

W kierunku gospodarki o obiegu zamkniętym

Perspektywa przemysłu



redakcja naukowa
Joanna Kulczycka i Krzysztof Głuc

Instytut Gospodarki Surowcami Mineralnymi i Energią
Polskiej Akademii Nauk

***W kierunku gospodarki
o obiegu zamkniętym
Perspektywa przemysłu***

Redakcja naukowa:
Dr hab. Joanna Kulczycka, prof. AGH
Dr Krzysztof Głuc

Kraków 2017
Wydawnictwo IGSMiE PAN

RECENZENCI

Dr hab. inż. Elżbieta Pietrzyk-Sokulska, prof. IGSMiE PAN

Dr hab. inż. Agnieszka Generowicz, prof. PK



*Niniejszy materiał został opublikowany dzięki dofinansowaniu
Narodowego Funduszu Ochrony Środowiska i Gospodarki Wodnej
Za jego treść odpowiada wyłącznie Instytut Gospodarki Surowcami Mineralnymi i Energią Polskiej Akademii Nauk*

Projekt okładki: Jolanta Królas

ADRES REDAKCJI

Instytut Gospodarki Surowcami Mineralnymi i Energią Polskiej Akademii Nauk

ul. J. Wybickiego 7A, 31-261 Kraków

tel.: +48 12 632 33 00; fax: +48 12 632 35 24

© Copyright by IGSMiE PAN & MSAP UEK

Printed in Poland

Kraków 2017

ISBN 978-83-62922-81-9

WYDAWNICTWO IGSMiE PAN, KRAKÓW

Nakład 20 egz.; Ark. wyd. 13,54; Ark. druk. 19 (×8)

Druk i oprawa: Zakład Poligraficzny Uniwersytetu Ekonomicznego w Krakowie

Spis treści

Słowo wstępne	5
Część I – Koncepcja GOZ	
<i>Jan BONDARUK, Mariusz KRUCZEK, Paweł ZAWARTKA</i>	
Koncepcyjne ujęcie modeli biznesowych w gospodarce o obiegu zamkniętym	9
Conceptual approach to business models in circular economy	
<i>Agnieszka NOWACZEK, Joanna KULCZYCKA, Marzena SMOL, Anna AVDIUSHCHENKO, Jerzy HAUSNER</i>	
Badania postaw i poziomu świadomości w obszarze gospodarki o obiegu zamkniętym ...	19
Examination of attitudes and awareness related to circular economy	
Część II – Recykling	
<i>Katarzyna GRUDNIEWSKA, Szymon BUJAK, Weronika WIERZBICKA, Agnieszka SOBIANOWSKA-TUREK</i>	
Odzysk metali z frakcji magnetycznej i niemagnetycznej odpadów samochodowych	31
Recovery of metal from magnetic and non-magnetic fractions of automobile waste	
<i>Agnieszka GURGUL, Włodzimierz SZCZEPANIAK, Monika ZABŁOCKA-MALICKA</i>	
Termiczny proces odzysku surowców z odpadów elektronicznych – zgazowanie parą wodną	41
Thermal processing for recovering raw materials from electronic waste – steam gasification	
<i>Karolina KOSSAKOWSKA, Katarzyna GRZESIK, Bogusław BIEDA, Ryszard KOZAKIEWICZ</i>	
Możliwości pozyskiwania metali ziem rzadkich z odpadów poflotacyjnych i górniczych ..	49
Possibility of obtaining rare earth metals from flotation and mining waste	
<i>Jerzy KOROL, Jan BONDARUK, Joanna LENŻA, Mateusz GLEJA</i>	
Koncepcja zagospodarowania odpadów z procesu recyklingu folii rolniczych w aspekcie gospodarki o obiegu zamkniętym	63
Waste management conception of recycled agricultural films in the aspect of circular economy	
Część III – Biogospodarka	
<i>Beata KOŃCZAK, Paweł ZAWARTKA</i>	
Produkcja fermentatu i kompostu z osadów ściekowych dla efektywnego wdrażania gospodarki cyrkularnej	77
Production of digestate and compost from sewage sludge for the effective implementation of circular economy	
<i>Marzena SMOL, Agnieszka NOWACZEK, Joanna KULCZYCKA</i>	
Zagospodarowanie ubocznych produktów spalania biomasy oraz pofermentu z biogazowni rolniczych zgodnie z założeniami gospodarki o obiegu zamkniętym	87

Management of by-products from biomass combustion and waste digestate from agricultural biogas plants according to circular economy assumptions	
<i>Anna LEMPART, Edyta KUDLEK, Mariusz DUDZIAK</i>	
Cyrkulacja wody basenowej jako przykład działania zgodnego z ideą gospodarki o obiegu zamkniętym	99
Swimming pool water circulation as an example of action in accordance with circular economy	
<i>Joanna WYCZARSKA-KOKOT, Anna LEMPART</i>	
Popłuczyny z obiegów basenowych jako odpad możliwy do wykorzystania	111
Washings from swimming pools as reusable waste	
Część IV – Energetyka	
<i>Katarzyna Anna JABŁOŃSKA</i>	
Tendencje zmian w energetyce a koncepcja gospodarki cyrkularnej	123
Tendencies of changes in energy sector and circular economy concept	
<i>Natalia GENEROWICZ</i>	
Ekoprojektowanie paneli fotowoltanicznych	135
Ecodesigning of photovoltaic panels	
<i>Robert BOCIANOWSKI, Zenon FOLTYNOWICZ</i>	
Analiza wstępna poprzedzająca badania środowiskowe innowacyjnej metody szczelinowania łupków gazonośnych sprężonym metanem (CNG)	143
Preliminary analysis prior to environmental studies of an innovative method of shale gas fracturing based on compressed natural gas application (CNG)	

Słowo wstępne

W monografii opisano rozwiązania technologiczne i organizacyjne, których celem jest poszukiwanie rozwiązań wygrany-wygrany-wygrany (*win-win-win*) obejmujących korzyści dla środowiska, podmiotów gospodarczych i klienta/społeczeństwa zgodne z założeniami i celami gospodarki o obiegu zamkniętym (GOZ). GOZ dotyczy wielu obszarów, tj. ekonomii współdzielenia, zrównoważonej konsumpcji, oceny i promowania trwałości i energooszczędności produktów, zwiększenia roli usług, napraw, ponownego użycia, wprowadzania rozszerzonej odpowiedzialności producenta, oceny cyklu życia produktu, symbiozy gospodarczej, zmniejszenie ilości substancji toksycznych, przejście od płacenia za posiadanie (*pay-for-ownership*) do płacenia za używanie (*pay-for-use*), a przede wszystkim zwiększenia recyklingu. Istotnym wyzwaniem jest zatem używanie surowców, a nie ich zużywanie oraz przetwarzanie produktów po ich zakończeniu.

Promowanie rozwiązań w obszarze GOZ wymaga nie tylko działań inwestycyjnych, ale również organizacyjnych i legislacyjnych. Takie działania podejmowane są w ostatnich latach zarówno w krajach Unii Europejskiej, jak i poszczególnych krajach członkowskich. W grudniu 2015 r. Komisja Europejska (KE) opublikowała pakiet GOZ obejmujący:

a) komunikat pt. Zamknięcie obiegu – plan działania UE dotyczący gospodarki o obiegu zamkniętym,

b) część legislacyjną – propozycje zmian w dyrektywach dotyczących odpadów.

Istotą koncepcji GOZ jest:

1) utrzymanie możliwie jak najdłużej wysokiej wartości i jakości zasobów, materiałów i produktów w gospodarce oraz

2) minimalizowanie ilości wytwarzanych odpadów, a także jak najbardziej efektywne zagospodarowanie powstających odpadów (zgodnie z hierarchią gospodarowania odpadami). KE zaproponowała, aby modelowe rozwiązania w kierunku GOZ były dostosowane do uwarunkowań społeczno-gospodarczych poszczególnych państw członkowskich i ujęte w krajowych dokumentach. Pierwszy plan GOZ wśród krajów członkowskich UE został opracowany i uchwalony w Holandii (2016). W Polsce, w grudniu 2016 r., Ministerstwo Rozwoju przygotowano projekt polskiej Mapy drogowej transformacji w kierunku GOZ, który został zaktualizowany w lipcu 2017 r. Jego opracowanie potraktowane zostało jako

projekt strategiczny w Strategii na rzecz odpowiedzialnego rozwoju. Jednak pierwsza strategia GOZ na poziomie krajowym została przyjęta w Chinach w 2002 r. i jest nadal realizowana i uaktualniana, co przynosi wymierne korzyści gospodarce.

W pierwszej części monografii zaprezentowano koncepcję budowania innowacyjnych modeli GOZ, a także poziom świadomości społecznej w tym obszarze. Część druga to propozycje rozwiązań technologicznych w zakresie odzysku surowców, głównie metali z różnych frakcji odpadów. Zaprezentowano też przykłady zastosowań GOZ w biogospodarce, a w ostatniej części w energetyce, uwzględniając również zagadnienia eko-projektowania. Ponieważ GOZ jest wciąż nowym paradygmatem zarządzania w wielu obszarach, autorzy mają nadzieję, że publikacja będzie dobrym przykładem do poszukiwania m.in. eko-innowacyjnych rozwiązań oraz pozwoli na tworzenie nowych modeli biznesowych i zasad prowadzenia biznesu.

Pragniemy podziękować Pani dr hab. inż. Elżbiecie Pietrzyk-Sokulskiej, prof. IGSMiE PAN i Pani dr hab. inż. Agnieszce Generowicz, prof. PK za wnikliwe i staranne recenzje.

Część I

Koncepcja GOZ

Jan BONDARUK*, Mariusz KRUCZEK*, Paweł ZAWARTKA*

Koncepcyjne ujęcie modeli biznesowych w gospodarce o obiegu zamkniętym

STRESZCZENIE. Rosnące zainteresowanie gospodarką o obiegu zamkniętym stanowiącą alternatywny dla liniowego sposób gospodarowania powoduje, że znajduje ona coraz częściej odzwierciedlenie w przyjmowanych w przedsiębiorstwach kierunkach i sposobach działania prowadząc do powstania nowych modeli biznesowych. Istotą nowych modeli biznesowych jest urzeczywistnienie głównego wyzwania gospodarki o obiegu zamkniętym, którym jest ograniczenie kosztów i uzyskiwanie dodatkowych korzyści wskutek domknięcia obiegu materiałów i energii. Celem rozdziału jest próba systematyzacji tych modeli biznesowych i określenie warunków ich tworzenia i funkcjonowania.

Conceptual approach to business models in circular economy

ABSTRACT. The growing interest for circular economy as an alternative to linear economy is increasingly reflected on directions and practices of business development and lead to the emergence of new business models. The essence of the new business models is the realization of the main challenge of circular economy, which is to reduce costs and gain additional benefits due to the closure of materials and energy circulation. The aim of this chapter is the attempt to systematize these business models and to define the conditions for their creation and functioning.

1. Wstęp

Problemy środowiskowe, takie jak spadek bioróżnorodności, zanieczyszczenie wód, powietrza i gleb, ograniczona dostępność zasobów i intensywne wykorzystanie terenu, powodują że konieczna jest transformacja systemów gospodarowania w kierunku wymogom

* Dr inż., Główny Instytut Górnictwa, Katowice.

bardziej odpowiadającym zrównoważonemu rozwojowi (Meadows i in. 2004; WBCSD, 2010; Seiffert i Loch 2005; Markard i in. 2012). Z drugiej strony transformacja gospodarcza polegająca na formowaniu się złożonych sieci dostaw oraz wzrostu złożoności struktur właścicielskich prowadzą do powstania ryzyka w prowadzonej przez pojedyncze przedsiębiorstwa działalności, jak i stabilności dużych systemów społeczno-gospodarczych (Sachs 2015; Jackson 2009). W perspektywie tych trendów pojawiła się nowa koncepcja gospodarowania określana jako gospodarka o obiegu zamkniętym (GOZ, ang. *Circular Economy* – CE). GOZ to promowany przez Komisję Europejską i rządy innych państw (np.: Chiny, Japonię, Kanadę) model gospodarowania. Jego rosnąca popularność oraz pojawiające się, dla urzeczywistnienia zawartych w nim wytycznych, wymagania powodują, że paradygmatem GOZ zainteresowany jest również biznes, który z jednej strony przygotowuje się do sprostania nowym wymaganiom, z drugiej upatruje w tym kierunku źródeł przewagi konkurencyjnej, dodatkowych przychodów i wzrostu efektywności (KE 2014; FEMA 2012; KE 2015). Przedsiębiorcy traktują ten kierunek rozwoju jako źródło kształtowania przewag konkurencyjnych oraz potencjalny kierunek transformacji łańcuchów dostaw i sposobów dostarczania wartości interesariuszom, w tym zwłaszcza klientom (FEMA 2014). Zainteresowanie sfery gospodarczej GOZ stanowiło inspirację dla podjętej w rozdziale problematyki modeli biznesowych. Zmiana paradygmatu gospodarowania wymaga przekształcenia i ewolucji dotychczasowych wzorców i modeli gospodarowania w nowe, dostosowane do pojawiających się potrzeb. Celem pracy jest przedstawienie wybranych koncepcji opisujących modele biznesowe odpowiadające paradygmatowi gospodarki o obiegu zamkniętym.

2. Istota gospodarki o obiegu zamkniętym

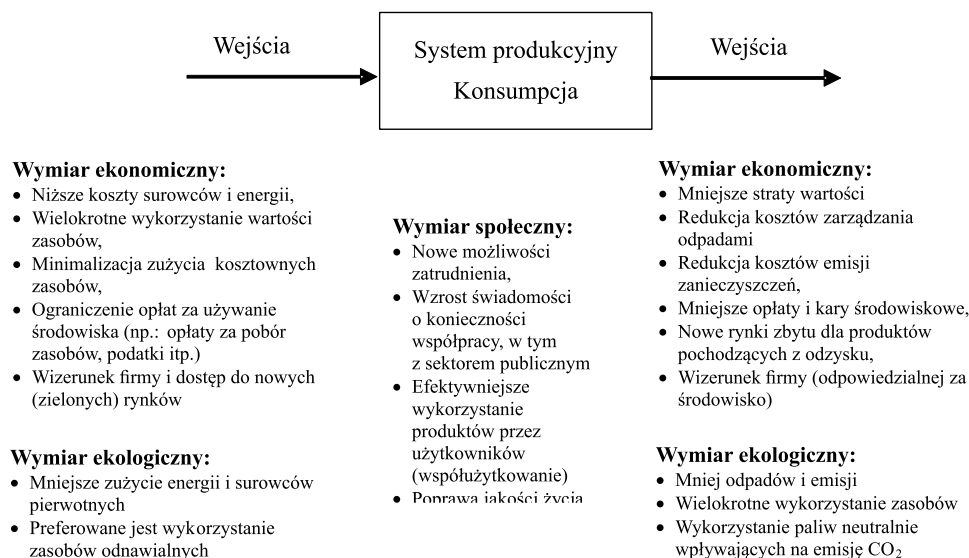
Paradygmat gospodarki o obiegu zamkniętym rozwinął się z końcem lat 70. XX wieku (FEMA 2013). W literaturze przedmiotu (Andersen 2007; Ghisellini i in. 2016; Su i in. 2013; Pearce i Turner 1990) opisywano wówczas wpływ zasobów naturalnych na gospodarkę, jako źródło wejść do systemu produkcyjnego i konsumpcji oraz wyjść w postaci odpadów. Badania te obejmowały liniowy przepływ zasobów przez systemy gospodarcze i wskazywały na występowanie otwartych obiegów, w których raz skonsumowane zasoby nie były ponownie wykorzystywane. W pracach Bouldinga (1966) pojawia opis Ziemi jako zamkniętego systemu, w którym istnieją ograniczenia w dostępności do zasobów i asymilacji zanieczyszczeń, a co za tym idzie potrzeba zachowania równowagi między środowiskiem i gospodarką. Stahel i Reday (1976) odnieśli założenia GOZ do ekologii przemysłowej wprowadzając koncepcję zamkniętej pętli jako strategii dla zapobiegania powstawania odpadów, tworzenia miejsc pracy i efektywniejszego wykorzystania zasobów. W dalszych pracach Stahel (1982) rozwinął istotę współdzielenia produktów zamiast ich posiadania, jako najwłaściwszy model biznesowy zrównoważonej gospodarki zapewniający ograniczenie kosztów i ryzyka związanego z powstawaniem odpadów. Koncepcja GOZ czerpie zatem z różnych wzorców opisujących systemy zrównoważonego gospodarowania, w tym zwłaszcza z: ekologii przemysłowej (Frosch i Gallopoulos 1989; Graedel 1996; Lifset i Graedel 2001), ekosystemów przemysłowych (Jelinski i in. 1992), symbiozy

przemysłowej (Chertow 2000), czystszej produkcji (Nowak 2001). Uwzględniając przy tym ich związki z przepływem materiałów w systemach produkcyjnych (Lieder i Rashid 2016), efektywności (Huppel i Ishikawa 2009; Burchart-Korol 2013), ekoprojektowania (od kołyski do kołyski) (Braungart i in. 2007), odporności systemów społeczno-ekologicznych (Crépin i in. 2012), efektywności gospodarowania (Stahel 2010; FEMA 2013), czy też koncepcji gospodarki zeroemisyjnej (Pauli 2010) i innych. Wiele definicji nowej koncepcji gospodarowania, jaką jest gospodarka cyrkularna, prowadzi do trudności w jednoznacznym zdefiniowaniu. Elementem wspólnym wszystkich definicji jest jednak dążenie do domknięcia obiegu materiałów w gospodarce.

Obecnie najpowszechniej stosowaną definicję GOZ podaje Fundacja Ellen MacArthur, wskazując, że jest to ekonomia industrialna, której zamierzonym celem jest przywracanie do obiegu i regenerowanie produktów poprzez ich odpowiednie projektowanie, a następnie eksploatację. Działania Fundacji Ellen MacArthur w obszarze wprowadzania do powszechnego wykorzystania GOZ są bardzo istotne. Fundacja wydała szereg publikacji związanych z GOZ, w tym książkę Webstera (2015) i serię raportów (FEMA 2012; FEMA 2013). Fundacja jest również ośrodkiem współpracy dla przedsiębiorców decydentów politycznych i środowisk naukowych. Ze wsparcia fundacji korzystają również firmy doradcze na przykład Lacey and Rutqvist czy McKinsey (FEMA i in. 2015).

Podobne podejście do definicji GOZ prezentują w literaturze Geng i Doberstein (2008), którzy odnoszą się do chińskich doświadczeń z wdrożeniem GOZ definiowaną jako realizacja zamkniętego przepływu materiałów w całym systemie gospodarczym. Webster (2015) dodaje, że GOZ to taka forma gospodarowania, która przez projektowanie przywraca produkty, komponenty i materiały do ponownego użycia nadając im zawsze najwyższą użyteczność i wartość. Odpowiednio Yuan i inni (2008) stwierdzają, że podstawą GOZ jest zamknięty obieg materiałów oraz wykorzystanie surowców i energii przez wiele faz cyklu życia produktu. Bocken i inni (2016) wskazuje, że GOZ to strategia projektowania i modelowania biznesowego, która prowadzi do domknięcia pętli przepływu zasobów. Taka definicja nawiązuje do opisu GOZ z perspektywy zrównoważonego rozwoju i jego trzech wymiarów: ekonomicznego, środowiskowego i społecznego. Ujęcie zrównoważonego rozwoju nakazuje jednak prowadzenie modyfikacji przedstawionej definicji. W tym wypadku GOZ to taka gospodarka, w której celem funkcjonowania systemu produkcyjno-konsumpcyjnego jest maksymalna produkcja usług z produktów wytworzonych w klasycznym liniowym przepływie materiałów i energii. Jest to osiągnięte między innymi poprzez cykliczny przepływ materiałów oraz wykorzystanie odnawialnych źródeł energii. Stosowanie GOZ przyczynia się do rozwoju we wszystkich trzech wymiarach zrównoważonego rozwoju. GOZ wpływa na ograniczenie przepływów materiałów i energii do poziomu naturalnych granic, jakie stawiają gospodarce ekosystemy, przestrzegając przy tym naturalnych zdolności do odnawiania się zasobów. Koncepcyjne ujęcie przedstawionej definicji GOZ przedstawiono na rysunku 1.

Dla idealnie działającego systemu GOZ fizyczne przepływy materiałów i energii pomniejszają składniki wejściowe do systemu oraz wychodzące z systemu odpady i emisje (Korhonen i in. 2004; Korhonen 2004). Koszty wykorzystywanych zasobów i energii zostaną pomniejszone podobnie jak i koszty odpadów i emisji (np. o opłaty środowiskowe, opłaty



*Rys. 1. GOZ z perspektywy wymiarów zrównoważonego rozwoju
Źródło: Opracowanie własne na podstawie: Korhonen 2018*

za składowanie odpadów, podatki ekologiczne itp.). Dzięki wielokrotnemu wykorzystaniu wartości produktów powstają nowe firmy oraz wzrasta zatrudnienie. GOZ pozwala firmom na rozszerzenie dotychczas prowadzonej działalności na międzysektorowe i międzyorganizacyjne łańcuchy wartości poprzez tworzenie sieci współpracy, w których realizacja podstawowych funkcji zarządzania jest bardzo złożona, a decyzje obciążone wysokim ryzykiem. Stąd też poszukiwania nowych koncepcji biznesowych, które przyjmują przykładowo formy leasingu i wynajmu, gospodarki współdzielonej, logistyki zwrotnej i innych.

Analizując przedstawione szerokie spektrum definicji opisujących GOZ można sformułować wnioski, że jest to rozwiązanie, którego głównym celem jest ograniczenie zużycia zasobów i energii oraz ilości powstających odpadów i emisji, polegające na domykaniu pętli obiegu materiałów i energii oraz oszczędniejszemu ich wykorzystaniu. Cele te można osiągnąć w długookresowej perspektywie poprzez odpowiednie projektowanie, konserwację, naprawę, ponowne użycie, ponowne wytwarzanie, renowację i recykling oraz zmianę świadomości społecznej.

3. Modele biznesowe GOZ – istota i klasyfikacja

Zasadniczą kwestią w rozwoju GOZ jest zmiana postaw i zachowań klientów. Pomimo rosnącej świadomości klientów, koniecznością odzysku materiałów i surowców oraz możliwościami ponownego wykorzystania produktów lub ich części, modele GOZ są nadal mało rozpowszechnione (Linder i Williander 2015). Nowe modele biznesowe mają zatem na

celu zwiększyć z jednej strony świadomość, z drugiej faktyczną efektywność wykorzystania zasobów w gospodarce. Istotą nowych modeli biznesowych jest założenie, że klienci nie chcą posiadać określonych dóbr, ale są zainteresowani określonymi efektami, czy też dostępnością danego dobra. Grupa modeli związanych z szerszym wykorzystaniem produktów kosztem ograniczenia praw własności to jednak jedno z wielu spojrzeń na możliwość biznesowej aplikacji paradygmatu GOZ, który zakłada działania mające na celu dalsze i bardziej efektywne eksploataowanie zasobów. W perspektywie szeroko rozumianej GOZ konieczne jest takie kierowanie przepływami materiałów i energii, by realizować podstawowe wymagania związane z domykaniem ich obiegu w gospodarce. Powoduje to potrzebę tworzenia nowych modeli biznesowych w złożonym układzie międzyorganizacyjnym, obejmujących różne poziomy funkcjonowania (położenia w łańcuchach wartości) dostawców, recyklerów i innych podmiotów gospodarczych wpływających na sprawną obsługę zwrotów. Podejmowane dotychczas próby opracowania jednego ogólnego modelu biznesowego dla przepływu materiałów i energii zgodnego z założeniami GOZ nie przyniosły rozwiązań. Częściej wypracowywane są ogólne plany działania, w których ujmowane są kierunkowe wytyczne w zakresie projektowania modeli biznesowych na rzecz GOZ, w tym mających charakter innowacyjny (Mentink 2014).

GOZ stała się nową wizją wykorzystania surowców, energii odnawialnej, tworzenia wartości i przedsiębiorczości (Joustra i in. 2013). Linder i Williander (2015) przedstawiają pojęcie modelu biznesowego GOZ jako koncepcyjną logikę tworzenia wartości. Bazuje ona na wykorzystaniu wartości ekonomicznej zachowanej w produktach po ich użyciu na potrzeby tworzenia nowej oferty. Mentink (2014) definiuje model biznesowy GOZ jako uzasadnienie sposobu, w jaki organizacja tworzy, dostarcza i wykorzystuje wartość w zamkniętych pętlach materiałowych. Dodatkowo stwierdza, że tak pojmowane modele biznesowe GOZ niekoniecznie zmierzają do zrównoważenia potrzeb ekonomicznych, społecznych i ekologicznych, w przeciwieństwie do tych modeli biznesowych, których głównym celem jest zrównoważony rozwój (Mentink 2014). Podstawowe konstrukty i elementy składowe modeli biznesowych GOZ są w literaturze różnie rozumiane i definiowane. Jednym z częściej spotykanych jest model ReSOLVE – regeneracja (*Regenerate*), współużytkowanie (*Share*), optymalizacja (*Optimise*), zamykanie obiegów (*Loop*), wirtualizacja (*Virtualise*) i wymiana (*Exchange*). Model ten daje ramy dla tworzenia wartości w GOZ (Van Renswoude i in. 2015) oraz określa wymagania normatywne dla modeli biznesowych i obszary integracji. Istnieje sześć działań mających na celu wdrożenie gospodarki o obiegu zamkniętym (FEMA 2013; FEMA 2014):

- 1) regeneracja, która oznacza przejście na materiały i energię odnawialną. Związane jest to z powracaniem odzyskanych zasobów biologicznych do biosfery i ma na celu odzyskanie, zachowanie i przywrócenie równowagi ekosystemów,
- 2) współużytkowanie to działania mające na celu maksymalizację wykorzystania produktów przez współdzielenie ich między różnych użytkowników. Może to być realizowane przez wzajemne udostępnianie prywatnych produktów lub wspólne udostępnianie zbioru produktów. Udostępnianie oznacza również ponowne użycie produktów, o ile jest to technicznie dopuszczalne (np. *second-hand*) lub też przedłużanie ich życia przez konserwację, naprawę i zwiększenie trwałości i wytrzymałości.

- 3) optymalizowanie to działanie obejmujące zwiększenia wydajności lub efektywności produktu i eliminowanie odpadów w procesach produkcyjnych oraz łańcuchach dostaw. Działania związane z optymalizowaniem mogą również polegać na wykorzystaniu dużych zbiorów danych automatyzacji, teledetekcji i sterowania do zarządzania obiegiem materiałów. W optymalizacji zakłada się, że nie wymagana jest zmiana produktu lub technologii.
- 4) zamykanie obiegów ma na celu utrzymanie w użytkowaniu produktów lub materiałów przez zatrzymanie ich w zamkniętych pętlach. Działania te są realizowane między innymi poprzez recykling materiałowy, ekstrakcję materiałów i inne procesy fizyczno-chemicznej przeróbki. Wyższy priorytet w tym działaniu ma domykanie pętli już na etapie wewnątrzorganizacyjnym.
- 5) wirtualizacja to działanie polegające na dematerializacji produktów. Dematerializacja ta przyjmuje formę pośredniej (np. zakupy on line) i bezpośredniej (np. książki lub gazety on line).
- 6) wymiana, która wiąże się z wprowadzeniem nowych, bardziej zaawansowanych materiałów nieodnawialnych, użycie nowych technologii (np. druk 3D) oraz wybór nowych produktów i usług (np. transport multimodalny).

W tabeli 1 przedstawiono wybrane rozwiązania mogące stanowić modele biznesowe GOZ usystematyzowane zgodnie z modelem ReSOLVE.

TABELA 1. Przykładowe modele biznesowe GOZ

Składowa modelu ReSOLVE	Przykładowe modele biznesowe GOZ
Regeneracja	Odzysk energii, dostawy energii z OZE, budownictwo energooszczędne, realizacja produkcji w parkach przemysłowych.
Współużytkowanie	Utrzymanie ruchu i gospodarka remontowa, platformy wymiany, wspólne używanie, wypożyczanie produktów, wypożyczanie, leasing, dzierżawa, odsprzedaż, wymiana części na nowsze, aktualizacja, wydłużanie cyklu życia produktu, używanie własnych narzędzi do świadczenia usług.
Optymalizacja	Ponowne wykorzystanie produktów, produkcja na zamówienie, wykorzystanie Just in Time (systemy pull), outsourcing.
Zamykanie obiegów	Przywracanie wartości produktów, zawracanie produktów/komponentów/materiałów z wysypisk, zarządzanie popytą zużytych produktów.
Wirtualizacja	Usługi zdematerializowane.
Wymiana	Zmiana, wymiana technologii.

Źródło: Opracowanie własne na podstawie: FEMA 2014, Van Renswoude 2015, Mentink 2014.

W pracach Mentinka (2014) nakreślone zostały niezbędne zmiany w elementach klasycznych modeli biznesowych, które wpływają na rozwój usług w GOZ. Są to:

- propozycja wartości (co?) – produkty powinny być w pełni zużyte lub poddane recyklingowi, co wymaga rozwiniętych systemów logistyki zwrotnej lub przedsiębiorstwa powinny utworzyć systemy świadczenia usług w oparciu o oferowane produkty i sprzedawać efekty ich wykorzystania (sprzedawać usługi),

- działania, procesy, zasoby, zdolności (jak?) – produkty powinny zostać wykonane w specjalnych procesach z wykorzystaniem materiałów pochodzących z recyklingu lub specjalnych zasobów, co wymaga nie tylko specyficznych zdolności, ale również utworzenia systemu logistyki zwrotnej i zarządzania relacjami z innymi uczestnikami łańcucha dostaw, by zapewnić domknięcie pętli przepływu materiałów,
- kreowanie przychodów (dlaczego?) – przychody ze sprzedaży usług opartych na konkretnych produktach powinny uwzględniać stopień ich użycia,
- klient (kto?) – sprzedaż produktów w GOZ może wymagać zmian nawyków klientów, a czasami zmian segmentów docelowych klientów, do których kierowane będą produkty.

Jednocześnie Laubscher i Marinelli (2014) wskazali kluczowe obszary integracji modeli biznesowych z paradygmatem GOZ:

- 1) model sprzedaży – przejście od sprzedaży wolumenów produktów w kierunku sprzedaży usług i ponownego wykorzystania produktów po pierwszym użyciu przez klientów,
- 2) projektowanie produktów i dobór materiałów – zmiana wiąże się ze sposobem projektowania produktów, tak by były one zorientowane na wszelkiego rodzaju formy ponownego wykorzystania (*reusing, remanufacturing, recycling*). Konstrukcja produktu powinna umożliwić jego ponowne wykorzystanie w niezmięnionej postaci lub wykorzystanie części lub materiałów na potrzeby nowych produktów,
- 3) zarządzanie informacją o przepływach materiałowych – dotyczy rozwoju systemów informatycznych umożliwiających śledzenie przepływu materiałów w pętlach łańcuchów dostaw (od miejsca pozyskania surowców do ostatecznego klienta oraz od klienta do producentów). Dane te mogą być wykorzystane w optymalizacji wykorzystania materiałów pochodzących z produktów, których cykl życia uległ zakończeniu,
- 4) łańcuchy dostaw zamkniętej pętli pozwalają na maksymalizację wykorzystania surowców pochodzących z recyklingu lub remanufacturingu tak, by wykorzystać maksymalnie wartość produktów. Taka konstrukcja łańcucha dostaw ma również umożliwić efektywniejsze wykorzystanie majątku przedsiębiorstw, które są ogniwami łańcucha dostaw,
- 5) partnerstwo logistyczne – polega na budowie relacji opartych na długookresowej współpracy i zaufaniu z dostawcami oraz klientami w łańcuchu dostaw,
- 6) zarządzanie zasobami ludzkimi – zmiana kultury organizacyjnej poprzez ukształtowanie systemu zachęt, budowanie potencjału kadrowego, program szkoleń i nagradzania za działania związane z wdrażaniem GOZ.

Przedstawione czynniki integracji wskazują, że jednym z najistotniejszych elementów tworzenia modeli biznesowych GOZ jest rozwinięta logistyka zwrotna, a właściwie całościowa koncepcja zamkniętych pętli łańcuchów dostaw (Laubscher i Marinelli 2014, Burchart-Korol i in. 2016). Analiza relacji występujących między ogniwami łańcucha (sieci) dostaw oraz sposoby zarządzania przepływami materiałów, informacji i środków finansowych determinować będą efektywność zastosowanego modelu GOZ.

4. Podsumowanie

Przedstawione rozważania dotyczące koncepcji modeli biznesowych w gGOZ wskazują przede wszystkim na brak jednego spójnego ujęcia tej problematyki w literaturze. Wskazany model ReSOLVE jest jednym z możliwych podejść umożliwiających klasyfikację modeli biznesowych GOZ, ale brak wyraźnie zarysowanych granic pomiędzy poszczególnymi obszarami powoduje, że niektóre modele mogą być ujmowane w więcej niż jednej kategorii. Ze względu na stosunkową nowość, jaką jest wprowadzone pojęcie GOZ, konieczne jest w pierwszej kolejności przeprowadzenie inwentaryzacji i kodyfikacji rozwiązań biznesowych, które mogą być podstawą opracowania typologii modeli biznesowych. Warto też zwrócić szczególną uwagę na związek GOZ z logistyką, a zwłaszcza logistyką zwrotną, gdyż zarządzanie przepływami materiałów i informacji decyduje o realizacji głównej idei GOZ, jaką jest domykanie obiegu materiałów i energii w gospodarce.

Literatura

- Andersen M.S. 2007 – *An introductory note on the environmental economics of the circular economy*. Sustainable Science, 2(1), s. 133–40.
- Bocken N.M.P., de Pauw I., Bakker C. i van der Grinten B. 2016 – *Product design and business model strategies for a circular economy*. Journal of Industrial Production Engineering, 33, s. 308–320.
- Boulding K.E. 1966 – *The economics of the coming spaceship earth*. Environmental Quality Issues in a Growing Economy.
- Braungart M., McDonough W. i Bollinger A. 2007 – *Cradle-to-cradle design: creating healthy emissions - a strategy for eco-effective product and system design*. Journal of Cleaner Production, 15 (13), s. 1337–1348.
- Buchart-Korol D., Czaplicka-Kolarz K. i Kruczek M. 2016 – *The Benefits of Integration of Circular Economy in Supply Chain Management*. [In:] Carpathian Logistics Congress. CLC'2015, November 4th–6th 2015, Jesenic, Czech Republic. Conference proceedings. Ostrava, Tanger, s. 51–56.
- Buchart-Korol D., Czaplicka-Kolarz K. i Kruczek M. 2013 – *Koncepcja ekoefektywności w zrównoważonym zarządzaniu produkcją*. Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej seria: Organizacja i Zarządzanie nr 63, Gliwice.
- Chertow M.R. 2000 – *Industrial symbiosis: literature and taxonomy*. Annual Review of Energy Environmental 25, s. 313–337.
- Crépin A., Biggs R., Polasky S., Troell M. i Zeeuw A. 2012. *Regime shifts and management*. Ecological Economy 84, s. 15–22.
- Ellen MacArthur Foundation, SUN, McKinsey & Co (FEMA i in.) 2015 – *Growth Within: A Circular Economy Vision for a Competitive Europe*.
- Frosch D. i Gallopoulos N. 1989 – *Strategies for manufacturing*. Science America 261 (3), s. 94–102.
- Fundacja Ellen MacArthur (FEMA) 2012: *Towards the Circular Economy*. Report Vol. 1.
- Fundacja Ellen MacArthur (FEMA) 2013: *Towards the Circular Economy*. Londyn.
- Geng Y. i Doberstein B. 2008 – *Developing the circular economy in China: challenges and opportunities for achieving "leapfrog development"*. International Journal of Sustainable Development World Ecology 15, s. 231–239.
- Ghisellini P., Cialani C. i Ulgiati S. 2016 – *A review on circular economy: the expected transition to a balanced interplay of environmental and economic systems*. Journal of Cleaner Production 114, s. 11–32.
- Graedel T.E. 1996 – *On the concept of industrial ecology*. Annual Review Energy Environmental 21, s. 69–98.
- Huppes G. i Ishikawa M., 2009 – *Eco-efficiency guiding micro-level actions towards sustainability: ten basic steps for analysis*. Ecological Economy, 68, s. 1687–1700.
- Jackson T. 2009 – *Prosperity without Growth*. Economics for a Finite Planet. Earthscan, London, New York.
- Jelinski L.W., Graedel T.E., Laudise R.A., McCall D.W. i Patel C.K.N. 1992 – *Industrial ecology: concepts and approaches*. Procedia of Natural Academic Science 89, s. 793–797.

- Joustra D.J., de Jong E. i Engelaer F. 2013 – *Guided Choices towards a Circular Business Model*. North-West Europe Interreg IVB: Lille, Francja.
- Komisja Europejska (KE) 2014 – *Towards a circular economy: a zero waste programme for Europe*. Communication From the Commission to the European Parliament, the Council, the European Economic and Social Committee and the Committee of the Regions, Brussels (EN).
- 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.
- Korhonen J. 2004 – *Industrial ecology in the strategic sustainable development model: strategic applications of industrial ecology*. Journal of Cleaner. Production, 12 (8–10), s. 809–823.
- Korhonen J., Honkasalo A. i Seppälä J. 2018 – *Circular Economy: The Concept and its Limitations*. Ecological Economics 143, s. 37–46
- Korhonen J., von Malmborg F., Strachan P.A. Ehrenfeld J.E. 2004 – *Management and policy aspects of industrial ecology: an emerging research agenda*. Business Strategy Environment 13 (5), s. 289–305.
- Laubscher M. i Marinelli T. 2014 – *Integration of Circular Economy in Business*. [In:] Proceedings of the Conference: Going Green–CARE INNOVATION 2014, Vienna, Austria, 17–20 November 2014.
- Lieder M. i Rashid A. 2016 – *Towards circular economy implementation: a comprehensive review in context of manufacturing industry*. Journal of Cleaner Production 115, s. 36–51.
- Lifset R. i Graedel T.E. 2001 – *Industrial ecology: goals and definitions*. [In:] Ayres, R.U., Ayres, L. (eds.), Handbook for Industrial Ecology. Edward Elgar, Brookfield.
- Linder M. i Williander M. 2015 – *Circular Business Model Innovation: Inherent Uncertainties*. Business Strategy Environment.
- Markard J., Raven R. i Truffer B. 2012 – *Sustainability transitions: an emerging field of research and its prospects*. Research Policy 41, s. 955–967.
- Meadows D.H., Randers J. i Meadows D.L. 2004 – *The Limits to Growth. The 30-year Update*. Routledge, London.
- Mentink B. 2014 – *Circular Business Model Innovation: A Process Framework and a Tool for Business Model Innovation in a Circular Economy*. Master's Thesis, Delft University of Technology & Leiden University, Leiden, Holandia.
- Nowak Z. 2001 – *Zarządzanie środowiskiem*. Cz. II, Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice.
- Pauli G. 2010 – *Blue Economy: 10 Years, 100 Innovations, 100 Million Jobs*. Paradigm Publications
- Pearce D.W. i Turner R.K. 1990 – *Economics of natural resources and the environment*. Baltimore, MD: JHU Press.
- Sachs J. 2015 – *The Age of Sustainable Development*. Columbia University Press.
- Stahel W. 1982 – *The product life factor*. [In:] Orr, G.S. (ed.), An Inquiry into the Nature of Sustainable Societies. The Role of the Private Sector. Houston Area Research Centre, Houston, s. 72–105.
- Stahel W. 2010 – *The Performance Economy*. Palgrave Macmillan.
- Stahel W. i Reday G. 1976 – *The Potential for Substituting Manpower for Energy*. Report to the Commission of the European Communities.
- Su B., Heshmati A., Geng Y. i Yu X. 2013. *A review of the circular economy in China: moving from rhetoric to implementation*. Journal of Cleaner Production 42, s. 215–227.
- Van Renswoude K., Wolde A.T. i Joustra D.J. 2015 – *Circular Business Models*. Part 1: An introduction to IMSA's Circular Business Model Scan. Available online: https://groenomstilling.erhvervsstyrelsen.dk/sites/default/files/media/imsa_circular_business_models_-_april_2015_-_part_1.pdf (30.08.2017).
- Webster K. 2015 – *The Circular Economy: a Wealth of Flows*. Ellen MacArthur Foundation, Isle of Wight.
- World Business Council for Sustainable Development (WBCSD) 2010: *Vision 2050. The New Agenda for Business*. Conches-Geneva.
- Yuan Z., Bi J. i Moriguichi, Y. 2008 – *The circular economy: a new development Strategy in China*. Journal of Industrial Ecology 10, s. 4–8.

Agnieszka NOWACZEK*, Joanna KULCZYCKA**, Marzena SMOL***,
Anna AVDIUSHCHENKO****, Jerzy HAUSNER*****

Badania postaw i poziomu świadomości w obszarze gospodarki o obiegu zamkniętym

STRESZCZENIE. Opracowanie i wdrażanie działań dotyczących transformacji polskiej gospodarki w kierunku gospodarki o obiegu zamkniętym (GOZ) zostało zainicjowane i jest realizowane przez Ministerstwo Rozwoju. Wytypowano główne priorytety dla Polski w obszarze GOZ i opracowano Mapę drogową transformacji w kierunku GOZ (I wersja 2016, aktualizacja 2017). Równoległe do prowadzonych prac na szczeblu centralnym, istotne znaczenie ma badanie poziomu świadomości konsumentów i ich oczekiwań w zakresie działań w obszarze GOZ oraz odpowiedzialności za ich realizację.

W rozdziale zaprezentowano wyniki badań ankietowych dotyczące postaw i świadomości w obszarze GOZ osób mieszkających w województwie małopolskim z uwzględnieniem podziału na mieszkańców miasta Kraków i pozostałych. Celem badań było także zidentyfikowanie oczekiwań mieszkańców w zakresie wdrażania koncepcji i zasad GOZ przez poszczególnych decydentów. Porównanie odpowiedzi respondentów w poszczególnych grupach pozwoliło na wskazanie podobieństw i różnic w postawach w obszarze GOZ w zależności od wieku, płci, wykształcenia oraz miejsca zamieszkania

Examination of attitudes and awareness related to circular economy

ABSTRACT. Development and implementation of activities related to the transformation to the circular economy in Poland has been initiated by the Ministry of Development. The main CE related priorities of Poland were identified and the Roadmap for transformation towards CE was prepared (I version 2016, update 2017). In parallel with the work carried out at central level, it is important to investigate consumer awareness and expectations on activities and responsibilities for their realization. The chapter presents the results of surveys on attitudes and awareness about CE of the residents of Malopolskie Voivodeship, taking into account the division into inhabitants of Cracow and other inhabitants of the voivodship. The objective of the research was also to identify residents' expectations regarding the implementation of the CE model and its principles by individual decision makers. Comparison of the obtained answers from Malopolska residents allowed to indicate similarities and differences in attitudes resulting from age, education and place of residence.

* Mgr, *** Dr, Instytut Gospodarki Surowcami Mineralnymi i Energią PAN, Kraków.

** Dr hab., prof. AGH, **** Dr, AGH Akademia Górniczo-Hutnicza, Kraków.

***** Prof. dr hab., Uniwersytet Ekonomiczny, Kraków.

1. Wstęp

W grudniu 2015 r. Komisja Europejska (KE) opublikowała pakiet gospodarki o obiegu zamkniętym (GOZ), w skład którego wchodzi:

- komunikat Zamknięcie obiegu – plan działania Unii Europejskiej (UE) dotyczący gospodarki o obiegu zamkniętym,
- część legislacyjna – propozycja zmian w dyrektywach dotyczących odpadów.

Istotą koncepcji GOZ jest utrzymanie możliwie jak najdłużej wysokiej wartości i jakości zasobów, materiałów i produktów w gospodarce oraz minimalizowanie ilości wytwarzanych odpadów poprzez ich efektywne zagospodarowanie (zgodnie z hierarchią gospodarowania odpadami). Tempo wdrażania przez poszczególne kraje członkowskie GOZ powinno być dostosowane m.in. do poziomu rozwoju społeczno-gospodarczego, stopnia implementacji rozwiązań prośrodowiskowych, świadomości społecznej. KE wezwała więc państwa członkowskie do opracowania krajowych dokumentów w tym zakresie. W odpowiedzi, Ministerstwo Rozwoju przygotowało w grudniu 2016 r. pierwszy projekt polskiej Mapy drogowej transformacji w kierunku GOZ (Mapa drogowej... 2017) oraz utworzono Zespół ds. GOZ, będący platformą współpracy międzyresortowej. W ramach pracy Zespołu ds. GOZ powołano cztery grupy robocze (ds. odpadów, modeli biznesowych, biogospodarki oraz edukacji i promocji), złożone z przedstawicieli innych resortów, administracji samorządowej, przedsiębiorstw, instytucji naukowo-badawczych oraz organizacji samorządowych (Mapa drogowej... 2017).

Powołany Zespół ds. GOZ dyskutował nad pierwszym projektem Mapy drogowej transformacji w kierunku GOZ. W efekcie, w czerwcu 2017 r. przygotowano zaktualizowany projekt tego dokumentu. Podkreślono w nim, iż konieczne jest podjęcie kompleksowych działań dotyczących produktów i usług w całym cyklu ich życia czyli od etapu pozyskania surowca, przez projektowanie, produkcję, konsumpcję, aż po gospodarowanie odpadami. Ten ostatni etap jest kluczowy w GOZ, gdyż w sytuacji powstania odpadów powinny być one traktowane jako surowce wtórne (Kulczycka, Smol 2016).

