

Michał KACZMARCZYK¹

ANALIZA CYKLU ŻYCIA W ENERGETYCE GEOTERMALNEJ – PRZEGLĄD DOŚWIADCZEŃ NA ŚWIECIE I MOŻLIWOŚCI ICH IMPLEMENTACJI W POLSCE

STRESZCZENIE

Ocena cyklu życia (LCA) nie jest powszechnie wykonywana w energetyce geotermalnej, można wręcz stwierdzić, że jest ona rzadkością. Wynika to przede wszystkim z faktu, iż przełożenie wyników z jednej lokalizacji na inną jest niemożliwe do zrealizowania wprost. Złożoność procesu inwestycyjnego, jakim jest realizacja ciepłowni, elektrociepłowni czy elektrowni geotermalnej powoduje, że realny wpływ na środowisko dla każdego projektu będzie inny, co wynika przede wszystkim ze zmiennych warunków geologicznych, topograficznych oraz środowiskowych. Artykuł stanowi przegląd doświadczeń na świecie, które mogą stanowić dobrą praktykę dla implementacji LCA w warunkach polskich.

SŁOWA KLUCZOWE

LCA, analiza cyklu życia, geotermia, energetyka

* * *

¹ AGH Akademia Górniczo-Hutnicza, Wydział Geologii, Geofizyki i Ochrony Środowiska, Katedra Surowców Energetycznych, al. Mickiewicza 30, 30-059 Kraków; e-mail: mkz@agh.edu.pl

WPROWADZENIE

Zrównoważony rozwój oraz budowanie odpowiedzialnego mixsu energetycznego wymaga stosowania narzędzi, które w sposób precyzyjny dostarczą informacji na temat efektywności proponowanych rozwiązań technologicznych i ich wpływu na środowisko. Za taką metodę postrzegana może być ocena cyklu życia LCA (ang. *Life Cycle Assessment*).

Geotermia, będąca odnawialnym źródłem energii, postrzegana jest jako niemal całkowicie bezemisyjna w miejscu funkcjonowania. Wynika to z faktu, że efekt ekologiczny dla istniejących czy nowo projektowanych ciepłowni geotermalnych w porównaniu z energetyką konwencjonalną jest bardzo korzystny, bez względu na to, czy analiza porównawcza wykonywana jest w odniesieniu do ciepłowni centralnych, czy też indywidualnych źródeł ciepła (Kaczmarczyk 2018). Analogicznie sytuacja przedstawia się w przypadku elektrowni geotermalnych. W ujęciu emisji produktów spalania do atmosfery jest to podejście prawidłowe, jednak w celu określenia realnego wpływu na środowisko, właściwym postępowaniem jest implementacja oceny cyklu życia do energetyki geotermalnej w celu zrozumienia kompleksowego wpływu na środowisko, potocznie określanego jako „od kołyski aż po grób”.

Ocena cyklu życia nie jest powszechnie wykonywana w energetyce geotermalnej, można wręcz stwierdzić, że jest ona rzadkością. Wynika to przede wszystkim z faktu, że przełożenie wyników z jednej lokalizacji na inną jest niemożliwe do zrealizowania wprost. Złożoność procesu inwestycyjnego, jakim jest realizacja ciepłowni, elektrociepłowni czy elektrowni geotermalnej powoduje, że realny wpływ na środowisko dla każdego projektu będzie inny, co wynika przede wszystkim ze zmiennych warunków geologicznych, topograficznych oraz środowiskowych. Do głównych kategorii wymagających zdefiniowania na etapie wykonywania oceny cyklu życia należy zaliczyć sposób zagospodarowania terenu, wystąpienia zagrożeń geologicznych, emisję do atmosfery, wody i górotworu, zużycie wody, wpływ na bioróżnorodność, emisję hałasu i światła oraz odprowadzenie ciepła odpadowego (Bayer i in. 2013). Skala przedsięwzięcia, jakim jest wykonanie oceny cyklu życia, biorąc pod uwagę powyższe informacje, wymaga zatem dużej interdyscyplinarności oraz rozważenia każdego przypadku w sposób indywidualny.

