniach dot. GOZ nie bada się samej mobilności, ale wskaźniki ją dotyczące (np. w zakresie sharing oraz zanieczyszczeń). Znaczenie współdzielenia podkreślana się jednak w krajowych strategiach GOZ. Przykładowo w dokumencie duńskim możliwe jest obniżenie kosztów transportu, a tym samym zwiększenie ekonomicznego zysku z recyklingu. Ponadto istnieje możliwość lepszego wykorzystania nadwyżek produkcyjnych poprzez dzielenie się np. sprzętem produkcyjnym między przedsiębiorstwami, co może przyczynić się do zwiększenia wydajności i oszczędności dla poszczególnych firm (Ministry of Environment and Food and Ministry of Industry 2018). Z kolei francuscy eksperci wśród dziesięciu kluczowych wskaźników dot. monitorowania GOZ wymieniają car-sharing (Ministry Of The Environment, Energy And Marine Affairs 2017), który przyczynia się do zmniejszenia zużycia paliw kopalnych (benzyna i olej napędowy) oraz materiałów (wykorzystywanych w produkcji pojazdów). Zarówno korzystanie z transportu zbiorowego, jak i wspólne korzystanie z samochodów wpisują się w koncepcję użycia zamiast posiadania. Wzrost zainteresowania tą formą transportu wynika z jednej strony z powstania stosownych platform elektronicznych, poprzez które można dokonać wypożyczenia samochodu, a z drugiej zaś ze wzrostu usług elektronicznych łączących potencjalnego pasażera z kierowcą (Ministry Of The Environment, Energy And Marine Affairs 2017). Niebagatelne znaczenie mają także trudności ze znalezieniem wolnych miejsc postojowych, czy też opłaty ponoszone za parkowanie lub wjazd własnym pojazdem w określonej strefie. Wreszcie, osoby rzadko korzystające z auta wolą ponosić od czasu do czasu relatywnie niewielką opłatę za wypożyczenie pojazdu niż jednorazowo wносить większą kwotę za zakup samochodu. Co więcej, ekspansja firm reprezentujących określony sektor, np. branżę outsourcing/ offshoring (por. Kopyciński 2021), przynoszących specyficzną kulturę korporacyjną, może sprzyjać rozwojowi systemów wypożyczania. Z kolei do barier wzrostu znaczenia car-sharingu (w Polsce) można zaliczyć takie czynniki jak: niewłaściwy system planowania przestrzennego – czego skutkiem jest nadmierne rozproszenie zabudowy i usług, niewydolna (lub wręcz niesfunkcjonująca – w szczególności w mniejszych miejscowościach) komunikacja publiczna, czy też panująca do chwili obecnej (choć w dużych miastach coraz mniejszym stopniu) często wymuszona brakiem rozsądnej alternatywy moda na posiadanie samochodu.

Jak można wywnioskować z powyższych opisów, problematyka mobilności stanowi istotny składnik problematyki GOZ. Obszar ten nie ogranicza się jednak tylko do samochodów, ale obejmuje również inne urządzenia jak rower, czy też urządzenia transportu osobistego (UTO), w tym hulajnogi elektryczne.

Zaprezentowane poniżej indeksy oceny transformacji kraju w kierunku GOZ w zakresie współdzielenia środków transportu obejmują wskaźniki postulatywne, których uzyskanie możliwe jest m.in. na poziomie operatorów poszczególnych systemów wynajmu, ale tak-

że w wyniku badań konsumenckich. Planuje się, aby na syntetyczny wskaźnik dotyczący współdzielenia w zakresie mobilności obejmował następujące wymiary:

- ◆ samochody dostępne w systemie wynajmu na minuty w przeliczeniu na 1 mieszkańca,
- ◆ średnia cena rynkowa wypożyczenia samochodu na 1 godzinę w systemie wynajmu na minuty,
- ◆ stopień wykorzystania (w %) 1 samochodu w systemie wynajmu na minuty,
- ◆ liczba rowerów dostępnych w systemie wynajmu na minuty w przeliczeniu na 1 mieszkańca,
- ◆ liczba stacji rowerowych w systemie wynajmu na minuty w przeliczeniu na 1 mieszkańca,
- ◆ stopień wykorzystania (w %) 1 roweru w systemie wynajmu na minuty,
- ◆ liczba hulajnóg i innych urządzeń transportu osobistego (UTO) dostępnych w systemie wynajmu na minuty w przeliczeniu na 1 mieszkańca,
- ◆ stopień wykorzystania (w %) 1 UTO w systemie wynajmu na minuty,
- ◆ odsetek mieszkańców korzystających z transportu zbiorowego,
- ◆ liczba samochodów zarejestrowanych na użytkowników prywatnych w przeliczeniu na 1 mieszkańca (destymulanta),
- ◆ wypełnienie (w %) samochodów na dłuższych trasach.