Koncepcja GOZ została zdefiniowana, jako „zamykanie pętli, cyklu życia produktu poprzez zwiększenie recyklingu i ponownego wykorzystania oraz dostarczanie korzyści zarówno dla środowiska, jak i gospodarki” (Pisano i in. 2015). Natomiast wg Fundacji Ellen MacArthur jest to uwzględnianie w projektowaniu naprawy i regeneracji oraz utrzymywania przez cały czas najwyższej użyteczności i wartości produktów, komponentów i materiałów, rozdzielać techniczne i biologiczne cykle (Ellen MacArthur Foundation... 2015). Rozwiązania i działania zgodne z GOZ będą skuteczne jedynie przy pełnej akceptacji społecznej. Jednym z głównych aspektów GOZ jest ochroną środowiska. I to właśnie społeczeństwo powinno mieć świadomość roli i znaczenia środowiska w życiu człowieka oraz jego wpływu na różne aspekty życia. Zjawisko to określane jest mianem świadomości ekologicznej, czyli stanu wiedzy, poglądów i wyobrażeń ludzi o roli środowiska w życiu człowieka, jego antropogennym obciążeniu, stopniu wyeksploatowania, zagrożenia i ochrony, w tym także stanu wiedzy o sposobach i instrumentach sterowania użytkowaniem i ochroną środowiska (Górka, Poskrobko i Radecki 2001). W Polsce jako pionierskie badania w tym zakresie uważa się badania tarnobrzeskie z 1983 r. Wynikało

z nich, że społeczeństwo traktuje środowisko jako wartość, ale nie odczuwa potrzeby działań na jego rzecz. Od roku 2000 prowadzono cykliczne badania dotyczące poziomu świadomości ekologicznej społeczeństwa, na bazie których w roku 2008 powstał Raport Instytutu na rzecz Ekorozwoju (INE) pt. „Polacy w zwierciadle ekologicznym”, zgodnie z którym wskazano, iż społeczeństwo ma bardzo zróżnicowane podejście do zagadnień związanych z ochroną środowiska i dzieli się na: prośrodowiskowych (ok. 20%) i prorozwojowych (15%) oraz liczną grupę niemającą opinii na ten temat (15%) (Gliński 1988). Obecnie badania związane z ochroną środowiska prowadzi Ministerstwo Środowiska. Na jego zlecenie TNS Polska (Raport z analizy... 2015) przygotował przegląd zrealizowanych w latach 2009–2015 badań poziomu świadomości, postaw i zachowań ekologicznych Polaków. Przeanalizowano 83 publikacje, głównie raporty lub komunikaty badawcze. Większość z nich to jednorazowe inicjatywy badawcze, a jedynie około 30 to badania prowadzone cyklicznie lub badania trackingowe. 11 dokumentów to anglojęzyczne raporty z międzynarodowych badań Eurobarometru realizowane na zlecenie KE. Istotną rolę w tym zakresie pełnią organizacje pozarządowe (np. Fundacja CBOS), które zleciły dotychczas niemal co czwarty analizowany projekt badawczy. Z raportów z badań wynika, że do ochrony środowiska społeczeństwo motywuje przede wszystkim dbałość o zdrowie oraz troska o przyszłe pokolenia. Popularność zachowań konsumenckich, wspierających ochronę środowiska w Polsce wzrasta, o czym świadczy np. korzystanie z toreb wielokrotnego użytku lub oszczędzanie wody (prysznic zamiast kąpieli w wannie). Zachowania te są najbardziej popularne w grupie osób od 40 do 49 roku życia oraz wśród ludzi wykształconych (Tuszyńska 2008). Jak wynika z najnowszych badań Stena Recycling, obecnie 74% Polaków segreguje odpady (Raport... 2017). Regularna segregacja odpadów staje się zatem coraz bardziej popularna, jednak jest to nadal kwestia, która napotyka wiele barier. Dzięki przejęciu przez samorządy odpowiedzialności za gospodarkę odpadami, mieszkańcy zostali zaopatrzeni w pojemniki do segregacji odpadów. Według ankietowanych brak odpowiedniej infrastruktury przestał być zatem największą barierą, natomiast pojawiły się nowe takie jak brak miejsca w domu czy brak chęci do segregacji odpadów (Tuszyńska 2008). Wyniki badań wskazują także, iż respondenci zauważają poprawę stanu gospodarki odpadami w Polsce. Zwiększyła się liczba osób dostrzegających prowadzone przez gminy działania edukacyjne mieszkańców w zakresie właściwego gospodarowania odpadami, to wciąż ponad połowa ankietowanych takich działań nie dostrzega. Badania dotyczące wiedzy o GOZ były prowadzone jednorazowo przez Stena Recycling (Raport Stena Recykling 2017). Wynika z nich, że GOZ kojarzy się głównie z kwestiami środowiskowymi m.in. możliwością zmniejszenia liczby składowisk odpadów (57%) oraz ogólną poprawą stanu środowiska (49%). Najmniej badanych kojarzyło GOZ z nowymi uregulowaniami prawnymi UE (24%), ekologicznym projektowaniem produktów (28%) oraz społeczną odpowiedzialnością biznesu (CSR) (29%).

Celem pracy jest przedstawienie postaw i świadomości na temat GOZ mieszkańców województwa małopolskiego z uwzględnieniem podziału na mieszkańców miasta Krakowa i pozostałych. Wyniki badań umożliwiły poznanie poziomu świadomości mieszkańców regionu małopolskiego na temat GOZ oraz wskazanie barier i problematycznych sfer Małopolan wobec ekoinnowacji i zrównoważonego rozwoju regionu.

2. Metodologia badań

Badania prowadzone były w okresie marzec–czerwiec 2017 r. Grupą ankietowaną byli pełnoletni mieszkańcy województwa małopolskiego. Badania prowadzono poprzez kwestionariusz ankiety tradycyjnej oraz formularz elektroniczny. Kwestionariusz ankiety złożony był z metryczki i dotyczył ogólnych informacji na temat respondentów, tzn. wieku, płci, miejsca zamieszkania oraz wykształcenia, oraz z części właściwej, w której znalazły się pytania o postawy i zachowania proekologiczne. Formularz ankietowy umożliwiał zidentyfikowanie respondenta, co do płci, wieku, wykształcenia oraz aktualnego miejsca zamieszkania. W wyborze próby badawczej zastosowano dwie formy doboru:

- Dobór losowy prosty – wymagana liczba elementów próby losowana jest bezpośrednio z populacji i musi być reprezentatywna.
- Dobór ochotniczy – ankieta została umieszczona w internecie i odpowiadali na nią wszyscy zainteresowani tematyką.

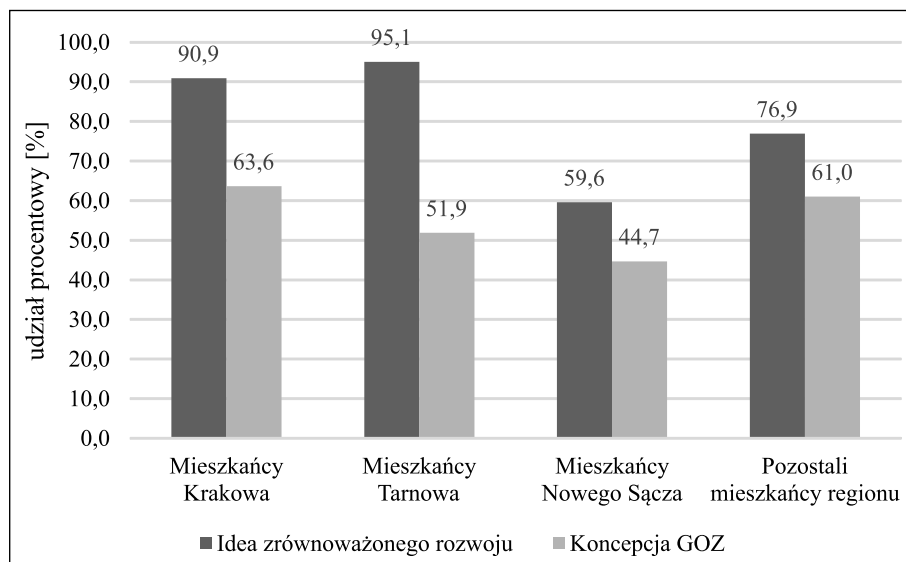
Pytania w ankiecie miały charakter zamknięty jedno- lub wielokrotnego wyboru, a ponadto zastosowano metodę badawczą bazującą na skali Likerta. Jest to pięciostopniowa skala oceny pozwalająca uzyskać odpowiedź dotyczącą stopnia akceptacji zjawiska i poglądu. Ponadto w metryczce kwestionariusza ankiety respondent poproszony został o wskazanie miejsca zamieszkania.

W ankiecie wzięło udział 430 mieszkańców regionu, w tym prawie 50% z terenu miasta Krakowa. 8,1% to respondenci z miast o wielkości od 100 do 500 tys. mieszkańców (głównie z Tarnowa), 4,7% mieszkańcy Nowego Sącza, a 10,5% mieszkańcy z terenu m.in. powiatu chrzanowskiego, oświęcimskiego, olkuskiego, bocheńskiego, myślenickiego. Z miast o wielkości do 10 tys. mieszkańców (m.in. Stary Sącz, Dobczyce, Proszowice, Skawina, Miechów) było 5,6%, a z terenów wiejskich 22,1%.

3. Wyniki badań

Wśród ankietowanych kobiety stanowiły 66,3%, a mężczyźni 33,7%. Dominowali respondenci z wykształceniem wyższym i średnim, a średnia wieku to 30 lat. Dzięki danym o miejscu zamieszkania respondentów, można było porównać wyniki i wskazać podobieństwa i różnice.

Jedno z pierwszych pytań dotyczyło wiedzy w zakresie założeń i koncepcji GOZ oraz zrównoważonego rozwoju. Wyniki analizowano z uwzględnieniem miejsca zamieszkania (rys. 1). Wskazują one, że mieszkańcy dużych miast takich jak Kraków i Tarnów mają największą wiedzę odnośnie założeń i zasad zrównoważonego rozwoju. Wśród ankietowanych mieszkańców Krakowa, niemal 91% prawidłowo zdefiniowało zrównoważony rozwój. Największą znajomość zasad zrównoważonego rozwoju wykazali mieszkańcy Tarnowa (95,1%). Znacznie niższą znajomość koncepcji zrównoważonego rozwoju mają mieszkańcy Nowego Sącza (59,6%). Z kolei pozostali ankietowani mieszkańcy regionu wykazali dość dużą znajomość tego zagadnienia, na poziomie niemal 77%. Jak wynika z badań, mniejsza ilość Małopolan identyfikuje założenia GOZ niż zasady zrównoważonego rozwoju. Spośród an-



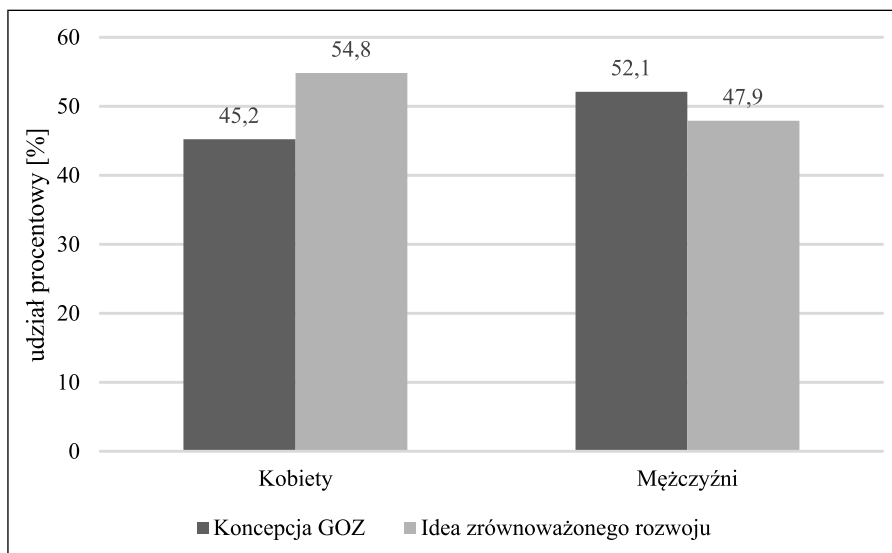
Rys. 1. Miejsce zamieszkania a znajomość założeń zrównoważonego rozwoju i koncepcji GOZ

kietowanych mieszkańców Krakowa niemal 64% poprawnie zidentyfikowało GOZ z ochroną zasobów naturalnych poprzez utrzymywanie w obiegu materiałów oraz minimalizowanie ich strat w postaci odpadów. W mniejszych miastach takich jak Tarnów i Nowy Sącz, udział osób którzy zidentyfikowali koncepcję GOZ był mniejszy i wynosił odpowiednio 51,9% i 44,7%. W pozostałej części województwa, pojęcie GOZ zidentyfikowało 61% respondentów. W grupie tej 22,1% populacji to mieszkańcy terenów wiejskich.

Badania wykazały, że większą wiedzę nt. zrównoważonego rozwoju i GOZ mają kobiety. Spośród ankietowanych kobiet, 54,5% wie, co to jest zrównoważony rozwój, a 45,2% poprawnie zidentyfikowało zasady i założenia GOZ. Inaczej jest w przypadku mężczyzn – 47,9% ankietowanych zna definicję zrównoważonego rozwoju i aż 52,1% poprawnie powiązało GOZ z ochroną zasobów naturalnych poprzez utrzymywanie w obiegu materiałów oraz minimalizowanie ich strat w postaci odpadów (rys. 2).

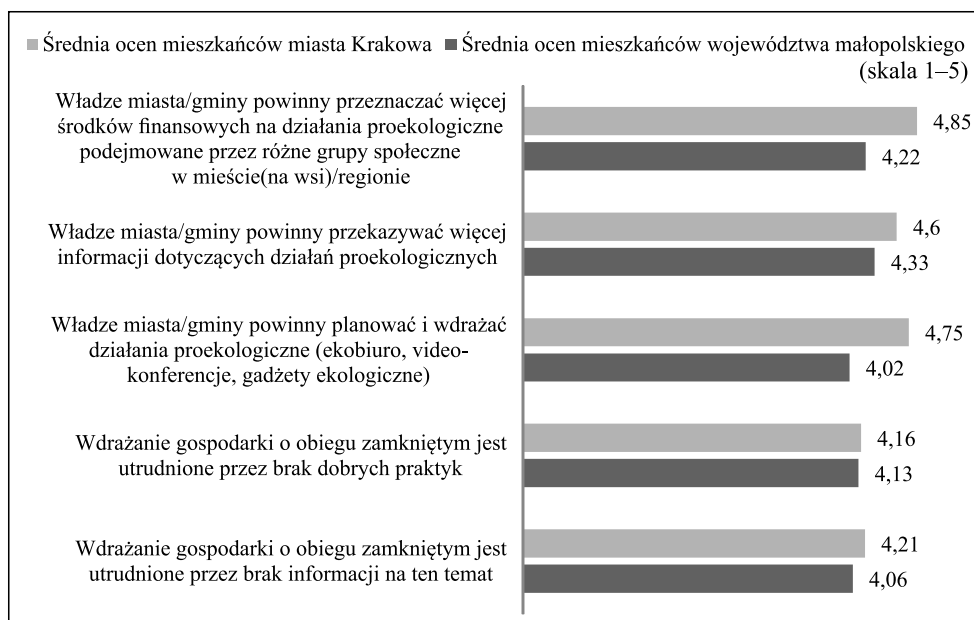
W dalszej części badania wykorzystano metodę sumowanych ocen, która została opracowana i po raz pierwszy zaproponowana przez R. Likerta (Raport pt. Działanie...). Należy ona do złożonych skal pomiaru postaw jednowymiarowych i jest szacunkowa. Jest zbiorem pewnych pozycji, z których każda (ocena stwierdzenia) jest w zasadzie sama w sobie skalą (Raport z analizy...) zależnościami, ponieważ zakwalifikowanie elementów do zbioru opiera się na ich relacji wobec skali jako całości. W niniejszym badaniu respondenci odpowiadali na pytania dotyczące różnych aspektów GOZ w skali od 1 do 5 (1 – zdecydowanie się nie zgadzam 2 – nie zgadzam się 3 – nie mam zdania 4 – zgadzam się 5 – zdecydowanie się zgadzam). Wyniki zestawiono na rysunku 3.

Wynika z nich, że zarówno mieszkańcy Krakowa, jak i pozostałych regionów województwa małopolskiego, uznali że władze samorządowe powinny przeznaczać więcej środków na



Rys. 2. Płeć a znajomość koncepcji zrównoważonego rozwoju i GOZ

działania proekologiczne, w tym GOZ oraz udostępniać więcej informacji o tych działaniach w regionie. Jako barierę utrudniającą wdrażanie koncepcji GOZ respondenci uznali brak informacji na ten temat (tab. 1).



Rys. 3. Średnia ocen z odpowiedzi respondentów

TABELA 1. Średnia ocen mieszkańców regionu w podziale na płeć i wiek

Twierdzenie	Średnia ocen mieszkańców		Płeć		Wiek respondentów w latach		
	woj. małopolskie	miasto Kraków	kobiety	mężczyźni	18–30	31–44	>45
Działania zgodne z ideą GOZ powodują wzrost gospodarczy, nie zwiększając presji na środowisko	2,98	4,25	4,15	3,85	3,89	3,58	4,20
GOZ poprawia jakość życia	4,05	4,55	4,35	4,88	4,85	4,20	3,95
GOZ wpływa na zmniejszenie zużycia energii	3,85	4,13	3,25	4,74	4,12	3,40	4,10
GOZ ogranicza powstawanie odpadów	3,36	4,25	4,12	4,56	3,80	4,40	4,60
GOZ ogranicza składowanie odpadów	4,20	4,15	4,31	4,64	3,95	3,70	4,30
Wodę można zaoszczędzić, biorąc prysznic zamiast kąpać się w wannie	4,19	3,85	4,88	4,20	3,20	3,45	4,50
Wodę można zaoszczędzić, używając zmywarki zamiast ręcznego mycia naczyń	4,15	4,40	4,78	3,98	4,10	4,20	4,15
Segregacja odpadów np. zagospodarowanie elektrośmieci poprawia stan środowiska	4,51	4,80	4,40	4,50	4,60	4,45	4,80
Korzystanie z transportu publicznego ma pozytywny wpływ na środowisko	4,39	4,85	4,22	4,77	4,20	4,50	4,35

Źródło: opracowanie własne.

Na podstawie analizy odpowiedzi respondentów zauważyć można różnice zdania na temat działań związanych z realizacją GOZ w zależności od wieku i płci Małopolan. W pytaniu dotyczącym wpływu GOZ na zużycie energii mieszkańcy województwa małopolskiego wskazali poziom 3, tzn. nie mam zdania, a mieszkańcy Krakowa uznali tezę za zgodną z ich przekonaniami. Duża dysproporcja występuje w podziale na płeć: kobiety udzieliły odpowiedzi na poziomie 3,25, a mężczyźni na poziomie 4,74, co oznacza wysoką zgodność z postawionym twierdzeniem. Podobna tendencja utrzymuje się w przypadku zależności pomiędzy odpowiedzią a wiekiem respondentów. Ludzie młodzi w przedziale 18–30 lat nie mieli zdania na temat wpływu GOZ na zmniejszenie zużycia energii, a osoby powyżej 45. roku życia uznały poprawność tego twierdzenia. W przypadku twierdzenia zakładającego wpływ GOZ na ograniczenie powstawania odpadów proporcje są jeszcze większe – mieszkańcy województwa małopolskiego nie mieli zdania w odniesieniu do powyższego twierdzenia a mieszkańcy Krakowa uznali zależność pomiędzy GOZ a ograniczeniem w powstawaniu odpadów za zdecydowanie słuszne. Na średnią dla powyższej tezy wpływa również wiek

respondentów, gdyż osoby powyżej 45 lat częściej odpowiadały twierdzącą na to pytanie. Również jeśli chodzi o pytanie dotyczące sposobu oszczędzania wody w gospodarstwie domowym respondenci zamieszkujący województwo małopolskie częściej wybrali odpowiedź twierdzącą niż mieszkańcy miasta Krakowa. A osoby młode w przedziale 18–30 lat uznały, że wybór rodzaju kąpieli nie musi mieć związku z oszczędzaniem wody.

3. Wnioski

Na podstawie przeprowadzonych badań można wyciągnąć następujące wnioski:

- mieszkańcy województwa małopolskiego poprawnie identyfikują koncepcję GOZ, lecz bliższe jest im pojęcie zrównoważonego rozwoju,
- mieszkańcy Krakowa uznali, że za kształtowanie postaw proekologicznych odpowiedzialne są władze przede wszystkim miasta,
- społeczeństwo Małopolski oczekuje większego zaangażowania władz regionu w działania proekologiczne (informacja, promocja, przykłady dobrych praktyk),
- mieszkańcy województwa uznają, iż GOZ może mieć wpływ na poprawę jakości życia oraz zmniejszenie zużycia energii,
- mieszkańcy dostrzegają bezpośredni związek GOZ a ograniczeniem wytwarzania i składowania odpadów,
- kobiety zdecydowanie częściej podejmują działania proekologiczne, zarówno w większych miastach, jak i małych miejscowościach,
- większą wiedzą na temat GOZ mają osoby powyżej 45. roku życia niż bardzo młode.

Wyniki przeprowadzonych analiz, jak i dane z raportów dotyczących poziomu świadomości ekologicznej (Raport Stena Recykling 2017), wskazują na wzrost poczucia wpływu indywidualnego mieszkańca na stan środowiska. Osoby, które samodzielnie podejmują działania proekologiczne są bardziej przekonane o własnej sprawczości i z większym optymizmem rozszerzają aktywność na rzecz środowiska. Wzrasta również popularność zachowań konsumenckich wspierających ochronę środowiska. W większym stopniu działania prośrodowiskowe są podejmowane świadomie, a nie tylko jako efekt korzyści ekonomicznych. Społeczeństwo w dalszym ciągu uważa, że instytucje publiczne są w największym stopniu odpowiedzialne za edukację ekologiczną i to one powinny wdrażać działania informacyjne i prośrodowiskowe. Mieszkańców województwa małopolskiego cechuje znaczny poziom świadomości ekologicznej, co przekłada się na świadomych i w pełni odpowiedzialnych wyborów odnoszących się do poprawy jakości życia w regionie.

Literatura

- Ellen MacArthur Foundation, *Towards A Circular Economy: Business Rationale For An Accelerated Transition*, 2015, s. 2.
- Gliński P. 1988 – *Świadomość ekologiczna społeczeństwa polskiego – dotychczasowe wyniki badań*. „Kultura i Społeczeństwo” nr 3.

- Górka K., Poskrobko B. i Radecki W. 2001 – *Ochrona środowiska. Problemy społeczne, ekonomiczne i prawne*. Polskie Wydawnictwo Ekonomiczne, Warszawa.
- Jezior J. – *Metodologiczne problemy zastosowania Skali Likerta w badaniach postaw wobec bezrobocia*. Uniwersytet Marii Curie-Skłodowskiej, Lublin.
- Kulczycka J. i Smol M. 2016 – *Environmentally friendly pathways for the evaluation of investment projects using life cycle assessment (LCA) and life cycle cost analysis (LCCA)*. Clean Technologies and Environmental Policy 18(3), s. 829–842.
- Mapa drogowej transformacji w kierunku GOZ, MR Warszawa 2017 [www.mr.gov.pl].
- Pisano U. i in. 2015 – *The role of stakeholder participation in European sustainable development policies and strategies*. ESDN Quarterly Report, Vienna, s. 20.
- Raport pt. Działania proekologiczne Polaków a ich wiedza na temat gospodarki obiegu zamkniętego, <http://portal-komunalny.pl/trzy-czwarte-z-polakow-nie-slyszalo-o-gospodarce-obiegu-zamknietego-362929/>.
- Raport z analizy badań świadomości, postaw i zachowań ekologicznych Polaków przeprowadzonych w Polsce w latach 2009-2015 Analiza TNS Polska dla Ministerstwa Środowiska, 2015.
- Tuszyńska L. 2008 – *Diagnoza stanu edukacji środowiskowej społeczności lokalnych w wybranych regionach Polski*. Wyd. UW, Warszawa.

Projekt finansowany ze środków przeznaczonych na program finansowania badań naukowych i innowacji UE „Horyzont 2020” na podstawie umowy Nr 665778 o dofinansowanie działań „Marie Skłodowska-Curie”. Projekt finansowany ze środków Narodowego Centrum Nauki, konkurs POLONEZ. Numer rejestracyjny projektu 2015/19/P/HS4/02098.



Część II

Recykling

Katarzyna GRUDNIEWSKA*, Szymon BUJAK**, Weronika WIERZBICKA***,
Agnieszka SOBIANOWSKA-TUREK****

Odzysk metali z frakcji magnetycznej i niemagnetycznej odpadów samochodowych

STRESZCZENIE. Na świecie rośnie corocznie produkcja samochodów, co determinuje wzrost ilości odpadów samochodowych. W przypadku branży motoryzacyjnej odpadami są zarówno zużyte podzespoły, jak i całe pojazdy. Wyeksploatowane samochody trafiają do wyspecjalizowanych punktów – stacji demontażu, gdzie poddawane są procesom zaprojektowanym tak, by uzyskać jak najwyższy poziom recyklingu. W pracy przedstawiono wyniki prac badawczych dotyczących odzysku metali (Cd, Co, Cu, Fe, Mn, Ni i Zn) z frakcji magnetycznej i niemagnetycznej (4–2 cm) odpadów samochodowych metodą kwaśnego ługowania z wykorzystaniem 0,1M H₂SO₄ oraz 1M H₂SO₄ jako czynników ługujących w/bez obecności reduktora – H₂O₂. Dodatkowo określono wpływ stężenia zastosowanego czynnika ługującego na proces wydzielania badanych jonów metali.

Recovery of metal from magnetic and non-magnetic fractions of automobile waste

ABSTRACT. Car production in the world is growing every year, which determines the growth of automobile waste. In case of the automotive industry, waste is both components and whole vehicles. Used cars go to the specialist points – dismantling stations, where they are subjected to processes designed to achieve the highest level of recycling. This chapter presents the results of research work on the recovery of metals (Cd, Co, Cu, Fe, Mn, Ni and Zn) from magnetic and non-magnetic fraction (4–2 cm) of car waste by acid leaching using 0,1M H₂SO₄ and 1M H₂SO₄ as leaching agents in/without the presence of reducing agent – H₂O₂. In addition, the influence of the concentration of leaching agent applied to the process of the extraction of tested metal ions was determined.

* Dr inż., ** Mgr inż., Zakład Chemii Analitycznej i Metalurgii Chemicznej, Wydział Chemiczny, Politechnika Wroclawska, Wrocław.

*** Mgr inż., **** Dr inż., Zakład Technologii Odpadów i Remediacji Gruntów, Wydział Inżynierii Środowiska, Politechnika Wroclawska, Wrocław.

1. Wstęp

1.1. Materiały konstrukcyjne wykorzystywane w motoryzacji

Wytworzenie pojazdu samochodowego to skomplikowany proces, a jego podstawą jest wybór odpowiednich materiałów konstrukcyjnych, z których wytwarzane będą podzespoły. Podstawowy podział materiałów konstrukcyjnych dzieli je na cztery grupy: metale i ich stopy, polimery (tworzywa sztuczne), ceramikę oraz kompozyty (połączenie dwóch lub więcej powyższych materiałów inżynierskich w jeden) (Burzyńska-Szysko 2011). Powszechnie stosowane są wszystkie wymienione typy materiałów konstrukcyjnych, jednakże w pojazdach samochodowych znajduje się najwięcej elementów wykonanych z metali. Do najważniejszych należą stal, żeliwo, aluminium oraz magnez wykorzystywane w postaci stopów (Senkara 2009; Idzior 2007; Reguła i in. 2008). Oprócz stopów wykorzystywane są również metale w czystej postaci np. metale kolorowe, ołów, rtęć, tytan.

1.2. Produkcja pojazdów na świecie

Z roku na rok produkowane jest coraz więcej pojazdów. Informacje o trzech najprężniej działających w tym sektorze krajach przedstawiono w tabeli 1. Państwa te uporządkowano wg malejącej liczby wyprodukowanych pojazdów w 2015 roku. W celu porównania przedstawiono również dane produkcji samochodów w Polsce.

TABELA 1. Liczba wyprodukowanych samochodów w wybranych krajach w latach 2010–2015

Kraj/Rok	2015	2014	2013	2012	2011	2010
Cały świat	68 539 516	67 782 035	65 745 403	6 308 1024	59 897 273	58 239 494
Chiny	21 079 427	19 928 505	18 084 169	15 523 658	14 485 326	13 897 083
Japonia	7 830 722	8 277 070	8 189 323	8 554 503	7 158 525	8 310 362
Niemcy	5 707 938	5 604 026	5 439 904	5 388 459	5 871 918	5 552 409
Polska	534 700	472 600	47 5000	539 671	741 000	785 000

Źródło: Opracowanie własne na podstawie International Organization of Motor Vehicle Manufactures 2017.

W podanym przedziale lat liczba wyprodukowanych pojazdów samochodowych na świecie wzrosła o około 15%. Pod względem wielkości produkcji przodują dziś Chiny. Na drugim miejscu plasuje się Japonia, a na trzecim Niemcy, którzy wiodą pod tym względem prym w Europie. Polska zajmuje 23 miejsce w światowej produkcji i 8 w europejskiej.

1.3. Recykling pojazdów samochodowych

Obserwowany wzrost produkcji pojazdów samochodowych na świecie zwiększa zapotrzebowanie na surowce, co implikuje konieczność ich dostarczenia w coraz większej ilości do ich wytworzenia. Sposobem wydatnie przyczyniającym się do zmniejszenia stopnia eksploatacji złóż naturalnych surowców jest recykling. W myśl ustawy z 14 grudnia 2012 roku o odpadach (Dz.U. z 2013, poz. 21, z późn. zm.) poprzez recykling rozumie się odzysk, w ramach którego odpady są ponownie przetwarzane na produkty, materiały lub substancje wykorzystywane w pierwotnym lub innych celach.

W przypadku branży motoryzacyjnej odpadami są zarówno zużyte podzespoły, jak i całe pojazdy. Wyeksploatowane samochody trafiając do wyspecjalizowanych punktów – stacji demontażu – poddawane są procesom zaprojektowanym tak, by uzyskać jak najwyższy poziom recyklingu.

W Polsce z technicznego punktu widzenia recykling pojazdu można podzielić na trzy zasadnicze fazy: demontaż i osuszanie, strzępienie oraz zagospodarowanie odpadów postrzępiarkowych. To właśnie ostatni etap przetwarzania wyeksploatowanych pojazdów wydaje się być najbardziej problemowy dla przedsiębiorców. Polega on na segregacji i zagospodarowaniu odpadów postrzępiarkowych – *Automotive Shredded Residue* (ASR). Wyróżnia się cztery frakcje ASR powstałe w procesie strzępienia, tj: magnetyczną, niemagnetyczną, niemetaliczną oraz pyły (Kozłowski i in. 2009).

Frację magnetyczną (złom wsadowy) można stosunkowo łatwo oddzielić od innych grup odpadów postrzępiarkowych i przetransportować. Podstawową metodą zagospodarowania omawianej frakcji jest skierowanie jej do hut jako surowiec do wytopu stali. Pozostałe trzy frakcje są bardzo zróżnicowane pod względem materiałowym. W swoim składzie zawierają m.in. metale kolorowe, metale nieżelazne, niemetale, tworzywa sztuczne, gumy, drewno, drobne kawałki szkła, tkaniny i inne surowce, co w znacznej mierze stwarza trudności w odpowiednim, całkowitym ich zagospodarowaniu.

Metale kolorowe i nieżelazne są z reguły odseparowywane i kierowane do zakładów zajmujących się ich ponownym wykorzystaniem – często nie są składowane w punktach recyklingu pojazdów samochodowych. Pozostałe frakcje niemetaliczne nie nadają się do powtórnego wykorzystania z racji nieoptymalności procesu ich przetwarzania i są magazynowane na składowiskach odpadów. Problem ich wykorzystania częściowo rozwiązuje się poprzez wykorzystanie ich jako materiałów energetycznych. Jednakże jest to sposób tymczasowy, gdyż stanowi poważne zagrożenie dla środowiska z racji emisji gazów powstających po ich spalaniu (Kozłowski i in. 2009).

Obecnie stosuje się różne sposoby zagospodarowania odpadów ASR. Jednym z nich jest np. metoda recyklingu materiałowego, degradacja materiałów zawartych w ASR za pomocą tlenku tytanu (IV), użycie ASR do produkcji betonu oraz wykorzystanie ASR jako reduktora w spiekaniu i redukcji rud żelaza (Sicińska 2014; Dobrzański i Matuła 2012; Mayyas i in. 2017; Pera i in. 2014; Szypuła i Zdonek 2013; Wasielewski i in. 2008). Jednakże w ostatnich latach obserwuje się wzrost zainteresowania naukowców w zakresie badań dotyczących hydrometalurgicznego odzysku różnorodnych jonów metali z odpadów postrzępiarkowych z zastosowaniem metody ługowania, o czym świadczy szereg

regularnie publikowanych prac naukowych (Kurose i in. 2006; Joung i in. 2009; Pedersen i in. 2009; Granata i in. 2011; Ferella i in. 2015; Singh i Lee 2015, 2016).

W nawiązaniu do obecnych trendów badawczych przeprowadzono szereg eksperymentów, których głównym celem było oznaczenie składu jakościowo-ilościowego pierwiastków w poszczególnych frakcjach odpadów samochodowych. Ponadto, w myśl poczynionego przeglądu literatury, dokonano analizy wpływu stężenia czynnika ługującego na wydzielanie poszczególnych jonów metali.

2. Część badawcza

2.1. Materiał badawczy

Próbę odpadów samochodowych po strzępieniu uzyskano od profesjonalnej firmy zajmującej się demontażem i strzępieniem pojazdów. Całkowita masa zgromadzonego materiału wynosiła 8523 gramy. Otrzymane odpady postrzępiarkowe były zróżnicowane zarówno pod względem rozmiarowym, jak i materiałowym. W celu otrzymania próby reprezentatywnej przeznaczonej do dalszych eksperymentów badawczych przeprowadzono dwuetapowy proces przygotowania materiału składający się z analizy sitowej odpadów (sita o oczkach 8 cm, 4 cm i 2 cm) oraz materiałowej każdej przesianej frakcji (podział na cztery frakcje materiałowe: metaliczną magnetyczną, metaliczną niemagnetyczną, metale połączone w sposób trwały bądź trudny do rozdzielania z niemetalami (metal + niemetal) oraz niemetaliczną).

Po odsianiu i segregacji materiału badanego oraz zapoznaniu się z literaturą traktującą o metodach ługowania, do dalszych badań wybrano grupy materiałowe metali magnetycznych i niemagnetycznych uzyskane z frakcji sitowej o rozmiarze 4–2 cm.

2.2 Metodyka procesu ługowania materiału badawczego

W celu uzyskania reprezentatywności każdą frakcję materiałową rozdrobniono mechanicznie. Następnie odważono próbki poddane procesowi ługowania. Ekstrakcję prowadzono za pomocą roztworów 0,1M H₂SO₄ i 1M H₂SO₄, jako czynników ługujących z lub bez zastosowania H₂O₂ jako reduktora. Ustalony stosunek fazy ciekłej do fazy stałej (L:S) był równy 10:1. Ługowanie prowadzono w temperaturze pokojowej. Wszystkie próbki przez cały czas mieszano na wytrząsarce z prędkością 50 obrotów/minutę. W celu oznaczenia stężeń metali pobierano próbki roztworu po ługowaniu o objętości 1 ml i rozcieńczano wstępnie wodą redestylowaną do objętości 5 ml.

2.3. Metody analitycznego oznaczania pierwiastków

W celu oznaczenia stężeń metali w próbkach po ługowaniu posłużono się metodą Atomowej Spektrometrii Absorpcyjnej (ASA) z atomizacją w płomieniu. Urządzeniem używanym w tym celu był spektrometr SpectrAA-20Plus. Jako źródło promieniowania absorbowanego posłużył zestaw lamp z katodą wnątkową firmy Varian SpectrAA.

3. Otrzymane wyniki i ich omówienie

Przeprowadzono szereg badań dotyczących wpływu czynników ługujących na proces ługowania frakcji 4–2 cm. Proces był prowadzony w temperaturze pokojowej w czasie 24 godzin. Obie frakcje materiałowe, tj. metaliczną magnetyczną i metaliczną niemagnetyczną podzielono na 3 próbki i poddano procesom ługowania za pomocą roztworów: 0,1M H₂SO₄, 0,1M H₂SO₄ + H₂O₂ oraz 1,0M H₂SO₄ + H₂O₂. Otrzymane wyniki analiz zestawiono w tabeli 2.

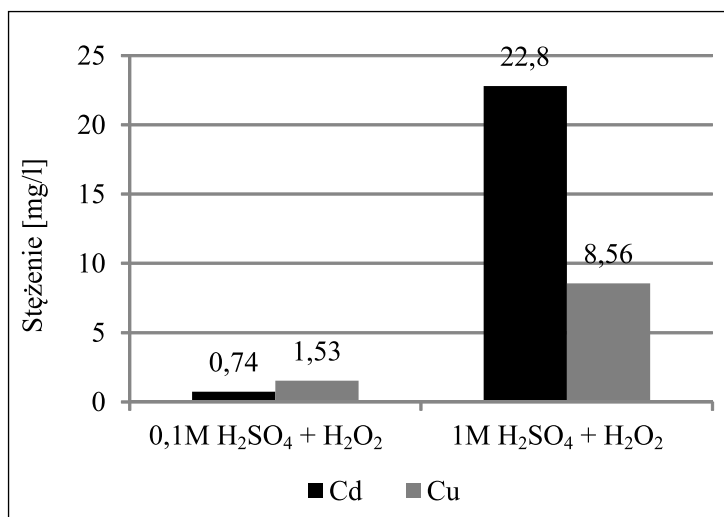
TABELA 2. Wpływ czynnika ługującego na wydzielenie jonów z frakcji 4–2 cm, t = 24 h

Czynnik ługujący	Frakcja materiałowa	Stężenia wybranych metali [mg/l]						
		Cd	Co	Cu	Fe	Mn	Ni	Zn
0,1M H ₂ SO ₄	metal. magn.	0,07	1,2	2,02	390	0,58	44,9	1 890
	metal. niemagn.	0,54	0,40	0,09	21,5	2,07	0,34	4 580
0,1M H ₂ SO ₄ + H ₂ O ₂	metal. magn.	0,11	2,21	LOD	3 320	10,1	33,0	191
	metal. niemagn.	0,74	0,19	1,53	8,49	2,45	0,47	1 930
1,0M H ₂ SO ₄ + H ₂ O ₂	metal. magn.	LOQ	1,67	1,41	14 700	41,5	222	1 570
	metal. niemagn.	22,8	LOQ	8,56	52,7	0,47	0,85	9 400

Objaśnienia: metal. magn. – metaliczna magnetyczna, metal. niemagn. – metaliczna niemagnetyczna, LOD – poniżej granicy wykrywalności, LOQ – poniżej granicy oznaczalności

Źródło: opracowanie własne.

Przedstawione wyniki badań wykazały, że stężenia poszczególnych jonów metali w roztworze po ługowaniu 0,1M H₂SO₄ malały dla frakcji metalicznej magnetycznej w kolejności: Zn > Fe > Ni > Co > Cu > Mn > Cd, natomiast dla metalicznej niemagnetycznej: Zn > Fe > Mn > Cd > Co > Ni > Cu. Dodatkowo zauważono, że zawartości jonów Co, Cu, Fe i Ni w roztworze po ługowaniu były wyższe w frakcji magnetycznej niż w frakcji niemagnetycznej. Jony Co występowały w stężeniu 28 razy większym, Cu około 22,4 razy, Fe około 18,1 razy, a Ni aż 132 razy. Dla jonów Cd, Mn i Zn stężenia były wyższe we frakcji niemagnetycznej, w której jonów Cd było około 7,71 razy więcej, Mn około 3,57 razy, a Zn około 2,42 razy. Zależność tę dla jonów Cu i Mn pokazano na rysunku 1.

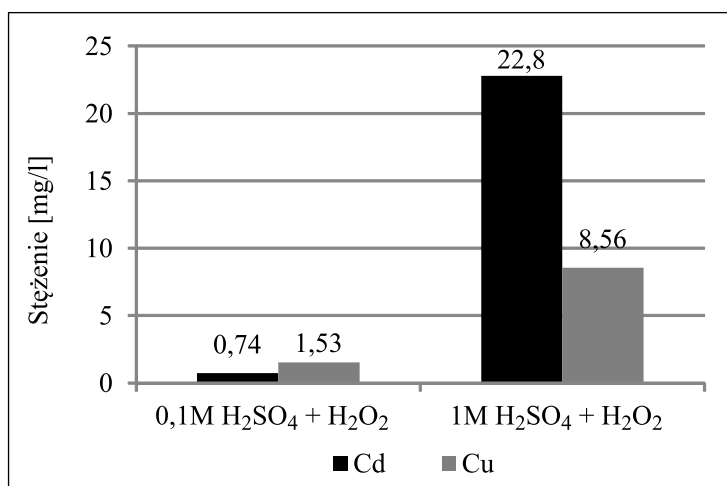


Rys. 1. Zawartość jonów Cu i Mn w magnetycznej i niemagnetycznej frakcji metalicznej 4–2 cm, 0,1M H₂SO₄
 Źródło: opracowanie własne

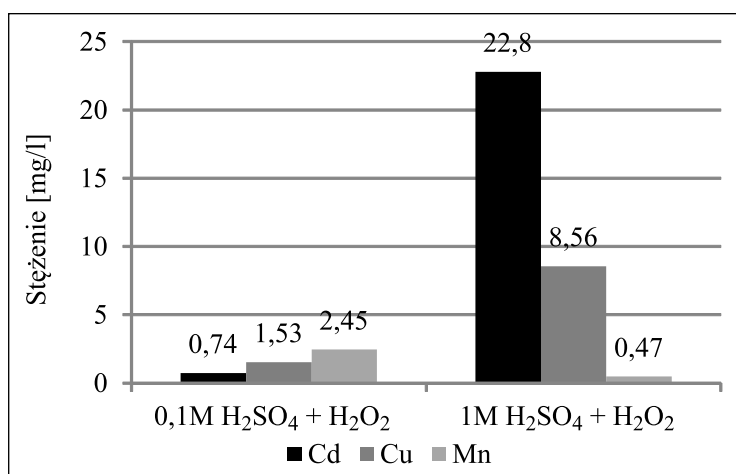
Podczas ługowania roztworem 0,1M H₂SO₄ z dodatkiem H₂O₂ stężenia kationów metali we frakcji metalicznej magnetycznej malały w innej kolejności niż podczas zastosowania 0,1M H₂SO₄ bez dodatku H₂O₂. Najwyższe stężenia odnotowano dla kationów Fe (3320 mg/l), następnie jonów: Zn (191 mg/l), Ni (33,0 mg/l), Mn (10,1 mg/l), Co (2,21 mg/l), a najniższe 0,11 mg/l dla kationów Cd. Zauważono, że zawartość jonów Cu była poniżej granicy wykrywalności. Dla metalicznej frakcji niemagnetycznej kolejność również się zmieniła i malejąco przedstawiała się następująco: Zn (1930 mg/l) > Fe (8,49 mg/l) > Mn (2,45 mg/l) > Cu (1,53 mg/l) > Cd (0,74 mg/l) > Ni (0,47 mg/l) > Co (0,19 mg/l). Zaobserwowano, że we frakcji magnetycznej stężenia jonów Co, Fe, Mn i Ni były wyższe niż w niemagnetycznej, natomiast dla kationów Cd, Cu i Zn sytuacja była odwrotna. Dla jonów Cd i Co zobrazowano tę zależność na rysunku 2.

Dodatek nadtlenu wodoru miał na celu sprawdzenie wpływu tego czynnika na zwiększenie zdolności utleniającej 0,1M H₂SO₄. Zauważono, że dla metalicznej frakcji magnetycznej dodatek ten spowodował zwiększenie stężenia wyługowanych jonów metali: Cd, Fe i Mn o odpowiednio około 1,57, 11,4 i 17,4 razy. Jednocześnie spowodował on zmniejszenie stężenia dla jonów Co, Ni, Zn. Inną zależność zauważono dla metalicznej frakcji niemagnetycznej, gdzie stężenia jonów Cd, Cu, Mn wzrosły, natomiast stężenie kationów Co spadło o około 2,10 razy, Fe o około 2,53 razy, a Zn o około 2,37 razy. Stwierdzono więc, że dodatek nadtlenu wodoru nie powoduje wzrostu stężenia wyługowanych jonów dla każdego z oznaczanych metali. Dla wybranych jonów zależność tę we frakcji magnetycznej obrazuje rysunek 3.

W procesie ługowania 1M H₂SO₄ + H₂O₂ najwyższe zawartości badanych jonów metali dla próbki metalicznej magnetycznej uzyskano dla kationów Fe – 14 700, Zn – 1570 i Ni – 222 mg/l. Najniższe natomiast dla jonów Mn – 41,5, Co – 1,67 i Cu – 1,41 mg/l.