1. OCENA CYKLU ŻYCIA (LCA)

Ocena cyklu życia jest znormalizowaną metodą postępowania w celu analizy zagrożeń środowiskowych związanych z produktem/procesem w całym okresie jego życia. Zasady i struktura LCA określone zostały w normie PN-EN ISO 14040, natomiast wymagania i wytyczne do przeprowadzania LCA zawiera norma PN-EN ISO 14044.

Ocena cyklu życia pozwala na właściwą ocenę wszelkich aspektów środowiskowych na etapie wydobywania i przetwarzania surowców mineralnych, wytwarzania, dystrybucji, eksploatacji, recyklingu i ostatecznego unieszkodliwienia odpadów (Rebitzer i in. 2004; Grzesik 2006; Kowalski i in. 2007; Dąbrowski i Dzikuć 2012). Za podstawowe zadania wy-

nikające z realizacji oceny cyklu życia należy w przedstawionym powyżej kontekście uznać udokumentowanie wpływu produktu/procesu na środowisko na każdym etapie jego życia oraz przeanalizowanie możliwości wystąpienia wzajemnie powiązanych wpływów na środowisko wynikających z wprowadzenia działań na rzecz udoskonalenia produktu/procesu. W kontekście energetyki geotermalnej produktem takim będzie jednostka energii elektrycznej lub energii cieplnej.

Pierwszym etapem wykonania oceny cyklu życia jest określenie celu oraz zakresu badań. Podobnie jak w przypadku prowadzenia innych badań naukowych określenie celu determinuje to, w jaki sposób będą one realizowane. Istotne jest na tym etapie uzasadnienie, z jakiego powodu prowadzona jest ocena cyklu życia, co z kolei będzie determinowało poziom szczegółowości, z jakim zostanie ona wykonana. Aby było to możliwe konieczne jest zdefiniowanie systemu wyrobu oraz jednostek funkcjonalnych. Pierwsze z pojęć definiowane jest jako zbiór materiałowo i energetycznie połączonych procesów jednostkowych (Kulczycka red. 2001). Jednostka funkcjonalna definiowana jest natomiast jako ilościowy efekt systemu wyrobu stanowiący jednostkę odniesienia w LCA (PN-EN ISO 14040). W rozpatrywanym przypadku energetyki geotermalnej celem może być określenie wpływu na środowisko procesu produkcji energii elektrycznej lub cieplnej, natomiast jednostką funkcjonalną stanowić może, jak wspomniano powyżej, jednostka energii elektrycznej lub energii cieplnej.

Kolejnym etapem oceny cyklu życia jest określenie zbioru wejść i wyjść (LCI, ang. *Life Cycle Inventory*), przy czym po stronie danych wejściowych analizowane są surowce i energia, a po stronie danych wyjściowych produkty, odpady oraz emisje do środowiska. Etap ten, w którym następuje wytworzenie produktu określa granice systemu. Dotyczy on każdej zdefiniowanej/określonej jednostki funkcjonalnej.

Ocena wpływu na środowisko (LCIA, ang. *Life Cycle Impact Analysis*) stanowi trzeci etap oceny cyklu życia. Polega ona na przypisaniu poszczególnym pozycjom w opracowanym katalogu danych wejściowych i wyjściowych odpowiednich kategorii wpływu, co pozwala na rzetelną ocenę oddziaływania analizowanego produktu/procesu na środowisko.

Za ostatni etap uznać należy interpretację cyklu życia, a więc sformułowanie wniosków stanowiących wytyczną, co do postępowania w przypadku implementacji rozwiązań ograniczających wpływ analizowanego procesu na środowisko.