2.5. Zrównoważona konsumpcja energii w gospodarstwach domowych

Przejsie na energię odnawialną stanowi jedno z kluczowych wyzwań dla powodzenia wdrażania koncepcji gospodarki w obiegu zamkniętym. Działania w tym zakresie są pilne, ponieważ w okresie 2018–2050 prognozowany jest wzrost popytu na energię o około 50% (EIA 2019). W przypadku braku efektów w zakresie przejścia na wykorzystywanie w większym stopniu energii odnawialnej, przy jednoczesnym ograniczaniu jej zużycia, nie uda się zahamować dewastującego środowisko wpływu nieodwracalnych zmian klimatycznych (Hertzberg i in. 2017). W celu monitorowania zachodzących procesów w zakresie zrównoważonej konsumpcji energii proponuje się wykorzystanie przede wszystkich dostępnych wskaźników oraz wskaźnika skłonność do zapłaty za energię pochodzącą ze źródeł odnawialnych, który wymaga przeprowadzenia osobnych badań ankietowych. W szczególności proponuje się następujące wskaźniki:

- ◆ udział energii odnawialnej w końcowym zużyciu energii brutto. Jest to syntetyczny wskaźnik uwzględniający całą paletę wykorzystywanych odnawialnych źródeł energii. Mimo, iż od 2004 r. udział energii odnawialnej w końcowym zużyciu energii brutto w Polsce zwiększył się o ponad 38%, z poziomu blisko 7 do 11,3% w 2018 r., to niestety zauważyć można powiększanie się luki pomiędzy średnią wartością tego wskaźnika dla całej UE a Polską, zwłaszcza od 2015 r. O ile bowiem w 2004 r. luka

ta wynosiła jedynie około 1,6 punktu procentowego to w 2013 jej wartość wzrosła do 4 pkt proc. by w 2018 r. wynieść aż 6,8 pkt proc.

- ◆ udział energii odnawialnej w końcowym zużyciu ogrzewania i chłodzenia. Wskaźnik ten ma szczególne znaczenie w krajach, takich jak Polska, które mierzą się z negatywnymi konsekwencjami tzw., niskiej emisji wynikającej ze spalania węgla słabej jakości w paleniskach domowych, niespełniających norm w zakresie emisji poziomu zanieczyszczeń. Udział energii odnawialnej w końcowym zużyciu ogrzewania i chłodzenia wyniósł w Polsce w 2018 r. 14,8%. Od 2013 r. wskaźnik ten utrzymuje się na stabilnym poziomie, wahając się w przedziale od 14,1 do 14,8%. W jego przypadku luka pomiędzy Polską a średnią wartością dla 28 państw UE jest stosunkowo niska w porównaniu do pozostałych wskaźników i wynosi obecnie blisko 5 pkt proc., a w 2011 zbliżyła się nawet do poziomu 3 pkt proc. Ze względu jednak na dominację przestarzałych palenisk, dalsze działania w zakresie zwiększania udziału energii odnawialnej w końcowym zużyciu ogrzewania i chłodzenia są pilnie potrzebne,
- ◆ powierzchnia kolektorów słonecznych (tys. m²). Wskaźnik dotyczący powierzchni kolektorów słonecznych wybrany został z kilku powodów. Po pierwsze koszty pozyskiwania energii odnawialnej spadają najszybciej w przypadku tego źródła (Trancik, Cross-Call 2013; Comello i in. 2018). Po drugie mogą być one instalowane przez indywidualne gospodarstwa domowe w przeciwieństwie do biogazowni, elektrowni wodnych czy wiatraków (choć oczywiście również te źródła mogą być wykorzystywane w pewnych okolicznościach przez nie). Powierzchnia kolektorów słonecznych w Polsce systematycznie wzrasta w ostatniej dekadzie osiągając w 2018 r. poziom 2,43 mln m², podczas gdy w 2009 r. było to tylko 510 tys. m²,
- ◆ produkcja biogazu. Poziom produkcji biogazu został wybrany ze względu na fakt, iż w przeciwieństwie do energii pochodzącej z wiatru i słońca, może być wytwarzany niezależnie od warunków pogodowych, co stabilizuje cały system. Produkcja biogazu w Polsce systematycznie wzrastała w ostatniej dekadzie osiągając w 2018 r. poziom ponad 288 tys. ton oleju ekwiwalentnego (TOE), podczas gdy w 2009 r. było to jeszcze tylko ponad 98 tys. ton TOE. Jest jeszcze jednak bardzo duży potencjał w tym zakresie, bowiem Niemcy będące liderem w UE w zakresie produkcji biogazu wytwarzają go ponad 26 razy więcej niż w Polsce. Pokazuje to na istnienie znaczących rezerw w zakresie surowca potrzebnego do produkcji biogazu, a więc także potencjału rozwojowego dla tego rynku w Polsce,
- ◆ skłonność do zapłaty za energię pochodzącą ze źródeł odnawialnych w zł na gospodarstwo domowe. Tempo przeprowadzenia transformacji energetycznej w kierunku pełnego zastąpienia nieodnawialnych źródeł energii zależy od rozwiązań politycznych, jak i poparcia społecznego, mierzonego skłonnością do zapłaty za tego typu energię. Wynika to z faktu, iż wciąż jest ona droższa niż ta pochodząca ze źródeł nieodnawialnych (Shen i in. 2020). Administracja publiczna zgodnie z założeniami neo-weberowskiego paradygmatu (Mamica 2018) może na podstawie znajomości