Rys. 2. Zawartość jonów Cd i Co w magnetycznej i niemagnetycznej frakcji metalicznej 4–2 cm, 0,1M H₂SO₄ + H₂O₂
 Źródło: Opracowanie własne

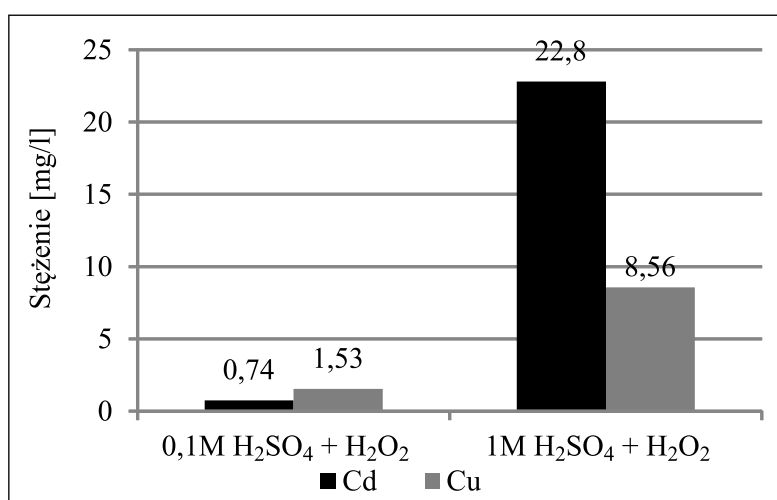


Rys. 3. Wpływ dodatku H₂O₂ na ługowanie kationów Co, Mn i Ni w metalicznej magnetycznej frakcji 4–2 cm, 0,1M H₂SO₄
 Źródło: Opracowanie własne

Stężenie jonów Cd w tej frakcji było poniżej granicy oznaczalności. Wykazano, że zawartość jonów dla frakcji metalicznej niemagnetycznej malała w kolejności: Zn (9 400 mg/l) > Fe (52,7 mg/l) > Cd (22,8 mg/l) > Cu (8,56 mg/l) > Ni (0,85 mg/l) > Mn (0,47 mg/l). W tym przypadku to jony Co były w stężeniu poniżej granicy oznaczalności. Koncentracja kationów Fe, Ni, Mn, i Co była wyższa we frakcji magnetycznej (odpowiednio o około

279, 261 i 88,3 razy), zaś jonów Cu, Zn i Cd w niemagnetycznej (w przypadku Cu i Zn o około 6 razy).

Porównując wpływ stężenia kwasu siarkowego(VI) na proces ługowania frakcji 4–2 cm zaobserwowano, że wraz ze zwiększeniem czynnika ługującego zwiększa się zawartość w frakcji metalicznej magnetycznej jonów: Cu z poziomu poniżej limitu detekcji do 1,41 mg/l, Fe z 3 320 do 14 700 mg/l, Mn z 10,1 do 41,5 mg/l, Ni z 33,0 do 222 mg/l, a Zn z 191 do 1 570 mg/l. Jednocześnie wyższe stężenie kwasu siarkowego(VI) spowodowało spadek zawartości wyługowanych kationów: Cd z 0,11 mg/l do poziomu poniżej granicy oznaczalności i Co z 2,21 do 1,67 mg/l. Wyniki te dla jonów Co i Mn obrazuje rysunek 4.



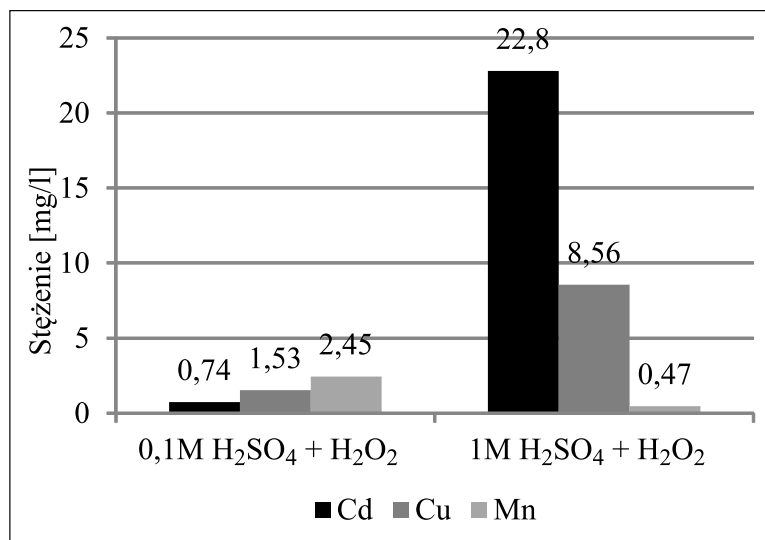
Rys. 4. Wpływ stężenia H₂SO₄ z dodatkiem H₂O₂ na ługowanie metali Co i Mn z metalicznej frakcji magnetycznej 4–2 cm

Źródło: Opracowanie własne

Zależności te dla frakcji metalicznej niemagnetycznej przedstawiają się inaczej. Stężenie jonów Cd wzrosło z 0,74 do 22,8, Cu z 1,53 do 8,56, Fe z 8,49 do 52,7, Ni z 0,47 do 0,85, a Zn z 1930 do 9400 mg/l. Jednocześnie zawartość jonów Co zmalała z 0,19 mg/l do poziomu poniżej granicy oznaczalności, a jonów Mn z 2,45 do 0,47 mg/l. Zależność tę przedstawiono na rysunku 5.

4. Podsumowanie

Przeprowadzone badania procesu ługowania odpadów postrzępiarkowych pozwoliły określić wpływ czynników ługujących na efektywność wydzielenia jonów oznaczanych metali. Na podstawie uzyskanych wyników eksperymentów można jednoznacznie stwierdzić, że możliwe jest wydzielenie jonów metali Cd, Co, Cu, Fe, Mn, Ni i Zn z odpadów postrzępiarkowych w procesie ługowania odczynnikami: 0,1M H₂SO₄, 0,1M H₂SO₄ + H₂O₂ oraz



Rys. 5. Wpływ stężenia H₂SO₄ z dodatkiem H₂O₂ na ługowanie metali Cd, Cu i Mn z metalicznej frakcji niemagnetycznej 4–2 cm
Źródło: Opracowanie własne

1M H₂SO₄ + H₂O₂. Rodzaj zastosowanego odczynnika silnie wpływał na wartość stężenia wydzielanego metalu. Dla frakcji sitowej 4–2 cm stężenia kationów malały w kolejności: przy 0,1M H₂SO₄:

- frakcja magnetyczna: Zn, Fe, Ni, Co, Cu, Mn, Cd,
- frakcja niemagnetyczna: Zn, Fe, Mn, Cd, Co, Ni, Cu,

przy 0,1M H₂SO₄ + H₂O₂:

- frakcja magnetyczna: Fe, Zn, Ni, Mn, Co, Cd, Cu,
- frakcja niemagnetyczna: Zn, Fe, Mn, Cu, Cd, Ni, Co,

przy 1M H₂SO₄ + H₂O₂:

- frakcja magnetyczna: Fe, Zn, Ni, Mn, Co, Cu, Cd,
- frakcja niemagnetyczna: Zn, Fe, Cd, Cu, Ni, Mn, Co.

Ponadto wpływ dodatku nadtlenu wodoru spowodował wzrost zawartości jonów metali Cd, Fe i Mn i jednocześnie spadek stężenia jonów Co, Cu, Ni i Zn w roztworze po ługowaniu frakcji magnetycznej, a we frakcji niemagnetycznej doszło do wzrostu stężenia Cd, Cu, Mn i Ni z jednoczesnym spadkiem dla jonów Co, Fe i Zn.

Badania wykazały, że poszczególne frakcje sitowe nie różnią się składem jakościowym badanych jonów Cd, Co, Cu, Fe, Mn, Ni i Zn, natomiast różnią się ich zawartością. Wykazano, że w przebadanej frakcji magnetycznej największe jest stężenie jonów Fe, zaś w frakcji niemagnetycznej – Zn. Przeprowadzone eksperymenty ługowania postrzępiarkowych odpadów samochodowych są bardzo istotnym działaniem mającym na celu nie tylko poznanie składu ilościowo-jakościowego jonów metali zawartych w próbce, ale także mogą posłużyć jako wstępny etap procesu odzysku kationów.

Literatura

- Burzyńska-Szysko M. 2011 – *Materiały konstrukcyjne*. Politechnika Warszawska, Wydz. Samochodów i Maszyn Roboczych, Warszawa.
- Dobrzański L.A. i Matula G. 2012 – *Podstawy metalurgii proszków i materiały spiekane*. Open Access Library nr 14, s. 87–91.
- Ferella F., De Michelis I., Scocchera A., Pelino M., Vegliò F. 2015 – *Extraction of metals from automotive shredder residue: Preliminary results of different leaching systems*. Chinese Journal of Chemical Engineering, nr 23, s. 417–424.
- Granata G., Moscardini E., Furlani G., Pagnanelli F. i Toro L. 2011 – *Automobile shredded residue valorisation by hydrometallurgical metal recovery*. Journal of Hazardous Materials nr 185, s. 44–48.
- Idzior M. 2007 – *Kierunki zmian materiałowych w motoryzacji w świetle wymogów ekologii*. Motrol nr 9, s. 72–87.
- International Organization of Motor Vehicle Manufacturers 2017, <http://www.oica.net/category/production-statistics/> (31.08.2017).
- Joung H.-T., Cho S.-J., Seo Y.Ch. i Kim W.H. 2009 – *Status of recycling end-of-life vehicles and efforts to reduce automobile shredder residues in Korea*. Journal of Material Cycles and Waste Management nr 2, s. 159–166.
- Kozłowski J., Czyżyk H. i Lewandowski D. 2009 – *Recykling złomu samochodowego*. Recykling nr 106, s. 20–22.
- Kurose K., Okuda T., Nishijima W. i Okada M. 2006 – *Heavy metals removal from automobile shredder residues (ASR)*. Journal of Hazardous Materials nr 137, s. 1618–1623.
- Mayyas M., Pahlevani F., Maroufi S., Liu Z. i Sahajwalla V. 2017 – *Waste conversion into high-value ceramics: Carbothermal nitridation synthesis of titanium nitride nanoparticles using automotive shredder waste*. Journal of Environmental Management nr 188, s. 32–42.
- Pedersen A.J., Frandsen F.J., Riber C., Astrup T., Thomsen S.N., Lundtorp K. i Mortensen L.F. 2009 – *A Full-scale Study on the Partitioning of Trace Elements in Municipal Solid Waste Incinerations Effects of Firing Different Waste Types*. Energy & Fuels nr 23, s. 3475–3489.
- Pera J., Ambroise J. i Chabannet M. 2014 – *Valorization of automotive shredder residue in building materials*. Cement and Concrete Research nr 34, s. 557–562.
- Reguła T., Bronicki M., Lech-Grega M. i Czekaj E. 2008 – *Ocena możliwości kształtowania właściwości mechanicznych odlewniczego stopu magnezu AZ91 przez zastosowanie odpowiedniej obróbki cieplnej*. Prace Instytutu Odlewnictwa tom 48, zeszyt 1, s. 39–45.
- Senkara J. 2009 – *Współczesne stale karoseryjne dla przemysłu motoryzacyjnego i wytyczne technologiczne ich zgrzewania*. Przegląd spawalnictwa nr 11, s. 3–7.
- Sicińska K. 2014 – *Przyjazna środowisku technologia odzysku pozostałości ze strzępienia odpadów z pojazdów wycofanych z eksploatacji*. Transport samochodowy nr 1, s. 83–92.
- Singh J. Lee B. K. 2015 – *Hydrometallurgical recovery of heavy metals from low grade automobile shredder residue (ASR): An application of advanced Fenton process (AFP)*. Journal of Environmental Management 161, s. 1–10.
- Singh J. i Lee B.K. 2016 – *Recovery of precious metals from low-grade automobile shredder residue: A novel approach for the recovery of nanozero-valent copper particles*. Waste Management 48, s. 353–365.
- Szypuła I. i Zdonek B. 2013 – *Badania przydatności materiałów zawierających związki organiczne jako reduktorów do spiekania i redukcji rud żelaza oraz odpadów żelazonośnych*. Instytut Metalurgii Żelaza, s. 36–44.
- Wasielowski R., Robak Z. i Stelmach S. 2008 – *Badania rozkładu termicznego odpadów pochodzących ze strzępienia samochodów wycofanych z eksploatacji*. KARBO 3, s. 149–156.

Agnieszka GURGUL*, Włodzimierz SZCZEPANIAK**, Monika ZABŁOCKA-MALICKA***

Termiczny proces odzysku surowców z odpadów elektronicznych – zgazowanie parą wodną

STRESZCZENIE. Odpady zawierające komponenty elektroniczne charakteryzują się złożoną i scaloną budową oraz zawartością metali, które z ekonomicznego i ekologicznego punktu widzenia, powinny być poddawane procesowi recyklingu. Celem prowadzonych badań jest opracowanie metody, która pozwoli na efektywny odzysk metali z odpadów zawierających elementy elektroniczne przy jednoczesnej maksymalnej eliminacji faz organicznych spajających strukturę płyty obwodu drukowanego. Proponowane rozwiązanie wykorzystuje proces zgazowania odpadów elektronicznych w atmosferze pary wodnej. Proces przeprowadzany jest w skali laboratoryjnej w poziomym reaktorze kwarcowym w temperaturze sięgającej 850–900°C. W trakcie procesu zgazowania zachodzi dekompozycja żywic epoksydowych, które są głównym materiałem spajającym strukturę obwodu drukowanego. Produktem procesu jest pozostałość stała, która jest praktycznie oczyszczona z substancji organicznych i przygotowana do dalszego odzysku metali oraz palny gaz, który potencjalnie może mieć zastosowanie energetyczne.

Thermal processing for recovering raw materials from electronic waste – steam gasification

ABSTRACT. Waste containing electronic components is characterized by complex and integrated construction. Additionally high content of metals in this type of waste, from an economic and ecological point of view, should be recycled. The aim of the research is to develop a method that will allow effective recovery of metals from electronic waste while eliminating the organic phase that bonds the printed circuit board. The proposed solution uses the process of steam gasification. The process is carried out on a laboratory scale in a horizontal quartz reactor at temperatures up to 850–900°C. During the gasification process decomposition of the epoxy resins takes place, which are the main materials that bond the printed circuit board structure. The process products are a solid residue which is practically without organic substances and is prepared for further metal recovery and combustible gas which potentially has an energy application.

* Mgr inż., ** Prof. dr hab. inż., Politechnika Wroclawska, Wydział Inżynierii Środowiska, Zakład Technologii Odpadów i Remediacji Gruntów; email: agnieszka.gurgul@pwr.edu.pl

*** Dr inż., Politechnika Wroclawska, Wydział Chemiczny, Zakład Chemii Analitycznej i Metalurgii Chemicznej.

1. Wstęp

W związku z rosnącą światową produkcją urządzeń elektronicznych, rośnie również ilość odpadów zawierających komponenty elektroniczne składające się głównie z obwodów drukowanych (ang. *Printed Circuit Board*). W przypadku odpadów elektronicznych istotną barierą dla recyklingu jest ich złożona i scalona budowa. Elementy takie składają się z tworzyw sztucznych, które mają wysoki potencjał energetyczny oraz metali, których odzysk jest kluczowy ze względu na intensywną eksploatację zasobów naturalnych oraz ich wartość ekonomiczną. Spośród metali, które stanowią około 40% wagowych obwodów drukowanych, największy udział mają Cu, Al, Pb, Zn, Ni, Fe i Sn (Andrade i in. 2014). Włókno szklane wzmacniane żywicą epoksydową lub papier celulozowy wzmacniany żywicą fenolową to dominująca faza niemetaliczna, stanowiąca około 30% wagowych obwodu drukowanego (Fraga i in. 2013). W skład elementów obwodów drukowanych mogą wchodzić też dodatki, które modyfikują ich właściwości materiałowe. Przykładami takich substancji są bromowe środki uniepalniające, polichlorowane bifenyle, freony, chloro- i fluorowęglowodory i azbest. Obecność substancji organicznych w strukturze odpadów elektronicznych ma istotne znaczenie ze względu na potencjalne emisje z procesów ich przetwarzania. Budowa i skład materiałowy urządzeń elektronicznych stale się zmienia wraz z rozwojem technologii, co dodatkowo utrudnia prowadzenie ich recyklingu.

Wymienione powyżej właściwości odpadów elektronicznych powodują, że recykling ich strumienia jest ograniczony. Szacuje się, że odpady elektroniczne są jednym z najszybciej rosnących strumieni w UE, których roczne wytwarzanie to 10 mln Mg (Eurostat). Opracowanie efektywnej metody odzysku materiałowego odpadów elektronicznych jest istotnym zagadnieniem, z uwagi na ograniczone zasoby surowców naturalnych oraz ich wartość ekonomiczną. Celem badań prowadzonych w Laboratorium Procesów Termicznych Zakładu Technologii Odpadów i Remediacji Gruntów, Wydziału Inżynierii Środowiska Politechniki Wrocławskiej jest opracowanie metody, która pozwoli na efektywny odzysk metali z odpadów zawierających elementy elektroniczne, przy jednocześnie maksymalnej eliminacji faz organicznych spajających strukturę płyty obwodu drukowanego.

2. Zgazowanie

Zgazowanie jest procesem prowadzonym w temperaturach bliskich 1000°C w obecności czynnika utleniającego, którym może być tlen, powietrze, ditlenek węgla, a także para wodna. Celem procesu zgazowania jest przekształcenie ciała stałego (paliwa, odpadu) w gaz, który składa się głównie z wodoru, tlenku węgla, metanu, dwutlenku węgla, azotu i pary wodnej. Skład gazu może się zmieniać w zależności od warunków prowadzenia procesu, surowców oraz użytego czynnika zgazowującego. Produkt gazowy jest palny i po dalszym oczyszczeniu może być wykorzystywany energetycznie lub jako surowiec (tzw. gaz syntezowy).

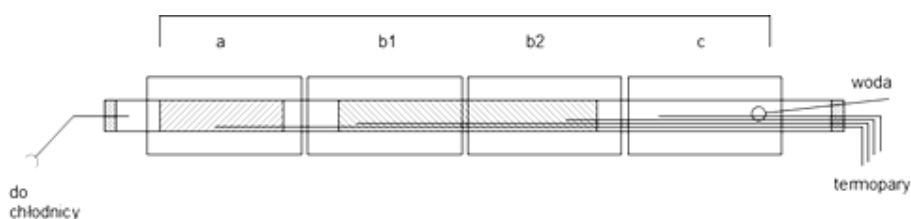
Analizując ilość wytwarzanych odpadów elektronicznych oraz ich skład materiałowy wydaje się jednak, że zagadnieniem priorytetowym w recyklingu tych odpadów nie jest

produkcja gazu, ale odzyskiwanie surowców metalicznych. Dlatego głównym produktem tak rozumianego procesu zgazowania jest nieorganiczna pozostałość stała, która składa się głównie z metali, włókien szklanych oraz części mineralnej. W Laboratorium Procesów Termicznych prowadzone są badania wykorzystujące proces allotermicznego zgazowania materiałów w atmosferze nadmiaru pary wodnej, także odpadów elektronicznych, z odzyskiem faz metalicznych, mineralnych oraz gazu bogatego w wodór (Mońka i in. 2011; Zabłocka-Malicka i in. 2015). Proces zgazowania pozwala na całkowite usunięcie z odpadu elektronicznego frakcji organicznych z jednoczesnym pozostawieniem mineralnej pozostałości stałej, z której możliwe jest odzyskanie metali.

2.1. Zgazowanie odpadów elektronicznych parą wodną

Wykorzystanie procesu zgazowania w celu przetwarzania odpadów elektronicznych nie jest koncepcją szeroko omawianą w literaturze i często jest utożsamiane ze stosowaniem pirolizy. Jednocześnie metoda ta została opisana i zaakceptowana, w odniesieniu do odpadów komunalnych (Arena 2012). Badania wykorzystujące proces zgazowania prowadzone na skalę laboratoryjną koncentrują się m.in. na przetwarzaniu tworzyw sztucznych zawartych w obwodach drukowanych do gazu bogatego w wodór (Acomb i in. 2013). Prowadzone są również badania dotyczące zgazowania odpadów elektronicznych w obecności katalizatorów w celu eliminacji faz organicznych i odzysku surowców (Salbidegoitia i in. 2015; Zhang 2016).

Elementami elektronicznymi, które są badane w Laboratorium Procesów Termicznych Politechniki Wrocławskiej są m.in. obwody drukowane FR-4, dyski pamięci RAM oraz inwertery matrycy. Zgazowanie złożonych odpadów jest przeprowadzane w poziomym reaktorze kwarcowym, którego schemat przedstawiono na rysunku 1.



Rys. 1. Reaktor użyty w procesie zgazowania – rura kwarcowa o średnicy wewnętrznej 36 mm. a, b1, b2 oraz c – piece rurowe ogrzewające odpowiednio: strefę konwersji gazów procesowych, strefy zgazowania i strefę wytwarzania i dogrzewania pary wodnej

Reaktor składa się z rury kwarcowej o długości 1200 mm i średnicy wewnętrznej 36 mm. Jest on ogrzewany czterema piecami rurowymi, które są niezależnie sterowane regulatorami temperatury, co umożliwia wydzielenie czterech stref: a – konwersji gazów procesowych z materiałem o potencjalnych właściwościach katalitycznych, b – zgazowania, z podziałem na dwie podstrefy oraz c – generowania pary wodnej z dogrzaniem pary do wymaganej

temperatury. Temperatura w poszczególnych strefach mierzona jest zespołem czterech termopar typu K.

Wodę do wytwarzania pary podawano za pomocą pompy perystaltycznej, a fazę gazową z procesu zgazowania kierowano do chłodnicy Liebiga. Kondensat gromadzono w wymiennalnych kolbach miarowych, natomiast ochłodzone gazy kierowano do płuczki zawierającej roztwór NaOH. Gazem nośnym oraz jednocześnie reagentem w badanym procesie była para wodna podawana w nadmiarze. Celem procesu przeprowadzonego w ten sposób była eliminacja faz organicznych z odpadu, połączona z usunięciem węglowej pozostałości pirolitycznej i konwersją produktów etapu pirolitycznego w odpowiednio wysokiej temperaturze do prostych związków (szczególnie wodoru i tlenku węgla), skutkująca ograniczeniem tworzenia się smół i faz olejowych.

Materiał poddawany procesowi zgazowania umieszczono w reaktorze kwarcowym rozdzielając poddawany zgazowaniu materiał i wypełnienie strefy konwersji kwarcową rurką dystansową i osłaniając obustronnie materiał przegrodami z ogniotrwałej maty mineralnej. Przygotowany reaktor przedstawiono na rysunku 2.



Rys.2. Przygotowany do zgazowania materiał odpadów elektronicznych (inwerterów matrycy) wraz z wypełnieniem strefy wspomagania konwersji gazów (granule po lewej)

Źródło: Gurgul, PWr, W7/Z2

Wypełniony reaktor umieszczono w ciągu pieców rurowych i zamknięto masą silikonową, w której zatopiono doprowadzenie wody i odprowadzenie gazów procesowych. Po złożeniu całego układu wszystkie strefy reaktora wygrzano wstępnie przez dobę w temperaturze około 100–150°C. Następnie ogrzano (z szybkością 20°C/min.) strefy wspomagania konwersji i wytwarzania pary wodnej do temperatur odpowiednio 800 i 600°C. Kontynuując ogrzewanie obu stref rozpoczęto podawanie wody i wytwarzanie pary oraz powolne (3°C/min) ogrzewanie sekcji zawierających zgazowywany materiał. Podczas eksperymentu cały układ ogrzano do maksymalnej temperatury około 900°C. Eksperyment zakończono po ponad 6 godzinach. Wtedy rozpoczęto schładzanie wszystkich stref z początkową szybkością 20°C min., a od mniej więcej 600°C ochładzanie odbywało się w sposób naturalny. Po ochłodzeniu układu reaktor zdemontowano. Na rysunku 3 przedstawiono wygląd reaktora kwarcowego po procesie zgazowania wraz z umieszczoną w nim próbą odpadów elektronicznych, natomiast na rysunku 4 przedstawiono usunięte z reaktora po procesie inwertery matrycy.

Podczas procesu zgazowania, część organiczna, która spaja strukturę obwodu drukowanego, została usunięta i produktem końcowym była część nieorganiczna składająca się głównie z metali i frakcji mineralnej. Pozostałości stałe z tak przeprowadzonego procesu są materiałem, który może następnie zostać poddany procesom chemicznym w celu odzyskania faz metalicznych w typowych procesach metalurgicznych.



Rys. 3. Reaktor z odpadami inwerterów i wypełnieniem strefy wspomagania konwersji gazów po procesie zgazowania

Źródło: Gurgul, PWr, W7/Z2



Rys. 4. Materiał inwerterów po procesie zgazowania

Źródło: Gurgul, PWr, W7/Z2

3. Możliwości dalszego przetwarzania produktów zgazowania

Metale stanowią ok. 40% masowych obwodów drukowanych, które są ważnym elementem większości urządzeń elektronicznych (Williams 2010). W tabeli 1 przedstawiono udział poszczególnych metali w budowie obwodów drukowanych. Odzysk surowców z odpadów elektronicznych, które mogą zostać ponownie wykorzystane w produkcji, znacznie obniża koszty technologiczne oraz środowiskowe.

W odzysku metali szlachetnych z odpadów elektronicznych wykorzystywane są najczęściej metody hydrometalurgiczne. Proces ługowania może być przeprowadzany różnymi czynnikami ługującymi, które dobiera się na podstawie składu chemicznego surowca, koncentracji metalu czy wymagań technicznych (Cui i Zhang 2008). Następnie powstające roztwory są poddawane procesom rozdzielania i oczyszczania. Najczęściej stosowanymi czynnikami ługującymi w odzysku metali z odpadów elektronicznych są: cyjanki, halogenki, tiosiarczany, tiomocznik. Również metale szlachetne mogą być odzyskiwane z PCB z wysoką skutecznością, sięgającą 96% (Park i Fray 2009).

Wysokie stężenie chlorków, bromków i związków organicznych jest niekorzystne w metalurgicznym przetwarzaniu odpadów elektronicznych. Proces zgazowania, który poprzedza ługowanie, pozwala na usunięcie substancji organicznych zawierających chlor i brom i dzięki temu ułatwia proces ługowania. Celem zgazowania w wysokiej temperaturze jest maksymalna eliminacja faz organicznych łączących strukturę płytki obwodów drukowanych

TABELA 1. Udział masowy metali w budowie obwodu drukowanego

Materiał	Udział, wt. % [ppm]
Cu	10–26.8
Al	1.33–4.78
Pb	0.99–4.19
Zn	0.16–2.17
Ni	0.28–2.35
Fe	1.22–8.0
Sn	1.0–5.28
Sb	0.06–0.4
Au	80–1000 ppm
Pt	4.6–30 ppm
Ag	110–3300 ppm
Pd	10–294 ppm

Źródło: Williams 2010.

z nietopnych faz metalicznych i mineralnych. Wraz z usunięciem organicznych substancji spajających PCB (głównie żywic epoksydowych), struktura obwodu drukowanego otwiera się, co zwiększa możliwości penetracji materiału przez roztwory ługujące. Ilustruje to fotografia przedstawiona na rysunku 5.



Rys. 5. Otwarta struktura obwodu drukowanego po procesie zgazowania

Źródło: Gurgul, PWr, W7/Z2

4. Wnioski

Odpady elektroniczne są grupą odpadów zawierających wysoki udział metali oraz substancji organicznych. Ze względu na ograniczone ilości surowców metalicznych, opracowanie technologii recyklingu odpadów elektronicznych jest ważną kwestią. Efektywne przetwarzanie i recykling odpadów pochodzących z urządzeń elektrycznych i elektronicznych powinno charakteryzować się optymalizacją odzysku surowców, jak również eliminacją od-

padów i emisji do atmosfery. W przedstawionym procesie zgazowania jedynym reagentem jest para wodna. Brak obecności powietrza powoduje, że emisje występują dopiero przy ewentualnym energetycznym wykorzystaniu tzw. syngazu. Z kolei zawrót kondensatu wraz z wydzielonymi frakcjami węglowodorowymi eliminuje ścieki technologiczne. Proces zgazowania, jako pierwszy etap przetwarzania PCB powoduje usunięcie chlorków, bromków oraz związków organicznych, których wysokie stężenie jest niekorzystne w metalurgicznym przetwarzaniu tego typu odpadów.

Literatura

- Acomb J.C., Anas Nahil M. i Williams P.T. 2013 – *Thermal processing of plastics from waste electrical and electronic equipment for hydrogen production*. Journal of Analytical and Applied Pyrolysis (103), s. 320–327.
- Arena U. 2012 – *Process and technological aspects of municipal solid waste gasification. A review*. Waste Management (32), s. 625–639.
- Cui J. i Zhang L. 2008 – *Metallurgical recovery of metals from electronic waste: A review*. Journal of Hazardous Materials, s. 228–256.
- de Andrade V.F., Bizzo W.A. i Figureiro R.A. 2014 – *Characterization of Printed Circuit Boards for Metal and Energy Recovery after Milling and Mechanical Separation*. Materials (7), s. 4555–4566.
- de Fraga C.A., Marques A.C., Marrero J.M. 2013 – *A review of the recycling of non-metallic fractions of printed circuit boards*. SpringerPlus (2), s. 521.
- Eurostat (<http://ec.europa.eu/eurostat/web/waste/key-waste-streams/weee>)
- Mońka P., Szczepaniak W. i Zabłocka-Malicka M. 2011 – *Gasification of RAM memory waste*. Czasopismo Techniczne. Ch. Chemia (108), s. 119–126.
- Park Y.J. i Fray D.J. 2009 – *Recovery of high purity precious metals from printed circuit boards*. Journal of Hazardous Materials (164), s. 1152–1158.
- Salbidegoitia J.A., Fuentes-Ordóñez E.G., Gonzalez-Marcos M.P., Gonzalez-Velasco J.R., Bhaskar T. i Kamo T. 2015 – *Steam gasification of printed circuit board from e-waste: Effect of coexisting nickel to hydrogen production*. Fuel Processing Technology (133), s. 69–74.
- Williams P.T. 2010 – *Valorization of Printed Circuit Boards from Waste Electrical and Electronic Equipment by Pyrolysis*. Waste Biomass Valor (1), s. 107–120.
- Zabłocka-Malicka M., Rutkowski P. i Szczepaniak W. 2015 – *Recovery of copper from PVC multiwire cable waste by steam gasification*. Waste Management (46), s. 488–496.
- Zhang S. i Yu Y. 2016 – *Dechlorination behavior on the recovery of useful resources from WEEE by the steam gasification in the molten carbonates*. Procedia Environmental Sciences (31), s. 903–910.

Karolina KOSSAKOWSKA*, Katarzyna GRZESIK**, Bogusław BIEDA***,
Ryszard KOZAKIEWICZ**

Możliwości pozyskiwania metali ziem rzadkich z odpadów poflotacyjnych i górniczych

STRESZCZENIE. Metale ziem rzadkich (REE) w Komunikacie Komisji (COM/2014/0297) uznane są jako surowce krytyczne tj. mające duże znaczenie gospodarcze i jednocześnie o dużym ryzyku niedoboru dostaw. Głównym producentem REE są Chiny, natomiast w Europie nie ma kopalni eksploatujących zasoby naturalne w celu produkcji metali ziem rzadkich. Z drugiej strony na terenie Europy znajdują się zasoby wtórne, takie jak odpady górnicze i poflotacyjne, które mogą być potencjalnym źródłem pozyskiwania metali ziem rzadkich. Międzynarodowy projekt ENVIREE finansowany z programu ERA-MIN ma na celu opracowanie nowatorskich metod odzysku metali ziem rzadkich ze źródeł wtórnych. W pracy scharakteryzowano wybrane zasoby wtórne na terenie Europy, a także podano wyniki ich analiz chemicznych i mineralogicznych.

Possibility of obtaining rare earth metals from flotation and mining waste

ABSTRACT. Rare earth elements are identified as critical raw materials by European Commission (Communicate COM/2014/0297). That means they are either highly relevant for economical development and with high risk of supply. China dominates REE production market. Currently in Europe there is no active mine exploiting natural REE resources. On the other hand, many secondary materials, such as mining wastes, tailings might be potential REE source. ENVIREE is an international project financed by ERA-MIN program. It's objective is to develop innovative methods for the recovery of rare earth elements from secondary sources. In the chapter selected secondary resources in Europe are described. Further, the results of their chemical and mineralogical analyzes are presented.

* Mgr inż., ** Dr inż., AGH Akademia Górniczo-Hutnicza, Kraków, Wydział Geodezji Górniczej i Inżynierii Środowiska.

*** Dr hab. inż., AGH Akademia Górniczo-Hutnicza, Kraków, Wydział Zarządzania.

1. Wstęp

Pierwiastki ziem rzadkich (*Rare Earth Elements* – REE) to grupa 17 pierwiastków o zbliżonych właściwościach chemicznych. Do grupy należy 15 lantanowców: lantan (La), cer (Ce), prazeodym (Pr), neodym (Nd), promet (Pm), samar (Sm), europ (Eu), gadolin (Gd), terb (Tb), dysproz (Dy), holm (Ho), erb (Er), tul (Tm), iterb (Yb) i lutet (Lu) oraz skand (Sc) i itr (Y). Pierwiastki ziem rzadkich występują powszechnie, jednak ich duże rozproszenie znacznie ogranicza możliwość ich pozyskiwania. REE zyskują na znaczeniu, głównie przez coraz częstsze zastosowanie w wielu gałęziach przemysłu. Wykorzystywane są m.in. w silnikach elektrycznych samochodów i turbin wiatrowych, dyskach twardech w komputerach, oświetleniu fluorescencyjnym, płaskich ekranach urządzeń multimedialnych, pojazdach hybrydowych. Równocześnie z wysokim zapotrzebowaniem, istnieje ryzyko zaopatrzenia w REE. Z tego powodu określa się je jako materiały krytyczne (Komunikat Komisji... 2014).

W połowie XX w. światowa produkcja tlenków metali ziem rzadkich (REO) wynosiła zaledwie 1000 Mg. Na przestrzeni lat obserwowano wzrostową tendencję w zapotrzebowaniu i produkcji. Najwyższą produkcję zanotowano w 2009 r., gdy wynosiła ona 137 tys. Mg (USGS 2015). Szacuje się, że zapotrzebowanie na metale ziem rzadkich w 2017 roku może zwiększyć się o ponad 20% w stosunku do zapotrzebowania w roku 2014 i o ponad 50% do roku 2020 (Curtin University, IMCOA, 2014).

Obecnie eksploatowane źródła REE znajdują się w Chinach, Stanach Zjednoczonych i Australii. W Chinach największą kopalnią REE jest Bayan Obo zlokalizowana 150 km na południe od Baotou. Inne obszary górnicze znajdują się w południowo-wschodniej prowincji i w Syczuanie. W 2012 roku ponownie rozpoczęto wydobywanie minerałów zawierających pierwiastki ziem rzadkich w Stanach Zjednoczonych, w kopalni Mountain Pass. Wydobywanie w 2014 roku wyniosło 5 tys. Mg (Molycorp 2015). W południowo-zachodniej Australii zlokalizowane jest złożo Mount Weld. W 2014 roku wydobywanie wyniosło 4 tys. Mg (Lynas 2015). Badane są możliwości pozyskania REE w Kanadzie, Stanach Zjednoczonych, Kenii, Australii, RPA, Rosji i na Grenlandii (Hatch 2015).

Reakcją Komisji Europejskiej na przewidywany wzrost zapotrzebowania surowców i niepewność zaopatrzenia jest dokument EU *Raw Materials Initiative* (Komunikat Komisji... 2008). Opracowano strategię odpowiadającą na wyzwania związane z dostępem do surowców nieenergetycznych i nierolniczych. Opiera się ona na trzech podstawowych filarach: stabilnym dostępie do surowców na rynkach światowych, zrównoważonej dostawie surowców z europejskich źródeł, zwiększeniu efektywności wykorzystania zasobów i promowaniu recyklingu.

Część materiałów odpadowych, zawierających REE, np. odpad z pozyskiwania ołowiu i cynku, miedzi, nie jest aktualnie rozpatrywana jako potencjalne źródła REE. Ze względu na duże zróżnicowanie tych materiałów nie jest możliwe opracowanie uniwersalnego sposobu odzyskiwania pierwiastków ziem rzadkich: Obecnie materiały te są uznawane za odpady i zostają deponowane na składowiskach, co wiąże się z negatywnym wpływem na środowisko. Możliwe jest ich przetworzenie w celu wytworzenia nowych surowców.

Wykorzystanie materiałów odpadowych jest zgodne z założeniami *Circular Economy*. Działanie to ma doprowadzić do utrzymania w gospodarce zasobów tak długo, jak to możliwe i zminimalizowania wytwarzanych odpadów. „Domknięcie” obiegów w gospodarce ma zwiększyć konkurencyjność UE poprzez ochronę przedsiębiorstw przed niedoborem zasobów i niestabilnością cen. Jednocześnie pomoże uniknąć wyczerpania zasobów. Działania dotyczące prowadzenia gospodarki w zamkniętym obiegu są zgodne z priorytetami UE, w tym z kreowaniem miejsc pracy i wzrostu gospodarczego, klimatem i energią i innowacjami przemysłowymi (Komunikat Komisji... 2015).

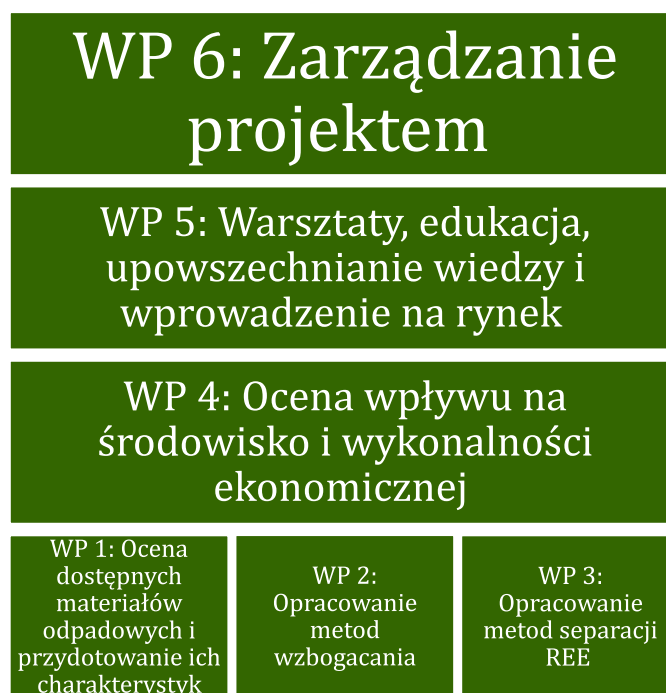
Celem pracy jest przedstawienie i scharakteryzowanie źródeł wtórnych metali ziem rzadkich zlokalizowanych w Europie. Źródła te zostały zidentyfikowane i zbadane w ramach Międzynarodowego projektu ENVIREE finansowanego z programu ERA-MIN. Przedsięwzięcie ma na celu opracowanie nowatorskich metod odzysku metali ziem rzadkich ze źródeł wtórnych.

2. Cele i partnerzy projektu ENVIREE

Celem projektu ENVIREE (*Environmentally friendly and efficient methods for extraction of Rare Earth Elements from secondary sources*) jest opracowanie przyjaznej dla środowiska i efektywnej metody pozyskiwania metali ziem rzadkich ze źródeł wtórnych – odpadów powydobywczych oraz uzupełnienie wiedzy w zakresie możliwości efektywnego zaopatrzenia Europy w pierwiastki ziem rzadkich, pochodzące z tych źródeł. W pierwszym etapie zidentyfikowano możliwe potencjalne źródła wtórne pierwiastków ziem rzadkich. Na podstawie dostępnych informacji: objętości dostępnego złoża, właściwości materiałów, wybrano najbardziej obiecujące lokalizacje. Dla próbek pochodzących z wybranych źródeł przeprowadzono badania laboratoryjne wzbogacania, wmywania i separacji. Dodatkowo dla etapu wzbogacania przeprowadzono próby w skali pilot (półtechnicznej) na 1000 kg materiału. Na podstawie wyników testów w skali półtechnicznej opracowane zostały indywidualne, wydajne metody pozyskiwania REE z poszczególnych źródeł. Aby uzyskać całościowy pogląd na proponowane rozwiązania, przeprowadzane są również badania, takie jak: ocena cyklu życia, strategiczna ocena oddziaływania na środowisko, ocena efektywności energetycznej i opłacalności ekonomicznej. Zarekomendowano również procedury rekultywacji. Holistyczne podejście zastosowane w projekcie pozwala na opracowanie nowoczesnych, skutecznych metod pozyskiwania REE ze źródeł wtórnych, przy jednoczesnym zapewnieniu środowiskowej i ekonomicznej wykonalności przedsięwzięć. Podstawowymi celami projektu ENVIREE są: opracowanie innowacyjnych, skutecznych procesów pozyskiwania metali ziem rzadkich z wybranych materiałów odpadowych i ich optymalizacja, zapewnienie środowiskowej i ekonomicznej opłacalności proponowanych rozwiązań, w tym ich efektywności energetycznej, skutecznej rekultywacji, rozpowszechnienie wiedzy poprzez szkolenia, akcje edukacyjne, udostępnienie wyników badań na rynku, inicjacja interakcji między grupami docelowymi (<http://www.enviree.eu>). W skład konsorcjum odpowiedzialnego za realizację projektu ENVIREE wchodzi 11 partnerów z 8 krajów.

- Chalmers University of Technology (Szwecja) (pakiety WP3, WP6),
- AGH Akademia Górniczo-Hutnicza im. Stanisława Staszica w Krakowie (Polska) (pakiet WP4),
- AICU The Alexandru Ioan Cuza University of Iași (Rumunia) (pakiet WP1),
- IST-ID Instituto Superior Técnico for Research and Development (Portugalia) (pakiet WP5),
- KIT Karlsruher Institut für Technologie (Niemcy),
- PIPAS Primus.inter.pares AS (Norwegia),
- EDM Empresa de Desenvolvimento Mineiro (Portugalia),
- CEA le Commissariat à l'énergie atomique et aux énergies alternatives (Francja) (pakiet WP 2),
- CGS Council for Geoscience (RPA),
- SAVONA Savona Project s.a. (Polska),
- BRGM Bureau de Recherches Géologiques et Minières (Francja).

Zadania projektu rozdzielono na 6 pakietów (rys. 1).



Rys. 1. Struktura projektu ENVIREE

- WP 1: *Ocena dostępnych materiałów odpadowych i przygotowanie ich charakterystyk.*

Do zadań w ramach tego pakietu należał przegląd literatury w celu wyboru materiałów odpadowych mogących zawierać znaczne ilości REE, selekcja materiałów odpadowych do

dalszych badań w ramach projektu, pobór prób, przygotowanie charakterystyk wybranych materiałów odpadowych, powtórna selekcja najbardziej obiecujących materiałów do dalszych etapów projektu.

Partnerzy zaangażowani w WP1: CHALMERS, CEA, AICU, IST-ID, CGS, EDM, PIPAS

→ WP 2: *Opracowanie metod wzbogacania wymywania.*

Do zadań wykonanych w ramach tego pakietu należało przeprowadzenie badań laboratoryjnych wzbogacania i wymywania w skali półtechnicznej. Następnie opracowanie optymalnych metod dla wybranych materiałów odpadowych.

Partnerzy zaangażowani w WP2: CHALMERS, CEA, PIPAS, BRGM

→ WP 3: *Opracowanie metod separacji REE.*

W ramach pakietu WP3 dokonano separację poszczególnych metali ziem rzadkich. Następnie rekomendację najlepszego dostępnego rozwiązania.

Partnerzy zaangażowani w WP3: CHALMERS, CEA, IST-ID, PIPAS, KIT.

→ WP 4: *Ocena wpływu na środowisko i wykonalności ekonomicznej.*

W ramach pakietu WP4 przeprowadzono badania mające na celu określenie opłacalności ekonomicznej i środowiskowej opracowanych rozwiązań. Wykonano analizę cyklu życia (LCA – Life Cycle Assessment), wstępną ocenę oddziaływania na środowisko. Opracowano również wskaźniki zrównoważonego rozwoju dla opracowanych metod. Ponadto przygotowano wytyczne dotyczące optymalizacji pod względem energetycznym i rekultywacji po zakończeniu przetwarzania wybranych odpadów. Wykonano również ocenę wykonalności ekonomicznej.

Partnerzy zaangażowani w WP4: CHALMERS, AGH, CEA, AICU, IST-ID, CGS, SAVONA.

→ WP 5: *Warsztaty, edukacja, upowszechnianie wiedzy i wprowadzenie na rynek.*

Do zadań ujętych w pakiecie WP5 należą promocja wiedzy uzyskanej w projekcie, kontakt i współpraca z partnerami biznesowymi.

Partnerzy zaangażowani w WP5: CHALMERS, AGH, CEA, AICU, IST-ID, CGS,

→ WP6: *Zarządzanie projektem.*

Pakiet WP6 obejmuje koordynację i zarządzanie wszystkimi pozostałymi działaniami w ramach projektu, zapewnieniem wysokiej jakości efektów pracy.

Partnerzy zaangażowani w WP6: CHALMERS.

3. Charakterystyka zasobów wtórnych rozpatrywanych w projekcie ENVIREE

W Europie zlokalizowane jest wiele składowisk odpadów przemysłowych, wydobywczych i stawów osadowych, które mogą potencjalnie stanowić źródło metali ziem rzadkich. W ramach projektu do wstępnej analizy zostały zakwalifikowane materiały odpadowe zlokalizowane w Szwecji, Portugalii, Słowacji, Czechach, Polsce i na Cyprze. Przeanalizowano informacje o dostępnej objętości poszczególnych odpadów i ich składzie mineralnym. Zidentyfikowano materiały mogące potencjalnie stanowić źródła metali ziem rzadkich. Wybrano obiekty, dla których zaplanowano dalsze badania.