2. DOŚWIADCZENIA ŚWIATOWE

Jak zostało wspomniane powyżej, przeprowadzanie oceny cyklu życia pozostaje rzadkością w energetyce geotermalnej. Zdecydowana większość publikacji dotyczy elektrowni geotermalnych (m.in. Frick i in. 2010; Bayer i in. 2013; Lacirignola i in. 2013; Buonocore i in. 2015; Heberle i in. 2016; Menberg i in. 2016; Cook i in. 2017; Martinez-Corona i in. 2017; Tomasini-Montenegro i in. 2017) lub też produkcji energii elektrycznej z odnawialnych źródeł energii przedstawionej w sposób ogólny (m.in. Phent 2006; Dąbrowski i Dzikuć 2012; Asdrubali i in. 2015; Kanbur i in. 2017; Martin-Gamboa i in. 2017). Z punktu widze-

nia możliwości implementacji doświadczeń zawartych w wyżej wymienionych publikacjach w warunkach polskich, należy zaznaczyć, że obecnie w Polsce nie jest produkowana energia elektryczna, choć istnieje ku temu pewien potencjał, jak wskazano w publikacji *Atlas wykorzystania wód termalnych do skojarzonej produkcji energii elektrycznej i ciepłej przy zastosowaniu układów binarnych w Polsce* (Bujakowski i Tomaszewska red. 2014).

Należy jednocześnie mieć świadomość, że pewne aspekty oceny cyklu życia dla elektrowni geotermalnych i ciepłowni geotermalnych mają cechy wspólne, do których zaliczyć należy przede wszystkim etapy poszukiwania zasobów geotermalnych, ich udostępnienia i eksploatacji otworów wiertniczych, a także utylizacji wody geotermalnej opuszczającej elektrownię/ciepłownię geotermalną. Bez wątplenia wnioskiem, który można wyciągnąć jest konsekwencja definiowania w wymienionych publikacjach jednostki funkcjonalnej, jako ilość wytworzonej energii, bez względu na to, czy jest ona odnoszona do pojedynczej megawatogodziny jednostki energii, czy też w odniesieniu do całkowitej ilości wyprodukowanej energii na potrzeby odbiorców ciepła. Należy w tym miejscu zwrócić uwagę na jeden fakt, mianowicie w przypadku energetyki ciepłej bardziej zasadne wydaje się definiowanie jednostki funkcjonalnej jako np. 1 MWh bądź 1 TJ, co wynika ze zmiennego zapotrzebowania odbiorców sieci ciepłowniczej na energię ciepłą, w zależności od warunków atmosferycznych panujących w konkretnym sezonie grzewczym. Takie podejście pozwoli na użytkarckie wykorzystanie metodyki zastosowanej w trakcie oceny cyklu życia dla każdego z przyszłych okresów grzewczych.

Pomimo że dominujący jest fakt wykonywania oceny cyklu życia dla elektrowni geotermalnych, ocena systemów ciepłowniczych, które mogą stanowić dobrą praktykę dla implementacji w sektorze energetyki geotermalnej była wykonywana i publikowana w pracach Olivier-Sola i in. (2009), Chiavetta i in. (2011), Maraver i in. (2013), Parajulli i in. (2014). Podobnie jak w przypadku produkcji prądu elektrycznego i tego, co mogą wnieść dotychczasowe doświadczenia do implementacji oceny cyklu życia w Polsce, powinny być zauważone przykłady wykonania LCA dla ciepłowni opartych na innym źródle niż geotermalne. Naturalna jest możliwość czerpania wiedzy z oceny infrastruktury sieci ciepłowniczej jako elementu niezbędnego dla wykonania oceny cyklu życia w ciepłownictwie. Jest to o tyle ważne, że w przypadku energii elektrycznej sytuację klaruje fakt przyłączenia instalacji do sieci elektroenergetycznej, która stanowi podmiot zarządzany na szczeblu krajowym. Sektor ciepłowniczy funkcjonuje w skali lokalnej, odnosząc się do specyficznych warunków panujących na danym obszarze.