tego wskaźnika zaproponować system dopłat, który sprzyja transformacji energetycznej, ale nie zastępuje deklarowanych nakładów prywatnych. Wartości proponowanego wskaźnika różnią się od siebie znacznie w poszczególnych krajach a średnia jego wartość obliczona na podstawie porównania wyników 30 badań w 13 krajach wyniosła 7,16 USD (Soon, Ahmad 2015).

Wnioski

Analiza dostępnych opracowań w zakresie monitoringu GOZ, a także krajowej „Mapy drogowej transformacji w kierunku gospodarki o obiegu zamkniętym” pozwoliła na wyodrębnienie i zaproponowanie grupy wskaźników dla pięciu kluczowych obszarów zrównoważonej konsumpcji. Zaproponowane wskaźniki uwzględniają specyfikę polskiej gospodarki oraz świadomości ekologicznej mieszkańców kraju. Wiele ze przedstawionych wskaźników ma charakter jakościowy, który zdaniem autorów znacznie lepiej odwzoruje trendy w zakresie transformacji kraju w kierunku GOZ. Wskaźniki te określono jako postulatywne, mając na względzie konieczność wykonywania w przyszłości dedykowanych badań konsumenckich. Należy podkreślić, że autorzy mają świadomość, iż lista zaprezentowanych wskaźników nie wyczerpuje w 100% możliwości oceny i mogłaby być znacząco rozszerzona. Niniejsza propozycja wydaje się jednak stanowić znaczący wkład w dyskusji na temat monitorowania implementacji założeń GOZ w Polsce.

Literatura

- Bilska B., Wrzosek M., Krajewski K., Kolożyn-Krajewska D. 2015: Zrównoważony rozwój sektora żywnościowego a ograniczenie strat i marnotrawstwa żywności. *Journal of Agribusiness and Rural Development*, 2(36), s. 171–179.
- Brundtland G.H. 1987: Our common future—Call for action. *Environmental Conservation*, 14(4), s. 291–294.
- Circular economy strategies and roadmaps in Europe: Identifying synergies and the potential for cooperation and alliance building. (2019). European Economic and Social Committee.
- COM 2015: Commission of European Communities Communication no. 614. Closing the loop – An EU action plan for the Circular Economy.
- Dyrektywa 2018: Dyrektywa ramowa o odpadach. 2018/851.
- EASAC 2016: European Academies' Science Advisory Council. Indicators for a Circular Economy. EASAC Policy Report 30, Halle, Germany.
- EIA 2019: International Energy Outlook 2019. Energy Information Administration. Washington, DC, USA.
- EMF 2015: Ellen MacArthur Foundation. Delivering the circular economy: a tool-kit for policymakers.
- Głowacki J., Kopyciński P., Mamica Ł., Malinowski M. 2019: Identyfikacja i delimitacja obszarów gospodarki w obiegu zamkniętym w ramach „zrównoważonej konsumpcji. [W:] Kulczycka J. red. *Gospodarka o obiegu zamkniętym w polityce i badaniach naukowych*. Kraków: Wyd. IGSMiE PAN, s. 167–179.
- GRI 2016: Global Reporting Initiative performance indicators. On-line: <https://www.globalreporting.org/resource-library/G3.1-Quick-Reference-Sheet.pdf>.