Za priorytetowe uznano 4 źródła: Covas i Cumieira (Portugalia); New Kankberg (Szwecja), KGHM (Polska). Dodatkowo zdecydowano się przeprowadzić analizy dla 4 innych źródeł: Kopalni Staszic w Rudkach (Polska); Kopalni Rožná (Czechy); Ervideira (Portugalia); Regtepoort (Republika Południowej Afryki).

3.1. Ogólna charakterystyka zasobów wtórnych rozpatrywanych w projekcie ENVIREE

Covas, Portugalia

Odpady zdeponowane w Covas pochodzą z okresu 1954–1984, kiedy w regionie prowadzone było podziemne wydobywanie wolframu (głównie schelitu i wolframidów). Depozyt składa się głównie ze stref siarczków (pirofotyt, piryty, arsenopiryty i chalkopiryty) i towarzyszących wolframu, scheelitu i ferberytu. Skład mineralny obejmuje także apatyt, muszkit, chloryn i kwarc. Wydobyty materiał poddawano przetwarzaniu przy wykorzystaniu metod elektromagnetycznych, spiekania, flotacji. Zwałowisko odpadów powstałych w wyniku aktywności górniczej zostało zrehabilitowane przez EDM. Wykonano stabilizację nachylenia, ograniczenie obszarów składowania, ograniczenie infiltracji oraz zachowanie naturalnych procesów neutralizacji chemicznej. W rejonie Covas zidentyfikowano obszary różniące się wielkością ziaren materiałów: strefa drobnoziarnistych materiałów (A), strefa główna zawierająca materiały z zakładu przetwórczego (B), strefa materiałów z drenażu osadów (C). Sumaryczna objętość dostępnych w Covas odpadów wynosi 300 tys. m³ (Deliverable D1.1).

Cumieira, Portugalia

Złoże Cumieira znajduje się na płaskowyżu utworzonym przez warunki atmosferyczne i akumulację otaczających skał. Miąższość waha się od kilku centymetrów do 3 metrów. Składa się z łupków, kwarcu, granitu i aplitu-pegmatytu. Obszar ten był początkowo eksploatowany w celu pozyskania skandiu (Sc) (Cassiterite), a później niobu-tantal (Nb-Ta) (COLTAN). Eksploatacja miała miejsce w latach 1927–1966. Przetwarzanie rudy prowadzono w obiektach przemysłowych oddalonych od obszaru górniczego, przy zastosowaniu metod hydrograwitacyjnych i elektrostatycznych. Zidentyfikowano dwa obszary, w których zlokalizowane są odpady przerobcze (tailings) o różnym uziarnieniu: strefa drobnego materiału zlokalizowana w okolicy zakładu przetwórczego, strefa słabo rozdrobnionego materiału. Według badań Dias z 2011 roku, sumaryczna zawartość REE w odpadach przerobczych (tailings) z tego regionu może sięgać 394.2 ppm (Deliverable D1.1).

New Kankberg, Szwecja

Kopalnia New Kankberg zlokalizowana jest w północnej Szwecji. Wydobywanie złota i telluru w tej lokalizacji rozpoczęto w 2012 roku. Obecnie osiąga się wydajność eksploatacji sięgającą około 400–500 tys. Mg materiału rocznie. Zawartość złota wynosi około 4 g/Mg materiału. W wydobywanej rudzie znajduje się również tellur. W 2014 roku w kopalni wyprodukowano około 31 tys. Mg telluru. Ruda wydobywana jest w podziemnej kopalni i jest transportowana do pobliskiego zakładu przetwórczego w Boliden. Proces przetwarzania skła-

da się z rozdrobnienia, mielenia, flotacji, wymywania przy użyciu cyjanku. Pozostałości po przeprowadzonych procesach są kierowane do osadników razem z odpadami z przetwarzania innych rud. Przewiduje się zamknięcie obiektu w 2023 roku, po wyczerpaniu złoża. Wstępne testy flotacji prowadzone przez Boliden wykazały, że większość REE występuje w monazycie. Całkowita zawartość REO w próbce wynosiła 2916 ppm. 19% pierwiastków ziem rzadkich zidentyfikowanych w próbce należało do grupy ciężkich metali ziem rzadkich HREE (HREE – *Heavy Rare Earth Elements*), natomiast pozostałe 80% należało do grupy lekkich metali ziem rzadkich LREE (*Light Rare Earth Elements*) (Deliverable D1.1).

KGHM Polska Miedź – Żelazny Most, Polska

KGHM Polska Miedź, eksploatuje jedno z największych na świecie złóż rud miedzi w kopalniach Rudna, Lubin i Polkowice-Sieroszowice. Obszar górniczy znajduje się w południowej części Polski. Złóża rudy miedzi użytkowane przez KGHM w Polsce znajdują się na głębokości od kilkuset do 1500 metrów głębokości. Minerale występują głównie w trzech typach skał: piaskowcach, łupkach i dolomitach. Najpowszechniejsze siarczki miedzi występujące w rudzie to: chalkocyt, bornit, chalkopiryt i kowelit. Ze względu na niską średnią zawartość miedzi (1,7%) w eksploatowanych złożach w Polsce, konieczny jest proces wzbogacania. Polega on na kruszeniu i rozdrabnianiu rudy, flotacji, zagęszczaniu, przesączaniu i suszeniu. W rezultacie koncentrat zawiera ilość miedzi, wystarczającą do dalszego przetwarzania w hucie. Odpady powstałe podczas wzbogacania rudy miedzi są składowane w zbiorniku Żelazny Most, który jest największym składowiskiem odpadów mineralnych w Europie i jednym z największych na świecie. Zajmuje powierzchnię 13,94 km². Został zbudowany w 1974 roku w celu gromadzenia odpadów poflotacyjnych z trzech lokalnych instalacji wzbogacania miedzi, przechowywania wód podziemnych z kopalni w Lubinie-Głogowie i wykorzystania w procesie flotacji siarczków podczas przetwarzania rudy. Całkowite ilości odpadów i wody zdeponowane na składowisku szacuje się odpowiednio na 476 mln m³ i 7,5 mln m³. Coroczny przyrost ilości zdeponowanych odpadów wynosi od 20 do 26 mln Mg. Szacowana zawartość REE w odpadach zdeponowanych na terenie Żelaznego Mostu wynosi 60–210 ppm (Deliverable D1.1).

3.2. Szczegółowa charakterystyka źródeł wtórnych

Przeprowadzono trzy kampanie próbkowe: dwie w 2015 roku (maj, czerwiec) i jedną w 2016 roku (RPA, Czechy). Wszystkie pozyskane próbki zostały przygotowane w jednym laboratorium i poddawane takiej samej procedurze przygotowania do kolejnych metod analitycznych. Pobrane w każdej lokalizacji próbki zostały szczegółowo opisane i przygotowane do analiz. Przygotowanie obejmowało: suszenie w temperaturze 30°C, w razie potrzeby rozkruszenie agregatów, homogenizację, mielenie, ponowną homogenizację. Aby uzyskać stężenie pierwiastków chemicznych, w szczególności zawartość REE wybranych próbek przeprowadzono badania trzema metodami: analizę aktywacji neutronów (NAA – *Neutron Activation Analysis*), spektrometrię (ICPMS – *Inductively Coupled Plasma Mass Spectrometry*) i fluorescencję rentgenowską (XRF – *X-ray Fluorescence*). Charakterystykę mine-

ralogiczną przeprowadzono metodą dyfrakcji (XRD – *Xray Diffraction*) rozdrobnionych próbek. Specjację żelaza uzyskano przy użyciu spektroskopii Mössbauera. Badanie to pomogło również w identyfikacji minerałów, w których REE są trwałe. AICU przeprowadziło trzy rodzaje analiz: ICP-MS, XRF i XRD. IST-ID przeprowadził dwa typy analizy: INAA, spektroskopię Mössbauera.

Analiza XRF

XRF jest tanią i szybką metodą analityczną pozwalającą na zidentyfikowanie wielu pierwiastków chemicznych. Jej wadą są wysokie wartości graniczne wykrywalności pierwiastków, około 1 ppm. XRF wykorzystano do wstępnej, orientacyjnej analizy próbek zebranych w terenie. Wyniki analizy przedstawiono w tabeli 1 i na rysunku 2.

TABELA 1. Zawartość REE w badanych próbkach odpadów powydobywczych – metodą XRF (Deliverable D1.2)

Pochodzenie próbki	Etykieta	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Suma
New Kankberg	Swe 5	78,7	140,2	8,9	26,9	–	254,7
Covas	B3	17,8	38,5	6,4	16,5	4,4	83,6
	B4	9,9	20,1	–	–	5,1	35,1
Cumieira	D1	15,4	35,7	–	17,6	–	68,7
	D2	20,4	42	6,5	17	–	85,9
Ervideira	Mest 2	15,9	29,4	6,6	15,9	–	67,8
KGHM	Pol 1	2,3	33,9	84	20,3	–	140,5
Kopalnia	Pol 4	16,5	9,1	–	17,2	4,8	47,6
Rozna	Cz 143	28,3	56,3	63	25,9	4,8	178,3
Retgepoort	SA 132	256,2	417,4	15,2	45,3	9,5	743,6
	SA 133	212,3	433,1	11,9	52,4	21,3	731
	SA 134	79,6	147,2	7,7	26,5	5,9	266,9

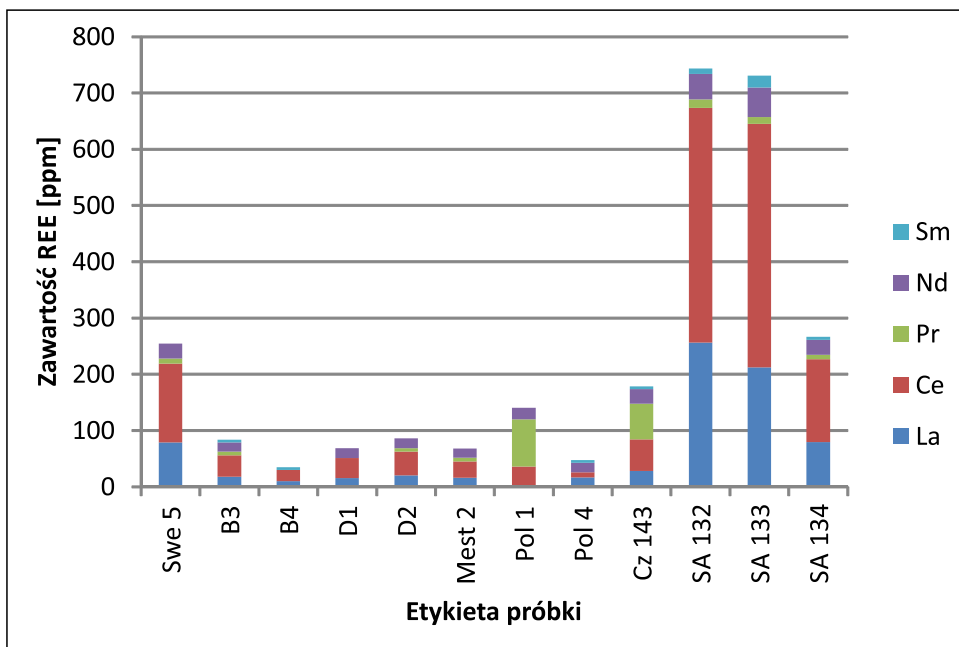
Jedną z metod zapewniających wysoką dokładność i wrażliwość jest ICP-MS. Wyniki analizy dla wybranych próbek przedstawiono na rysunku 3.

INAA

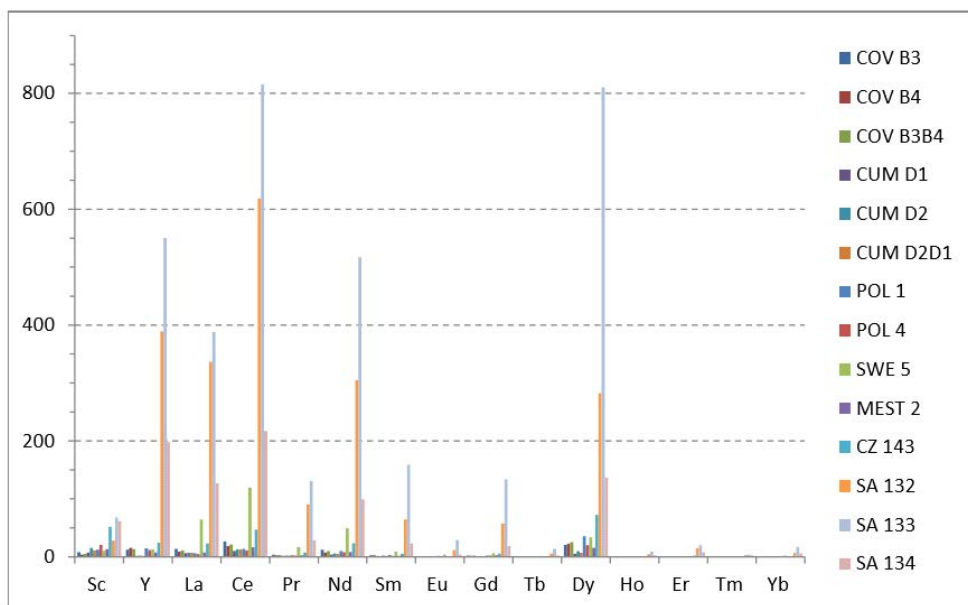
Analiza INAA pozwoliła na identyfikację głównych i śladowych pierwiastków z dużą dokładnością. Zbadano zawartość następujących pierwiastków: Na, K, Mn, Fe, Sc, Cr, Co, Zn, Ga, As, Br, Rb, Zr, Sb, Cs, Ba, La, Ce, Nd, Sm, Eu, Tb, Dy, Yb, Lu, Hf, Ta, W, Th, U.

X-ray diffraction (XRD)

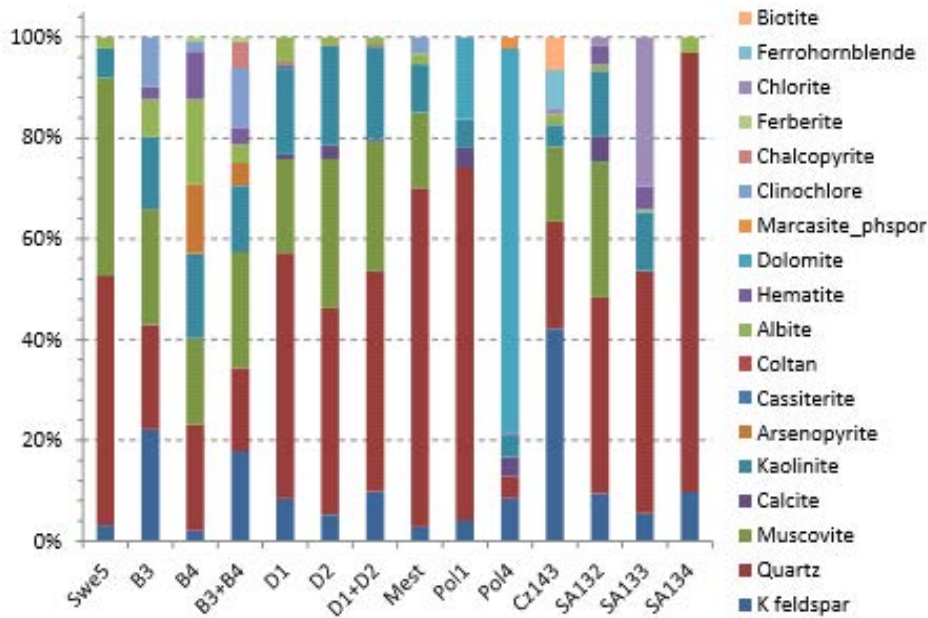
Do określania struktury rozdrobnionych próbek zastosowano metodę Rietveld, która służy do określania ilości składników krystalicznych i bezpostaciowych w wielofazowych mieszaninach. W wyniku analizy otrzymano charakterystykę mineralogiczną próbek (rys. 4).



Rys. 2. Zawartość REE w analizowanych próbkach (Deliverable D1.2, Deliverable D1.3) ICP-MS



Rys. 3. Zawartość REE w analizowanych próbkach – metoda ICP-MS (Deliverable D1.2, Deliverable D1.3)



Rys. 4. Charakterystyka mineralogiczna wybranych próbek – metoda XRD (Deliverable D1.2, Deliverable D1.3)

Mössbauer analysis

Aby zidentyfikować tlenki żelaza, które nie zostały wykryte przy pomocy XRD, zastosowano spektroskopię Mössbauera. Badanie pozwala m.in. na oszacowanie stopnia utlenienia żelaza. Zaobserwowano korelację pomiędzy Fe w postaci nanocząsteczkowych tlenków, a całkowitą zawartością REE, z wyłączeniem próbki z New Kankberg. Może to wynikać z adsorpcji nanocząsteczek tlenku żelaza kationami REE. Wyjątkiem jest materiał ze Szwecji charakteryzujący się wyższym stężeniem REE w rudzie pierwotnej.

QEMSCAN analysis

Badanie QEMSCAN ma na celu zidentyfikowanie występowania fosforanów (w tym monazytów) i ich potencjału wyodrębnienia. W wyniku analizy uzyskano skład mineralogiczny materiału pochodzącego z New Kankberg (tab. 2).

Wyniki analizy pokazują, że większość fosforanów zawartych w próbce z New Kankberg występuje w postaci monazytu i apatytu, z niewielkimi ilościami ksenonitu i berlinitu. Analiza poszczególnych ziaren wykazała, że niektóre cząstki fosforu są wieloskładnikowe. Stwierdzono również że monazyt jest w 40% związany z innymi minerałami i ma wolną powierzchnię, która wynosi 55% (Deliverable D1.1).

TABELA 2. Skład mineralogiczny próbki z New Kankberg – metoda QEMSCAN (Deliverable D1.2, Deliverable D1.3)

Minerał	%
Zircon	0,03
K Feldspar	4,36
Orthopyroxene	0,07
Biotite	0,2
Tourmaline	0,15
Pyrite	0,54
Quartz	61,37
Chlorite	1,05
Kaolinite	4,63
Amphibole	0,18
Magnetite/Hematite	0,02
Others	0,11
Plagioclase	1,05
Leucoxene	0,08
Corundum	0,15
Epidote	0,02

Minerał	%
Garnet	0,07
Anatase	0,27
Rutile	0,65
Goethite	0,03
Hornblende	0,16
Muscovite	17,26
Xenotime	0,05
Berlinite	0,01
Apatite	0,32
Calcite	0,19
Arsenopyrite	0,07
Monazite	0,8
Topas	0,1
Andalusite/Kyanite	3,69
Beryl	0,69
Spalerite	0,03

4. Wnioski

Analiza wybranych próbek wykazała, że potencjalnie najbardziej przydatne materiały z Europy, z punktu widzenia stężenia REE, pochodzą z New Kankberg (Szwecja) i Covas (Portugalia). Z tych miejsc pochodzą próbki o najwyższej zawartości REE. Sprawia to, że są one najbardziej obiecujące w kontekście odzyskiwania metali ziem rzadkich. Warto zauważyć, że wysokie zawartości REE zaobserwowano również w próbkach pochodzących z Południowej Afryki. Rozważa się dalsze badania dotyczące koncentracji i ekstrakcji tych próbek. Badania metodą XRD – Rietveld i QEMSCAN wykazały, że próbki pochodzące z New Kankberg zawierają fosforany. Wyniki analizy Mössbauera sugerują, że materiał z New Kankberg może mieć najwyższą zawartość REE. Dlatego to miejsce jest priorytetowe dla opracowania dalszych procesów odzyskiwania REE. Obszar Covas jest drugim obiecującym miejscem wybranym do dalszych etapów badań. Poza wysoką zawartością metali ziem rzadkich, odpady z Covas charakteryzują się również dużą zawartością wolframu.

5. Podsumowanie i dyskusja

REE jako surowce niezbędne dla rozwoju nowoczesnych technologii, między innymi odnawialnych źródeł energii, zyskują na ważności. Obecna dominacja Chin na rynku skłania do poszukiwania źródeł alternatywnych, za które uznaje się między innymi odzysk REE z odpadów przemysłowych. Możliwość pozyskiwania REE z tego typu źródeł wtórnych jest badana w ramach międzynarodowego projektu ENVIREE.

Zidentyfikowane w ramach projektu materiały mogą stanowić potencjalne źródło REE pozwalające na częściowe zaspokojenie zapotrzebowania w Europie. Aby było to możliwe należy opracować optymalne, efektywne metody wzbogacania i separacji pierwiastków metali ziem rzadkich dla wybranych źródeł wtórnych zidentyfikowanych w Europie. Są to odpady powstające w wyniku wzbogacania złota w New Kankberg (Szwecja) i odpady zgromadzone w czasie eksploatacji złoża w Covas (Portugalia). Metody te będą opracowywane w następnym etapie projektu ENVIREE. Implementacja opracowanych metod i w efekcie przetworzenie istniejących odpadów w celu pozyskania nowych surowców pozwoli na oszczędzenie zasobów i zmniejszenie ilości odpadów deponowanych na składowiskach. W celu zapewnienia opłacalności przedsięwzięcia pod względem środowiskowym i ekonomicznym w kolejnych etapach projektu ENVIREE będą prowadzono dalsze badania. Należały do nich: analiza cyklu życia (LCA), strategiczna ocena oddziaływania na środowisko, ocena efektywności energetycznej, ocena opłacalności ekonomicznej. W wyniku przeprowadzonych badań uzyskano informacje o wpływie na środowisko w związku z przetwarzaniem odpadów powydobywcznych. Analizy pozwoliły również na zoptymalizowanie prac pod względem zużycia energii. Opracowywane są również wytyczne dotyczące rekultywacji składowisk odpadów pochodzących z wtórnej eksploatacji tj. procesu wzbogacania i odzysku REE. Takie holistyczne podejście pozwala na zapewnienie możliwie najlepszego sposobu pozyskania metali ziem rzadkich z wybranych źródeł wtórnych.

This publication and research was completed within ENVIREE project (ENVIRONMENTALLY friendly and efficient methods for extraction of Rare Earth Elements from secondary sources) funded by NCBR, within the 2nd ERA-NET ERA-MIN Joint Call Sustainable Supply of Raw Materials in Europe 2014. Publikacja i badania zostały wykonane w ramach projektu, finansowanego przez NCBR w ramach programu ERA-NET, ERA-MIN.

Literatura

- Curtin University, IMCOA, 2014. REE production and consumption statistics are subject to considerable margins of error and difficult to verify due to the existence of a REE black market fuelled by illegal exports from China.
- Deliverable D1.1 – Report on the identification of secondary resources in Europe and South Africa and brief description of their wastes, <http://www.enviree.eu/publications/>
- Deliverable D1.2 – Report on the physical – chemical properties of available materials for the recovery of REE, <http://www.enviree.eu/publications/>
- Deliverable D1.3 – Chemical and mineralogical data of secondary REE sources, <http://www.enviree.eu/publications/>
- Dias, Análise estrutural e paragenética de produtos litológicos e mineralizações de segregação metamórfica: Estudo de veios hiperaluminosos e protólitos poligénicos Silúricos da região da Serra de Arga (Minho); PhD Thesis; Universidade do Minho, Braga, 2011.

Hatch G. 2015 – *TMR Advanced Rare-Earth Projects Index*. <http://www.techmetalsresearch.com/metrics-indices/tmr-advanced-rare-earth-projects-index/>.

Komunikat Komisji do Parlamentu Europejskiego i Rady Inicjatywa na rzecz surowców – zaspokajanie naszych kluczowych potrzeb w celu stymulowania wzrostu i tworzenia miejsc pracy w Europie, COM(2008) 699, Bruksela, 4.11.2008.

Komunikat Komisji do Parlamentu Europejskiego, Rady, Europejskiego Komitetu Ekonomiczno-Społecznego i Komitetu Regionów w sprawie przeglądu wykazu surowców krytycznych dla UE i wdrażania inicjatywy na rzecz surowców, COM(2014) 297, Bruksela, 26.05.2014.

Komunikat Komisji do Parlamentu Europejskiego, Rady, Europejskiego Komitetu Ekonomiczno-Społecznego i Komitetu Regionów Zamknięcie obiegu – plan działania UE dotyczący gospodarki o obiegu zamkniętym, COM(2015) 614 , Bruksela, 2.12.2015.

Lynas, 2015. *From Mine to Market. Lynas Corporation Annual Report 2014*. <https://www.lynascorp.com/Annual%20Reports/2014%20Annual%20Report.pdf>.

Molycorp, 2015. Molycorp, Inc. (15–11357). (Chapter 11) case. <https://cases.primeclerk.com/molycorp>.

USGS, Mineral Commodity Summaries 2015, U.S. Geological Survey, Reston, Virginia: 2015 <http://minerals.usgs.gov/minerals/pubs/mcs/2015/mcs2015.pdf>,
<http://www.enviree.eu>

Jerzy KOROL*, Jan BONDARUK**, Joanna LENŻA**, Mateusz GLEJA***

Koncepcja zagospodarowania odpadów z procesu recyklingu folii rolniczych w aspekcie gospodarki o obiegu zamkniętym

STRESZCZENIE. Składowanie odpadów z tworzyw polimerowych jest istotnym problemem środowiskowym, należy podejmować działania w kierunku ich maksymalnego zagospodarowania, co jest istotnym aspektem gospodarki o obiegu zamkniętym, zgodnie z którą należy ograniczać zużycie surowców pierwotnych. Omówiony cykl życia w perspektywie obiegu zamkniętego pomaga zrozumieć potrzebę optymalizacji procesów recyklingowych według aspektów gospodarczych, jak i środowiskowych. W pracy przedstawiono koncepcję zagospodarowania odpadów powstających na linii recyklingu folii. Obecnie odpady te są składowane na składowiskach lub spalane w spalarniach odpadów. Przedstawiona koncepcja technologiczna zagospodarowania tych odpadów pozwoli na zwiększenie skuteczności recyklingu folii rolniczych oraz na wytworzenie nowego surowca do produkcji różnego rodzaju asortymentu na bazie polietylenu – będącego głównym składnikiem przetwarzanych odpadów powstających na linii recyklingu folii.

Waste management conception of recycled agricultural films in the aspect of circular economy

ABSTRACT. Disposal of waste polymeric plastics is an important environmental issue. According to the circular economy it is necessary to increase their recycling. In this chapter a conception of processing and reuse as a raw material, wastes from the recycling process of agricultural films is presented. Presented life cycle of polymeric materials helps to understand the need to optimize recycling processes by economic and environmental aspects. Proposed conception will allow to increasing the efficiency of recycling process of agricultural films.

* Dr hab. inż., prof. GIG, ** Dr inż., *** Mgr inż., Główny Instytut Górnictwa, Katowice; e-mail: jkorol@gig.eu

1. Wstęp

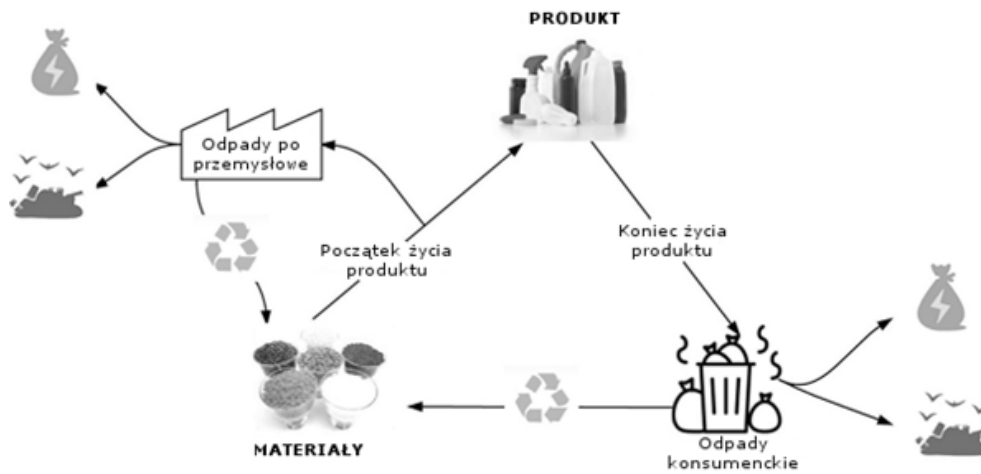
Tworzywa sztuczne są syntetycznymi polimerami organicznymi, wytworzonymi głównie z surowców petrochemicznych. Od momentu wynalezienia pierwszego polimeru na początku XX wieku i rozwoju polietylenu w latach 30. XX w. liczba nowych tworzyw polimerowych, jak i ich zastosowań znacznie wzrosła. Biorąc pod uwagę zarządzanie odpadami, stały wzrost ich wykorzystania (w roku 2014 – 280 Mt) jest coraz większym problemem w skali globalnej.

Łatwość kształtowania, odporność na korozję, jak i mnogość właściwości w większości zastosowań, są cechami pożądanymi (Shen i Worrell 2014). Jednak powolny rozkład tych materiałów jest jednym z powodów, dla których recykling tworzyw sztucznych jest jedną z kluczowych strategii mających na celu zmniejszenie o 35% ilości odpadów trafiających do środowiska w okresie od 1995 do 2020 r. (Achilias i in. 2008).

Jednym z wielu produktów wytwarzanych z tworzyw polimerowych są folie, stosowane w wielu dziedzinach gospodarki, w tym w przemyśle spożywczym, rolnictwie, budownictwie, elektrotechnice i innych. Rozwój technologii wytwarzania poliolefin, głównych surowców stosowanych w produkcji folii, sprawił, że istnieje możliwość otrzymywania folii o unikalnych i konkretnie ukierunkowanych właściwościach. Składowanie odpadów z tworzyw polimerowych jest istotnym problemem środowiskowym, należy więc podejmować działania w kierunku ich maksymalnego zagospodarowania, co jest istotnym aspektem gospodarki o obiegu zamkniętym, zgodnie z którą należy ograniczać zużycie surowców pierwotnych. W związku z tym w pracy zostanie przedstawiona koncepcja zagospodarowania odpadów powstających na linii recyklingu folii oraz sposób ich ponownego wykorzystania. Obecnie odpady te są składowane na składowiskach lub spalane w spalarniach. Przedstawiona koncepcja technologiczna zagospodarowania tego typu odpadów pozwoli na zwiększenie skuteczności recyklingu folii rolniczych oraz pozyskanie nowego surowca do produkcji różnego rodzaju asortymentu na bazie polietylenu, będącego głównym składnikiem przetwarzanych odpadów powstających na linii recyklingu folii.

2. Cykl życia polimeru

Cykl życia materiałów polimerowych przedstawiono na rysunku 1. Materiał wejściowy jest przetwarzany do gotowego produktu z wykorzystaniem różnych technik przetwórstwa tworzyw (wytlaczanie, formowanie wtryskowe itp.) Za ten moment przyjmuje się początek fazy życia gotowego produktu. Podczas procesu wytwarzania generowany jest pierwszy rodzaj odpadów po przemysłowych PI (*Post-Industrial Waste*), który nie trafia do konsumenta. Najczęściej są to niespełniające wymagań produkty otrzymane w procesie technologicznym w wyniku nieodpowiednich parametrów prowadzenia procesu technologicznego, zastosowania surowców niespełniających wymagań jakościowych, niestabilności procesu technologicznego lub przejść produkcyjnych. Tego typu produkty w postaci odrzutów produkcyjnych, ścinek lub naddatków stają się odpadami, które cechuje znany skład oraz czystość materiału (Ragaert i in. 2017).



Rys. 1. Cykl życia materiału. W zależności od wybranej ścieżki, polimer zostanie poddany procesom recyklingu, odzysku energii, lub trafi na wysypisko

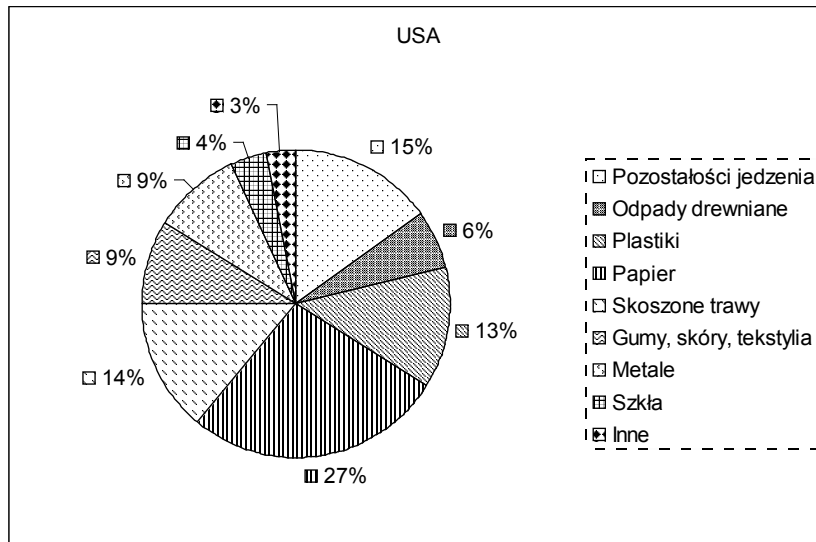
Źródło: Opracowanie własne na podstawie: Ragaert i in. 2017

Na końcu cyklu życia produkt jest rozdrabniany stając się odpadem po konsumenckim PC (*Post-Consumer waste*) (Ragaert i in. 2017). Zazwyczaj odpady zawierają mieszaninę różnych rodzajów tworzyw polimerowych nieznanego pochodzenia potencjalnie zanieczyszczonych papierem, metalami, tekstyliami, odpadami organicznymi, skórą, gumą, szkłem, ceramiką, glebą i innymi materiałami. Na rysunkach 2, 3 i 4 przedstawiono średnią kompozycję odpadów komunalnych w USA, Chinach i Europie (Czajczyńska i in. 2017).

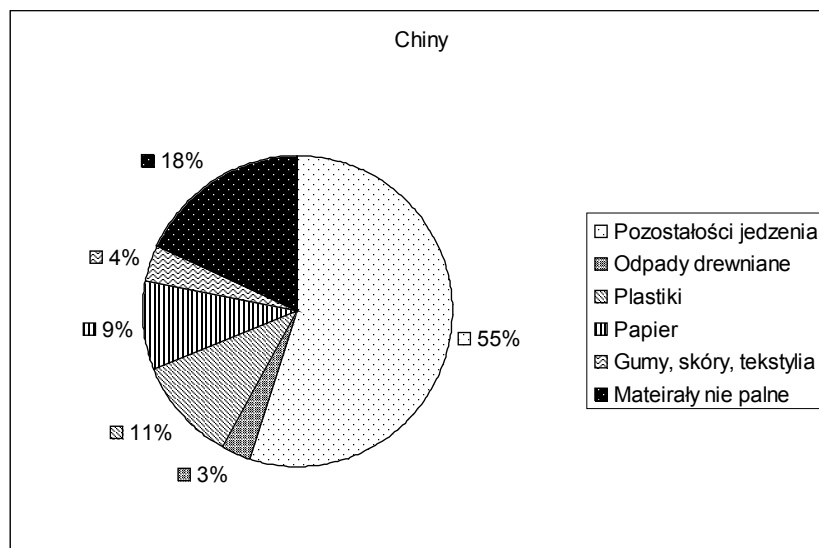
3. Wykorzystanie polimerów

Folie z tworzyw sztucznych należą do rodziny wysokoefektywnych materiałów w wykorzystaniu zasobów podczas produkcji, jak i ich użytkowaniu. Biorąc pod uwagę zastosowanie finalnego produktu, tworzywa sztuczne zużywają 140 razy mniej energii w trakcie użytkowania, niż potrzeba do ich wytworzenia.

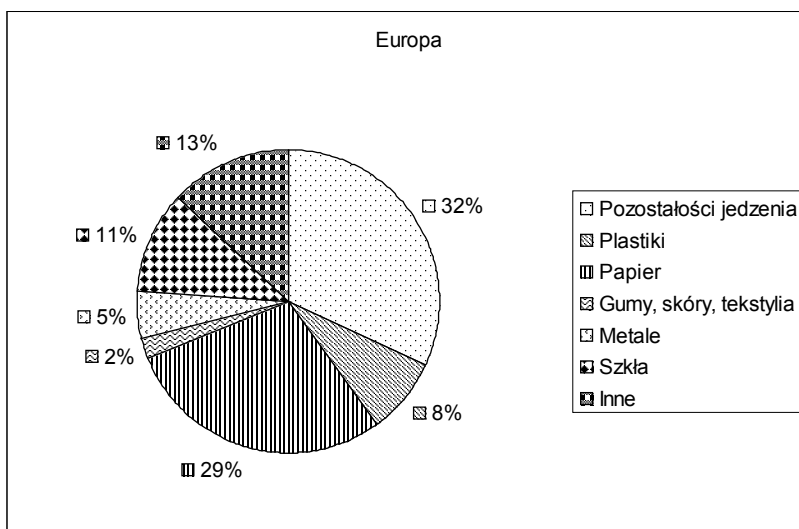
Ze względu na unikatowe właściwości materiały te są szeroko stosowane w sektorach przemysłu takich jak, budownictwo, motoryzacja, aeronautyka, elektryka i elektronika, rolnictwo, medycyna oraz przemyśle spożywczym. Przeprowadzone badania dotyczące zapotrzebowania na tworzywa sztuczne w Europie jednoznacznie wykazały, że rynek ten każdego roku ulega powiększeniu (rys. 5, Plastic- Europe 2016).



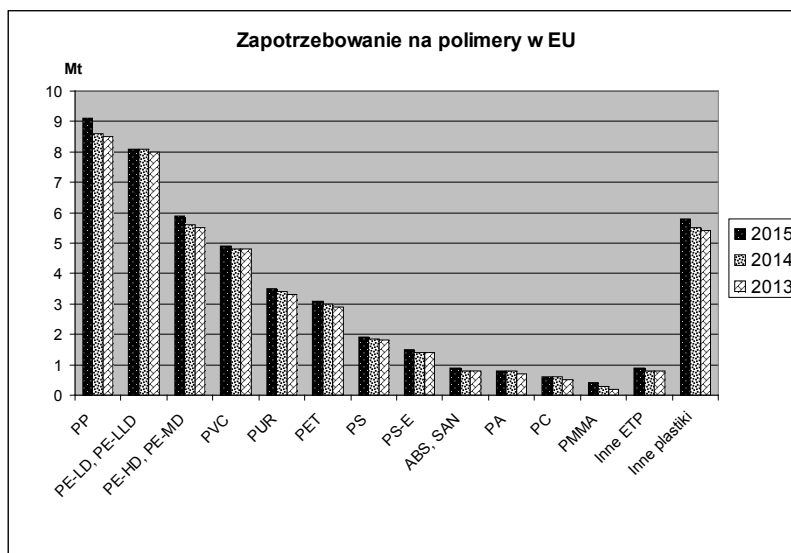
*Rys. 2. Kompozycja odpadów komunalnych w USA
Źródło: Czajczyńska i in. 2017*



*Rys. 3. Kompozycja odpadów komunalnych w Chinach
Źródło: Czajczyńska i in. 2017*



*Rys. 4. Kompozycja odpadów komunalnych w Europie
Źródło: Czajczyńska i in. 2017*



*Rys. 5. Zapotrzebowanie na poszczególne polimery w Unii Europejskiej
Źródło: PlasticEurope 2016*

3.1. Wykorzystanie polimerów w rolnictwie

Polietylen niskiej gęstości LDPE (*Low-Density Polyethylene*) służy do wytwarzania elastycznych, folii oraz różnego rodzaju pianek. Wyprodukowane z tego materiału folie stosuje się do zabezpieczania palet w dostawach rolnych, owijania beli siana w hodowli zwierząt gospodarskich, zamykania w nich kiszonki, jako folie ściółkowe, fumigacyjne oraz szklarniowe. Tworzywa sztuczne powoli zastępują długotrwałe materiały takie jak stal, materiały ceramiczne itp. ze względu na większą wydajność w produkcji i stosunkowo łatwy recykling.

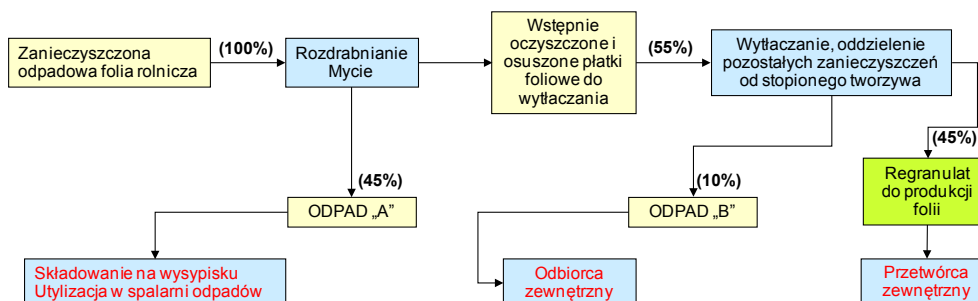
Pomimo wyższych kosztów wytworzenia w perspektywie czasu, jednorazowe folie, które można przenosić w dowolne miejsce są często preferowane względem długotrwałych konstrukcji, szczególnie w przypadku drobnych producentów, którzy mogą dzięki temu uniknąć dużych nakładów kapitałowych. Wykorzystanie średnio dwóch torebek na kiszonkę rocznie przez średnie gospodarstwo mleczarskie w New England (Stany Zjednoczone) o średnicy 2,5-3,5 m i długości 30-75 m jest przedsięwzięciem bardziej opłacalnym od budowy silosu bunkrowego lub pionowego (Leviatan i Barros 2003).

4. Recykling folii rolniczych

Większość odpadów rolniczych APW (*Agricultural Plastic Waste Streams*) stanowią folie wytworzone z LDPE lub LLDPE (*Linear Low Density Polyethylene*) wykorzystywane do ochrony upraw oraz wytwarzania kiszonki (Vox i in. 2016). W celu poprawy właściwości folie obok materiału polimerowego zawierają różnego rodzaju dodatki np. węgla, którego zadaniem jest zapewnienie ochrony przed promieniowaniem UV (folie do ściółkowania i rury nawadniające, Briassoulis i in. 2013).

Folie stosowane w rolnictwie po zakończonym okresie użytkowania, jako odpad są często składowane na legalnych i nielegalnych wysypiskach śmieci, bądź też spalane na polach lub w przydomowych kotłowniach, powodując emisję CO₂ i wielu innych szkodliwych substancji, takich jak rakotwórcze dioksyny, furany i inne wielopierścieniowe węglowodory aromatyczne. Taki sposób utylizacji jest niezmiernie szkodliwy dla środowiska, którego negatywny potencjał obrazuje skala zużywanych w procesach produkcji rolniczej tworzyw polimerowych, głównie w postaci folii. Zużycie tworzyw polimerowych w rolnictwie w Europie w 2012 r. wyniosło 1 930 000 Mg (wg PlasticEurope). Opracowanie metody pozwalającej na zwiększenie efektywności procesu recyklingu odpadowych folii rolniczych jest perspektywicznym kierunkiem zmierzającym do rozwiązania problemu skutecznego zagospodarowania większej liczby odpadów.

Obecnie w większości nowoczesnych zakładów przetwórczych, zajmujących się recyklingiem odpadowych folii polietylenowych w tym z rolnictwa, jedynie 45% mas. jest odzyskiwane w postaci regranulatu. Schemat technologii przetwarzania odpadowych folii z rolnictwa przedstawiono na rysunku 6. W trakcie recyklingu folii, podczas poszczególnych procesów jednostkowych, powstają dwa rodzaje odpadów: A i B. Pierwszy z nich to tzw. szlam, który powstaje podczas mycia rozdrobnionej folii i składa się z następujących frakcji:



Rys. 6. Schemat technologii przetwarzania odpadowych folii
Źródło: Opracowanie własne

- polietylenu w postaci płatków foliowych – 30% mas.,
- wilgoci – 25% mas.,
- zanieczyszczeń – 45% mas.,

Odpad, B to tzw. „zlepy” w postaci wycłoczyn tworzywa, które powstają podczas filtracji stopionego tworzywa polimerowego. Zawiera on następujące frakcje:

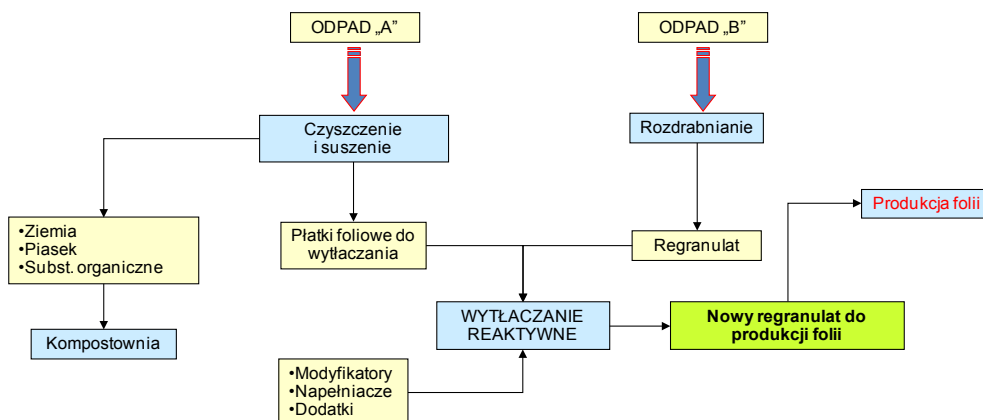
- polietylen – 90% mas.,
- zanieczyszczenia – 10% mas.