Z punktu widzenia przydatności dotychczasowych doświadczeń ze stosowania metody LCA do zastosowania w ciepłownictwie wykorzystującym energię geotermalną należy wymienić publikacje Nitkiewicz i Sekreta (2014), Studenckiej (2016) oraz Bartolozzi i in. (2017). Interesujące są zwłaszcza informacje zawarte w publikacji Bartolozzi i in. (2017). Autorzy wykonali ocenę LCA dla systemu ciepłowniczego w Toskanii (Włochy), porównując instalację pomp ciepła, systemu biomasowego oraz kotłów opalanych gazem ziemnym w wariantcie z kotłownią centralną. Za jednostkę funkcjonalną przyjęto 1 kWh energii ciepłej u odbiorcy końcowego, a analizowany system ciepłowniczy z pompami ciepła charakte-

ryzował się mocą 525 kW ze źródłem ciepła niskotemperaturowego opartym na 70 wymiennikach pionowych o głębokości 150 m.

System oparty na pompie ciepła został przeanalizowany przy stosowaniu metody LCA także przez Nitkiewicz i Sekreta (2014). Rozważone zostały dwa warianty, ze sprężarkową pompą ciepła woda/woda oraz absorpcyjną pompą ciepła woda/woda, a także wariant z wykorzystaniem gazu ziemnego. Niskotemperaturowe źródło dla pompy ciepła stanowiła woda o temperaturze 19,5°C (wydajność 24 m³/h). Jako jednostkę funkcjonalną autorzy przyjęli 3185 GJ ciepła, co odpowiadało całkowitej ilości ciepła, jakie powinno zostać dostarczone do odbiorców przyłączonych do sieci ciepłowniczej, aby zapewnić ich potrzeby. Analiza została jednak przeprowadzona dla parametrów sieci 50/40°C, co należy uznać za parametr niski i trudny do zrealizowania w warunkach polskich, gdyż wymagałby on modernizacji istniejących instalacji centralnego ogrzewania u odbiorców końcowych, przystosowanych do wyższych parametrów pracy. Mimo iż temperatura wody (19,5°C) nie spełnia kryteriów, by nazwać ją zgodnie z obowiązującym w Polsce prawem wodą termalną (Dz.U. z 2017, poz. 2126), jest to przykład bliski tematowi rozważanemu w niniejszym artykule.

Ocena efektywności ekonomicznej ciepłowni geotermalnej pracującej w układzie biwalentnym z kotłami gazowymi, przy użyciu analizy kosztów życia przeprowadzona została z kolei w publikacji Studenckiej (2016). Założeniem do analizy była temperatura wody geotermalnej na poziomie 65°C wydobywana z wydajnością 300 m³/h. Dodatkowym założeniem było określenie udziału geotermii w całkowitej produkcji ciepła w układzie biwalentnym na 33 500 MWh/rok. Porównanie wyników z uzyskanymi dla ciepłowni węglowej wskazało, że mimo wyższych nakładów inwestycyjnych oraz kosztów utylizacji odpadów, ciepłownia oparta na geotermii oraz gazie ziemnym charakteryzuje się stosunkowo niskimi kosztami eksploatacyjnymi, co w konsekwencji wskazuje na nią jako bardziej zasadne z ekonomicznego punktu widzenia rozwiązanie.

3. MOŻLIWOŚCI IMPLEMENTACJI W POLSCE

Obecny stan wykorzystania energii geotermalnej w Polsce wskazuje na możliwość implementacji metody oceny cyklu życia przede wszystkim w ciepłownictwie, a w przyszłości być może także w elektroenergetyce.

W Polsce działa obecnie 6 ciepłowni geotermalnych (tab. 1) o łącznej mocy zainstalowanej z geotermii na poziomie 76,2 MW, które dostarczyły w roku 2015 do odbiorców 737,9 TJ ciepła (Kępińska 2016). Należy jednak zwrócić uwagę, że potencjał możliwy do wykorzystania w najbliższym czasie jest co najmniej dwukrotnie większy. Mowa o ośmiu perspektywicznych lokalizacjach (tab. 2), w których łączna moc szacowana jest na 47 MW, a ilość możliwej do wyprodukowania energii na 713 TJ (Pająk i Bujakowski 2014). Zestawienie perspektywicznych lokalizacji nie wyczerpuje z pewnością potencjału w skali całego kraju, wskazuje jednak na miejsca, które w bliskiej perspektywie czasowej mają największe szansę na powodzenie realizacji.