- Guo B., Geng Y., Jingzheng R., Zhu L., Liu Y., Sterr T. 2017: Comparative assessment of circular economy development in China's four megacities: the case of Beijing, Chongqing, Shanghai and Urumqi. *Journal of Cleaner Production*, 162(20), s. 234–246.
- Hertzberg M., Siddons A., Schreuder H. 2017: Role of greenhouse gases in climate change. *Energy & Environment*, 28(4), s. 530–539
- Jaworski T.J., Grochowska S. 2017: Circular Economy – the criteria for achieving and prospect of implementation in Poland. *Archives of Waste Management and Environmental Protection*, 19(4), s. 13–22.
- Kopec M., Gondek K., Mierzwa-Hersztek M. 2018: Gospodarka o obiegu zamkniętym w kontekście strat i marnowania żywności. *Polish Journal for Sustainable Development*, 22(2), s. 51–58.
- Kopyciński P. 2021: The Embeddedness of Firms and Employees in Central Europe: Krakow as an Offshoring and Outsourcing Centre. [W:] Mamica Ł. red. *Outsourcing in European Emerging Economies: Territorial Embeddedness and Global Business Services*: London, New York: Routledge, s. 155–165.
- KPZPO 2014: Krajowy plan zapobiegania powstawaniu odpadów.
- Mamica Ł. 2018: Public Policy and the Neo-Weberian State, Public policy and the neo-Weberian state. Red. Nauk. Stanisław Mazur, Piotr Kopycinski. Abingdon, Oxon, New York, NY: Routledge, an imprint of the Taylor & Francis Group. *Routledge frontiers of political economy*, 235, s. 110–119.
- Ministry Of The Environment, Energy And Marine Affairs 2017: 10 Key Indicators for Monitoring the Circular Economy. 2017 Edition.
- Ministry of Environment and Food and Ministry of Industry, Business and Financial Affairs 2018: The Danish Government: Strategy for Circular Economy.
- MPiT 2019: Mapa drogowa transformacji w kierunku gospodarki o obiegu zamkniętym. Warszawa. On-line: <https://www.gov.pl/web/przedsiębiorczosc-technologie/rada-ministrow-przyjela-projekt-mapy-drogowej-goz> (dostęp: 10.2019).
- Nowaczek A., Kulczycka J., Pędziewiatr E. 2019: Przegląd wskaźników gospodarki o obiegu zamkniętym w dokumentach strategicznych wybranych krajów UE. [W:] Kulczycka J. red. *Gospodarka o obiegu zamkniętym w polityce i badaniach naukowych*. Kraków: Wyd. IGSMiE PAN, s. 21–33.
- Pesce M., Tamai I., Guo D., Critto A., Brombal D., Wang X., Cheng H., Marcomini A. 2020: Circular Economy in China: Translating Principles into Practice. *Sustainability*, 12(3), 832, DOI: 10.3390/su12030832
- Poniatowska-Jaksch M., Sobiecki R. 2016: Przedsiębiorczość w sharing economy, 11–26, *Sharing economy (gospodarka współdzielenia)*, Poniatowska-Jaksch M., Sobiecki R. red. Warszawa: Oficyna Wydawnicza SGH.
- Saidani M., Yannou B., Leroy Y., Cluzel F., Kendall A. 2019: A taxonomy of circular economy indicators. *Journal of Cleaner Production*, Elsevier, 207, s. 542–559.
- Shen N., Deng R., Liao H., Shevchuk O. 2020: Mapping renewable energy subsidy policy research published from 1997 to 2018: A scientometric review. *Utilities Policy*, 64, 101055.
- Smol M., Avdiushchenko A., Kulczycka J., Nowaczek A. 2018: Public awareness of circular economy in southern Poland: Case of the Malopolska region. *Journal of Cleaner Production*, 197, s. 1035–1045.
- Soon J.J., Siti-Aznor A. 2015: Willingly or grudgingly? A meta-analysis on the willingness-to-pay for renewable energy use. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 44, s. 877–887.
- Stępień S., Dobrowolski D. 2017: Straty i marnotrawstwo w łańcuchu dostaw żywności – propedeutyka problemu. *Progress in Economic Sciences*, 4, s. 305–316.