Generowane podczas recyklingu folii rolniczych odpady w niezmienionej postaci są odpadem nadającym się jedynie do składowania na wysypiskach lub do utylizacji w spalarni odpadów.

5. Koncepcja przetwarzania odpadów z procesu recyklingu folii

W celu zwiększenia efektywności recyklingu przedstawiono koncepcję otrzymywania nowego materiału polimerowego z wykorzystaniem odpadów powstających na linii do recyklingu folii. Zakłada ona wytworzenie nowego użytecznego materiału polimerowego. Schemat proponowanego rozwiązania przedstawiono na rysunku 7. Uzyskany surowiec w postaci regranulatu może być ponownie wykorzystany do produkcji szerokiego asortymentu folii dla rolnictwa, spełniając w ten sposób założenia gospodarki o obiegu zamkniętym – *Circular Economy*.

Wprowadzenie do praktyki produkcyjnej proponowanego rozwiązania wymaga szeregu badań, które obecnie są realizowane w Zakładzie Inżynierii Materiałowej w Głównym Instytucie Górnictwa w ramach projektu z NCBiR pt.: *Wielowarstwowa folia do konserwacji pasz na bazie odpadów z procesu recyklingu folii rolniczych o niskim wpływie na środowisko w całym cyklu życia*. Realizacja tego projektu przyczyni się do zwiększenia wydajności procesu recyklingu i wytwarzania regranulatu zastępującego oryginalne droższe surowce, wytwarzane z surowców ropopochodnych, charakteryzujące się większym negatywnym wpływem dla środowiska niż te pochodzące z recyklingu.



Rys. 7. Schemat proponowanego rozwiązania

Źródło: Opracowanie własne

6. Możliwe zastosowanie materiałów odzyskanych w procesie recyklingu tworzyw polimerowych

Recykling jest procesem odzyskiwania materiału lub energii ze stałych odpadów. Najbardziej znane są dwa modele wykorzystania powstałego materiału:

- recykling materiałowy – wytwarzanie regranulatów służących do produkcji folii i innych wytłaczanych czy wtryskiwanych produktów (Briassoulis i in. 2013),
- recykling energetyczny – np. dodawanie do paliw stałych, czy konwersja mieszaniny tworzyw sztucznych do paliw poprzez pirolizę cząsteczek o długich łańcuchach węglowodorowych do węglowodorów o krótkich łańcuchach w atmosferze beztlenowej (Wong i in. 2017).

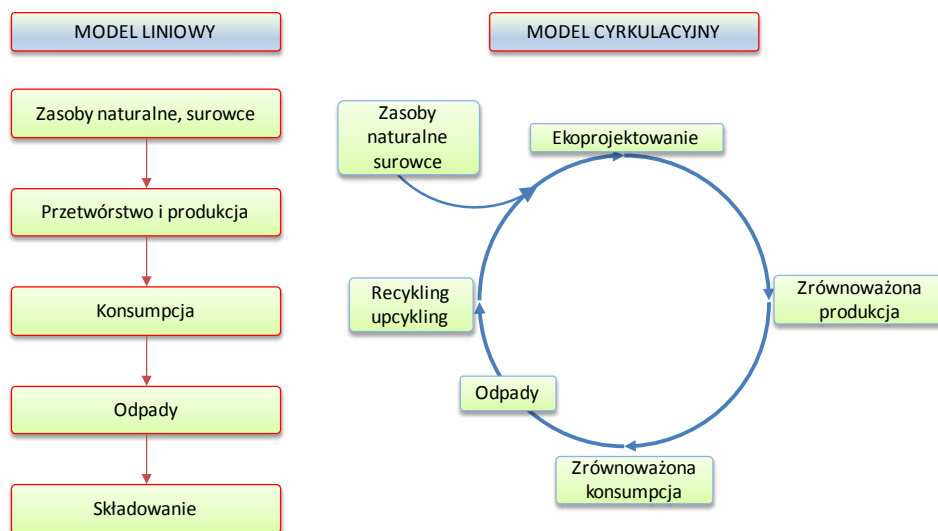
Wytworzony z odzyskanych materiałów regranulat jest wykorzystywany do produkcji folii, opakowań, rur, i wielu innych produktów (Briassoulis i in. 2013). Dodanie objętościowo 30% dodatków na bazie polietylenu lub polipropylenu, powstałych w wyniku recyklingu, znacząco poprawia parametry masy bitumicznej (Zoorob i Suparma 2000). Dodatkowo odpady z tworzyw sztucznych mogą być wykorzystywane jako syntetyczne spoiwo do produkcji materiałów kompozytowych. W tej metodzie odpadowe tworzywa mieszane są z piaskiem i topione, celem uzyskania kompozycji podobnej do betonu (Akçaoğlu 2015). Często w przypadku silnie zanieczyszczonych tworzyw stosuje się ich konwersję do bio paliw polegającą na poddaniu materiału procesowi pirolizy, degradującym termicznie cząsteczki surowca w środowisku beztlenowym. W wyniku tego wytwarzane są trzy główne rodzaje produktów (Dayana i in. 2016): olej pizolityczny (bioolej), gaz pizolityczny (biogaz) oraz stała pozostałość węglowa (karbonizat) (Czarnocka 2015).

7. Regranulaty a gospodarka o obiegu zamkniętym

Tworzywa pozyskane podczas recyklingu odpadów tzw. regranulaty stanowią alternatywę dla tradycyjnych tworzyw polimerowych pochodzenia petrochemicznego i wpisują się w najnowszy trend światowej gospodarki, gospodarki o obiegu zamkniętym (ang. *circular economy*). Jest on promowany między innymi przez stowarzyszenie PlasticEurope (PlasticEurope 2015). Stowarzyszenie to opublikowało rekomendacje dla producentów tworzyw sztucznych w sprawie planowanego nowego pakietu propozycji dotyczących gospodarki o obiegu zamkniętym i wezwało do ustanowienia do roku 2025 zakazu składowania nadających się do recyklingu i odzysku odpadów pokonsumenckich, jako podstawowego warunku umożliwiającego poprawę efektywności wykorzystania zasobów w Europie.

Gospodarka o obiegu zamkniętym (cyrkulacyjna) ma na celu zmniejszenie ilości odpadów do zera, a projektowanie poszczególnych elementów produktu powinno uwzględniać ich demontaż, przetworzenie i ponowne wykorzystanie. Podstawową cechą gospodarki cyrkulacyjnej jest systemowe myślenie, zgodnie, z którym produkt jest traktowany jako jeden z elementów cyklu życia, uwzględniającego etap przetwarzania i wielokrotnego wykorzystania. Zgodnie z założeniami Fundacji Ellen MacArthur podstawowym celem gospodarki cyrkulacyjnej jest używanie surowców, a nie ich zużywanie oraz przetwarzanie produktów po zakończonej fazie użytkowania. Fundacja Ellen MacArthur opracowała raport pn. *Towards the Circular Economy* (Ellen MacArthur Foundation 2015). Jest to pierwszy raport obejmujący gospodarcze, biznesowe i organizacyjne możliwości przejścia z modelu gospodarki liniowej na model gospodarki cyrkulacyjnej. Gospodarka cyrkulacyjna jest również zamienne nazywana gospodarką o cyklu zamkniętym, modelem „od kołyski do kołyski” (*from cradle to cradle*) lub gospodarką o pętli zamkniętej. Nie jest to tylko metoda czy narzędzie, ale jest to filozofia postępowania, która wyznacza kierunek działania i sposób myślenia. Dotychczas znany model gospodarki liniowej, przedstawiający cykl życia produktu od wydobycia surowców do generowania odpadów, okazuje się być niewystarczający ze względu na pojawiające się problemy ze wzrastającą ilością odpadów na składowiskach. Dlatego należy dążyć do stworzenia zrównoważonego gospodarowania zasobami. Jako alternatywne rozwiązanie powstała gospodarka cyrkulacyjna, która propaguje nowe podejście systemowe, zgodnie z którym produkty podlegają ponownemu zużyciu. Założenia gospodarki o obiegu zamkniętym w porównaniu z modelem gospodarki liniowej przedstawiono na rysunku 8.

Gospodarka cyrkulacyjna, zgodnie z Komunikatem Komisji Europejskiej (Komisja Europejska 2014), jest systemem, w którym cykl życia produktu uwzględnia jego ponowne wielokrotne wykorzystanie w sposób produktywny, tworząc w ten sposób wartość dodaną. Model gospodarki cyrkulacyjnej charakteryzuje się zamkniętą strukturą pętli, przedstawiającą nowe podejście do przepływu materiałów w odróżnieniu od modelu gospodarki liniowej. Zgodnie z wytycznymi Komisji Europejskiej (Komisja Europejska 2010; Komisja Europejska 2011a), strategia dotycząca racjonalnej gospodarki zasobami powinna polegać na: rozwijaniu gospodarki niskoemisyjnej, efektywnie korzystającej z zasobów, korzystaniu z zasobów odnawialnych, uniezależnieniu wzrostu gospodarczego od wykorzystania zasobów nieodnawialnych i energii, ograniczeniu emisji dwutlenku węgla, zwiększeniu konkurencyjności oraz zapewnieniu bezpieczeństwa energetycznego. W celu konsekwentnej realiza-



Rys. 8. Przejście od koncepcji modelu liniowego gospodarki do modelu o obiegu zamkniętym
 Źródło: Korol 2016

cji tych zadań Komisja Europejska przedstawiła *Plan działań na rzecz zasobooszczędnej Europy*, zgodnie z którym do roku 2020 obywatele i organy rządowe powinny wybierać najbardziej zasobooszczędne produkty i usługi. Ich decyzje dotyczące zakupów będą skłaniać przedsiębiorstwa do wprowadzania innowacji i dostarczania bardziej zasobooszczędnych produktów (Komisja Europejska 2011b). Jednym z głównych celów planu działań, jak również gospodarki cyrkulacyjnej, jest przekształcanie odpadów w zasoby. Kolejnym dokumentem Komisji Europejskiej jest komunikat *Ku gospodarce o obiegu zamkniętym: program zero odpadów dla Europy* (Komisja Europejska 2014), zgodnie z którym gospodarka o obiegu zamkniętym stanowi strategię rozwoju, zakładającą wzrost gospodarczy bez zwiększania konsumpcji zasobów, zmianę struktury łańcuchów produkcji oraz przemianę systemów przemysłowych. Komisja Europejska (Komisja Europejska 2011b) propaguje efektywne korzystanie z surowców krytycznych i ich recykling w ramach inicjatywy na rzecz surowców. W gospodarce o obiegu zamkniętym należy zachęcać do wykorzystywania zasobów odnawialnych oraz tych pochodzących z recyklingu odpadów.

8. Wnioski

Folie rolnicze po okresie użytkowania, nie powinny trafiać na składowiska czy być spalane w przydomowych paleniskach. Składowanie odpadów z tworzyw polimerowych jest istotnym problemem środowiskowym, należy zatem podejmować działania w kierunku ich maksymalnego zagospodarowania, co jest istotnym aspektem gospodarki o obiegu zamkniętym, zgodnie z którą należy ograniczać zużycie surowców pierwotnych. Przedstawiona kon-

cepcja przetwarzania odpadów z linii recyklingu folii pozwala na intensyfikację procesu recyklingu i zwiększenie jego skuteczności, co jest perspektywnym kierunkiem zmierzającym do rozwiązania problemu skutecznego zagospodarowania większej liczby odpadów folii rolniczych, których zużycie stale rośnie ze względu na rozwój agrotechniki.

Stosowanie przedstawionej koncepcji przez przetwórców tworzyw polimerowych, głównie firmy recyklingowe, pozwoli im na spełnienie przyszłych wymogów stawianych przez Komisję Europejską w ramach programu „Zero odpadów” narzucającą przedsiębiorcom obowiązek minimalizacji odpadów i zagospodarowanie w recyklingu materiałowym 100% nadających się do tego odpadów.

Praca powstała w ramach projektu NCBiR: POIR.04.01.02-00-0093/16, pt.: Wielowarstwowa folia do konserwacji pasz na bazie odpadów z procesu recyklingu folii rolniczych o niskim wpływie na środowisko w całym cyklu życia.

Literatura

- Achillas D.S i in. 2008 – *Recycling techniques of polyolefins from plastic wastes sprężystości*. Global NEST Journal nr 1, t. 12, s. 114–122.
- Akçaozogl̇u S. 2015 – *Evaluation of waste plastics as recycled plastics composite materials*. Edorium™ Journal of Waste Management nr 1, Wilmington (?), s. 16–19.
- Brissoulis D. i in. 2013 – *Technical specifications for mechanical recycling of agricultural plastic waste*. Waste Management nr 6, New York, t. 33, s. 1516–1530.
- Czajczyńska D. i in. 2017 – *Potential of pyrolysis processes in the waste management sector*. Thermal Science and Engineering Progress t. 3, s. 171–197.
- Czarnocka J. 2015 – *Zastosowanie pirolizy mikrofalowej do przetwarzania biomasy*. Przemysłowy Instytut Motoryzacji, Warszawa.
- Dayana S. i in. 2016 – *A review on pyrolysis of plastik wastes*. Energy Conversion and Management t. 115, Kuala Lumpur, s. 308–326.
- Ellen MacArthur Foundation 2015: *Towards the Circular Economy: Economic and Business Rationale for an Accelerated Transition*. Cowes.
- Komisja Europejska 2010: *Communication From The European Commission Europe 2020. A European strategy for smart, sustainable and inclusive growth*, COM/2010/2020.
- Komisja Europejska 2011a: *Komunikat Komisji do Parlamentu Europejskiego, Rady, Europejskiego Komitetu Ekonomiczno-Społecznego i Komitetu Regionów. Stawianie Czola Wyzwaniom Związanym z Rynekami Towarowymi i Surowcami*. COM/2011/25, www.eurlex.europa.eu.
- Komisja Europejska 2011b: *Komunikat Komisji do Parlamentu Europejskiego, Rady, Europejskiego Komitetu Ekonomiczno-Społecznego i Komitetu Regionów. Plan działania na rzecz zasobooszczędnej Europy*. COM/2011/571, www.eurlex.europa.eu.
- Komisja Europejska 2014: *Komisji do Parlamentu Europejskiego, Rady, Europejskiego Komitetu Ekonomiczno-Społecznego i Komitetu Regionów ku gospodarce o obiegu zamkniętym: program „zero odpadów” dla Europy*. COM/2014/398, www.eurlex.europa.eu.
- Korol J. 2016 – *Ocena śladów środowiskowych na przykładzie biokompozytów i tworzyw polimerowych*. Główny Instytut Górnictwa, Katowice.
- Leviatan L. i Barros A. 2003 – *Recycling Agricultural Plastics In New York State*. Cornell University, New York.
- PlasticEurope 2015: *Tworzywa sztuczne – Fakty 2015. Analiza produkcji, zapotrzebowania oraz odzysku tworzyw sztucznych w Europie*. http://www.plasticseurope.org/documents/document/20151123112635-fakty_o_tworzywach_2015_pl.pdf.
- PlasticEurope 2016: *Plastics – the Facts 2016*. http://www.plasticseurope.org/documents/document/20161014113313-plastics_the_facts_2016_final_version.pdf.

- Ragaert K. i in. 2017 – *Mechanical and chemical recycling of solid plastic waste*. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2017.07.044>.
- Shen L. i Worrell E. 2014 – *Chapter 13 – Plastic Recycling*. *Handbook of Recycling*, Waltham, s. 179–190.
- Vox G. i in. 2016 – *Mapping of Agriculture Plastic Waste*. *Agriculture and Agricultural Science Procedia* t. 8, s. 583–591.
- Wong S.L. i in. 2017 – *Conversion of low density polyethylene (LDPE) over ZSM-5 zeolite to liquid fuel*. *Fuel* t. 192, London, s. 71–82.
- Zoorob S.E. i Suparna L.B. 2000 – *Laboratory design and investigation of the properties of continuously graded Asphaltic concrete containing recycled plastics aggregate replacement (Plastiphalt)*. *Cement and Concrete Composites* nr 4, t. 22, Amsterdam, s. 233–242.

Część III

Biogospodarka

Beata KOŃCZAK* Paweł ZAWARTKA*

Produkcja fermentatu i kompostu z osadów ściekowych dla efektywnego wdrażania gospodarki cyrkularnej

STRESZCZENIE. Z uwagi na ograniczoną dostępność zasobów naturalnych oraz uzależnienie gospodarki europejskiej od importu surowców, konieczne jest podejmowanie działań w zakresie zmian funkcjonowania istniejącej branży wodno-ściekowej w myśl paradygmatu NEW (z ang. Nutrient-Energy-Water). Paradygmat ten stanowi nowe, całościowe podejście dla procesów oczyszczania ścieków, ukierunkowane na produkcję zasobów i energii. W pracy przedstawiono rozwiązania technologiczne, które umożliwiają przekształcanie osadów ściekowych w wartościowy produkt (fermentat lub kompost) do rolniczego wykorzystania. Osady ściekowe są bogatym źródłem związków organicznych, azotu, fosforu i częściowo potasu. Stanowią one także materiał strukturyzujący glebę i czasowo magazynujący wodę, co jest szczególnie istotne przy zastosowaniu tego typu nawozów w rolnictwie. Zaletą nawozów organicznych z osadów ściekowych jest także powolne uwalnianie składników odżywczych, co ogranicza zjawisko przenawożenia i wymywania biogenów do wód powierzchniowych. Tym samym wytwarzanie nawozów z osadów ściekowych spełnia założenia paradygmatu NEW, gdyż proces ten pozwala na odzysk zasobów, przy jednoczesnej ochronie wód. W pracy omówiono także kryteria utraty statusu odpadów z uwzględnieniem wymagań dotyczących: jakości produktu i materiałów wejściowych, procesów przetwarzania osadów ściekowych w produkt do zastosowań rolniczych, procedur zapewniania jakości i dostarczania informacji.

Production of digestate and compost from sewage sludge for the effective implementation of circular economy

ABSTRACT. Due to the limited availability of natural resources and the dependence of European economy of the raw materials import, it is necessary to take action in terms of changes in the functioning of the existing water and wastewater industry under the NEW (Nutrient-Energy-Water) paradigm. This paradigm is a new, holistic approach to wastewater treatment processes towards the production of resources and energy from sludge. In this article are presented the technological solutions for the transformation of sewage sludge into a valuable product (digestate or compost) for agricultural use. Sewage sludge are a rich source of organic compounds, nitrogen, phosphorus and potassium. They are also a soil-forming material. The advantage of organic fertilizer produced from sewage sludge is their ability to slow release of nutrients. It makes the absorption of nutrition easier for the plant and

* Dr inż., Główny Instytut Górnictwa, Katowice.

reduces the risk of over-fertilization. The production of fertilizers from sewage sludge fulfills of NEW paradigm. This process allows the recovery of resources and the protection of water. In this work are also discussed the end-of-waste criteria: the quality of the product and of the input materials, processing of sewage sludge in the product for agricultural applications, procedures for quality assurance and delivery information.

1. Wstęp

W Polsce, według raportu Głównego Urzędu Statystycznego (GUS) z 2015 r., funkcjonowało ponad 3268 oczyszczalni ścieków. Z uwagi na przebiegające w nich procesy oczyszczania ścieków, mają one szczególne znaczenie dla zdrowia ludzi i stanu środowiska, a zwłaszcza ekosystemów wodnych. Z drugiej jednak strony procesy oczyszczania ścieków, obok górnictwa, metalurgii i produkcji nawozów, należą do najbardziej energochłonnych, przez co mają istotny wpływ na stan środowiska (Banaszek 2017). Zatem przedsiębiorstwa wodno-kanalizacyjne powinny być już nie tylko ukierunkowane na świadczenie usług polegających na oczyszczaniu ścieków, ale i powinny podejmować działania mające na celu minimalizację zużycia energii i/lub jej odzysk energii oraz surowców ze strumienia ścieków lub osadów ściekowych. Działania te wpisują się w paradygmat NEW, czyli Nutrienty – Energia – Woda (Gromiec 2017).

Poprawa efektywności energetycznej jest zwykle prowadzona poprzez wykonanie audytu energetycznego, który pozwala określić kierunki i możliwości poprawienia efektywności energetycznej w danym obiekcie w zakresie gospodarki energią elektryczną, ciepłą i chłodem. Audyt energetyczny kończy się wskazaniem konkretnych rozwiązań zarówno technicznych (np. wymiany starego sprzętu), jak i organizacyjnych (wprowadzenie systemu kontroli) wraz z analizą kosztów wprowadzonych zmian (Tokarski 2013). Innymi rozwiązaniami pozwalającymi na zmniejszenie zużycia lub odzysk energii w oczyszczalni ścieków jest wykorzystanie istniejącego terenu pod panele fotowoltaiczne czy odzysk ciepła odpadowego ze ścieków oraz biogazu w wyniku fermentacji osadów ściekowych. Gromiec (2013) podaje, że istnieje także możliwość montażu turbiny na stopniu wodnym, w celu wykorzystania energii spadu oczyszczonych ścieków do odbiornika. Takie rozwiązanie zastosowano m.in. w oczyszczalni ścieków w Płaszowie, które pozwala wygenerować moc około 80 kW.

Ścieki i osady ściekowe są też cennym źródłem zasobów, takich jak woda, azot, fosfor, biopolimery, wodór. Istnieją technologie pozwalające pozyskać wodę do zastosowań przemysłowych po przeprowadzeniu procesu jej „odnowy”. Ciekawym rozwiązaniem jest też produkcja wodoru ze ścieków i wykorzystaniu go na własne potrzeby oczyszczalni lub też jako alternatywnego paliwa do pojazdów mechanicznych (Markowski i in. 2010).

Ścieki mogą być też źródłem cennych biopolimerów. Jednym z najbardziej pożądanym polimerów pozyskiwanych ze ścieków są polihydroksykwas (PHA). Średnie ich stężenie w biomacie może wynosić nawet 50% s.m. Zaletą PHA jest to, że są całkowicie biodegradowalne i mogą być przekształcone w bioplastik do szerokiego zastosowania w przemyśle (Sing-Key 2017; Pittmann i in. 2017; Ciesielski i in. 2013).

W pracy skupiono się przede wszystkim na analizie możliwości odzysku zasobów w oczyszczalni ścieków poprzez recykling substancji organicznych i częściowo mineralnych zawartych w osadach ściekowych i wykorzystaniu ich jako nawozów. Takie rozwiąza-

nie wpisuje się w nurt zrównoważonego środowiska, gdyż minimalizuje zużycie zasobów naturalnych (m.in. fosforu) na potrzeby produkcji nawozów.

1.1. Charakterystyka osadów ściekowych

Osady ściekowe są oddzielną od fazy płynnej masą, składającą się ze związków mineralnych i organicznych, ale stanowią odpad, który w zależności od miejsca wytwarzania różni się kodem i klasyfikacją, a także możliwościami jego dalszego zagospodarowania.

Zgodnie z danymi GUS w Polsce w 2015 roku powstało 951,5 tys. Mg s.m. osadów ściekowych, w tym aż 568,0 tys. Mg s.m. stanowiły osady komunalne. W 2015 roku osady ściekowe wykorzystywane były przede wszystkim w rolnictwie, jak też przekształcane w procesach termicznych. Tylko niewielka część osadów przekazywana była do składowania i rekultywacji. Są one bowiem bogatym źródłem związków organicznych, azotu, fosforu i częściowo potasu.

2. Rozwiązanie technologiczne przekształcania osadów ściekowych

Zgodnie z Ustawą z dnia 14 grudnia 2012 r. o odpadach procesy biologicznego przekształcania odpadów biodegradowalnych klasyfikowane mogą być jako procesy R3 (recykling organiczny). Jeżeli jakość produktów procesu biologicznego dedykowanego jako proces recyklingu organicznego nie odpowiada wymaganiom dla nawozów lub środków wspomagających uprawę roślin wówczas klasyfikacja musi zostać zmieniona na D8.

Osady ściekowe mogą być przekształcane biologicznie w procesach:

- tlenowych – kompostowanie, którego głównym celem jest wytworzenie kompostu – produktu, który nie będzie już odpadem, gdy będzie spełniał kryteria jakościowe dla nawozów lub środków wspomagających rozwój roślin;
- beztlenowych – fermentacja metanowa, której celem jest wytworzenie biogazu oraz pofermentatu, który nie będzie już odpadem, gdy będzie spełniał kryteria jakościowe dla nawozów lub środków wspomagających rozwój roślin.

Poniżej scharakteryzowano każdą z metod biologicznego przekształcania osadów ściekowych.

2.1. Kompostowanie

Kompostowanie to proces polegający na kontrolowanym, tlenowym rozkładzie materii organicznej w wyniku naturalnie przebiegających procesów. Jego produktem końcowym jest kompost, który może znaleźć zastosowanie jako ulepszcza gleby, nawóz, warstwa próchniczotwórcza (tab. 1). W odróżnieniu od obornika czy innego materiału odpadowego bogatego w substancje organiczne łatwiej się go przechowuje, transportuje, nie stwarza też uciążliwości zapachowych (Gajalakshmi i in. 2008).

Kompostowanie odbywać się może w pryzmach, kontenerach, tunelach w systemie otwartym lub zamkniętym. Najpopularniejszą metodą kompostowania, z uwagi na prostotę procesu i niskie koszty eksploatacyjne, jest kompostowanie w pryzmach otwartych. Kompostowanie w systemach zamkniętych wymaga wprowadzenia dodatkowo napowietrzania pryzmy kompostowej, jak i odbierania i oczyszczania gazów odlotowych. Proces kompostowania trwa od kilku tygodni do kilku miesięcy, a temperatura prowadzenia procesu waha się w zakresie 20–70°C. Kompostowanie w temperaturze 70°C pozwala na higienizację kompostu.

TABELA 1. Zastosowanie kompostu

Dział	Zastosowanie
Agronomia	Wzbogacanie gleby
Ogrodnictwo	Starter dla wzrostu siewek, nasion, wzbogacanie gleby, naturalny nawóz
Zadarnianie	Starter dla wzrostu nasion, siewek, wzbogacanie gleby, warstwa wierzchnia gleby, naturalny nawóz, ściółka
Leśnictwo	Starter dla wzrostu nasion, siewek, wzbogacanie gleby, warstwa wierzchnia gleby, naturalny nawóz, ściółka
Rewitalizacja	Wzbogacanie gleby, ściółka
Bioremediacja	Wzbogacanie gleby, ściółka
Zagospodarowanie przestrzeni miejskiej i wiejskiej	Wzbogacanie gleby, ściółka

Źródło: Opracowanie własne na podstawie: Cooperband 2002.

2.2. Fermentacja

Fermentacja to beztlenowy proces rozkładu związków organicznych obecnych w osadach ściekowych. W jej wyniku powstają lotne kwasy tłuszczowe, które powtórnie można wykorzystać w oczyszczalni ścieków jako źródło związków węgla w procesie denitryfikacji ścieków oraz biogazu, który może być wykorzystany jako źródło energii w procesach oczyszczania. Proces fermentacji osadów ściekowych prowadzi się zwykle w warunkach mezofilowych, tj. w zakresie temperatur 30–42°C. W celu higienizacji osadów ściekowych wskazane jest prowadzenie fermentacji termofilowej w temperaturze 50–60°C. Podwyższenie temperatury niszczy mikroorganizmy patogenne, skraca czas fermentacji. Z drugiej jednak strony fermentacja w warunkach termofilnych jest procesem trudnym do przeprowadzenia, z uwagi na wysoką wrażliwość mikroorganizmów termofilnych na zmiany parametrów prowadzenia procesu. Ponadto wymaga większego nakładu energii dla podgrzania osadów ściekowych (Dąbrowska 2015).

W tabeli 2 zestawiono warunki niezbędne do przeprowadzenia procesu kompostowania i fermentacji osadów ściekowych.

TABELA 2. Charakterystyka procesów przetwarzania odpadów biodegradowalnych

Nazwa technologii	Opis procesu	Produkty powstające w trakcie procesu
Fermentacja metanowa	Wysokotemperaturowa hydroliza odpadów przez 4–6 dni. Fermentacja w zakresie możliwie mezofilowym przez 20 dni lub stopniowa fermentacja w zakresie mezofilowym, a następnie termofilowym.	Ferment – produkt spełnia wymagania dla nawozów lub środka wspomagającego rośliny, proces R3, kierowany do wykorzystania
		Produkt nie spełnia wymagania dla nawozów lub środka wspomagającego rośliny, proces D8, kierowany do składowania lub do rekultywacji
Kompostowanie	Proces dwustopniowy, łączny czas kompostowania – min. 12 tygodni,	Kompost – produkt spełnia wymagania dla nawozów lub środka wspomagającego rośliny, proces R3, kierowany do wykorzystania
		Produkt nie spełnia wymagania dla nawozów lub środka wspomagającego rośliny, proces D8, kierowany do składowania lub do rekultywacji
Fermentacja metanowa + kompostowanie	Fermentacja w zakresie mezofilowym – min. 20 dni, a w zakresie termofilowym – min. 12 dni Kompostowanie przefermentowanego materiału	Kompost – produkt spełnia wymagania dla nawozów lub środka wspomagającego rośliny, proces R3, kierowany do wykorzystania
		Produkt nie spełnia wymagania dla nawozów lub środka wspomagającego rośliny, proces D8, kierowany do składowania lub do rekultywacji

Źródło: Opracowanie własne na podstawie: Wytycznych Ministerstwa Środowiska – Departamentu Gospodarki Odpadami 2008

3. Kryteria utraty statusu odpadów

3.1. Kryterium jakości materiałów wejściowych

Kryterium jakości materiałów wejściowych dla produkcji kompostu i fermentatu powstało w celu zapewnienia możliwości kontrolowania:

- zdatności tych produktów do zastosowania przyrodniczego (np. rolnictwo, podłoża hodowlane),
- bezpieczeństwa używania tych produktów w zakresie ochrony zdrowia i środowiska.

Zapewnienie odpowiedniej jakości kompostu i fermentatu sprawia, że są one alternatywą dla materiałów surowych o podobnym zastosowaniu. Kryteria jakości obejmują następujące parametry:

- minimalna zawartość materii organicznej – w celu wykluczenia z rynku produktów o niskiej jakości, nie spełniających oczekiwań rynkowych, powodujących negatywny wpływ na środowisko i zdrowie ludzi, niespełniających wymogów technicznych, przeciwdziałaniu mieszanemu z materiałami nieorganicznymi.
- minimalna stabilność – powinna gwarantować ograniczenie emisji metanu i odorów w trakcie przechowywania i aplikacji (14% emisji występuje w trakcie produkcji

i przechowywania, 2% emisji w trakcie aplikacji), wykluczenie z wprowadzenia na rynek produktów nie poddanych obróbce (tzw. materiałów „poszatkuj i rzuć”),

- nieobecność patogenów,
- ograniczona zawartość nasion chwastów i diaspor roślinnych,
- ograniczona zawartość zanieczyszczeń makroskopowych – obecność szkła, metali, plastiku jest potencjalnie niebezpieczna dla użytkowników tego produktu oraz dla zwierząt na wypadek połknięcia, może powodować degradację gleby i spadek jej wartości. Zalecana kontrola w tym zakresie – kompletna degradacja materii organicznej kompostu lub fermentatu za pomocą bardzo silnego utleniacza chemicznego albo metodą sitową.
- ograniczona zawartość metali ciężkich – w celu zapewnienia wymogów środowiskowych, ograniczenia ryzyka wprowadzenia znacznych ilości metali ciężkich do środowiska w wyniku niewłaściwego użytkowania produktu, ograniczenie zateżenia metali ciężkich w glebie (w wyniku rozkładu materii organicznej zawartej w kompoście/fermentacie), ograniczenia mieszania strumieni odpadów. Przy odpowiednim doborze i kontroli materiału wejściowego można uzyskać produkt o poziomie zanieczyszczeń niższym niż wartości graniczne.

W chwili obecnej trwają prace nad wprowadzeniem kolejnego wymogu odnośnie składu jakościowego produktu, a mianowicie zawartości zanieczyszczeń organicznych. Ma to na celu wyeliminowanie zagrożenia stosowania tych materiałów w krajach, w których zgodnie z danymi historycznymi mogło dojść do niekontrolowanego skażenia gleby zanieczyszczeniami organicznymi, a w których nie prowadzi się rutynowanych badań w tym zakresie. Wprowadzenie tego wymogu ograniczy też tzw. zjawisko nielegalnego kanału utylizacji skażonych strumieni odpadów poprzez mieszanie ich ze strumieniem niezanieczyszczonych odpadów. Monitoring zawartości zanieczyszczeń organicznych w produkcie ułatwiłby kontrolowanie materiałów wejściowych, na co nie pozwala inspekcja wzrokowa (np. odróżnienie odpadów zielonych pochodzących z ogrodów, parków od odpadów z wykaszania rejonu dróg). W celu ułatwienia opracowania odpowiednich kryteriów jakościowych produktów wejściowych powstaje europejska baza wiedzy na temat substancji organicznych zanieczyszczających kompost i fermentat oraz wdrażane są miejscowe programy monitorowania zanieczyszczeń organicznych.

Wymagania jakościowe, jakie powinny spełniać osady ściekowe, jako materiał wejściowy do procesów fermentacji i kompostowania, są następujące:

- zawartość substancji organicznej:
 - min. 60% s.m. w procesach kompostowania oraz fermentacji metanowej, jeżeli głównym celem procesu jest wytworzenie nawozów organicznych, zawierających substancję organiczną w ilości ponad 30% s.m.,
 - min. 40% s.m., gdy celem przetwarzania biologicznego jest wytworzenie środków wspomagających uprawę roślin lub biologiczne unieszkodliwianie odpadów.
- wilgotność – uwodnienie odpadów musi zostać doprowadzone do poziomu optymalnego dla procesu przetwarzania (R3 lub D8), tj. 45–60% dla procesów tlenowych, >60% dla procesów fermentacji suchej, >85% dla fermentacji mokrej,

- zawartość NPK:
 - iloraz C/N – 25-35, iloraz C/P ok. 100,
 - zawartość azotu w przetwarzanej mieszaninie powinna być większa niż 0,3% s.m. (z uwagi na ubytek azotu podczas procesów biologicznego przekształcania oraz wymaganą minimalną zawartość azotu w nawozie 0,3% s.m.), zawartość fosforu nie mniejsza niż 0,2% s.m. jako P₂O₅, a potasu nie mniej niż 0,2% wyrażone jako K₂O. Niezbędne jest prowadzenie monitoringu składu odpadów oraz zmian NPK w odpadach w trakcie biologicznego przetwarzania,
- zawartość metali ciężkich – nie powinna przekraczać wartości dopuszczalnej w stosowanych rozporządzeniach, należy uwzględnić 1,5–2-krotne zażęzanie metali w produkcie w stosunku do ich zawartości w mieszaninie przetwarzanych odpadów.

Szczegółowo dopuszczalną zawartość metali ciężkich w osadach ściekowych przeznaczonych do biologicznego przetwarzania oraz w produktach do zastosowań rolniczych podano w tabeli 3.

TABELA 3. Maksymalne zawartości metali w mieszaninach odpadów do biologicznego przetwarzania oraz dopuszczalne zawartości metali w nawozach i środkach wspomagających roślin

Metal	Jednostka	Zawartość metali ciężkich	
		maksymalne zalecane w odpadach przed biologicznym przetwarzaniem	dopuszczalne w nawozie organicznych lub środku wspomagającym uprawę roślin
Nikiel	mg/kg s.m.	≤ 40	≤ 60
Chrom	mg/kg s.m.	≤ 65	≤ 100
Cynk	mg/kg s.m.	–	–
Miedź	mg/kg s.m.	–	–
Ołów	mg/kg s.m.	≤ 90	≤ 140
Kadm	mg/kg s.m.	≤ 3	≤ 5
Rtęć	mg/kg s.m.	≤ 1	≤ 2

Źródło: Rozporządzenie Ministra Rolnictwa i Rozwoju Wsi z dnia 18 czerwca 2008 r. w sprawie wykonania niektórych przepisów ustawy o nawozach i nawożeniu (Dz.U. 2008, nr 119 poz. 765 z późn. zmian.).

Techniczna Grupa Robocza dopuściła tymczasowo traktowanie osadów ściekowych jako materiału wejściowego do produkcji kompostu i fermentatu w ramach krajowych systemów *end-of-waste* bądź podobnych systemów dla produktów. Tymczasowe dopuszczenie wynika z licznych problemów, jakie niesie ze sobą wykorzystywanie osadów ściekowych jako materiału wejściowego do produkcji kompostu i fermentatu, a mianowicie problemy związane z kosztami uzyskania zgodności, zaufania klientów, stabilnością prawną, wpływami rynkowymi, neutralnością technologiczną.

3.2. Wymogi procesów przetwarzania

Wymogi w zakresie procesów przewarzenia dotyczą przede wszystkim organizmów wskaźnikowych oraz profili czasowo-temperaturowych. Wymagania sanitarno-higieniczne dotyczą zawartości żywych jaj pasożytów jelitowych – *Ascaris sp.*, *Trichuris sp.*, *Toxocara sp.* oraz bakterii z rodzaj *Salmonella* itd.. Poniżej zestawiono w tabelach 4–5 wymagania odnośnie prowadzenia procesu kompostowania i fermentacji metanowej w celu otrzymania wysokowartościowego produktu, jakim jest kompost lub fermentat.

TABELA 4. Kryteria dotyczące procesów i technik obróbki kompostu

Sposób kompostowania	Temperatura procesu	Czas utrzymywania temperatury (minimum)	Liczba przerzuceń masy kompostowej
Kompostowanie w przyzmach	55°C	2 tygodnie	5
Kompostowanie w przyzmach	65°C	5 dni	2
Kompostowanie w komorach zamkniętych	60°C	1 tydzień	–

Źródło: Opracowano na podstawie: Wytycznych Ministerstwa Środowiska Departamentu Gospodarki Odpadami dotyczących wymagań dla procesów kompostowanie, fermentacji i mechaniczno-biologicznego przetwarzania odpadów (wg stanu prawnego na dzień 15 grudnia 2008 r.).

TABELA 5. Wymagane warunki fermentacji metanowej dla higienizacji osadów ściekowych

Proces fermentacji	Temperatura	Czas fermentacji	Zalecenia
Fermentacja termofilowa	>55°C	12d	przez 24h temp. powinna wynosić min. 55°C
Fermentacja mezofilowa	30–35°C	min. 20d	odpady surowe muszą być przez min. 1h poddane obróbce wstępnej w temp. 70°C
			odpady przefermentowane muszą być przez min. 1h poddane obróbce końcowej w temp. 70°C lub poddane dodatkowo kompostowaniu

Źródło: Opracowano na podstawie: Wytycznych Ministerstwa Środowiska Departamentu Gospodarki Odpadami dotyczących wymagań dla procesów kompostowanie, fermentacji i mechaniczno-biologicznego przetwarzania odpadów (wg stanu prawnego na dzień 15 grudnia 2008 r.).

3.3. Procedury zapewniania jakości i dostarczania informacji

Kompost lub fermentat powinien posiadać etykietę zawierającą następujące informacje:

- użyteczność w funkcji ulepszania gleby:
 - zawartość materii organicznej,
 - zawartość materii czynnej alkalicznej (zawartość CaO),

- użyteczność w kontekście nawożenia:
 - wartość odżywcza (N, P, K, Mg), w przypadku fermentatu dodatkowo zawartość S i azotu mineralnego (N-NH₄, N-NO₃),
 - zawartość mikrośladników odżywczych Cu, Zn w przypadku stężenia Cu > 100 mg/kgsm, Zn > 400 mg/kgsm.
- własności biologiczne:
 - zawartość nasion zdolnych do wykiełkowania i diaspor roślinnych,
 - ogólne własności materiału:
 - gęstość nasypowa, kąt zsypu, usypu,
 - masa objętościowa,
 - wielkość ziaren,
 - zawartość materii suchej lub uwodnienie,
 - pH,
 - przewodnictwo elektryczne (zasolenie).

oraz dodatkowo:

- opis obszarów zastosowań, w których jest możliwe użycie kompostu i fermentatu,
- zalecenia poprawnego użycia.

System zarządzania jakością kompostu/fermentatu powinien obejmować:

- kontrolę materiałów wejściowych opartą o wartości graniczne dla zawartości metali ciężkich, substancji makroskopowych, a czasem i zanieczyszczeń organicznych,
- monitorowanie procesów wytwarzania,
- próbkowanie zgodnie z wymogami prawnymi,
- okresowe kontrole przez podmiot zewnętrzny wraz z kontrolą jakości kompostu, fermentatu,
- certyfikację zakładu, produktu,
- informacje dotyczące zgodności z regulacjami prawnymi krajowymi,
- szkolenia pracowników.

4. Podsumowanie

Osady ściekowe są cennym źródłem zasobów, takich jak woda, azot, fosfor. Dzięki technologii kompostowania lub fermentacji możliwe jest ich przekształcenie w produkt (kompost lub fermentat) do rolniczego zastosowania. Proces przetwarzania osadów ściekowych w nawóz wpisuje się w myśl paradygmatu NEW. Istotne jest, aby już na etapie przygotowania materiału wejściowego (czyli osadów ściekowych) do procesu kompostowania i fermentacji spełniały one wymagania określone w kryteriach utarty statusu odpadów. Prowadzenie procesu kompostowania i fermentacji także powinno spełniać wymagania określone w kryterium dotyczącym sposobu przetwarzania osadów w produkt nawozowy lub środek wspomagający uprawę roślin, tak aby maksymalnie zapewnić higienizację osadów ściekowych i bezpieczeństwo odbiorcy końcowego kompostu lub fermentatu jako produktu nawozowego. W zakładach, w których prowadzone będzie prowadzony proces przekształcania

osadów ściekowych w ramach procesu R3 wdrożone muszą być odpowiednie procedury zapewniania jakości i dostarczania informacji.

Literatura

- Banaszek P. 2017 – *Optymalizacja zużycia energii na Oczyszczalni Ścieków Klimzowiec*. <http://www.ecocluster.com.pl/uploads/dynamic/magazine/optimalizacja-zuzycia-energii-na-oczyszczalni-ciekow-klimzowiec.pdf>, 03.08.2017.
- Ciesielski S., Pokoj T., Możejko J. i Klimiuk E. 2013 – *Molecular identification of polyhydroxyalkanoates-producing bacteria isolated from enriched microbial community*. Polish Journal of Microbiology nr 62, t. 1, s. 45–50.
- Cooperband L. 2002 – *The art and science of composting. A resources for farmers and compost producers*. Uniwersytet Wisconsin-Madison, Center for Integrated Agricultural Systems.
- Dąbrowska L. 2015 – *Wpływ sposobu prowadzenia fermentacji osadów ściekowych na produkcję biogazu*. Rocznik Ochrony Środowiska t. 17, s. 943–957.
- Gajalakshmi S. i Abbasi S.A. 2008 – *Solid Waste Management by Composting: State of the Art*. Critical Reviews in Environmental Science and Technology nr 38, t. 5, s. 311–400.
- Gromiec M. 2017 – *Gospodarka cyrkulacyjna w branży wodno-ściekowo-osadowej*. Materiały seminaryjne z Posiedzenia seminaryjnego Komisji Środowiska Senatu RP „Wykorzystanie ścieków i osadów ściekowych jako źródła energii i pozyskiwania surowców dla ograniczenia zmian klimatycznych”.
- Markowski M., Urbaniec K. i Grabczyk R. 2010 – *Zapotrzebowanie energii do produkcji wodoru metodą fermentacyjną z biomasy*. Inżynieria i Aparatura Chemiczna nr 49, t. 2, s. 79–80.
- Pittmann T. i Steinmetz H. 2017 – *Polyhydroxyalkanoate production on waste water treatment plants: process scheme, operating conditions and potential analysis for german and european municipal waste water treatment plants*. Bioengineering nr 4, s. 54.
- Sing-Key J. 2017 – *Resource Recovery Potential of Wastewater Treatment: Biopolymers*. Imperial College London.
- Tokarski M. 2013 – *Poprawa efektywności energetycznej – pierwszy krok na przykładzie audytu energetycznego MPWiK S.A. we Wrocławiu*. Materiały konferencyjne: XVI Sympozjum naukowo-techniczne WOD-KAN -EKO, Wrocław.
- Ustawa z dnia 14 grudnia 2012 r. o odpadach (tekst jednolity Dz.U. 2016, nr 0, poz. 1987 z późn. zmian.).

Marzena SMOL*, Agnieszka NOWACZEK**, Joanna KULCZYCKA***

Zagospodarowanie ubocznych produktów spalania biomasy oraz pofermentu z biogazowni rolniczych zgodnie z założeniami gospodarki o obiegu zamkniętym

STRESZCZENIE. Wykorzystanie materiałów odpadowych, w tym popiołów ze spalania biomasy oraz pofermentu w celach przemysłowych i rolniczych jest zgodne z założeniami programu zero odpadów dla Europy (2014), w którym podkreśla się, że trwały wzrost gospodarczy jest możliwy poprzez przechodzenie na gospodarkę o bardziej zamkniętym obiegu. W publikacji dokonano przeglądu powszechnie stosowanych metod zagospodarowania wybranych odpadów, tj. ubocznych produktów spalania (UPS) biomasy i pofermentu z biogazowni rolniczych, zgodnie z założeniami gospodarki o obiegu zamkniętym (GOZ). Wskazano, iż obecnie najczęściej stosowanymi metodami zagospodarowania UPS biomasy są: przyrodnicze wykorzystanie (nawożenie – dodatek do produktów nawozowych, rekultywacja – dodatek poprawiający strukturę gleby), przemysłowe wykorzystanie (głównie w budownictwie jako dodatek do cementu, dodatek pucolanowy, surowiec do wytwarzania sztucznych kruszyw, do produkcji betonów komórkowych, do stabilizacji gruntów w pracach drogowych, jako materiał do budowy nasypów) oraz składowanie. Z kolei wśród metod zagospodarowania masy pofermentacyjnej wyszczególniono jej przyrodnicze wykorzystanie, termiczną utylizację oraz składowanie.