Tabela 1

Ciepłownie geotermalne w Polsce (Kępińska 2016)

Table 1

Geothermal district heating in Poland (Kępińska 2016)

Lokalizacja	Wydajność otworu produkcyjnego [m ³ /h]	Maksymalna temperatura wody geotermalnej [°C]	Moc cieplna [MW]	Energia [TJ]
			całkowita/z geotermii	
Bańska Niżna	960	86	82,6/40,70	462,92/418,98
Pyrzyce	370	61	22,00/6,00	66,54/41,92
Stargard	~180	87	12,60/12,60	213,61/213,61
Mszczonów	60	42	8,30/3,70	15,69/5,99
Uniejów	120	68	7,40/3,20	6,80/5,44
Poddebice	190	71	10,00/10,00	51,98/51,98
SUMA	–	–	142,90/76,20	817,54/737,92

Tabela 2

Perspektywiczne lokalizacje dla powstania ciepłowni geotermalnych w Polsce i ich przewidywane parametry techniczne (Pająk i Bujakowski 2014)

Table 2

Perspective locations for newly designed geothermal district heating in Poland and their expected technical parameters (Pająk i Bujakowski 2014)

Lokalizacja	Wydajność otworu produkcyjnego [m ³ /h]	Maksymalna temperatura wody geotermalnej [°C]	Moc cieplna [MW]	Energia [TJ]
			całkowita/z geotermii	
Chociwiel	275	90	2,57/2,56	23,58/23,55
Cieplice	45	95	3,15/1,31	18,38/17,67
Koło	200	120	45,30/16,97	369,92/305,18
Konin	150	100	8,73/5,49	77,40/77,06
Łowicz	50	107	6,27/2,51	47,78/45,55
Ślesin	150	100	3,49/3,46	41,76/41,42
Turek	150	100	7,62/5,17	62,09/61,84
Żnin	250	100	17,26/10,03	141,27/140,74
SUMA	1270,00	–	94,39/47,05	782,18/713,01

Co istotne, dotychczas nie były prowadzone w Polsce badania dotyczące wykonania oceny cyklu życia dla istniejących czy nowo projektowanych ciepłowni geotermalnych. Dokonano natomiast oceny oddziaływania na środowisko oraz udokumentowany został wpływ ciepłowni geotermalnych na ograniczenie emisji produktów spalania paliw konwencjonal-

nych do atmosfery, a więc tzw. niska emisja (Kaczmarczyk red. 2015; Kaczmarczyk 2018).

Analizując pracujące obecnie ciepłownie geotermalne w Polsce należy stwierdzić, że w każdym z przypadków proces oceny cyklu życia będzie przebiegał inaczej. Zasadne wydaje się wydzielenie co najmniej kilku podstawowych obszarów podlegających ocenie z punktu widzenia wpływu na środowisko. Pierwszym elementem, na który należy zwrócić uwagę, są prace poszukiwawcze oraz wiertnicze. W sytuacji zmiennych warunków geologicznych w zależności od lokalizacji danej ciepłowni geotermalnej, sposób prowadzenia prac wiertniczych w celu udostępnienia złoża będzie odmienny. Nie sposób przytoczyć wszystkich kwestii, ale za przykład niech posłużą np. głębokość otworu/ów wiertniczych, konstrukcja otworów, konieczność zastosowania pompy głębinowej lub konieczność stosowania inhibitorów korozji na etapie eksploatacji. To, jaki system otworów wiertniczych zostanie zastosowany, wynika przede wszystkim ze składu chemicznego wody geotermalnej i jest bezpośrednio powiązany z zagospodarowaniem wody geotermalnej opuszczającej ciepłownię, a więc zatłoczenia jej do górotworu lub zrzucenia do cieku powierzchniowego. To z kolei będzie miało wpływ np. w przypadku systemu jednootworowego na wprowadzenie do układu chłodni wentylatorowych w celu obniżenia temperatury wody geotermalnej.