Management of by-products from biomass combustion and waste digestate from agricultural biogas plants according to circular economy assumptions

ABSTRACT. The use of waste materials, including by-products of biomass combustion and waste digestate, for industrial and agricultural purposes is consistent with the assumptions of the “zero waste” programme for Europe (2014), which underlines that sustainable economic growth is possible by moving to a more circular economy (CE). The objective of this review is to present the commonly used methods of waste disposal – by-products of biomass combustion and waste digestate from agricultural biogas plants, according to the assumptions of circular econo-

* Dr, ** Mgr, Instytut Gospodarki Surowcami Mineralnymi i Energią PAN, Kraków.

*** Dr hab, prof. AGH, AGH Akademia Górniczo-Hutnicza, Kraków.

my. It was indicated that currently the most commonly used disposal methods of ashes from biomass combustion are: natural use (fertilization – additive for fertilizer products, reclamation – soil improver), industrial use (in the construction industry, as a component of the mixture of raw materials for cement production, raw material for aggregates production, for the concrete production, for land stabilization in road works, as a material for the construction of embankments) and storage. The natural use, thermal utilization and storage are listed as the methods of disposal of waste digestate from agricultural biogas plants.

1. Wstęp

Zgodnie z przyjętą w krajach europejskich hierarchią postępowania z odpadami, nadrzędnym celem jest zapobieganie ich powstawaniu oraz ograniczanie ilości (Rakoczy 2014). W ramach unieszkodliwiania odpadów recykling i inne metody odzysku powinny być traktowane priorytetowo. Ostatnią z metod wskazanych w hierarchii postępowania z odpadami jest ich unieszkodliwienie w bezpieczny dla środowiska sposób, np. poprzez selektywne składowanie. Postępowanie to, wynikające z szeroko rozumianego interesu społecznego, wpisuje się w aktualne działania na rzecz ochrony środowiska pozwalając wdrożyć idee zrównoważonej gospodarki odpadami. Ponadto działania związane z „zamknięciem obiegu” cyklu życia produktów dzięki zwiększeniu recyklingu i ponownego użycia jest zgodne z założeniami gospodarki o obiegu zamkniętym (GOZ), która jest nowym modelem gospodarczym Unii Europejskiej, w którym podkreśla się, iż minimalizacja wytwarzania odpadów jest kluczowym elementem stworzenia niskoemisyjnej, zasobooszczędnej, innowacyjnej i konkurencyjnej gospodarki (Mapa drogowa 2017).

Celem pracy jest przedstawienie przeglądu powszechnie stosowanych metod zagospodarowania wybranych odpadów pochodzących z sektora energetycznego, tj. ubocznych produktów spalania biomasy i pofermentu z biogazowni rolniczych, zgodnie z założeniami gospodarki o obiegu zamkniętym.

2. Gospodarka o obiegu zamkniętym a wykorzystania ubocznych produktów spalania biomasy (UPS) i pofermentu z biogazowni rolniczych

Wykorzystanie materiałów odpadowych, w tym popiołów ze spalania biomasy oraz pofermentu, w celach przemysłowych i rolniczych jest zgodne z założeniami programu zero odpadów dla Europy (COM. 398, 2014), w którym podkreśla się, że trwały wzrost gospodarczy jest możliwy poprzez przechodzenie na gospodarkę o bardziej zamkniętym obiegu. Komisja Europejska w Komunikacie „Ku gospodarce o obiegu zamkniętym” podkreśliła, że bardziej efektywne wykorzystanie odpadów może przynieść znaczne korzyści gospodarcze dla krajów członkowskich UE, w tym dla Polski. Systemy gospodarki o obiegu zamkniętym pozwalają zachować możliwie jak najdłuższą wartość dodaną produktów i zminimalizować ilość odpadów (COM 614, 2015). W ramach programu „Horyzont 2020”, analizowane są w wielu projektach różne możliwości zmian w zakresie gospodarki odpadami poprzez przejście na gospodarkę o obiegu zamkniętym na poziomie krajowym i międzynarodowym wspierające zastosowanie eko-innowacyjnych rozwiązań na rynku (Smol i in. 2015b). Ponowne wykorzystanie surowców,

które obecnie usuwa się jako odpady, jest jedną z kluczowych zasad przyjętego w grudniu 2015 r. pakietu dotyczącego gospodarki o obiegu zamkniętym (COM 614, 2015). Jedną z takich możliwości jest wykorzystanie popiołów ze spalania biomasy oraz odpadów pofermentacyjnych w produktach komercyjnych, np. nawozowych lub budowlanych, co było przedmiotem licznych badań. Wpływ popiołów ze spalania biomasy na właściwości fizykochemiczne gleb lekkich był analizowany m.in. w pracy Meller i Bilenda (2012). Poszukiwali oni możliwości zagospodarowania UPS mieszaniny zrębków drzewnych, wierzby energetycznej, kukurydzy i słomy w Elektrociepłowni Czechnica. Wstępne wyniki badań wskazują na korzystne oddziaływanie popiołów z biomasy na właściwości fizykochemiczne gleb lekkich. Mogą one działać odkwaszająco oraz poprawiać właściwości fizykochemiczne tych gleb. Autorzy wskazują, iż wprowadzanie popiołów do gleby jest zgodne ze zrównoważonym rozwojem i stanowi dobry sposób ich odzysku i recyklingu. Z kolei w pracy Obernbergera i Supancica (2009) podkreślono, iż aplikacja popiołu ze spalania biomasy do gruntów rolnych i leśnych jest powszechnie stosowaną metodą ich zagospodarowania w różnych krajach europejskich, np. w Szwecji, Finlandii, Austrii i Niemczech. Jednak stosowanie UPS biomasy jest obecnie utrudnione z powodu braku lub niewystarczającej ilości przepisów prawnych, logistyki, narastających problemów technicznych i ekonomicznych (wymagane kompleksowe analizy popiołów i gleby, brak technologii zoptymalizowanych pod kątem wprowadzania popiołu z biomasy), a także braku wiedzy i szkolenia osób odpowiedzialnych za nawożenie (Obernberger i Supancica 2009).

Zagospodarowanie pofermentu jako nawozu jest także zgodne z założeniami gospodarki o obiegu zamkniętym. Istnieją jednak pewne ograniczenia w dogłębowym aplikowaniu pofermentu, m.in. gleba nawożona masą pofermentacyjną musi być analizowana pod kątem zawartości metali ciężkich i ich wymywalności. W przypadku rolniczego wykorzystania pofermentu należy także brać pod uwagę aspekty ekonomiczne, ponieważ koszt badań glebowych, wymaganych przy odzysku masy pofermentacyjnej metodą R10 (jako nawozu) może przekroczyć koszt wywozu pofermentu (Dach i in. 2011). Ponadto w trakcie podejmowania decyzji o zagospodarowaniu odpadów, w tym UPS biomasy i pofermentu, istotne są nie tylko aspekty środowiskowe, ale również aspekty społeczno-polityczne (promowanie małych przedsiębiorstw, wynagrodzenia itd.), aspekty ekonomiczne, prawne, regionalne (dostarczanie składników odżywczych w regionie i in.), jak również techniczne (Rehl i Müller 2011).

3. Uwarunkowania prawne w zakresie wykorzystania ubocznych produktów spalania biomasy (UPS) i pofermentu z biogazowni rolniczych

Poszukując prawidłowego sposobu zagospodarowania ubocznych produktów spalania (UPS) biomasy i pofermentu z biogazowni rolniczych należy poruszać się zgodnie z zasadami określonymi w ustawie o odpadach (Dz.U. 2013, poz. 21). Wskazano w niej, iż prawidłowe gospodarowanie odpadami to „zbieranie, transport, przetwarzanie odpadów, łącznie z nadzorem nad tego rodzaju działaniami, jak również późniejsze postępowanie z miejscami unieszkodliwiania odpadów oraz działania wykonywane w charakterze sprzedawcy odpadów lub pośrednika w obrocie odpadami”. Wytworzone odpady, zgodnie ze wskazaną ustawą, powinny być w jak największym stopniu poddane procesom odzysku, a gdy nie da się tego zrobić

powinny być unieszkodliwiane (Białowiec i in. 2009). W załączniku nr 1 do ustawy o odpadach, procesy odzysku obejmują m.in. obróbkę na powierzchni ziemi przynoszącą korzyści dla rolnictwa lub poprawę stanu środowiska (R10). W procesie tym przewiduje się stosowanie substancji odpadowych, a więc takich, które podlegają ustawie o odpadach, do zastosowania bezpośredniego, jako nawozy lub substancje poprawiające właściwości gleby.

O możliwości zastosowania danego odpadu w celu nawożenia lub poprawy właściwości gleby decyduje rozporządzenie Ministra Środowiska z dnia 20 stycznia 2015 r. w sprawie procesu odzysku R10 (Dz.U. 2015, poz. 132). W przypadku biomasy, rozporządzenie to przewiduje możliwości odzysku popiołów lotnych o kodzie 10 01 03 (popioły lotne z torfu i drewna niepoddanego obróbce chemicznej) poprzez rozprowadzanie na powierzchni ziemi oraz odpadów o kodzie 10 01 99 (odpady pochodzące ze spalania biomasy w rozumieniu przepisów wydanych na podstawie art. 146 ust. 3 ustawy z dnia 27 kwietnia 2001 r. Prawo ochrony środowiska). W przypadku rolniczego wykorzystania odpadów, możliwe jest sporządzanie mieszanek komponentów różnego pochodzenia, w tym, odpadowego, w celu uzyskania ostatecznej mieszaniny spełniającej określone wymogi. Normą w tym zakresie jest Rozporządzenie Ministra Rolnictwa i Rozwoju Wsi z dnia 18 czerwca 2008 r. w sprawie wykonania niektórych przepisów ustawy o nawozach i nawożeniu (Dz.U. 7 lipca 2008, nr 119, poz. 765). Właściwości popiołu pochodzącego ze spalania biomasy, jeśli są dobrze poznane, umożliwiają skierowanie go do wykorzystania w przemyśle lub rozpatrzenie możliwości rolniczego wykorzystania. W związku z tym, istotnym problemem staje się analiza i opracowanie nowoczesnych technologii zagospodarowania tych popiołów, ze szczególnym uwzględnieniem ich przyrodniczego wykorzystania.

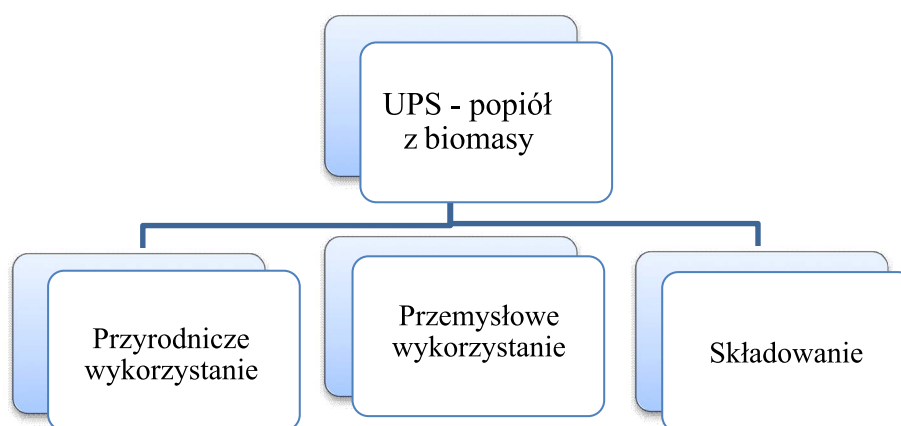
Popioły są cennym źródłem składników pokarmowych dla roślin, mają także właściwości odkwaszające, stanowią zatem alternatywę dla nawozów mineralnych. Należy jednak pamiętać o pewnych niedogodnościach związanych z zastosowaniem tych odpadów, a także zawartością w nich substancji szkodliwych, takich jak metale ciężkie. Z kolei zgodnie z Rozporządzeniem w sprawie procesu odzysku R10, pozostałości po zakończeniu procesu fermentacji w biogazowni dopuszczone są do „rozprowadzania na powierzchni gleby w celu jej nawożenia lub ulepszenia”. W zależności od tego, czy w skład substratów wchodziły odpady, czy też nie, warunki odzysku R10 są zróżnicowane. Opcja 1 – jeżeli w procesie beztlenowego rozkładu przetwarzane były m. in. odpady. Opcja 2 – jeżeli w procesie beztlenowego rozkładu przetwarzana była wyłącznie biomasa (art. 2 pkt 6 ustawy o odpadach z dnia 14 grudnia 2012 r.), lub produkty uboczne pochodzenia zwierzęcego (art. 2 pkt 9 ustawy), bez dodatku odpadów. W zakresie pozostałości pofermentacyjnej w załączniku znalazły się obydwa skategoryzowane odpady – 19 06 06 oraz 19 06 05. Rozporządzenie reguluje stosowanie tych odpadów do użyźniania gleby, aczkolwiek wiele z tych wymogów nie dotyczy pofermentu powstającego w biogazowniach rolniczych.

4. Metody zagospodarowania ubocznych produktów spalania (UPS) biomasy

UPS biomasy mogą być wykorzystane na skalę przemysłową. Należy przy tym pamiętać, iż gospodarowanie odpadami, powstającymi podczas procesów spalania biomasy,

jest jednym z trudnych zadań w gospodarce przedsiębiorstw. Negatywne oddziaływanie popiołów z biomasy na środowisko może być powodowane nie tylko nieumiejętnym ich przyrodniczym wykorzystaniem, ale również może być związane z migracją do otaczającego środowiska części składników z popiołów, np. poprzez niewłaściwe zabezpieczenie terenów, na których takie odpady są wykorzystywane lub składowane. Z uwagi na fakt, iż w ostatnich latach podjęto działania zmierzające do maksymalizacji wykorzystania składników zawartych w odpadach (ich odzysk i recykling), należy poszukiwać wysokoefektywnych metod ich zagospodarowania, zgodnie z zasadami rozwoju zrównoważonego (Ociepa-Kubicka 2015).

Popioły lotne są ubocznym produktem termicznego przekształcania biomasy, dlatego przy doborze metody ich zagospodarowania należy uwzględniać zasady określone w Ustawie o odpadach (Dz.U. 2013, poz. 21). Wskazano w niej, iż wytworzone odpady powinny być w jak największym stopniu poddane procesom odzysku, a gdy jest to niemożliwe, powinny być one unieszkodliwiane. Poszukiwanie alternatywnych metod zagospodarowania popiołów ze spalania biomasy należy rozpocząć od przeglądu dozwolonych sposobów odzysku przewidzianych dla tego rodzaju odpadu. Możliwości ich unieszkodliwiania lub zagospodarowania przedstawiono na rysunku 1.

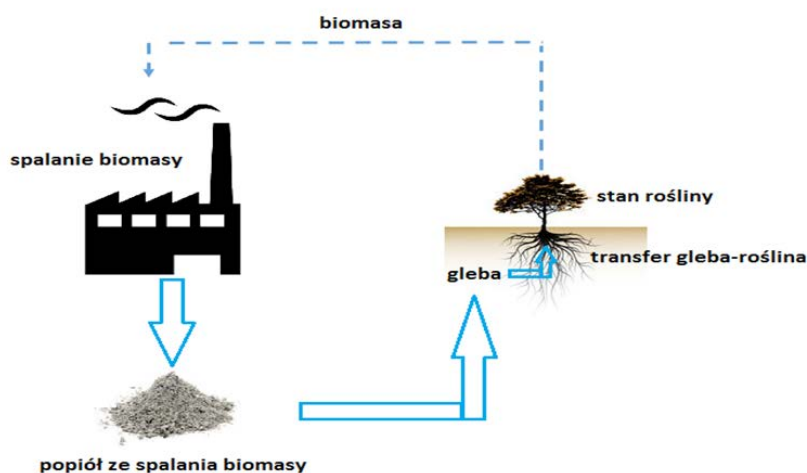


Rys. 1. Możliwości unieszkodliwiania/zagospodarowania ubocznych produktów spalania biomasy (UPS – uboczne produkty spalania) (opracowanie własne)

Bardzo ważnym aspektem związanym z wykorzystaniem popiołów ze spalania biomasy jest ich skład fizykochemiczny (Meller i Bilenda 2013). Obecnie obserwuje się duże zróżnicowanie właściwości popiołów z biomasy. Powodem tego jest sama różnorodność spalanej biomasy (siano, drewno, słoma itd.). Aby wskazać potencjał zagospodarowania popiołów należy przeprowadzić szczegółowe analizy uwzględniające ich skład fizykochemiczny. Warunkiem wykorzystania popiołów w poszczególnych gałęziach przemysłu, m.in. w budownictwie, technikach podziemnych (Borowski i Miłczak 2010) czy też do celów przyrodniczych (Ciesielczuk i in. 2011), jest potwierdzenie spełnienia wymagań norm, aprobat technicznych i przepisów prawnych.

4.1. Przyrodnicze wykorzystanie ubocznych produktów spalania (UPS) biomasy

Popiół ze spalania biomasy może zostać wykorzystany jako nawóz mineralny na polach (Piekarczyk i in. 2011). Należy przy tym pamiętać, iż w ten sposób może być wykorzystana tylko czysta spalona biomasa. UPS różnego rodzaju biomasy zaliczane są do najstarszych naturalnych nawozów mineralnych. Powstawały one m.in. podczas pożarów lasów oraz przy wypalaniu łąk. Powrót popiołów z biomasy do gleby, a zwłaszcza do tej, z której został zebrany plon przeznaczony na cele energetyczne, jest jedną z najbardziej ekologicznych i zgodną z zasadami zrównoważonego rozwoju możliwością ich wykorzystania (Meller i Bilenda 2013). Znaczna część makro- i mikroelementów pobranych z gleby w trakcie wegetacji rośliny może powrócić do niej w postaci nawozów na bazie popiołów ze spalania biomasy, zamykając tym samym obieg składników mineralnych w przyrodzie, dzięki obecności w popiele znacznych ilości wapnia, magnezu i potasu oraz mikroelementów, które stanowią ważny składnik pokarmowy dla roślin. Koncepcyjny schemat interakcji pomiędzy popiołem ze spalania biomasy i ekosystemem leśnym przedstawiono na rysunku 2.



Rys. 2. Schemat interakcji pomiędzy popiołem ze spalania biomasy i ekosystemem leśnym
źródło: opracowanie własne na podstawie Augusto i in., 2008

W przypadku stosowania popiołów z biomasy w celach nawozowych, należy pamiętać o ustosunkowaniu się do wartości granicznych wybranych składników w nawozach. Normą w tym zakresie jest Rozporządzenie Ministra Rolnictwa i Rozwoju Wsi z dnia 18 czerwca 2008 r. w sprawie wykonania niektórych przepisów ustawy o nawozach i nawożeniu (Dz.U. 7 lipca 2008, nr 119, poz. 765). Obecnie obowiązujące wartości graniczne metali w poszczególnych nawozach i środkach wspomagających uprawy roślin w Polsce przedstawiono w tabeli 1.

TABELA 1. Wartości graniczne metali w nawozach oraz w środkach wspomagającym uprawę roślin w Polsce

Normowane metale ciężkie	Dozwolona zawartość metali [mg/kg s.m.]
Nawozy mineralne i środki wspomagające uprawę roślin pochodzenia mineralnego wapno nawozowe [mg/ kg CaO]	
Kadm, Cd	8
Ołów, Pb	200
Wapno nawozowe zawierające magnez [mg/ kg CaO + MgO]	
Kadm, Cd	15
Ołów, Pb	600
Nawozy mineralne i środki wspomagające uprawę roślin pochodzenia mineralnego [mg/kg s.m.]	
Kadm, Cd	50
Rtęć, Hg	2
Ołów, Pb	140
Arsen, As	50
Nawozy organiczne i organiczno-mineralne, organiczno-mineralne środki wspomagające uprawę roślin [mg/kg s.m.]	
Chrom, Cr	100
Kadm, Cd	5
Nikiel, Ni	60
Ołów, Pb	140
Rtęć, Hg	2

Źródło: na podstawie Rozporządzenie Ministra Rolnictwa i Rozwoju Wsi (Dz.U. z 2008, nr 119, poz.765 z późn. zm.).

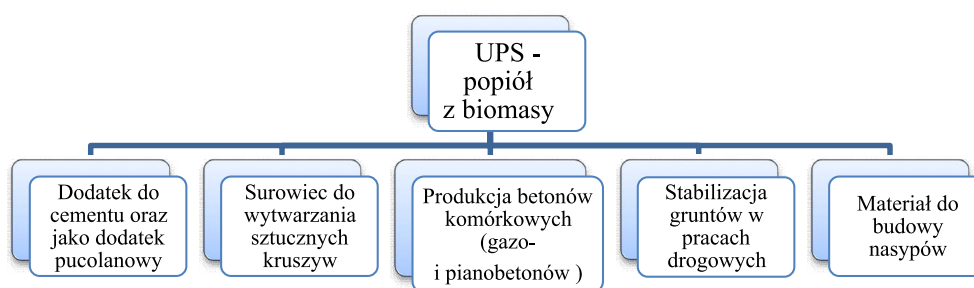
4.2. Przemysłowe wykorzystanie ubocznych produktów spalania (UPS) biomasy w materiałach budowlanych

Charakter produkcji materiałów budowlanych umożliwia zagospodarowanie dużych ilości odpadów powstających w innych dziedzinach gospodarki. Popioły ze spalania biomasy mogą być stosowane m.in. jako alternatywne surowce lub dodatki do materiałów budowlanych. Badania w tym kierunku prowadzi się ze względu na możliwość częściowego zastąpienia surowców budowlanych, ale także zmniejszenia emisji CO₂, np. przy procesach wypalania klinkieru cementowego (Chen i in. 2013). Co więcej, wzrost popytu na materiały budowlane, wynikający z rozwoju gospodarczego, wpłynął na poszukiwanie ekoinnowacyjnych metod wytwarzania materiałów w przemyśle budowlanym. Jednak ilość zagospodarowanych popiołów, stawiane im wymagania, a także możliwe do tolerowania wahania składu i innych właściwości uzależnione są od rodzaju wytwarzanego materiału budowlanego. Wśród najważniejszych zastosowań popiołów w budownictwie są:

- składniki mieszaniny surowcowej do produkcji cementu;
- aktywny dodatek do cementowych spoiw nieorganicznych (beton i zaprawy);

- składnik nadmiaru surowcowego do produkcji ceramiki budowlanej (cegły, płytki ceramiczne);
- składnik spiekane kruszywa lekkiego;
- substytut piasku i/lub cementu w konstrukcjach drogowych, w tym stabilizowane podłoża cementowe i nasypy drogowe (Baeza-Brotons i in. 2014).

Wykorzystanie materiałów budowlanych wzbogaconych o surowce pochodzące z odzysku prowadzi do pewnych zmian w charakterystykach materiałów budowlanych, dlatego należy przestrzegać wymaganych standardów w zakresie zastąpienia części składników innymi, zgodnie z przepisami budowlanymi oraz prowadzić badania wpływu takich zabiegów na środowisko. Możliwości wykorzystania popiołów (pochodzących ze spalania innych paliw niż węgiel jako dodatku typu II) określa norma PN-EN 206-1 (2003). Możliwości zagospodarowania UPS biomasy w sektorze budowlanym przedstawiono na rysunku 3.



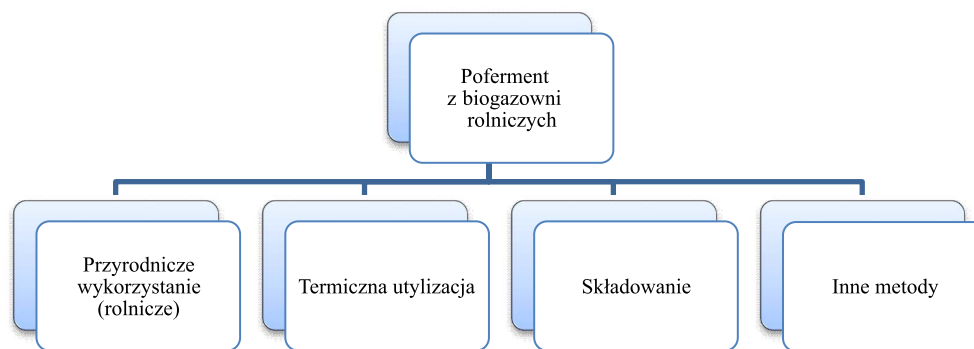
Rys. 3. Możliwości zagospodarowania ubocznych produktów spalania biomasy w budownictwie (Baeza-Brotons i in. 2014)

Potencjalne korzyści z wykorzystania popiołów w materiałach budowlanych to immobilizacja metali ciężkich w wypalanej matrycy, utlenianie substancji organicznych i niszczenie patogenów w trakcie procesu wypalania oraz zwiększenie odporności na niskie temperatury. Ze względu na zmienność składu mieszanek paliwowych i dążenie do zwiększenia w nich udziału biomasy, wiele popiołów nie spełnia wymagań zawartych w normie PN-EN 450-1+A1: 2009. Większość popiołów pochodzących z procesów współspalania odznacza się zbyt małą zawartością SiO_2 i zbyt dużą CaO w stosunku do obowiązującej normy. Duża i wciąż rosnąca ilość powstających popiołów lotnych nowej generacji ze spalania biomasy skłania do poszukiwania innych sposobów ich zagospodarowania. Bezpieczne ich stosowanie wymaga szerokiej wiedzy opartej na wynikach badań doświadczalnych, uwzględniających aspekt środowiskowy i techniczny, jak również uregulowania prawne (Poluszyńska 2013). Możliwości stosowania popiołów do celów budowlanych, z uwzględnieniem spełnienia zarówno kryteriów technicznych, jak i środowiskowych, były przedmiotem licznych badań. Należy także podkreślić, że na żadnym z etapów ich zagospodarowania nie mogą wystąpić zagrożenia dla osób zatrudnionych przy pracach z odpadami i użytkowników, a także działania te powinny być opłacalne ekonomicznie (Gawlicki i Małolepszy 2013). Warto także podkreślić, iż z uwagi na możliwość wykorzystania popiołów ze spalania biomasy jako alternatywnych surowców lub dodatków do materiałów budowlanych, przemysł budowlany

jest jedną z gałęzi gospodarki, które mogą być beneficjentem programów wspierających rozwój nowych ekotechnologii (Smol i in. 2015a).

4.3. Metody zagospodarowania pofermentu z biogazowni rolniczych

Osad pofermentacyjny jest substancją powstającą w procesie beztlenowego rozkładu substancji organicznej i jest bogaty w substancje odżywcze. Masa pofermentacyjna zawiera bakterie uczestniczące w procesie fermentacji metanowej, nieprzefermentowane związki organiczne oraz składniki mineralne. Substrat po przefermentowaniu ma zazwyczaj $\text{pH} > 7,7$. Nie działa jednak odkwaszająco, zwiększa natomiast właściwości buforowe gleby, ponieważ zawiera materię organiczną (Pontus 2017). Istnieje wiele metod zagospodarowania osadu pofermentacyjnego, jednak najczęściej stosowanymi są obróbka termiczna oraz wykorzystanie rolnicze (rys. 4).



Rys. 4. Możliwości unieszkodliwiania/ zagospodarowania pofermentu z biogazowni rolniczych (Marciniak 2014)

Metody zagospodarowania pofermentu z biogazowni rolniczych mogą być dobierane w zależności od składu pofermentu, charakterystyki oraz usytuowania geograficznego obszaru jego zastosowania, tak aby były zarówno bezpieczne, jak i opłacalne. Przy wyborze metody zagospodarowania pofermentu należy także pamiętać o ograniczeniach wynikających ze sposobu klasyfikacji odpadu, szczególnie iż obecnie państwa członkowskie różnie klasyfikują masę pofermentacyjną – jako odpad lub pełnowartościowy surowiec lub produkt. Brak uniwersalnych przepisów na obszarze UE przyczynia się do niejasności prawnej w obszarze gospodarki odpadami. Dotyczy to zarówno producentów jak i użytkowników masy pofermentacyjnej, ale także innych podmiotów zaangażowanych w tym zakresie (np. przedsiębiorstwa transportowe), zwłaszcza w sytuacji handlu masą pofermentacyjną między państwami członkowskimi. Problem dotyczy przede wszystkim podmiotów prowadzących działalność na terenach przygranicznych, gdzie pomimo zapotrzebowania na masę pofermentacyjną oraz niewielkie odległości pomiędzy miejscem jej wytworzenia i wykorzystania, różnice w obowiązującym prawodawstwie ograniczają swobodny i ekonomicznie korzystny handel. Brak harmonizacji w interpretacji statusu odpadu pofermentu istnieje

nawet między poszczególnymi regionami w obrębie niektórych państw UE. Konsekwencją tego jest ograniczanie obszaru działań zarówno producentów, jak i użytkowników osadu pofermentacyjnego jedynie do rynku krajowego (ale także lokalnego i regionalnego) wynikające z chęci uniknięcia kosztów administracyjnych i sądowych oraz ryzyka niejasnego statusu materiału. Zatem wykorzystanie pofermentu przy najniższym ryzyku dla środowiska i zdrowia nie zawsze jest korzystne ekonomicznie. Ustalenie jasnych i jednolitych kryteriów i zasad klasyfikacji dotyczących statusu osadu pofermentacyjnego (przestania zaliczania do odpadów) przyczyni się do poprawy równowagi pomiędzy podażą i popytem oraz stanie się narzędziem wsparcia inwestycji w obszarze jego produkcji i zagospodarowania. Ważnym elementem wykorzystania pofermentu jest także aspekt społeczny stosowania go jako nawóz. Wykazano bowiem, iż rolnicy czasem niechętnie wykorzystują kompost jako polepszacz gleby, jeśli zostanie on oznakowany jako odpad. Taki status powoduje, że jest on postrzegany jako produkt o niskiej wartości lub nawet budzi obawy co do powodowania negatywnych skutków dla rolnictwa (Marciniak 2014).

4. Wnioski

Z uwagi na odnotowany w ostatnich latach systematyczny wzrost masy generowanych ubocznych produktów spalania (UPS) biomasy oraz pofermentu z biogazowni rolniczych, będący konsekwencją wzrostu wykorzystania biomasy w energetyce, ich zagospodarowanie stało się bardzo ważnym problemem zarówno ekologicznym, technicznym, jak i ekonomicznym. Warto podkreślić, iż popioły ze spalania biomasy oraz poferment z biogazowni rolniczych charakteryzują się wysoką zawartością związków organicznych i biogennych, dlatego mogą być bogatym źródłem substancji niezbędnych do wzrostu roślin, co wskazywać może na możliwości ich przyrodniczego wykorzystania. Ponadto UPS biomasy z uwagi na właściwości pucolanowe, czyli zdolność do wiązania w połączeniu z wodą ze związkami wapniowymi, mogą być stosowane jako podstawniki przy produkcji materiałów budowlanych oraz w budownictwie. Obecnie najczęściej stosowanymi metodami zagospodarowania UPS biomasy są:

- przyrodnicze wykorzystanie:
 - nawożenie – dodatek do produktów nawozowych,
 - rekultywacja – dodatek poprawiający strukturę gleby,
- przemysłowe wykorzystanie (gł. w budownictwie):
 - dodatek do cementu oraz jako dodatek pucolanowy,
 - surowiec do wytwarzania sztucznych kruszyw,
 - produkcja betonów komórkowych (gazo- i pianobetonów),
 - stabilizacja gruntów w pracach drogowych,
 - materiał do budowy nasypów;
- składowanie;
- inne metody.

Z kolei zagospodarowanie masy pofermentacyjnej:

- przyrodnicze wykorzystanie,
- termiczna utylizacja,

- składowanie,
- inne metody.

Należy jednak pamiętać, iż zarówno UPS, jak i poferment klasyfikowane są jako odpad i w związku z tym konieczne jest określenie ich oddziaływania na wszystkie elementy środowiska (środowisko wodne, gruntowe, powietrze) przed wyborem odpowiedniej metody ich zagospodarowania. Aby można było mówić o powszechnym i świadomym stosowaniu produktów pochodzących z przetwarzania UPS i pofermentu, niezbędne są nie tylko regulacje prawne i przestrzeganie ich, ale przede wszystkim edukacja społeczeństwa, która przyczyni się do wzrostu wiedzy na temat różnych technologii, dzięki którym likwidowane są odpady przemysłowe (Pyssa 2004). Chociaż odpady z biomasy znajdują coraz większe zastosowanie w różnych gałęziach gospodarki, ich wykorzystanie jest nadal niewystarczające. Można oczekiwać, że w najbliższych latach technologie związane z gospodarczym wykorzystaniem tych odpadów będą się nadal rozwijać (Meller i Bilenda 2013).

Literatura

- Augusto L., Bakker M.R. i Meredieu C. 2008 – *Wood ash applications to temperate forest ecosystems – potential benefits and drawbacks*. Plant and Soil 306(1–2), s. 181–198.
- Baeza-Brotons F., Garcés P., Payá J. i 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.
- Białowiec A., Janczukowicz W. i Krzemieniewski M. 2009 – *Możliwości zagospodarowania popiołów po termicznym unieszkodliwianiu osadów ściekowych w aspekcie regulacji prawnych*. Rocznik Ochrona Środowiska, Tom 11, s. 959–971.
- Borowski G. i Miłczak M. 2010 – *Badania przydatności brykietów z popiołów paleniskowych jako podbudowy drogowe*. Postępy nauki i techniki, s. 136–143.
- Chen M., Blanc D., Gautier M., Mehu J. i Gourdon R. 2013 – *Environmental and technical assessments of the potential utilization of sewage sludge ashes (SSAs) as secondary raw materials in construction*. Waste Management 33(5), s. 1268–1275.
- Ciesielczuk T., Kusza G. i Nems A. 2011 – *Nawożenie popiołami z termicznego przekształcania biomasy źródłem pierwiastków śladowych dla gleb*. Ochrona Środowiska i Zasobów Naturalnych 49, s. 219–227.
- Dach J., Piłarski K., Janczak D. i Banasik P. 2011 – *Koszty zagospodarowania pulpy pofermentacyjnej z biogazowni w kontekście projektu nowej ustawy o nawozach i nawożeniu*. Technika Rolnicza Ogrodnicza Leśna 3, s. 8–10.
- Gawlicki M. i Małolepszy J. 2013 – *Wykorzystanie odpadów przemysłowych w drogownictwie*. Materiały z Konferencji XXVII Naukowo-Technicznej „Awarie Budowlane”, Międzyzdroje 2013.
- Hycnar J., Szczygielski T., Lysek N. i Rajczyk K. – *Kierunki optymalizacji zagospodarowania ubocznych produktów spalania węgla*. Inżynieria Środowiska, plik pdf.yadda.icm.edu.pl/yadda/element/bwmeta1.../hycnar_kierunki_optymalizacji.pdf
- Komunikat Komisji Europejskiej. 2014. Ku gospodarce o obiegu zamkniętym: program „zero odpadów dla Europy”. COM. 398, 2014.
- Komunikat Komisji Europejskiej. 2015. Zamknięcie obiegu -plan działania UE dotyczący gospodarki o obiegu zamkniętym. COM 614, 2015.
- Małolepszy J. i Tkaczewska E. 2006 – *Wpływ popiołów lotnych ze współspalania węgla kamiennego i biomasy na proces hydratacji i właściwości cementu*. [W:] Materiały konferencji Dni Betonu, Wisła, s. 591–601.
- Mapa drogowa 2017 – Mapa drogowej transformacji w kierunku gospodarki o obiegu zamkniętym, Ministerstwo Rozwoju, Projekt z dnia 10 lipca 2017 r.
- Marciniak A. 2014 – *Możliwości zagospodarowania odpadu pofermentacyjnego z biogazowni*. Studia Ecologiae et Bioethicae 12(2), s. 125–135.
- Meller E. i Bilenda E. 2013 – *Wpływ nawożenia popiołami z biomasy na plon i pobranie składników przez kukurydzę zwyczajną*. Polityka Energetyczna – Energy Policy Journal t. 16, s. 339–345.

- Obernberger I. i Supancic K. 2009 – *Possibilities of ash utilisation from biomass combustion plants*. [In:] Proceedings of the 17th European biomass conference & exhibition. 29. June 2009.
- Ociepa-Kubicka A. 2015 – *Wykorzystanie biomasy w przedsiębiorstwach energetycznych*. Proceedings of ECOpole 9, s. 279–286.
- Piekarczyk M., Kotwica K. i Jaskulski D. 2011 – *Wpływ stosowania popiołu ze słomy jęczmienia jarego na chemiczne właściwości gleby lekkiej*. *Fragm. Agron* 28(3), s. 91–99.
- Poluszyńska J. 2013 – *Możliwości zastosowania popiołów ze spalania biomasy w gospodarowaniu osadami ściekowymi*. *Prace Instytutu Ceramiki i Materiałów Budowlanych* 13, s. 49–59.
- Pontus K. – *Osad pofermentacyjny oraz jego wykorzystanie*. www.pom-biogas.eu/sites/default/files/osad_pofermentacyjny_oraz_jego_wykorzystanie.pdf, dostęp 10.10.2017.
- Pyssa J. 2004 – *Problemy utylizacji odpadów niebezpiecznych w województwie małopolskim. Paliwa i energia XXI wieku*. Uczelniane Wydawnictwa Naukowo-Dydaktyczne AGH, Kraków, s. 341–344.
- Rakoczy B. 2014 – *Organisation of municipal waste management in Polish law*. *Polish Yearbook of Environmental Law* (4), s. 57–69.
- Rehl T. i Müller J. 2011 – *Life cycle assessment of biogas digestate processing technologies*. *Resources, Conservation and Recycling* 56(1), s. 92–104.
- Rozporządzenie Ministra Rolnictwa i Rozwoju Wsi z dnia 18 czerwca 2008 r. w sprawie wykonania niektórych przepisów ustawy o nawozach i nawożeniu (Dz.U. 7 lipca 2008, nr 119, poz. 765).
- Rozporządzenie Ministra Środowiska z dnia 9 grudnia 2014 r. w sprawie katalogu odpadów (Dz.U. 2014, poz. 1923).
- Rozporządzenie Ministra Środowiska z dnia 20 stycznia 2015 r. w sprawie procesu odzysku R10 (Dz.U. 2015, poz. 132).
- Smol M., Kulczycka J., Henclik A., Gorazda K. i Wzorek Z. 2015a – *Możliwości zastosowania odpadów po termicznym przekształceniu osadów ściekowych w materiałach budowlanych*. *Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, Praca zbiorowa pod red. Andrzeja Kotowskiego, Katarzyny Piekarskiej i Bartosza Kaźmierczaka*, 6, s. 342–355.
- Smol M., Kulczycka J., Henclik A., Gorazda K. i Wzorek Z. 2015b – *The possible use of sewage sludge ash (SSA) in the construction industry as a way towards a circular economy*. *Journal of Cleaner Production* 95, s. 45–54.
- Tuszyńska L. 2008 – *Diagnoza stanu edukacji środowiskowej społeczności lokalnych w wybranych regionach Polski*. Wyd. UW, Warszawa.
- Ustawa z dnia 27 kwietnia 2001r., Prawo ochrony środowiska (Dz.U. nr 62 z 2001, poz. 627, ze zm.).
- Ustawa z dnia 14 grudnia 2012 r. o odpadach (Dz.U. 2013, poz. 21).

Praca finansowana ze środków NFOŚiGW oraz NCBiR w ramach projektu EKO-BIONOM (program GEKON).

Anna LEMPART*, Edyta KUDLEK**, Mariusz DUDZIAK***

Cyrkulacja wody basenowej jako przykład działania zgodnego z ideą gospodarki obiegu zamkniętego

STRESZCZENIE. Zgodnie z koncepcją gospodarki obiegu zamkniętego, wszelkie produkty, materiały oraz surowce powinny pozostawać w obiegu tak długo, jak to jest możliwe, a wytwarzanie odpadów powinno być jak najbardziej zminimalizowane. W tę ideę doskonale wpisują się systemy cyrkulacji wody basenowej, które minimalizują zarówno pobór wody wodociągowej do napełniania niecki basenu, jak i strumień ścieków odprowadzanych do kanalizacji. Celem niniejszej pracy jest omówienie zasady działania tych systemów.

Swimming pool water circulation as an example of action in accordance with circular economy

ABSTRACT. According to the concept of circular economy, all products, materials and raw materials should remain in circulation as long as possible. Furthermore, waste production should be minimized as much as possible. Swimming pool circulation systems fit perfectly in this concept. They minimize both: tap water consumption to fill the pool basin and the stream of wastewater discharged into the sewer systems. The aim of this paper is to describe the principle of operation of these systems.

1. Wstęp

Obiekty basenowe zużywają bardzo duże ilości wody, ciepła i energii. Jest to problem istotny, zarówno z punktu widzenia kosztów dostarczenia tych mediów, jak i faktu, że zasoby wodne Polski są małe. Na skutek różnych czynników, nasz kraj jest zagrożony deficytem

* Mgr inż., ** Dr inż., *** Dr hab. inż., prof. Pol. Śl., Politechnika Śląska, Wydział Inżynierii Środowiska i Energetyki, Instytut Inżynierii Wody i Ścieków, Gliwice; e-mail: anna.lempart@polsl.pl

wody. Z tych powodów, w obiektach basenowych wskazane jest prowadzenie racjonalnej gospodarki wodno-ściekowej, energetycznej oraz cieplnej.

Na całkowite zużycie wody w obiekcie basenowym składa się objętość wody przeznaczona na cele bytowo-gospodarcze obejmujące potrzeby higieniczno-sanitarne użytkowników i prace porządkowe oraz objętość wynikająca z zapotrzebowania na cele technologiczne, tj. płukanie złóż filtrów, uzupełnianie ubytków wody basenowej oraz pełna wymiana wody w niecce basenowej (Lempart i Wyczarska-Kokot 2017). Według zapisów Rozporządzenia Ministra Infrastruktury z dnia 14 stycznia 2002 r. (Dz.U. 2002, nr 8 poz. 70), przeciętna norma zużycia wody przez 1 korzystającego, dla pływalni krytej wynosi $160 \text{ dm}^3/\text{s-d}$, natomiast dla pływalni odkrytych: $200 \text{ dm}^3/\text{s-d}$ dla basenów wyczynowych i $400 \text{ dm}^3/\text{s-d}$ dla basenów o wykorzystaniu masowym.

Największe zużycie wody w całej eksploatacji obiektu basenowego generuje pełna wymiana wody w niecce basenu. Czynność ta wiąże się także z koniecznością podgrzania bardzo dużej objętości wody do wymaganej temperatury. Dlatego dąży się do tego, aby potrzeba wykonania tego zabiegu była jak najrzadsza.

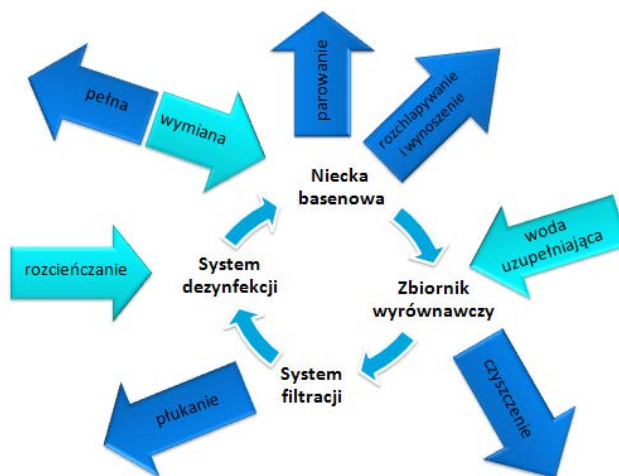
2. Obieg wody w instalacji wody basenowej

Utrzymanie takich parametrów jakościowych wody basenowej, jakie nie będą stanowiły zagrożenia dla zdrowia użytkowników, jest możliwe tylko pod warunkiem zapewnienia prawidłowego przepływu wody, który pozwala na całkowitą wymianę wody w niecce. Zaleganie wody przez dłuższy czas sprzyja bowiem gromadzeniu się zanieczyszczeń oraz rozwojowi mikroorganizmów. Zgodnie z przyjętymi w naszym kraju wymaganiami sanitarno-higienicznymi dla krytych pływalni (Sokołowski 1998), czas pełnej wymiany wody w niecce basenu nie powinien być dłuższy niż 6 h. Objętość wody w typowych nieckach basenów pływacki wynosi $450\text{--}600 \text{ m}^3$. Nieoszczędnym postępowaniem byłoby częste zrzucanie całej objętości wody z niecki basenowej do kanalizacji. Z tego powodu, instalacje wody basenowej pracują w systemie obiegu zamkniętego (rys. 1). Prawidłowa cyrkulacja wody zapewnia ciągle usuwanie zanieczyszczeń poprzez odprowadzanie wody z basenu do zbiornika wyrównawczego za pomocą przelewów (rys. 2, 3), jej oczyszczanie oraz stały dopływ do niecki (rys. 4, 5).