Kolejną kwestią wymagającą wyodrębnienia jest proces produkcji ciepła, który w polskich ciepłowniach geotermalnych realizowany jest przy wykorzystaniu płytowych wymienników ciepła, a także sprężarkowych i absorpcyjnych pomp ciepła. Kwestia ta odnosi się jednak wyłącznie do wykorzystywania zasobów geotermalnych, natomiast w kontekście pracy całej ciepłowni w większości przypadków rozpatrywane są układy biwalentne. Prowadzi to do sytuacji, w której przedsiębiorca, jakim jest ciepłownia geotermalna, oczekiwania będzie oceny cyklu życia uwzględniającej szczytowe źródło ciepła oparte na paliwach konwencjonalnych.

Ostatni z elementów stanowi sieć ciepłownicza. Zróżnicowane parametry pracy sieci ciepłowniczych, ukształtowanie terenu, czy wreszcie struktura odbiorców ciepła, powodują, że implementując ocenę cyklu życia do energetyki geotermalnej w Polsce, należy zdawać sobie sprawę, że przeprowadzona w jednym miejscu nie będzie miała charakteru utylitarnego. Nie zmienia to jednak faktu, iż jest to metoda pożądana, potrzebna i dająca satysfakcjonujące rezultaty z punktu widzenia nie tylko ekologicznego, ale również ekonomicznego.

PODSUMOWANIE

Ocena cyklu życia jest metodą dającą wymierne korzyści przedsiębiorcom chcącym ograniczyć negatywny wpływ na środowisko naturalne. Należy zwrócić uwagę, że są to nie tylko wymierne korzyści ekologiczne, ale także ekonomiczne. Zaletą oceny cyklu życia jest analiza poszczególnych procesów zachodzących w danym przedsiębiorstwie (w analizowanym przypadku mowa o ciepłowni geotermalnej) i ich analiza w celu zidentyfikowania procesów wywierających na środowisko największy wpływ, a w związku z tym możliwość implementacji rozwiązań zmieniających istniejący stan rzeczy. W przypadku sektora ener-

getyki geotermalnej w Polsce naturalną możliwością implementacji metody LCA są więc ciepłownie geotermalne. Jest to sektor, który pozwala na najbardziej miarodajną ocenę cyklu życia, a jednocześnie ze względu na skalę przedsięwzięć, na uzyskanie w ten sposób największych korzyści środowiskowych. Doświadczenia światowe wskazują, że w branży energetyki geotermalnej, przede wszystkim ciepłownictwa, LCA wykonywane jest niezwykle rzadko. Nie powinno to jednak być powodem do odrzucenia metody jako niemożliwej do zastosowania w warunkach polskich. Ocena cyklu życia jest znormalizowana i możliwa do wdrożenia natychmiast. Ze względu na znaczne skomplikowanie procesu inwestycyjnego i produkcyjnego w ciepłowni geotermalnej należy jednak z pewnością zaznaczyć, że nie będzie to zadanie łatwe, gdyż wymaga dużej interdyscyplinarności i precyzji w trakcie analizy.

Pracę zrealizowano w ramach umowy z AGH nr 15.11.140.204.