Objętość wody, jaka krąży w instalacji basenowej, wynika z zaprojektowanej wydajności obiegu cyrkulacji. Wyróżnia się dwie metody ustalania objętości cyrkulującej wody w obiegu basenowym: metodę uproszczoną (Sokołowski 1998) oraz metodę dokładną, podaną przez niemiecką normę DIN 19643. Metoda uproszczona, jako podstawę do obliczeń, przyjmuje wskaźnik objętości wody w m^3 przypadający na 1 m^2 powierzchni basenu przyjęty dla różnych typów basenów. Proponowane wskaźniki zestawiono w tabeli 1.

Natomiast według metody dokładnej opisanej w DIN 19643, strumień objętości wody należy obliczać zgodnie ze wzorem (1)

$$Q = \frac{A \cdot n}{a \cdot k} \left[\frac{\text{m}^3}{\text{h}} \right] \quad (1)$$



Rys. 1. Obieg wody w instalacji wody basenowej
Źródło: Opracowanie własne

gdzie:

- A – powierzchnia lustra wody [m^2],
- n – częstotliwość [1/h], $n = 1$ dla basenów pływackich, dla niepływających i do skoków,
- a – współczynnik użytkowy zależny od funkcji basenu (tab. 2),
- k – współczynnik obciążenia [m^{-3}],
 $k = 0,5$ dla procesów koagulacji, filtracji i chlorowania,
 $k = 0,6$ dla procesów koagulacji, filtracji, ozonowania i chlorowania.

TABELA 1. Wskaźnik objętości wody wg metody uproszczonej

Rodzaj basenu	Wskaźnik objętości wody [$m^3/m^2 \cdot h$]
Basen pływacki i sportowy	0,40
Basen do skoków	0,50
Basen wielozadaniowy	0,55
Basen dla niepływających	0,65
Basen dla małych dzieci	0,70

Źródło: Sokołowski 1998, str. 13.

TABELA 2. Wskaźnik objętości wody (DIN 19643)

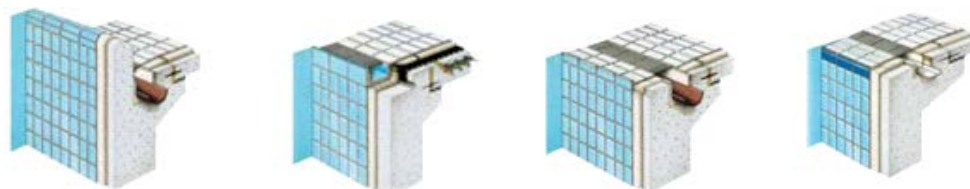
Rodzaj basenu	Współczynnik użytkowy, a [m ²]
Basen pływacki	4,5
Basen do skoków	4,5
Basen dla niepływających	2,7
Basen w ruchomym dnem	2,7
Basen dla małych dzieci	2,2
Basen mały, o głębokości <1,35 m	12
Basen do terapii ruchowej	4
Basen leczniczy	4
Whirpool	1 miejsce siedzące

Źródło: Sokołowski 1998, str. 14–15.

2.1. Rynny przelewowe

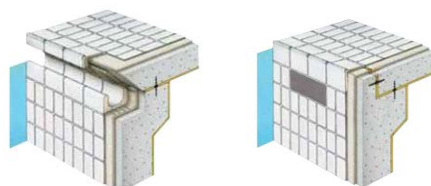
Bardzo ważną częścią systemu cyrkulacji wody basenowej są rynny przelewowe. Umożliwiają one odpływ zużytej wody z niecki basenu – zanieczyszczona woda zostaje wypierana z niecki przez stale dopływającą objętość wody doprowadzaną z basenowej stacji oczyszczania. Najwięcej zanieczyszczeń występuje w postaci pływającej na powierzchni lustra wody i to właśnie stąd są one zbierane przez rynny i odprowadzane kanałami odpływowymi do zbiornika wyrównawczego (a dalej do stacji oczyszczania wody basenowej).

Prawidłowo zaprojektowane przekroje rynien przelewowych powinny posiadać wystarczającą powierzchnię i odpowiednio duże otwory, aby uniknąć możliwości przelania obciążenia basenu. Na szczególną uwagę zasługują baseny o mniejszych wymiarach, dla których stosunek długości rynny do powierzchni lustra wody jest dość duży. W takiej sytuacji wynoszona przez fale objętość wody, także jest dużo większa. Jeśli podczas projektowania przekroju rynny nie zostanie przewidziana odpowiednio duża pojemność, woda z rynny będzie przedostawać się w kierunku tzw. plaży basenu i odpłynie do kanalizacji (Piechurski 2011). Konieczny jest także prawidłowy dobór rodzaju rynny przelewowej do funkcji basenu. Zastosowanie głęboko leżących rynien przelewowych (rys. 3) jest niezbędne dla basenów z atrakcjami takimi jak sztuczna fala czy rzeka. W przypadku zastosowania innych rozwiązań (rys. 2), straty przelewanej wody basenowej mogłyby być bardzo duże.



Rys. 2. Przykładowe rozwiązania wysoko leżących rynien przelewowych

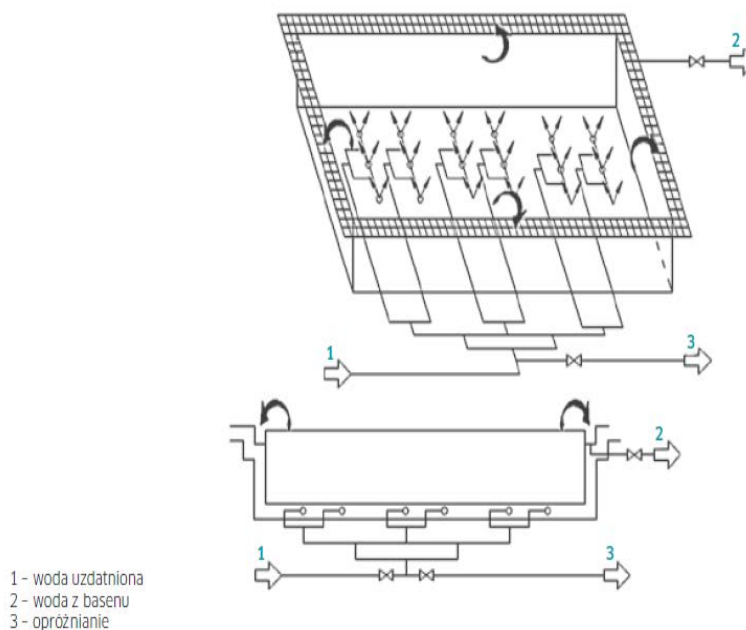
Źródło: Broszura Basenowa Ceresit <http://www.ceresit.pl>



Rys. 3. Przykładowe rozwiązanie nisko leżących rynien przelewowych
 Źródło: Broszura Basenowa Ceresit <http://www.ceresit.pl>

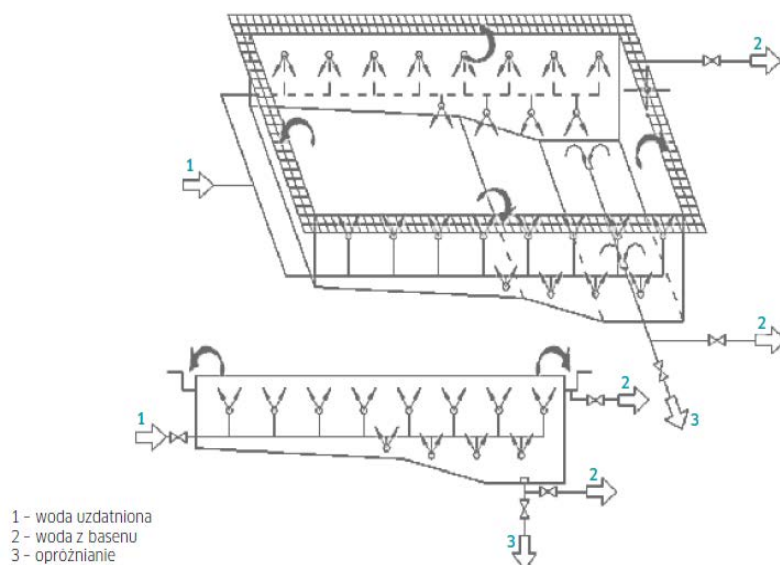
2.2. Systemy doprowadzające wodę do niecki basenu

Rozmieszczenie dopływów powinno, w jak najkrótszym czasie, zapewniać równomierne rozprowadzenie wody z basenowej stacji uzdatniania do wszystkich punktów w niecce basenu. W tym celu zastosowane mogą być dwa różne układy przepływu wody w niecce: pionowy (rys. 4) i poziomy (rys. 5).



Rys. 4. Dopływ do niecki basenu wody uzdatnionej w układzie pionowym
 Źródło: Piechurski 2011

W układzie pionowym woda dopływa do niecki przez system rozdzielczy zakończony otworami dopływowymi zabudowanymi w dnie basenu, a zanieczyszczona woda powierzch-



Rys. 5. Dopływ do niecki basenu wody uzdatnionej w układzie poziomym

Źródło: Piechurski 2011

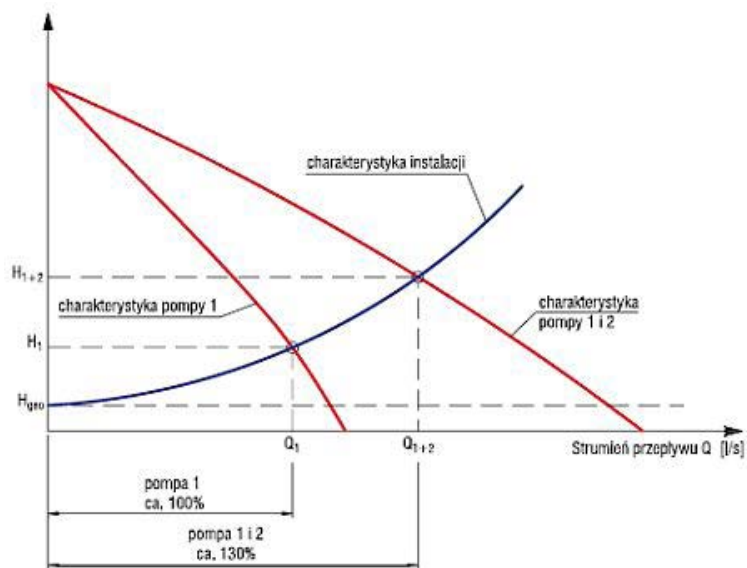
niowa, zostaje wypierana do rynien przelewowych. Układ ten zapewnia wymianę wody na dużej powierzchni, bez wystąpienia stref o różnej temperaturze wody. Otwory dopływowe mogą być rozwiązane dwojako: w postaci dysz dennych lub tzw. kanałów dopływowych na dnie basenu. Podczas rozmieszczania dysz dopływowych w dnie, należy przewidzieć jedną dyszę na około 7–8 m² powierzchni lustra wody. Kanały dopływowe są natomiast prowadzone wzdłuż dłuższych ścian basenu, a dopływ wody do kanału zazwyczaj następuje od głębszej strony niecki. Dopływ wody na dnie pozwala zminimalizować występowanie tzw. „stref martwych” w basenie. Ponadto, ciężkie i opadające na dno zanieczyszczenia są unoszone przez dopływający do niecki strumień wody (Muszyński 2009; Piechurski 2011).

Układ o przepływie poziomym charakteryzuje się rozmieszczeniem otworów doprowadzających wodę do niecki w przeciwnych ścianach basenu. Wyróżnić można przepływ wzdłużny (otwory w krótszej ścianie) i poprzeczny (otwory w dłuższej ścianie). Znacznie lepsze warunki hydrauliczne zapewnia zastosowanie przepływu poprzecznego. Szczególnie zalecane jest takie ułożenie dysz w ścianie basenu, aby osie dopływów nie pokrywały się – leżące naprzeciw siebie otwory dopływowe powinny zostać zamontowane naprzemiennie. Zgodnie z niemiecką normą DIN 19643, dysze należy umieszczać w połowie wysokości ściany, a odstęp pod nimi mogą wynosić nie więcej niż 1/3 szerokości basenu. W basenach głębokich wymagane jest zastosowanie dwóch poziomów dopływu: dolny powinien być zlokalizowany 30–60 cm nad dnem niecki, natomiast w basenach o głębokości do 1,35 m, dopływy powinny być umieszczane około 20–30 cm nad dnem basenu. Możliwość stosowania układu o przepływie poziomym jest ograniczona ze względu na geometrię niecki – w przypadku basenów o nieregularnych kształtach, może wystąpić wiele stref martwych (Muszyński 2009; Piechurski 2011).

2.3. Pompy obiegowe

Prawidłową cyrkulację wody w instalacji basenowej zapewnia optymalnie zaprojektowany zespół pomp obiegowych. Jest to kluczowy element basenowego systemu obiegu zamkniętego. Pompy cyrkulacyjne zazwyczaj pracują jako połączone równoległe (rys. 6). Takie rozwiązanie polega na zasysaniu wody niezależnie przez każdą pompę i tłoczeniu jej do wspólnego rurociągu. Połączenie równoległe pomp zapewnia ich pracę przy jednakowym ciśnieniu tłoczenia. Zalecane jest, aby pracowały one także przy takiej samej wysokości podnoszenia, co może być zapewnione poprzez pobieranie cieczy z tego samego zbiornika i zapewnieniu zbliżonych strat ciśnienia na wszystkich odcinkach rurociągu związanych z poszczególnymi pompami (Piechurski 2013). Należy mieć na uwadze, że dwie pompy połączone równoległe nie będą tłoczyć dwukrotnie większej ilości wody. Przy pracy równoległej ustala się nowy punkt pracy (rys. 6), a rzeczywisty wzrost jest niższy niż 50% (Priller 2008).

Pompy obiegowe powinny być wyposażone w prefiltry, które służą do zatrzymywania zanieczyszczeń w postaci włókien lub włosów. Ich zadaniem jest zabezpieczenie pomp przed zanieczyszczeniem i uszkodzeniem.



Rys. 6. Połączenie równoległe pomp
Źródło: Priller 2008

2.4. Częstotliwość pełnej wymiany wody w niecce basenowej

Pod warunkiem dokładnego czyszczenia dna i ścian niecki oraz obrzeża przelewowego, stosowanie zamkniętego obiegu wody z czynnym przelewem, umożliwiają przedłużenie czasu

całkowitej wymiany wody w niecce basenu pływackiego nawet do 1 roku. Według Zaleceń Zakładu Higieny Komunalnej, częstsza wymiana wody konieczna jest w basenach przeznaczonych dla dzieci (raz w tygodniu) oraz w wannach z hydromasażem (raz dziennie). Natomiast, w przypadku brodzików do płukania stóp, basenów chłodzących i baseników do moczenia nóg w saunie, wymagana jest pełna wymiana wody 1 raz w ciągu godziny, z odprowadzeniem zużytej wody basenowej do kanalizacji (Lempart i Wyczarska-Kokot 2017).

3. Problemy eksploatacyjne

Cyrkulacja wody w instalacji basenowej może powodować wiele problemów eksploatacyjnych. Sprzyja m.in. akumulacji różnych zanieczyszczeń, w tym aktywnych biologicznie mikrozanieczyszczeń, które mogą powodować zagrożenia dla zdrowia użytkowników obiektów basenowych. Z najnowszych doniesień literaturowych (Teo i in. 2016; Ekowati i in. 2016; Wang i in. 2013; Lempart i in. 2017) wynika, że w wodzie basenowej identyfikowane są m.in. farmaceutyki, składniki kosmetyków, domieszki przemysłowe, fitochemikalia, a nawet środki zmniejszające lub ograniczające palność (FRs), czy substancje owadobójcze. Ponadto, w wyniku złych warunków przepływu wody w niecce basenowej, rynnach i rurociągach oraz niedostatecznego czyszczenia ich, istnieje niebezpieczeństwo skażenia mikrobiologicznego instalacji.

Wiele problemów eksploatacyjnych może wystąpić również w związku z pracą pomp obiegowych. Wyróżnić należy m.in. pracę w kawitacji, spowodowaną spadkiem ciśnienia poniżej ciśnienia wrzenia dla danej temperatury. W przypadku tzw. rozwiniętej kawitacji może nawet dojść do zerwania strugi, na skutek czego pompa przestanie pobierać ciecz ze zbiornika. Kawitacja powoduje szybkie niszczenie pompy – szczególnie wirnika (Strączyński i in. 2007). Inne, najczęstsze problemy występujące w eksploatacji pomp stacjonarnych to: nadmierny wzrost temperatury łożysk, niestabilna praca pompy (zmienna i zbyt niska wydajność), nadmierny pobór mocy elektrycznej, nadmierny wyciek z uszczelnienia wału, czy zwiększony poziom drgań.

4. Idea gospodarki obiegu zamkniętego w instalacjach basenowych

Niedobór wody w niektórych krajach Unii Europejskiej, staje się coraz bardziej poważnym problemem. Może wywierać wręcz destrukcyjny wpływ na środowisko i gospodarkę. Wielokrotne wykorzystywanie wody basenowej w systemach obiegu zamkniętego jest cennym przykładem sposobu zwiększenia zasobów wody i odciążenia nadmiernie eksploatowanych zasobów wodnych.

Pakiet gospodarki o obiegu zamkniętym opublikowany 2 grudnia 2015 r. przez Komisję Europejską zawiera komunikat „Zamknięcie obiegu – plan działania UE dotyczący gospodarki o obiegu zamkniętym”, który w jednym z punktów zwraca szczególną uwagę na konieczność ponownego wykorzystywania zużytej wody. Komunikat jest zbiorem propozycji, których realizacja powinna przyczynić się do przejścia Unii Europejskiej na szeroko

rozumianą „drogę” obiegu zamkniętego, przy zapewnieniu rozwoju zrównoważonej, niskoemisyjnej, efektywnej surowcowo i konkurencyjnej gospodarki. Jedną z takich propozycji jest podjęcie działań zachęcających do ponownego wykorzystywania oczyszczonych ścieków, m.in. poprzez opracowanie przepisów dotyczących minimalnych wymagań w zakresie ponownego wykorzystania wody. Bez wątpienia w powyższe wpisuje się współczesne postępowanie dotyczące instalacji wody basenowej.

5. Możliwości dalszych działań

Wprawdzie idea gospodarki o obiegu zamkniętym jest w obiektach basenowych już realizowana w sposób warty naśladowania, istnieją możliwości wprowadzania nowych rozwiązań dążących do dalszego ograniczania zużycia zasobów wodnych i energii oraz objętości strumieni odpadów odprowadzanych z tych obiektów. W tym zakresie wymienia się m.in. zagospodarowywanie wody deszczowej, zwracanie wód wykorzystywanych do płukania złóż filtracyjnych, czy odzyskiwanie ciepła ze zużytej wody basenowej i natryskowej (Piechurska 2012; Wyczarska-Kokot 2016).

5.1. Wykorzystywanie wody deszczowej

Jakość wody deszczowej nie pozwala na jej wykorzystanie do spożycia lub na potrzeby higieniczne, jednak woda opadowa spływająca z dachów i z terenów utwardzonych idealnie nadaje się do takich celów jak np. splukiwanie misek ustępowych i pisuarów, prace porządkowe, czy podlewanie zieleni. Pływalnie kryte są zazwyczaj wyposażone w zarówno bardzo duże powierzchnie dachowe, jak i utwardzane parkingi sporych rozmiarów, co stwarza uzasadnione ekonomicznie warunki do zbierania wód deszczowych z tych powierzchni i ich późniejszego zagospodarowywania. Na system wykorzystania wód opadowych składają się: zbiornik wody deszczowej wyposażony w przelew, spust, włązy rewizyjne i wentylację grawitacyjną, filtr lub sito do podczyszczania wód opadowych oraz zestaw pompowy oraz system dezynfekcji. Zabezpieczenie takiej instalacji na wypadek wystąpienia okresu bezdeszczowego powinno stanowić prawidłowe połączenie z instalacją wody wodociągowej zabezpieczone zaworem antyskażeniowym (Piechurska 2012). Na rynku dostępne są tzw. centrale deszczowe, których zadaniem jest sterowanie i zarządzanie zagospodarowywaniem wody deszczowej. Posiadają one wbudowany zestaw czujników, wyłączników i zaworów, które pomagają automatycznie przełączać pobór wody z wody wodociągowej na wodę deszczową w zbiorniku i odwrotnie, tak aby dostawa wody do punktów poboru była zawsze niezawodna.

5.2. Zagospodarowywanie popłuczyn z filtrów basenowych

Głównym procesem oczyszczania wody basenowej jest filtracja, która zapewnia zatrzymywanie zanieczyszczeń podczas przepływu wody przez warstwę materiału – tzw. złoża

filtracyjnego. Podstawą prawidłowej pracy filtrów basenowych jest regularne płukanie tych złóż. Powinno ono odbywać się nie rzadziej niż co 2–3 dni. Do prawidłowego wypłukania złoża – według niemieckiej normy DIN 19463 – wymagane jest zużycie co najmniej 4m³ wody na 1 m² złoża. Zalecenia wielu producentów filtrów są jednak bardziej rygorystyczne – zwiększają tę ilość nawet do 6 m³/m² złoża. Dla przykładu – w skład typowej instalacji wody basenowej wchodzi 4 filtry o średnicy DN1800. Zakładając płukanie każdego filtra średnio co 2 dni, miesięczne zużycie wody na ten cel może wynieść nawet 900 m³ (Wyczarska-Kokot 2017). Około 75% tej objętości można – podobnie jak wody deszczowe – wykorzystywać gospodarczo: do spłukiwania misek ustępowych i pisuarów, polewania zieleni, czy zraszania kortów tenisowych i boisk, które nierzadko wchodzi w skład kompleksu sportowego, w którym znajduje się także basen. Takie działania prowadzą nie tylko do zmniejszenia objętości zużywanej wody, ale także ograniczają objętość strumieni odpadowych wprowadzanych do kanalizacji (Wyczarska-Kokot i in. 2017). Od 2002 roku w Instytucie Inżynierii Wody i Ścieków Politechniki Śląskiej prowadzone są badania nad jakością popłuczyn odprowadzanych z filtracyjnych systemów basenowych i możliwością ich zagospodarowania z wykorzystaniem prostych i niedrogich rozwiązań jednostkowych procesów i urządzeń. W kilku obiektach basenowych w Polsce takie rozwiązania już działają i ponoszą zwrot kosztów poniesionych na ich cele (Wyczarska-Kokot 2017). Producenci urządzeń proponują też rozwiązania wykorzystujące zaawansowane techniki membranowe, które pozwalają nawet na zawracanie wód popłucznych do niefiltracyjnych basenów.

5.3. Odzysk ciepła ze ścieków

Średnia temperatura ścieków odprowadzanych z obiektów basenowych wynosi około 30°C (Piechurska 2012). Nowoczesne systemy stwarzają możliwość odzyskania tego zgromadzonego ciepła. W tym celu konieczne jest dostarczenie ciepłych ścieków odprowadzanych m.in. z natrysków, do zbiornika wody zużytej, z którego, po oczyszczeniu z włosów i włókien, będą przepompowane do wymiennika ciepła centrali odzysku ciepła. Koszty energii potrzebnej do odzysku ciepła w pływalni stanowią około 30% kosztów energii potrzebnej do wytwarzania takiej samej ilości ciepła w urządzeniach konwencjonalnych (Piechurska 2012).

6. Podsumowanie

Omówione w artykule współczesne systemy cyrkulacji wody basenowej, które minimalizują zarówno pobór wody wodociągowej, jak i ograniczają strumień ścieków odprowadzanych do kanalizacji, doskonale wpisują się w założenia koncepcji gospodarki obiegu zamkniętego i stanowią cenny przykład ponownego wykorzystywania zużytej wody, zalecanego przez Komisję Europejską. Dostępne na rynku nowoczesne i innowacyjne urządzenia stwarzają duże możliwości podejmowania dalszych działań dążących do odciążania nadmiernie eksploatowanych zasobów wodnych. Wiele z omówionych w artykule urządzeń

i rozwiązań technicznych można zaadoptować i dostosować do zastosowania w innych dziedzinach przemysłu i gospodarki.

Literatura

- DIN 19643 *Uzdatnianie wody w basenach kąpielowych i na pływalniach*.
- Ekowati Y. i in. 2016 – *Occurrence of pharmaceuticals and UV filters in swimming pools and spas* Environmental Science and Pollutant Research 23, s. 14431–4441.
- Komunikat Komisji do Parlamentu Europejskiego, Rady, Europejskiego Komitetu Ekonomiczno-Społecznego i Komitetu Regionów „Zamknięcie obiegu – plan działania UE dotyczący gospodarki o obiegu zamkniętym”, COM(2015) 614 final.
- Lempart A. i Wyczarska-Kokot J. 2017 – *Bilans wody i ścieków dla wybranego obiektu basenowego*. INSTAL 3 (382), s. 54–58, ISSN1640-8160.
- Lempart A., Kudlek E. i Dudziak M. 2017 – *Identyfikacja nowych grup mikrozanieczyszczeń w wodzie basenowej*. [W:] Innowacyjne pomysły młodych naukowców: Nauka - Startup - Przemysł, 23–24 maja 2017, Kraków. Red. Joanna Kulczycka. Kraków: Wyd. IGSMiE PAN, s. 91, ISBN 978-83-6292274-1.
- Muszyński P. 2009 – *Instalacja wodna w niecce basenu publicznego*. Rynek Instalacyjny 1–2.
- Piechurski F. 2011 – *Jaki system się opłaca*. Cz. 1, Pływalnie i Baseny 7, s. 88–95.
- Piechurska A., Piechurski F. 2012a – *Oszczędzamy wodę*. Cz. 1, Pływalnie i Baseny 10, s. 114–118.
- Piechurska A., Piechurski F. 2012b – *Oszczędzamy wodę*. Cz. 1, Pływalnie i Baseny 11, s. 98–103.
- Piechurski F. 2013 – *W świecie pomp*. Cz. 1, Pływalnie i Baseny 14.
- Priller R. 2008 – *Projektowanie przepompowni ścieków – Zasady i zalecenia praktyczne dotyczące projektowania i wykonania*. Rynek Instalacyjny 5.
- Rozporządzenie Ministra Infrastruktury z dnia 14 stycznia 2002 r. w sprawie określenia przeciętnych norm zużycia wody. (Dz.U. 2002, nr 8, poz. 70).
- Sokołowski Cz. 1998 – *Wymagania sanitarno-higieniczne dla krytych pływalni*. MZiOS, Departament Zdrowia Publicznego, PZLiTS, Warszawa.
- Strączyński M., Pakuła G., Urbański P. i Solecki J. 2007 – *Podręcznik eksploatacji pomp w wodociągach i kanalizacji*.
- Teo T.L.L., Coleman H.M., Khan S.J. 2016 – *Occurrence and daily variability of pharmaceuticals and personal care products in swimming pools*. Environmental Science and Pollution Research, Vol. 23, Issue 7, s. 6972–6981.
- Wang W. i in. 2013 – *Halobenzoquinones in Swimming Pool Waters and Their Formation from Personal Care Products*. Environmental Science & Technology 47(7), s. 3275–3282; DOI: 10.1021/es304938x.
- Wyczarska-Kokot J. 2016 – *The study of possibilities for reuse of washings from swimming pool circulation systems*. Ecol. Chem. Eng. S, Vol. 23, nr 3, s. 447–459.
- Wyczarska-Kokot i in. 2017 – *Badania wskaźników zanieczyszczenia popłuczyn z instalacji basenowych* Pływalnie i baseny 25, s. 102–107.
- Zalecenia Zakładu Higieny Komunalnej NIZP-PZH dotyczące wymagań sanitarno-higienicznych dla obiektów basenowych i jakości wody w basenach przeznaczonych dla niemowląt i dzieci w wieku od 6 miesięcy do 3 lat (www.pzh.gov.pl z 07-09-2012).

Joanna WYCZARSKA-KOKOT*, Anna LEMPART**

Popłuczyny z obiegu basenowych jako odpad możliwy do wykorzystania

STRESZCZENIE. Przedstawiono ocenę możliwości zagospodarowania popłuczyn odprowadzanych z czterech obiegu basenowych, wyposażonych w różne rodzaje filtrów i złoż filtracyjnych. Jako dane do rozwiązania problemu przyjęto wyniki badań fizyczno-chemicznych próbek popłuczyn pobranych z instalacji filtracyjnych w trakcie płukania złoż. Koncepcja badań polegała na porównaniu rezultatów analiz popłuczyn z zaleceniami dotyczącymi dopuszczalnego stopnia zanieczyszczeń w ściekach odprowadzanych do wód lub ziemi. Badaniem objęto popłuczyny surowe, popłuczyny po procesie sedymentacji oraz popłuczyny po procesie koagulacji.

Washings from swimming pools as reusable waste

ABSTRACT: The evaluation of possibility of recovering water from washings discharged from swimming pool water treatment systems was presented. Washings from 4 different swimming pools equipped with different kind of filtration systems and filtration beds were tested. As data to solve the problem the results of physical-chemical tests of washing samples from the filtration system during the cleaning of the filter beds were used. The research concept was to compare the results of washings analyzes with the national recommendations on permissible levels of pollutants in waste water discharged into water or soil. The study included raw washings, post-sedimentation washings and post-coagulation washings.

1. Wstęp

Poszukiwanie nowoczesnych metod filtracji jest jednym z kilku aspektów decydujących o przyszłości technologii oczyszczania wody basenowej. Prowadzone w ostatnim czasie

* Dr inż., ** Mgr inż., Politechnika Śląska, Wydział Inżynierii Środowiska i Energetyki, Instytut Inżynierii Wody i Ścieków, Gliwice; e-mail: joanna.wyczarska-kokot@polsl

badania dotyczą między innymi nowych konstrukcji filtrów, modyfikacji sposobów ich działania, nowoczesnych złożeń oraz wydłużenia cyklu filtracyjnego bez obniżenia efektywności filtracji. Coraz większe są także możliwości zagospodarowywania popłuczyn powstałych po czyszczeniu złożeń filtrów basenowych, które do tej pory były odprowadzane najczęściej do kanalizacji sanitarnej. Istnieje nawet możliwość ich oczyszczenia i zawracania odzyskanej wody do obiegu basenowego (Reissmann 2005; Moller 2001; Komplex S.A. 2015; Łaskawiec i in. 2016; Wyczarska-Kokot 2017). Potencjał basenowych popłuczyn ukryty jest w stosunkowo dużej ich objętości oraz możliwości zastosowania prostych systemów oczyszczania w celu odzysku wody nadosadowej (Wyczarska-Kokot 2016; Wyczarska-Kokot i in. 2017).

2. Rodzaje złożeń filtracyjnych stosowanych w technologii wody basenowej

Podstawą funkcjonowania systemów oczyszczania wody basenowej jest proces filtracji, którego głównym celem jest usuwanie zawieszin o różnym stopniu dyspersji. Tym samym chroni on dalszą część instalacji przed uszkodzeniami mechanicznymi, czy zamulaniem. Współcześnie w instalacjach basenowych stosowane są filtry pośpieszne, w których filtracja wody odbywa się z prędkością 30 m/h.

Najprostszym i nadal bardzo popularnym rodzajem stosowanych rozwiązań są ciśnieniowe filtry jednowarstwowe, w których wypełnienie stanowi jeden rodzaj materiału filtracyjnego (najczęściej piasek lub żwir) o różnym uziarnieniu. Jednak w efekcie prowadzonych prac, mających na celu zwiększenie efektywności filtracji, powstały filtry wielowarstwowe, w których warstwa filtracyjna składa się z dwóch lub trzech warstw, z różnego rodzaju materiałów filtracyjnych. Wypełnienie takich filtrów stanowi zazwyczaj żwir, piasek kwarcowy i antracyt. Udowodniono, że po pewnym czasie eksploatacji systemu oczyszczania wody basenowej, warstwa antracytu może stać się siedliskiem mikroorganizmów w tym chorobotwórczych. Przy sprzyjających warunkach hydraulicznych, mogą one zostać wymyte do filtratu i stanowić zagrożenie dla zdrowia osób kąpiących się oraz obsługi technicznej obiektu. Ponadto, warstwa antracytu zwiększa koszty zakupu filtra i jego eksploatacji. Może też być przyczyną zwiększonego zużycia związku chloru stosowanego do dezynfekcji wody (Wyczarska-Kokot i Piechurski 2012). Z tych powodów, coraz większą popularnością cieszą się złoża nowej generacji, tj.: *Filterclean Silver* zawierające srebro o działaniu dezynfekującym, które pozwala skutecznie zapobiegać namnażaniu się w złożu drobnoustrojów. Są nimi m.in. *Activated Filter Glass* lub złoża szklane (AFM), którego ujemny ładunek powierzchniowy pozwala dodatkowo usuwać z wody drobne zanieczyszczenia organiczne i dodatnie jony (np. żelaza i manganu), lub złoża zeolitowe, skutecznie usuwające z wody drobne cząsteczki zawieszane i koloidalne oraz jony amonowe. Coraz większą popularnością w instalacjach wody basenowej cieszą się również filtry podciśnieniowe, które mogą być wykonywane jako otwarte lub zamknięte. W filtrach podciśnieniowych zamkniętych, jako materiał filtracyjny, stosowany jest piasek kwarcowy o różnym uziarnieniu, a w uzasadnionych przypadkach piasek kwarcowy i antracyt. Z kolei w filtrach podciśnieniowych otwartych stosuje się ziemię okrzemkową, perlit lub włókna celulozy (Wałęga 2013; Wyczarska-Kokot 2013).

3. Charakterystyka obiektów badań

Badania przeprowadzono w 4 obiektach basenowych, oznaczonych w pracy jako FP (B1), FPA (B2), FAFM (B3), FD (B4), gdzie FP oznacza filtr ze złożem piaskowym, FPA – filtr ze złożem piaskowo-antracytowym, FAFM – filtr ze złożem szklanym i FD – filtr ze złożem diatomitowym (okrzemkowym). Podstawowe parametry techniczne badanych obiektów, ze szczególnym uwzględnieniem rodzaju zastosowanych złożów filtracyjnych przedstawiono w tabeli 1.

4. Metodyka badań

Przeprowadzone badania miały na celu określenie podstawowych parametrów charakteryzujących jakość popłuczyn odprowadzanych z obiegu basenowych wyposażonych w różnego typu złoża filtracyjne. Próbki popłuczyn do analiz fizyczno-chemicznych pobierano z instalacji basenowych podczas płukania złożów. W celu otrzymania uśrednionej próbki do badań popłuczyn z obiektów FP(B1), FPA(B2) i FAFM(B3) pobierano w początkowym, środkowym i końcowym etapie procesu płukania. Łączna objętość każdej próbki wynosiła około 5 dm³. Pobór próbek odbywał się poprzez zawór do poboru próbek na rurociągu odpływowym popłuczyn. Najpierw wzruszono złożo filtracyjne sprężonym powietrzem, a następnie płukano je wodą. Koniec płukania wyznaczała klarowność odpływu, którą można było ocenić dzięki wziernikom umieszczonym na odpływie. Średni czas poboru próbek wynosił około 15 min.

Pobór próbek w obiekcie FD(B4) odbywał się w miejscu odpływu popłuczyn do studzienki rozprężnej. Pobierano około 1 dm³ popłuczyn podczas opróżniania zbiornika filtra, około 3 dm³ podczas spłukiwania ziemi okrzemkowej z tkaniny filtracyjnej (po 1 dm³ 3 razy w równych odstępach czasu) oraz 1 dm³ podczas spłukiwania dna zbiornika filtracyjnego. Średni czas poboru próbek wynosił około 25 min.

Pobór próbek oraz oznaczenie podstawowych parametrów fizyczno-chemicznych dla oceny stopnia zanieczyszczenia popłuczyn wykonano zgodnie z obowiązującymi metodami (Down 2005; Kaul 2007; Dojlido i in. 2010).

5. Analiza jakości popłuczyn w zależności od rodzaju złoża filtracyjnego

Założono, że popłuczyny będzie można odprowadzać do środowiska (do cieków wodnych lub do gruntu).

Analiza jakości popłuczyn wykazała, że średnie wartości badanych wskaźników zanieczyszczeń były większe niż wartości dopuszczalne według Rozporządzenia Ministra Środowiska z dnia 18 listopada 2014 r. w sprawie warunków, jakie należy spełnić przy wprowadzaniu ścieków do wód lub do ziemi, oraz w sprawie substancji szczególnie szkodliwych dla środowiska wodnego.

TABELA 1. Charakterystyka badanych obiektów basenowych

Basen	FP (B1)	FPA(B2)	FAFM (B3)	FD (B4)
Wymiary niecki basenowej [m×m]	12,5×25	7,2×12,5	kształt nieregularny, brodzik dla dzieci	12,5×25
Głębokość niecki basenowej [m]	1,2–1,8	1,2	0,35	1,2–1,8
Pojemność wodna [m ³]	562	162	10,5	716,4
Całkowita PU [m ²]	312,5	90	29,9	312,5
Minimalna wymagana PU dla jednej osoby [m ² /os.]	4,5	2,5	2,5	4,5
Przeciętna frekwencja [os./h]	18	20	6	24
Rzeczywista PU [m ² /os.]	17,4	4,5	–	13
Rodzaj filtra	ciśnieniowy, zamknięty	ciśnieniowy, zamknięty	ciśnieniowy, zamknięty	podciśnieniowy, namywany ziemią okrzemkową
Liczba filtrów [szt.]	2	2	1	1
Wymiar filtra [mm]	ø 1800	ø 630	ø 1200	2100 × 2300
Wysokość warstwy filtrac. / wys. filtra [mm]	1200/2815	1200/2210	1200/2136	2000
Rodzaj złoża	piaskowe	piaskowo-antracytowe	szklane AFM	ziemia okrzemkowa (złoże diatomitowe)
Powierz. filtracji	2,54	0,31	1,13	1,13
1-go filtra [m ²]				
Wydajność zespołu filtracyjnego [m ³ /h]	152,6	32,4	34	186
Prędkość filtracji [m/h]	30	30	30	4
Czas cyklu filtracyjnego [d]	3–4	3–4	2	7
Sposób płukania złoża filtracyjnego	sprężonym powietrzem i wodą obiegową pobieraną ze zbiornika wyrównawczego	wodą obiegową pobieraną ze zbiornika wyrównawczego	wodą obiegową pobieraną ze zbiornika wyrównawczego	splukiwanie z tkaniny filtracyjnej warstwy ziemi okrzemkowej wodą wodociągową przy pomocy węża z dyszą
Prędkość płukania [m/h]	50	50	50	–
Objętość wody do płukania [m ³ /m ² złoża]	4	4	4	–
Całkowita objętość wody do płukania 1-go filtra [m ³]	10	1,84	4,52	2,5
Miejsce odprowadzania popłuczyn	studzienka rozprężna i potem kanalizacja sanitarna	miejska sieć kanalizacji sanitarnej	studzienka rozprężna i potem kanalizacja sanitarna	studzienka rozprężna i potem kanalizacja sanitarna
Rodzaj koagulantu	2,5–10 % roztwór Super Flock (0,5–1,0 cm ³ /m ³ wody)	2,5–10% roztwór Super Flock (0,5–1,0 cm ³ /m ³ wody)	2,5÷10 % roztwór Super Flock (0,5–1,0 cm ³ /m ³ wody)	nie stosuje się
Środek do korekty pH	H ₂ SO ₄			
Technologia oczyszczania wody obiegowej	filtracja wstępna – koagulacja powierzchniowa – filtracja w filtrach wielowarstwowych – naświetlanie promieniami UV – dezynfekcja NaOCl – korekta pH	filtracja wstępna – koagulacja powierzchniowa – filtracja w filtrach wielowarstwowych – dezynfekcja NaOCl – korekta pH	filtracja wstępna – koagulacja powierzchniowa – filtracja w filtrze ze złożem szklanym – dezynfekcja NaOCl – korekta pH	filtracja wstępna – filtracja w filtrze otwartym "okrzemkowym" – dezynfekcja NaOCl – korekta pH

Objaśnienia: *PU – powierzchnia użytkowa (powierzchnia lustra wody).

Stężenia chloru wolnego powyżej $0,2 \text{ mgCl}_2/\text{dm}^3$ zmierzono we wszystkich próbkach popłuczyn, bez względu na rodzaj złoża filtracyjnego. Zawartość azotu i fosforu ogólnego ponad wartości dopuszczalne oznaczono w próbkach popłuczyn z filtrów wypełnionych złożem piaskowym – FP(B1) i piaskowo-antracytowym – FPA(B2). Ilość zawiesin ogólnych ponad wartość dopuszczalną tj. $35 \text{ mg}/\text{dm}^3$ oznaczono w popłuczynach z FP(B1), FPA(B2) i FD(B4). Jedynie w próbkach popłuczyn z FAFM(B3) zawartość zawiesin nie przekraczała wymagań wyżej wymienionego rozporządzenia (tab. 2).

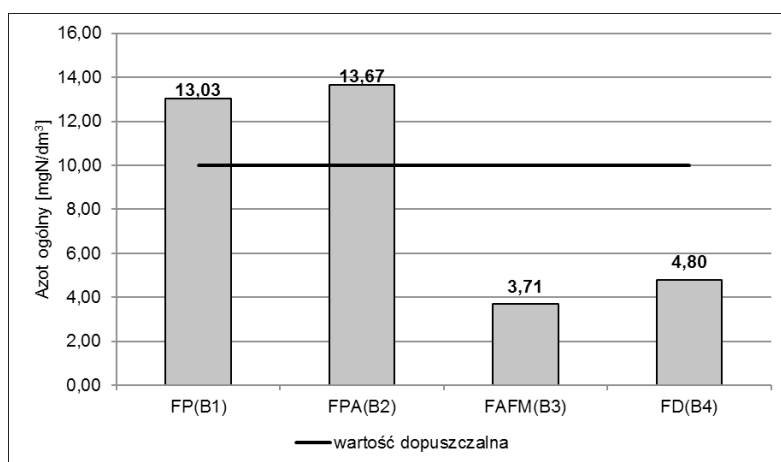
TABELA 2. Wskaźniki zanieczyszczenia popłuczyn

Parametr	Jednostka	Średnie wartości wskaźników zanieczyszczenia				Wart. dopuszcz. wg rozporz. DzU 2014, poz. 1800
		FP(B1)	FPA(B2)	FAFM(B3)	FD(B4)	
pH	–	7,51	7,40	7,30	7,56	6,5–9,0
Temperatura	°C	23,8	24,4	28,1	14,8	35
Azot ogólny	mg N/dm ³	13,03	13,67	3,71	4,80	10
Fosfor ogólny	mg P/dm ³	1,04	1,41	0,47	0,34	1
Chlor wolny	mg Cl ₂ /dm ³	0,21	0,32	0,43	0,46	0,20
Glin ogólny	mg Al ³⁺ /dm ³	0,34	0,56	0,10	–	3
Mętność	NTU	48,88	281,5	5,39	737	–
Chlorki	mg Cl ⁻ /dm ³	127	181	208	231	1000
Siarczany	mg SO ₄ ⁻² /dm ³	137	292	160	262	500
ChZT	mg O ₂ /dm ³	113,2	56,4	24,0	34,0	125
BZT5	mg O ₂ /dm ³	2,26	2,88	3,90	6,24	15
Zawiesiny ogólne	mg/dm ³	73	280	23	1263	35
Zawiesiny trudnoopadalne	mg/dm ³	43	32	–	33	35

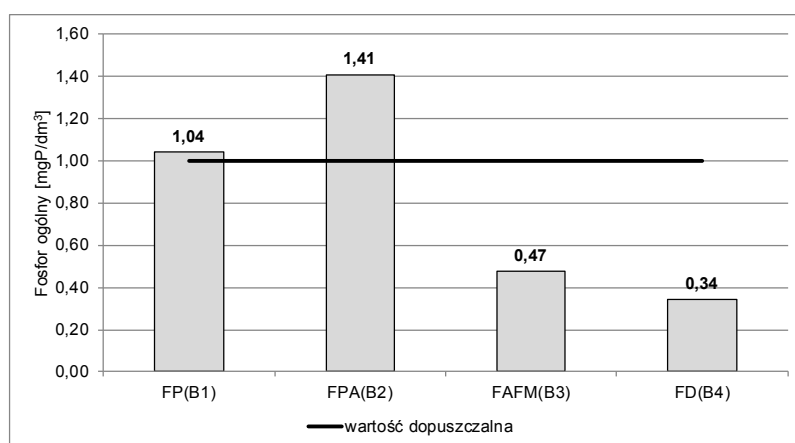
Popłuczyny z filtra wypełnionego aktywowanym złożem szklanym FAFM (B3) wyróżniały się najlepszą jakością. Zarówno ich mętność, jak i zawartość zawiesin ogólnych były nieporównywalnie mniejsze niż w popłuczynach z pozostałych rodzajów złoża filtracyjnych. Dotychczasowe badania (Łaskawiec i in. 2016; Wyczarska-Kokot 2016 i 2017; Wyczarska-Kokot i in. 2017) wykazały, że zawiesiny są głównymi zanieczyszczeniami uniemożliwiającymi bezpośrednie odprowadzenie popłuczyn do gleby lub cieków wodnych. Tymczasem średnia zawartość zawiesin w popłuczynach surowych z basenu wyposażonego w filtry ze złożem AFM była znacznie poniżej wartości dopuszczalnej wyszczególnionej w rozporządzeniu (Rozp. Min. Środ. 2014) i wyniosła $23 \text{ mg}/\text{dm}^3$. Największe stężenie zawiesin $1263 \text{ mg}/\text{dm}^3$ oznaczono w popłuczynach z FD(B4), w którym zainstalowany był podciśnieniowy filtr ze złożem diatomitowym (ziemia okrzemkowa). Tak duża ilość zawiesin w popłuczynach z tego typu filtra wynika ze sposobu płukania. Wraz z wodą płuczącą usuwana jest cała warstwa filtracyjna, wcześniej namyta na tkaniny filtracyjne. Ponad 97% zawiesin w popłuczynach z FD(B4) stanowiły w tym przypadku zawiesiny łatwoopadalne.