LITERATURA

- Asdrubali i in. 2015 – Asdrubali, F., Baldinelli, G., D’Alessandro, F. i Scrucca, F. 2015. Life cycle assessment of electricity production from renewable energies: Review and results harmonization. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 42, s. 1113–1122.
- Bartolozzi i in. 2017 – Bartolozzi, I., Rizzi, F. i Frey, M. 2017. Are district heating systems and renewable energy sources always an environmental win-win solution? A life cycle assessment case study in Tuscany, Italy. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 80, s. 408–420.
- Bayer i in. 2013 – Bayer, P., Rybach, L., Blum, P. i Brauchler, R. 2013. Review on life cycle environmental effects of geothermal power generation. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 26, s. 446–463.
- Bujakowski, W. i Tomaszewska B. red. 2014. *Atlas wykorzystania wód termalnych do skojarzonej produkcji energii elektrycznej i ciepłej przy zastosowaniu układów binarnych w Polsce*. Kraków: Instytut Gospodarki Surowcami Mineralnymi i Energią Polskiej Akademii Nauk.
- Buonocore i in. 2015 – Buonocore, E., Vanoli, L., Carotenuto, A. i Ulgiati, S. 2015. Integrating life cycle assessment and energy synthesis for the evaluation of a dry steam geothermal power plant in Italy. *Energy* 86, s. 476–487.
- Chiavetta i in. 2011 – Chiavetta, C., Tinti, F. i Bonoli, A. 2011. Comparative life cycle assessment of renewable energy systems for heating and cooling. *Procedia Engineering* 21, s. 591–597.
- Cook i in. 2017 – Cook, D., Davidsdottir, B. i Kristofersson, D.M. 2017. An ecosystem services perspective for classifying and valuing the environmental impacts of geothermal power projects. *Energy for Sustainable Development* 40, s. 126–138.
- Dąbrowski, R. i Dzikuć, M. 2012. Ocena cyklu życia (LCA) w sektorze energetycznym. *PAK* t. 58, nr 9.
- Frick i in. 2010 – Frick, S., Kaltschmitt, M. i Schroeder, G. 2010. Life cycle assessment of geothermal binary power plants using enhanced low-temperature reservoirs. *Energy* 35, s. 2281–2294.
- Grzesik, K. 2006. Wprowadzenie do oceny cyklu życia (LCA) – nowej techniki w ochronie środowiska. *Inżynieria Środowiska* t. 11, z. 1.

- Heberle i in. 2016 – Heberle, F., Schiffler, C. i Bruggemann, D. 2016. Life cycle assessment of Organic Rankine Cycles for geothermal power generation considering low-GWP working fluids. *Geothermics* 64, s. 392–400.
- Kaczmarczyk red. i in. 2015 – Kaczmarczyk, M. red., Pełka, G., Luboń, W., Będkowska, A., Piechowicz, L., Ciapała, B. i Blok, M. 2015. *Niska emisja. Od przyczyn występowania do sposobów eliminacji*. GEOSYSTEM Burek, Kotyza s.c., Kraków.
- Kaczmarczyk, M. 2018. Potential of existing and newly design geothermal heating plants in limiting of low emissions in Poland. *E3S Web of Conferences* vol. 44, art. no. 00062.
- Kanbur i in. 2017 – Kanbur, B.B., Xiang, L., Dubey, S., Choo, F.H. i Duan, F. 2017. Life cycle integrated thermoeconomic assessment method for energy conversion systems. *Energy Conversion and Management* 148, s. 1409–1425.
- Kępińska, B. 2016. Geothermal Energy Use – Country Update for Poland 2013–2015. *European Geothermal Congress 2016*, CU-22.
- Kowalski i in. 2007 – Kowalski, Z., Kulczycka, J. i Góralczyk, M. 2007. *Ekologiczna ocena cyklu życia procesów wytwórczych*. Wydawnictwo Naukowe PWN.
- Kulczycka J. red. i in. 2001 – Kulczycka, J. red., Góralczyk, M., Koneczny, K., Przewrocki, P. i Wąsik, A. 2001. *Ekologiczna ocena cyklu życia (LCA) nową techniką zarządzania środowiskowego*. Kraków: Wydawnictwo IGSMiE PAN.
- Lacirignola, M. i Blanc, I. 2013. Environmental analysis of practical design options for enhanced geothermal systems (EGS) through life-cycle assessment. *Renewable Energy* 50, s. 901–914.
- Maraver i in. 2013 – Maraver, D., Sin, A., Sebastian, F. i Royo, J. 2013. Environmental assessment of CCHP (combined cooling heating and power) systems based on biomass combustion in comparison to conventional generation. *Energy* 57, s. 17–23.
- Martinez-Corona i in. 2017 – Martinez-Corona, J.I., Gibon, T., Hertwich, E.G. i Parra-Saldivar, R. 2017. Hybrid life cycle assessment of a geothermal plant: From physical to monetary inventory accounting. *Journal of Cleaner Production* 142, s. 2509–2523.
- Martin-Gamboa i in. 2017 – Martin-Gamboa, M., Iribarren, D., Garcia-Gusano, D. i Dufour, J. 2017. A review of life-cycle approaches coupled with data envelopment analysis within multi-criteria decision analysis for sustainability assessment of energy systems. *Journal of Cleaner Production* 150, s. 164–174.
- Menberg i in. 2016 – Menberg, K., Blum, P., Pfister, S., Rybach, L. i Bayer, P. 2016. Life cycle assessment of geothermal power generation. *European Geothermal Congress 2016*, Strasbourg, France, 19–24 September 2016.
- Nitkiewicz, A. i Sekret, R. 2014. Comparison of LCA results of low temperature heat plant using electric heat pump, absorption heat pump and gas fired boiler. *Energy Conversion and Management* 87, s. 647–652.
- Oliver-Sola i in. 2009 – Oliver-Sola, J., Gabarrell, X. i Rieradevall, J. 2009. Environmental impacts of the infrastructure for district heating in urban neighbourhoods. *Energy Policy* 37, s. 4711–4719.
- Ustawa z dnia 9 czerwca 2011 r. Prawo geologiczne i górnicze (Dz.U. z 2017, poz. 2126).
- Parajuli i in. 2014 – Parajuli, R., Lokke, S., Ostergaard, P.A., Knudsen, M.T., Schmidt, J.H. i Dalgaard, T. 2014. Life cycle assessment of district heat production in a straw fired CHP plant. *Biomass and Bioenergy* 68, s. 115–134.

- Phent, M. 2006. Dynamic life cycle assessment (LCA) of renewable energy technologies. *Renewable Energy* 31, s. 55–71.
- PN-EN ISO 14040-06, 2009: Zarządzanie środowiskowe – Ocena cyklu życia – Zasady i struktura.
- PN-EN ISO 14044-06, 2009: Zarządzanie środowiskowe – Ocena cyklu życia – Wymagania i wytyczne.
- Pająk, L. i Bujakowski, W. 2014, Klasyfikacja potencjalnych obszarów perspektywicznych. [W:] Bujakowski W., Tomaszewska B. [red. nauk.], *Atlas wykorzystania wód termalnych do skojarzonej produkcji energii elektrycznej i ciepłej przy zastosowaniu układów binarnych w Polsce*.
- Rebitzer i in. 2004 – Rebitzer, G., Ekvall, T., Frischknecht, R., Hunkeler, D., Norrise, G., Rydberg, T., Schmidt, W.P., Suhh, S., Weidemaier, B.P. i Pennington, D.W. 2004. Life cycle assessment. Part 1: Framework, goal and scope definition, inventory analysis, and applications, *Environmental International* 30, s. 701–720.
- Studencka, J. 2016. Ocena efektywności ekonomicznej źródeł ciepła przy użyciu analizy kosztu życia (LCC) na przykładzie ciepłowni geotermalnej. *Ekonomia i Środowisko* 2 (57), s. 150–161.
- Tomasini-Montenegro i in. 2017 – Tomasini-Montenegro, C., Santoyo-Castelazo, E., Gujba, H., Romero, R.J. i Santoyo, E. 2017. Life cycle assessment of geothermal power generation technologies: An update review. *Applied Thermal Engineering* 114, s. 1119–1136.

LIFE CYCLE ASSESSMENT IN GEOTHERMAL ENERGY SECTOR – WORLD EXPERIENCE REVIEW AND THE POSSIBILITY OF IMPLEMENTATION IN POLAND

ABSTRACT

Life cycle assessment (LCA) is not commonly executed in geothermal energy, and it can be even determined that it is rare. This is mainly due to the fact that the possibility of the results of the application from one location to another is impossible to be implemented directly. The complexity of the investment process, which is the construction of a heating plant, combined heat and power plant or geothermal power plant, results in the real impact on the environment for each project being different. This results primarily from the changing geological, topographical and environmental conditions. The article is a review of world experience and presents the possibility of its implementation in Polish conditions.

KEYWORDS

LCA, life cycle assessment, geothermal energy, energy sector