Oprócz zawiesin parametrem wpływającym w istotny sposób na możliwość wykorzystania popłuczyn był chlor wolny. Złoża filtracyjne płukane były wodą ze zbiorników wyrównawczych, a więc wodą chlorowaną z obiegu basenowego. Z tego też powodu stężenia chloru wolnego w próbkach popłuczyn wynosiły od 0,21 mgCl₂/dm³ do 0,50 mgCl₂/dm³ i tym samym przekraczały wartość dopuszczalną, tj. 0,2 mgCl₂/dm³ (rys. 3). Ponieważ chlor ma silne właściwości utleniające jego wprowadzenie wraz ze strumieniem popłuczyn do wód powierzchniowych lub gleby może mieć negatywny wpływ na życie zwierząt i roślin. Literatura przedmiotowa (Wyczarska-Kokot 2016; Wyczarska-Kokot i in. 2017) wskazuje, że stężenie chloru wolnego w popłuczynach ulega zmniejszeniu do stężenia dopuszczalnego w wyniku „odstania” trwającego od 2 do 12 godzin, a zastosowanie intensywnego napowietrzania może przyspieszyć ten proces.

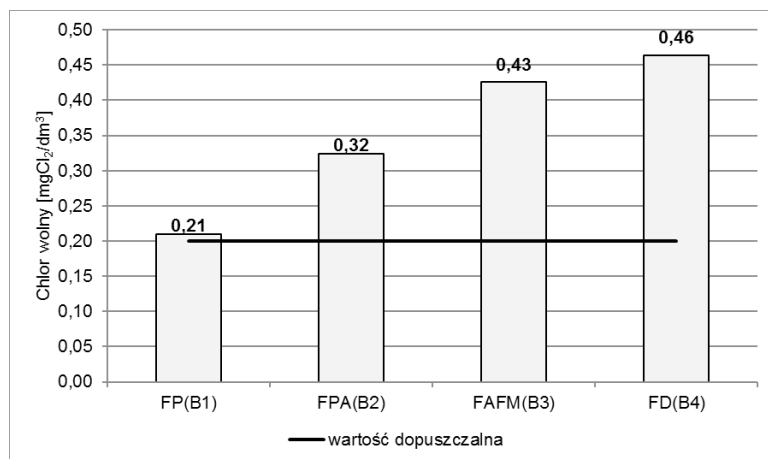
Na wykresach (rys. 1–4) przedstawiono wartości wybranych wskaźników zanieczyszczeń, z zaznaczeniem wartości dopuszczalnych według rozporządzenia (Dz.U. 2014, poz. 1800).



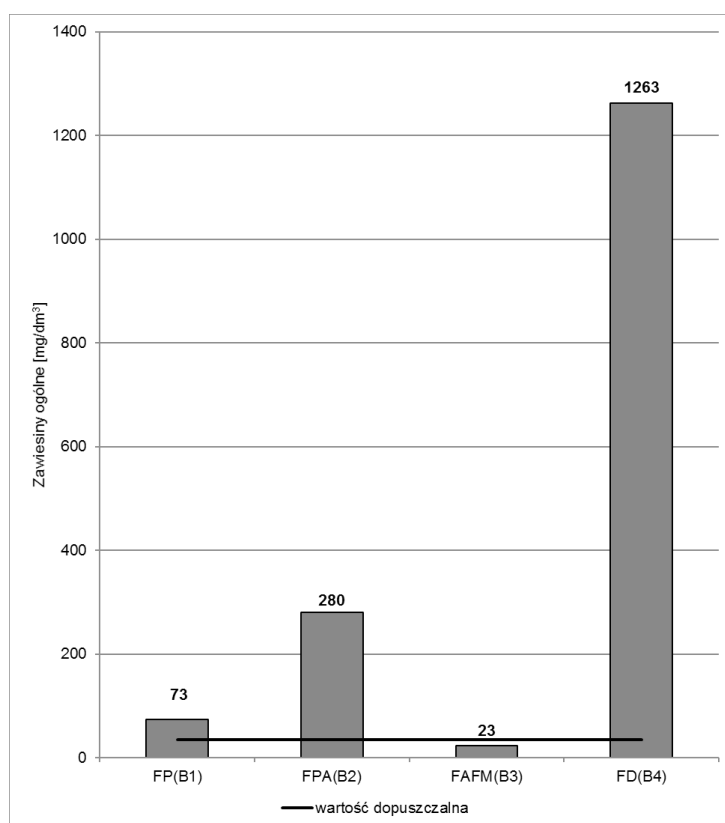
Rys. 1. Stężenie azotu ogólnego w popłuczynach
Źródło: Opracowanie własne



Rys. 2. Stężenie fosforu ogólnego w popłuczynach
Źródło: Opracowanie własne



Rys. 3. Stężenie chloru wolnego w popłuczynach
 Źródło: Opracowanie własne



Rys. 4. Zawartość zawiesin ogólnych w popłuczynach
 Źródło: Opracowanie własne

6. Podsumowanie i wnioski

Baseny to bardzo drogie pod względem eksploatacji, „wodochłonne” obiekty sportowe. Rosnące ceny wody i odprowadzania ścieków, okresowe deficyty wody i konieczność jej oszczędzania skłaniają właścicieli obiektów basenowych do stosowania rozwiązań umożliwiających obniżenie kosztów obsługi tych obiektów i racjonalne gospodarowanie wodą.

Popłuczyny basenowe stanowią strumień odpadowy o dużej objętości, który w klasycznych rozwiązaniach odprowadzany jest do kanalizacji. Taki zrzut popłuczyn to nie tylko marnotrawstwo wody, ale także energii zużytej na jej wcześniejsze podgrzanie. Zastosowanie prostych rozwiązań uwzględniających jednostkowe procesy, tj. sedymentację, koagulację czy ultrafiltrację, pozwala na racjonalne wykorzystanie popłuczyn z obiegów oczyszczania wody basenowej z wykorzystaniem osadników, osadników zespolonych z komorą mieszania i dozowania koagulantu czy układów ultrafiltracji membranowej.

Przeprowadzone do tej pory analizy objętości popłuczyn odprowadzanych do systemów kanalizacji sanitarnej pozwoliły określić możliwość redukcji kosztów odprowadzania ścieków od 20 do 70%. Pod warunkiem odpowiedniej jakości popłuczyn, określanej przez wskaźniki wymienione np. w Rozporządzeniu w sprawie warunków, jakie należy spełnić przy wprowadzaniu ścieków do wód lub do ziemi (Dz.U. 2014, poz. 1800) można je odprowadzać do cieków wodnych lub gruntu. Wykorzystywanie ich do nawadniania terenów, spłukiwania toalet i pisuarów jest rozwiązaniem pozwalającym na znaczną redukcję kosztów zaopatrzenia w wodę i odprowadzania ścieków w obiektach basenowych. Zainteresowanie tego typu rozwiązaniami jest coraz większe. Wiele koncepcji budowy nowoczesnych obiektów basenowych zakłada na etapie projektu odzysk ciepła i odzysk wody nadosadowej z popłuczyn.

Podjęte przez autorów pracy próby poprawy jakości popłuczyn, odprowadzanych z 4 obiektów basenowych wyposażonych w różnego typu filtry i różnego rodzaju złoża filtracyjne, poprzez zastosowanie procesu sedymentacji okazały się bardzo efektywne.

Dla przeanalizowanych rozwiązań układów filtracyjnych sformułowano następujące wnioski:

- Bezpośrednie odprowadzenie popłuczyn do wód lub ziemi było niemożliwe głównie ze względu na zbyt wysokie zawartości: zawiesin ogólnych (za wyjątkiem popłuczyn z obiektu FAFM(B3)), chloru wolnego (we wszystkich popłuczynach), azotu ogólnego i fosforu ogólnego (w popłuczynach z obiektów FP(B1) i FPA(B2)).
- W celu sprawdzenia podatności opadania zawiesin w próbkach badanych popłuczyn, przeprowadzono proces sedymentacji w warunkach laboratoryjnych. W wyniku tego procesu uzyskano obniżenie zawartości zawiesin od 51% w przypadku popłuczyn z filtrów piaskowych FP(B1) do aż 97,4% w przypadku popłuczyn z ziemią okrzemkową FD(B4).
- W wodzie nadosadowej z FP(B1) ilość zawiesin trudnoopadalnych była większa niż dopuszczalna 35 mg/dm^3 i wynosiła 43 mg/dm^3 . W celu usunięcia tego rodzaju zawiesin proces oczyszczenia popłuczyn należałoby zintensyfikować np. proces sedymentacji poprzedzić procesem koagulacji, zastosować układ ultrafiltracji membranowej lub kombinację tych procesów.

- Próbki popłuczyn z filtra wypełnionego aktywowanym złożem szklanym FAFM (B3) cechowały się najmniejszą zawartością zawiesin ogólnych w porównaniu do pozostałych badanych. Wynik ten jest potwierdzeniem charakterystyki złoża AFM jako produktu ze strefą o wysokim potencjale oksydacji, zapobiegającej powstawaniu błony biologicznej.

Literatura

- Dojlido J., Dożańska W., Hermanowicz W., Koziorowski B., Zerbe J. 2010 – *Fizyczno-chemiczne badanie wody i ścieków*. Arkady, Warszawa.
- Down R.D. i Lehr J.H. 2005 – *Environmental Instrumentation and Analysis Handbook*. Wiley, New Jersey.
- Kaul K. 2007 – *Handbook of Water and Wastewater Analysis*. Atlantic Publishers and Distributors, New Delhi.
- Kompleks S.A. 2015: *UltraEcoSwim do odzysku wody popłucznej*. Seminarium szkoleniowe Gdańska Fundacja Wody, Sobieszewo.
- Łaskawiec E., Dudziak M. i Wyczarska-Kokot J. 2016 – *Oczyszczanie popłuczyn z instalacji basenowej w jednostkowym membranowym procesie ultrafiltracji oraz w układzie zintegrowanym napowietrzanie-ultrafiltracja*. Aparatura badawcza i dydaktyczna vol. 4, s. 238–244.
- Moller E. 2001 – *Odzysk wody przemysłowej z wody popłucznej i basenowej w krytej pływalni*. Instalacje basenowe. Politechnika Śląska. Ustroń, s. 117–123.
- Reissmann F.G., Schulze E. i Albrecht V. 2005 – *Application of a combined UF/RO system for the reuse of filter backwash water from treated swimming pool water*. Desalination No 178, p. 41–49.
- Rozporządzenie Ministra Środowiska z dnia 18 listopada 2014 r. w sprawie warunków, jakie należy spełnić przy wprowadzaniu ścieków do wód lub do ziemi, oraz w sprawie substancji szczególnie szkodliwych dla środowiska wodnego, Dz.U. 2014, poz. 1800.
- Wałęga A. 2013 – *Filtry ciśnieniowe z ziemia okrzemkową*. Instalacje basenowe. Politechnika Śląska. Ustroń, s. 117–123.
- Wyczarska-Kokot J., Piechurski F. 2012 – *Analiza pracy złoża filtracyjnego piaskowego i z warstwą antracytu w systemie oczyszczania wody basenowej*. Praca zbiorowa pod red. Dymaczewski Z., Jeż-Walkowiak J. Zaopatrzenie w wodę, jakość i ochrona wód, Poznań, t. 2, s. 585–601.
- Wyczarska-Kokot J. 2013 – *Nowoczesne i innowacyjne technologie oczyszczania wody basenowej*. Cz. 3. Rynek Instalacyjny Nr 4, s. 82–84.
- Wyczarska-Kokot J. 2016 – *The study of possibilities for reuse of washings from swimming pool circulation systems*. Ecological Chemistry and Engineering S vol. 23, No 3, s. 447–459.
- Wyczarska-Kokot J. 2017 – *Badania jakości popłuczyn ze stacji filtrów w obiekcie basenowym w aspekcie możliwości odprowadzania ich do wód lub ziemi – studium przypadku*. Ochrona Środowiska vol. 39, Nr 2, s. 45–50.
- Wyczarska-Kokot J., Lempart A., Cieślak A. i Gorzkowska M. 2017 – *Badania wskaźników zanieczyszczenia popłuczyn z instalacji basenowych*. Pływalnie i Baseny Nr 25, s. 102–107.

Część IV

Energetyka

Katarzyna Anna JABŁOŃSKA*

Tendencje zmian w energetyce a koncepcja gospodarki cyrkularnej

STRESZCZENIE. W pracy zaprezentowano zagadnienia związane z tendencjami zmian w energetyce oraz ich zbieżnością z koncepcją gospodarki cyrkularnej. Wykazano, iż w ramach procesów, jakie kreuje ta koncepcja, możliwe jest kształtowanie i rozwój lokalnych gospodarek energetycznych.

Tendencies of changes in energy sector and the circular economy concept

ABSTRACT. The publication has presented tendencies of changes in energy sector and their compatibility with the circular economy concept. It has been proved that within process being created by this concept forming and developing local energy markets is being both possible and viable.

1. Wstęp

Postępująca transformacja energetyczna stanowi kapitałochłonny i długotrwały proces przemian, uwzględniający m.in. tendencje rynku surowcowego, demokratyzację energetyki i jej postęp techniczno-technologiczny. Występuje zatem trend umożliwiający nową organizację systemu energetycznego ukierunkowanego na decentralizację i dywersyfikację, co stwarza nowe możliwości rozwoju regionów. W tej strukturze rynki energetyczne są kształtowane na poziomie lokalnym, w oparciu o identyfikowalne zasoby energetyczne wykorzystywane w sposób adekwatny do potrzeb odbiorców końcowych. W tym znaczeniu zmiany

* Mgr, Katedra Polityki Gospodarczej i Samorządowej, Uniwersytet Ekonomiczny, Poznań.

w energetyce stanowią jedno z założeń koncepcji gospodarki cyrkularnej, a ich potencjalny wpływ będzie podlegał diagnozie i analizie przeprowadzonej w pracy. Zostanie do tego wykorzystana metoda *case study*, technika analityczna modeli logicznych, co w tym układzie ma na celu w pierwszej kolejności opis zachodzących zmian w energetyce, a następnie podjęcie próby oszacowania ich wpływu na gospodarki lokalne. Efektem końcowym, stanowiącym wartość publikacji, będzie ocena potencjału dostosowania i zmian regionalnych gospodarek energetycznych – problematyka aktualna i istotna, coraz częściej pojawiająca się w dylematach decyzyjnych inwestorów lokalnych oraz przedstawicieli władz samorządowych.

2. Tendencje rozwoju energetyki

Energetyka jest sektorem gospodarki odpowiedzialnym za jej niezachwiany rozwój oraz za budowanie dobrobytu społecznego. Jej wieloletni proces przemian został zainicjowany pierwszymi kryzysami energetycznymi oraz nadmierną degradacją środowiska. Spowodowało to podejmowanie nieznanych dotychczas działań zmierzających do eliminacji zagrożeń związanych z uzależnieniem gospodarek światowych od importu nieodnawialnych surowców energetycznych, zwiększeniem lokalnego bezpieczeństwa energetycznego oraz realizacją postulatów z zakresu ochrony środowiska.

Tak opisany kierunek zmian został w literaturze przedmiotu nazwany transformacją energetyczną (Ośrodek Studiów Wschodnich 2012; Fundacja im. H. Bölla 2015; Polski Komitet Energii Elektrycznej 2016). Jest to zagadnienie niezwykle obszerne, bo uwzględniające procesy przemian w elektroenergetyce, ciepłownictwie i transporcie, ale również zwiększanie efektywności energetycznej, postępującą liberalizację, innowacyjność i konkurencyjność rozpatrywaną na poziomie międzynarodowym. Dlatego też tendencje rozwoju energetyki w prezentowanej publikacji zostaną opisane w formie uproszczonej, ograniczonej do wyselekcjonowanych zagadnień tematycznych związanych z uwarunkowaniami makrootoczenia umożliwiającymi organizację systemu energetycznego na poziomie lokalnym. Zalicza się do nich:

- dywersyfikację źródeł pochodzenia energii,
- decentralizację przestrzenną źródeł wytwórczych,
- wdrożenia z zakresu nowoczesnych rozwiązań sieciowych,
- magazynowanie energii.

Dywersyfikacja źródeł pochodzenia energii stanowi bezpośredni efekt poszukiwań nowych, bardziej ekologicznych, efektywniejszych i tańszych technologii wytwórczych. Realizuje cel zmiany dotychczasowej struktury wykorzystania surowców energetycznych zorientowany w szczególności na identyfikację i eksploatację lokalnie dostępnych odnawialnych źródeł energii. Zakładanym skutkiem urzeczywistnienia tej tendencji w energetyce będzie jej odmienna struktura wytwórcza w wymiarze globalnym. Według prognoz BP Energy Outlook (2017), w perspektywie do 2035 roku nastąpi wzrost wykorzystania surowców energetyki odnawialnej i gazowej, stabilizacja wykorzystania energetyki węglowej oraz zmniejszenie wykorzystania oleju napędowego. Jest to kierunek zmian, który oprócz wy-

pełnienia zaostrzających się norm środowiskowych ma zapewnić większe bezpieczeństwo dostaw energii oraz minimalizować ryzyko zaistnienia kryzysów podażowych, konfliktów zbrojnych czy też katastrof naturalnych.

Decentralizację przestrzenną źródeł wytwórczych energii można opisać jako swoisty proces przekształceń wielkoskalowej energetyki w jej zdywersyfikowanej oraz rozproszonej terytorialnie formule. W tym znaczeniu jest to tendencja realizująca postulat zwiększenia liczby źródeł wytwórczych w systemie energetycznym przy jednoczesnym zmniejszaniu ich mocy zainstalowanych. Warto, jednak zaznaczyć, iż aspektem sprzyjającym jej realizacji jest rozwój technologii wykorzystujących odnawialne źródła energii, które na przestrzeni ostatnich lat osiągnęły dojrzałość technologiczną. Jest ona identyfikowana w odniesieniu do poprawiającej się produktywności instalacji wytwórczych liczonej w MWh/rok oraz zmniejszających się kosztów inwestycyjnych i operacyjnych, co znajduje swoje odzwierciedlenie w obniżeniu cen wytwarzanej energii. Szczególnym przypadkiem są tutaj technologie elektroenergetyczne: energetyki wiatrowej i fotowoltaiki, których koszty funkcjonowania w wymiarze globalnym w latach 2008–2015 obniżyły się odpowiednio w o około 30% i 80% (OECD/IEA 2016). Ten stan rzeczy znacząco poprawia dostępność tych technologii wytwórczych oraz skutkuje zwiększającą się liczbą instalacji wytwórczych wpływających pozytywnie na aktywizację odbiorców energii i ich możliwości partycypacji na rynku energii.

Wdrożenia nowoczesnych rozwiązań sieciowych to usprawnienia techniczno-technologiczne poprawiające funkcjonowanie sieci elektroenergetycznych. Dzięki nim możliwe jest precyzyjniejsze monitorowanie, zarządzanie i bilansowanie popytu i podaży na energię w danym regionie. W takim rozumieniu, nowoczesne rozwiązania sieciowe mogą stanowić nową usługę świadczoną przez lokalnych operatorów energii, która umożliwi odpowiednią koordynację oraz komplementarność zdywersyfikowanych i zdecentralizowanych źródeł energii. Pozwoli to na realizację całego łańcucha wartości w energetyce na poziomie lokalnym, a tym samym będzie prowadzić do częściowej autonomizacji energetycznej regionu.

Magazynowanie energii jest ostatnim z analizowanych elementów. Stanowi rozwiązanie problemu niedoskonałości w procesie ustalania relacji pomiędzy popytem a podażą na energię. Obecnie systemy magazynowania energii są najdynamiczniej rozwijającą się dziedziną energetyki, choć jeszcze niebędącą komercyjnie wykorzystywaną. Ich głównym zadaniem jest zapewnienie odpowiedniego poziomu rezerw w systemie energetycznym, co odbywa się za pomocą zastosowania całego spektrum rozwiązań technologicznych. Zalicza się do nich metody: elektrochemiczne (akumulatory), chemiczne (produkcja wodoru), cieplne (magazyny ciepła), mechaniczne (elektrownie szczytowo-pompowe, magazyny sprężonego powietrza), ale również komplementarność różnych form energii, tj. ciepłownictwa, elektroenergetyki i transportu. Zakłada się, że najpopularniejsze z nich będą związane z upowszechnianiem się motoryzacji elektrycznej i rozwojem jej infrastruktury w postaci stacji ładowania pojazdów. Osiągnięcie dojrzałości technologicznej przez technologie magazynowania energii zapewni większą elastyczność systemu energetycznego, w szczególności w kontekście niesterowalnych technologii wytwórczych energii elektrycznej, takich jak fotowoltaika czy energetyka wiatrowa.

Na podstawie informacji przedstawionych powyżej można wskazać, iż istnieją tendencje rozwoju energetyki, które kreują odmienne możliwości organizacji i funkcjonowania całe-

go sektora elektroenergetycznego. Prowadzą do rozproszenia rynku, implementacji nowych technologii wytwórczych wykorzystujących lokalne zasoby oraz aktywizacji dotychczasowych odbiorców energii. W tym rozumieniu udowodniono, iż energetyka może podlegać procesom autonomizacji, a tym samym – wpisywać się w założenia koncepcji gospodarki cyrkularnej.

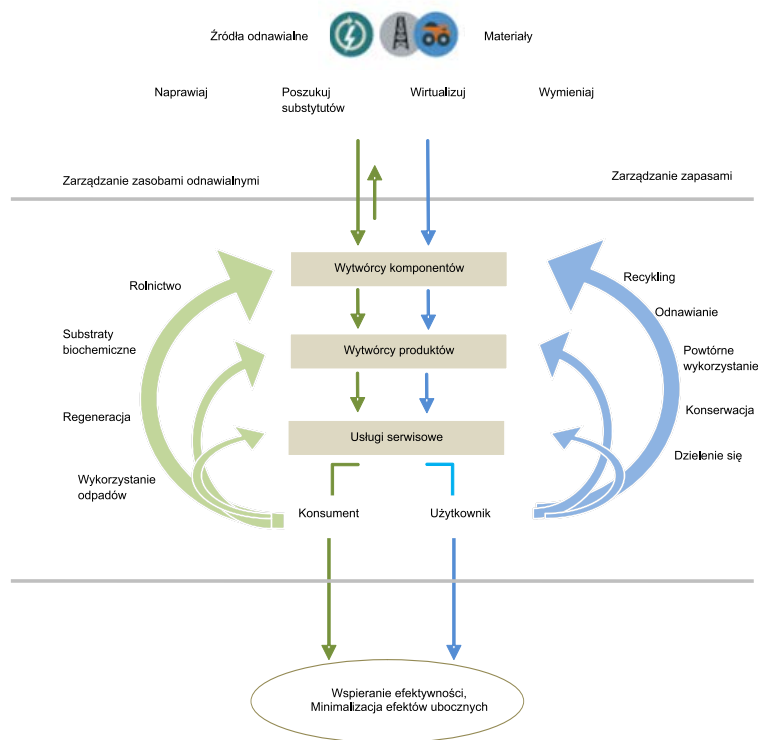
3. Założenia koncepcji gospodarki cyrkularnej w kontekście rozwoju energetyki na poziomie lokalnym

Gospodarka cyrkularna stanowi nową koncepcję kształtowania gospodarek lokalnych, w której odpady praktycznie nie istnieją, surowce nie są marnowane, a produkty wykorzystuje się w ponownych obiegach (cyklach). Stanowi tym samym zmodyfikowaną i ulepszoną formułę koncepcji zrównoważonego rozwoju, wzbogaconą o doświadczenia związane z recyklingiem odpadów oraz elementami procesów przemian społeczno-gospodarczych reprezentowanymi pierwszymi inicjatywami z zakresu *sharing economy* (Pietrewicz i Sobiecki 2016).

Główne zasady funkcjonowania gospodarki cyrkularnej opierają się na priorytetowym traktowaniu zasobów lokalnych, współpracy społeczeństw oraz wspólnego budowania dobrobytu. Funkcjonowanie gospodarki cyrkularnej przedstawiono na rysunku 1. Ilustruje on aspekty wykorzystania zasobów oraz przepływu materiałów, towarów i usług przyporządkowanych do roli użytkowników i konsumentów. Jest to możliwe dzięki odpowiednio zaprojektowanym procesom oraz zapewnieniu sprzężeń zwrotnych realizujących postulat maksymalizacji wykorzystania zasobów oraz eliminowaniu nieefektywności i marnotrawstwa.

Uniwersalizm koncepcji gospodarki cyrkularnej umożliwia również jej zastosowanie w procesie kształtowania lokalnych gospodarek energetycznych. Można go opisać w formule trzyetapowej mającej swoje źródło w schemacie funkcjonowania gospodarki cyrkularnej przedstawionym na rysunku 1.

Pierwszy etap polega na identyfikacji zasobów, szacowaniu ich wielkości oraz zapewnieniu równoważenia ich przepływu. W kontekście kształtowania lokalnej gospodarki energetycznej jest to urzeczywistnienie tendencji dywersyfikacji i decentralizacji źródeł wytwórczych. Opiera się na identyfikacji istniejących instalacji, szacowaniu potencjału wykorzystania zasobów energetycznych oraz możliwości ich rozwoju ukierunkowanych na otrzymanie optymalnego kształtu lokalnego rynku energii. Wymienione działania są realizowane w ramach audytów energetycznych, ulepszeń z zakresu efektywności energetycznej czy też modyfikacji funkcjonujących instalacji umożliwiających elastyczność projektowanego lokalnego systemu energetycznego. Istotnym elementem tego procesu będzie aktywizacja społeczeństw lokalnych, skutkująca wzrastającą liczbą nowych uczestników rynku – przedsiębiorstw, stowarzyszeń i osób fizycznych. Będą oni dążyć do samozaspokojenia własnych potrzeb energetycznych realizowanych w formule inwestycyjnej zakupu instalacji wytwórczych energii. Warto zaznaczyć, iż nasilanie się omawianej tendencji będzie prowadzić do nieodwracalnych zmian w energetyce, ale będzie kreowało nowe możliwości biznesowe. Upatruje się ich w powstaniu nowej gałęzi gospodarki lokalnej związanej z zarządzaniem,



Rys. 1. Schemat systemu gospodarki cyrkularnej

Źródło: Opracowanie własne na podstawie: The Ellen MacArthur Foundation, <https://www.ellenmacarthurfoundation.org/circular-economy/interactive-diagram>

serwisem i obsługą nowo powstałej infrastruktury oraz odmiennym kształtowaniem się zysków w energetyce.

Drugi (centralny) etap umożliwia odpowiednie zarządzanie istniejącymi zasobami na poziomie lokalnym. Odbywa się to w oparciu o wdrożenie procesów optymalizacyjnych, związanych z powtórным wykorzystaniem zasobów, dzieleniem się nimi, recyklingiem i konserwacją. Wymienione działania umożliwią kształtowanie gospodarki energetycznej na poziomie lokalnym – będą mieć formułę zmodyfikowanej dystrybucji, umożliwiającą optymalizację wykorzystania lokalnych zasobów energii, ich koordynację popytowo-podażową realizowaną przy wykorzystaniu nowoczesnych rozwiązań sieciowych, elastyczności oraz magazynowaniu energii. W tej formule dystrybucja będzie realizować cele maksymalizacji użyteczności identyfikowanych lokalnie zasobów. Warto dodać, iż Komisja Europejska postuluje powstanie odrębnego podmiotu świadczącego usługi zmodyfikowanej dystrybucji – tzw. Regionalnych Centrów Operacyjnych (Komisja Europejska 2016). Ich funkcjonowanie ma umożliwić lepszą koordynację popytowo-podażową oraz organizację współpracy na poziomie lokalnym.

Trzeci etap będzie polegał na ciągłym wspieraniu efektywności systemowej realizowanej poprzez wykrywanie i usuwanie negatywnych efektów zewnętrznych. W kontekście ener-

getyki kształtowanej na poziomie lokalnym będzie stanowił przedmiot analizy w obrębie efektywności zarządzania usługami energetycznymi oraz jakością sprzedaży finalnych produktów odbiorcom końcowym. Jego kształt będzie wynikał z istniejącej konkurencji na lokalnym rynku energii oraz nowych form współpracy opisywanych jako modele biznesowe. Mogą one dotyczyć odmiennej organizacji lokalnych rynków energii (rozliczania popytu na energię, wycenę elastyczności oraz magazynowania), powstawania grup sprzedażowych (forma agregacji podmiotów wytwórczych i odbiorców) i partnerstw realizujących wspólne projekty inwestycyjne.

W powyższym trzyetapowym ujęciu możliwości kształtowania gospodarki energetycznej na poziomie lokalnym zauważalna jest jej nowa rola i miejsce. Umożliwia lepsze planowanie oraz organizowanie rozwoju energetyki zapewniając szerszy kontekst sprzyjający włączeniu społeczności lokalnych. Jest to kierunek zmian, który może okazać się rozwiązaniem niezwykle korzystnym, oddziałującym na rosnący poziom świadomości ekologicznej, pobudzanie gospodarek lokalnych oraz kreowanie dotychczas nieznanymi rozwiązań z zakresu organizacji i funkcjonowania samej energetyki. Jednakże kształtowanie przedstawionych zagadnień będzie stanowiło długotrwały proces polepszeń i usprawnień, a całościowa reorganizacja systemu energetycznego na poziomie lokalnym będzie wymagała osiągnięcia maksymalnego efektu synergii istniejących zasobów oraz sposobów ich wykorzystania.

4. Case study

Zastosowanie w publikacji metody *case study* umożliwia analizę konkretnych modeli biznesowych (jednostki analizy), które mają swoje źródło w funkcjonującym ustawodawstwie. Są to: prosument, spółdzielnia energetyczna i klaster energetyczny. Zostaną one poddane analizie przy wykorzystaniu techniki modeli logicznych, w celu przedstawienia zależności przyczynowo-skutkowych wynikających z tendencji zmian w energetyce oraz ich potencjalnego wpływu na kształtowanie się gospodarek o charakterze cyrkularnym. Wykorzystanie powyższych narzędzi analitycznych umożliwia przyporządkowanie zdarzeń obserwowanych empirycznie do zdarzeń przewidywanych teoretycznie (Yin 2015).

4.1. Prosument

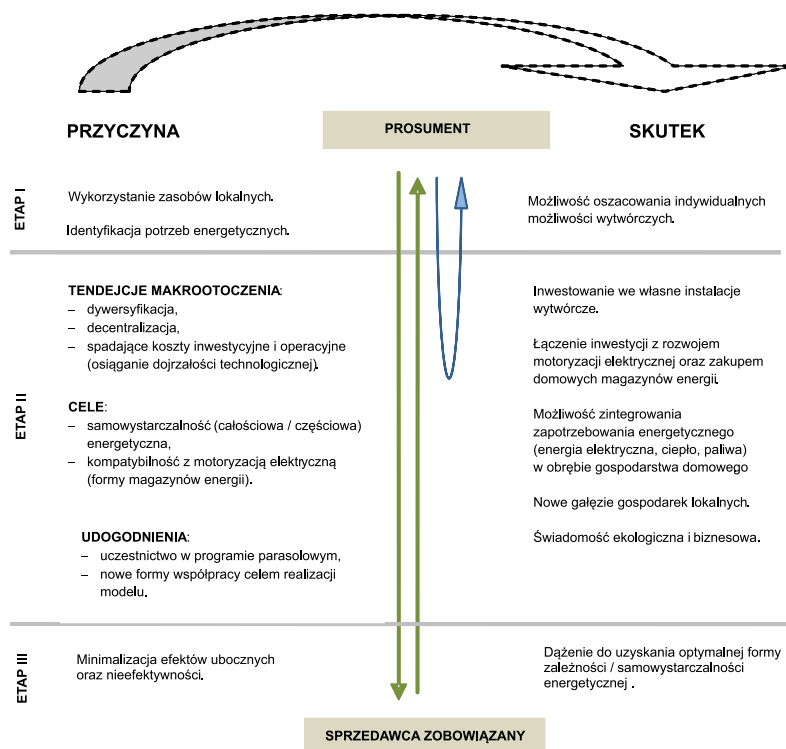
Zgodnie z definicją, prosument to odbiorca końcowy (osoba fizyczna lub prawna) dokonujący zakupu energii elektrycznej na podstawie umowy kompleksowej, jednocześnie wytwarzający energię elektryczną wyłącznie z odnawialnych źródeł energii w mikroinstalacji w celu jej zużycia na potrzeby własne, niezwiązane z wykonywaną działalnością gospodarczą (Dz.U. z dnia 20 lutego 2015 r.). Jest to najprostszy model biznesowy dotyczący pojedynczego uczestnika rynku energii, umożliwiający mu częściową lub całkowitą niezależność energetyczną.

Prosument zaistniał jako model biznesowy z dwóch powodów – jako forma oszczędności zapewniająca niezależność energetyczną w ramach własnej infrastruktury wytwórczej (małe

i mikroinstalacje fotowoltaiczne, kolektory słoneczne oraz małe elektrownie wiatrowe) oraz jako wyraz świadomości ekologicznej realizowanej dzięki tendencji decentralizacji i dywersyfikacji. Kiedyś prosument był realizowany wyłącznie w formie inwestycji osób fizycznych. Obecnie ewoluje w kierunku programów inwestycyjnych, np. w formule projektów parasolowych (zintegrowane plany pozyskiwania dotacji na realizację mikroinstalacji OZE, zapewnienia obiektom o charakterze gospodarczo-przemysłowym zeroenergetycznego charakteru, najmu powierzchni dachowych lub leasingu instalacji wytwórczych).

Model biznesowy prosumenta ma dalsze możliwości rozwoju, których upatruje się w upowszechnianiu motoryzacji elektrycznej oraz domowych magazynach energii. Prekursorami zmian są tutaj firmy motoryzacyjne (Tesla, BWM, Mercedes, Nissan), które kreują w ten sposób swój przyszły rynek zbytu. Ich komercjalizacja oraz popularyzacja umożliwią niezależność energetyczną na poziomie jednostki wytwórczej oraz odłączenie się od publicznej sieci energetycznej (tzw. instalacja typu *off-grid*). W związku z powyższym, skutki upowszechniania się tego modelu biznesowego będą miały wpływ bezpośrednio na kształtowanie się struktury zapotrzebowania na energię (popyt tylko w dni pochmurne lub bezwietrzne), co będzie wymuszało elastyczność systemową (popytową i podażową) oraz zastosowanie nowoczesnych rozwiązań sieciowych i magazynów energii.

Schemat funkcjonowania oraz ewoluowania opcji prosumenckiej przedstawiono na rysunku 2.



Rys. 2. Schemat opcji prosumenckiej – funkcjonowanie i ewolucja
Źródło: Opracowanie własne

4.2. Spółdzielnia energetyczna

Spółdzielnia energetyczna jest w polskim prawie definiowana jako spółdzielnia, której przedmiotem działalności jest wytwarzanie:

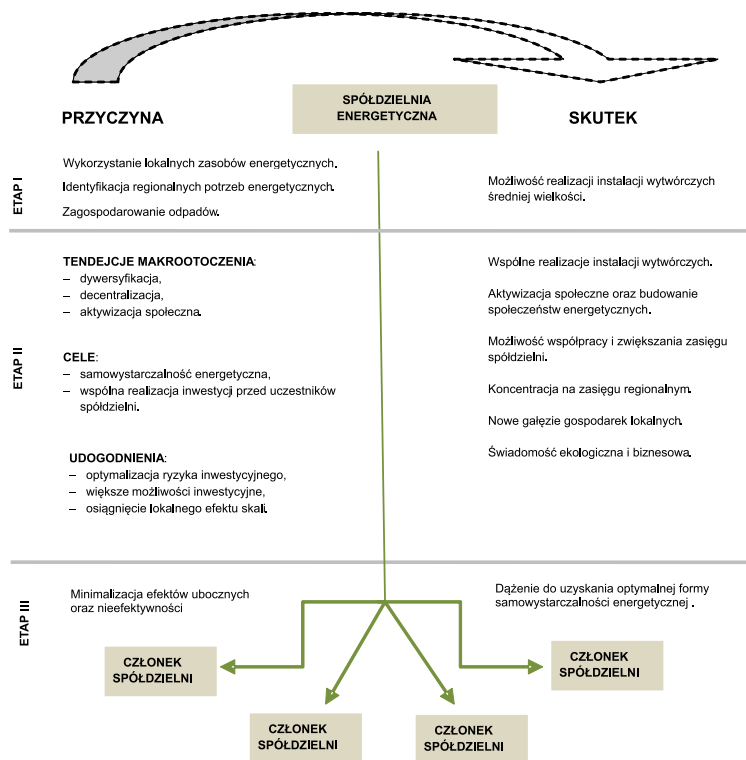
- energii elektrycznej w instalacjach odnawialnego źródła energii o łącznej mocy zainstalowanej elektrycznej nie większej niż 10 MW lub
- biogazu w instalacjach odnawialnego źródła energii o rocznej wydajności nie większej niż 40 mln m³ lub
- ciepła w instalacjach odnawialnego źródła energii o łącznej mocy osiągalnej w skwarzeniu nie większej niż 30 MWt

i równowagę zapotrzebowania, dystrybucji lub obrotu energii elektrycznej, biogazu lub ciepła na potrzeby własne spółdzielni energetycznej i jej członków, przyłączonych do zdefiniowanej obszarowo sieci dystrybucyjnej elektroenergetycznej o napięciu niższym niż 110 kV lub dystrybucyjnej gazowej, lub sieci ciepłowniczej, na obszarze gmin wiejskich lub miejsko-wiejskich w rozumieniu przepisów o statystyce publicznej (Dz.U. z dnia 20 lutego 2015 r.). Z powyższej definicji wynika, iż model spółdzielni energetycznej stanowi zrzeszenie producentów i odbiorców energii (osoby fizyczne i przedsiębiorstwa) realizujących wspólne inwestycje energetyczne o charakterze lokalnym. Mogą to być instalacje wytwórcze lub autonomiczne systemy energetyczne mające również własną infrastrukturę dystrybucyjno-przesyłową. W tej formule realizują korzyści członków zrzeszonych związane z dostępem do własnych źródeł energii, jak i dywersyfikacji działalności inwestycyjnej, w przypadku np. dużych gospodarstw rolnych, spółdzielni rolniczych, przedsiębiorstw, samorządów, przedsiębiorstw gminnych i użyteczności publicznej.

Spółdzielnia energetyczna jest więc instytucją umożliwiającą realizację wspólnych inwestycji oraz podejmowanie działań optymalizacyjnych przez społeczności lokalne, które występują w roli zarówno inwestorów, jak i odbiorców energii. W ten sposób wpisuje się ona w tendencje dywersyfikacji i decentralizacji źródeł energii, ale również włączenia społeczne w proces ich realizacji na wyznaczonym terenie.

W tym znaczeniu model biznesowy spółdzielni energetycznej stanowi swoiste wprowadzenie do nowego zagadnienia w energetyce – tzw. społeczności energetycznych (Dyrektywa 767 z dnia 30 listopada 2016 r.), czyli zrzeszeń społeczności lokalnych posiadających tytuły prawne do wytwarzania, konsumpcji, magazynowania i sprzedaży energii ze źródeł odnawialnych, z włączeniem umów sprzedaży, bez dyskryminacji energii z OZE i opłat nieodzwoiercedlających kosztów. Takimi społecznościami mogą być osoby fizyczne, przedsiębiorstwa, organizacje *non profit*, których udziałowcy lub członkowie współpracują w zakresie wytwarzania energii, dystrybucji, magazynowania lub dostaw energii ze źródeł odnawialnych (Koncepcja 2016).

Tak scharakteryzowany model biznesowy został – z uwzględnieniem możliwości dalszego rozwoju – przedstawiony na rysunku 3.



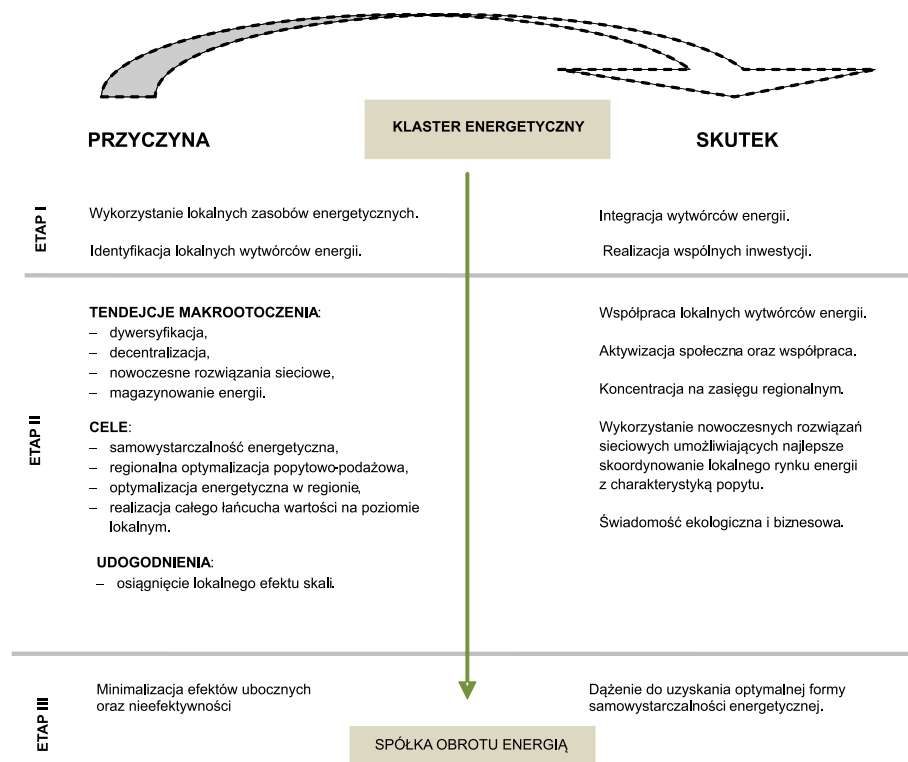
Rys. 3. Schemat spółdzielni energetycznej – funkcjonowanie i ewolucja
Źródło: Opracowanie własne

4.3. Klaster energii

Klaster energii jest to cywilnoprawne porozumienie, w skład którego mogą wchodzić osoby fizyczne, osoby prawne, jednostki naukowe, instytuty badawcze lub jednostki samorządu terytorialnego, dotyczące wytwarzania i równoważenia zapotrzebowania, dystrybucji lub obrotu energią z odnawialnych lub innych źródeł, w ramach sieci dystrybucyjnej o napięciu znamionowym niższym niż 110 kV, na obszarze działania tego klastra nieprzekraczającym granic jednego powiatu lub pięciu gmin (Dz.U. z dnia 20 lutego 2015 r.). W tym znaczeniu klaster energii jest również lokalną formą współpracy, jednak zawiązywaną pomiędzy wytwórcami energii, spółkami dystrybucyjnymi i/lub spółkami obrotu związanymi z energetyką odnawialną. Współpraca ta ma zapewnić lepszą organizację i optymalizację ich działania, rozumianą jako wykorzystanie korzyści wynikających z urzeczywistnienia się tendencji: dywersyfikacji źródeł pochodzenia energii, decentralizacji źródeł wytwórczych, wdrożeń z zakresu nowoczesnych rozwiązań sieciowych oraz magazynowania energii.

Klaster energii będą z założenia dążyć do autonomizacji, samowystarczalności oraz osiągnięcia optymalnego kształtu lokalnego systemu energetycznego. Jego zaprojektowanie będzie opierać się na integracji rozproszonych terytorialnie źródeł energii, zapewnieniu

im odpowiedniego poziomu elastyczności, inicjowaniu wspólnych inwestycji kreujących nowe modele biznesowe umożliwiające sprzedaż produkowanej energii lokalnym odbiorcom (rys. 4).



Rys. 4. Schemat klastra energetycznego – funkcjonowanie i ewolucja

Źródło: Opracowanie własne

Na podstawie zaproponowanych jednostek analizy stanowiących nowe modele biznesowe w energetyce oraz przeglądu tendencji rozwoju energetyki wskazano możliwe kierunki zmian w energetyce oraz ich następstwa. Wykorzystano do tego metodę badawczą modeli logicznych, która umożliwiła konkretyzację wizji energetyki ukierunkowanej na realizację postulatów regionalnej autonomizacji energetycznej oraz jej kształtowania w odniesieniu do formuły gospodarki cyrkularnej.

5. Wnioski

Celem publikacji było zbadanie możliwości organizacji energetyki na poziomie lokalnym. Zostało to wykonane w oparciu o analizę trzech przypadków stanowiących odrębne modele biznesowe funkcjonujące w energetyce, tj. prosument, spółdzielnia energetyczna oraz klastery energii. Ich opis został ujęty w ramach konstrukcyjnych schematu gospodarki

cyrkularnej, co umożliwiło organizację poszczególnych etapów wdrożenia, uwzględnienie tendencji zmian w makrootoczeniu, realizowane cele oraz kontekst przyczynowo-skutkowy wskazujący na potencjał dalszego rozwoju. Przeprowadzona analiza wykazała, że gospodarka energetyczna może być realizowana na poziomie lokalnym, co jest działaniem wymagającym realizacji wspólnej wizji, współpracy społeczności lokalnych oraz świadomości potrzeb energetycznych.

Literatura

- BP Energy Outlook, Edition 2017, <https://www.bp.com/content/dam/bp/pdf/energy-economics/energy-outlook-2017/bp-energy-outlook-2017.pdf>.
- Dyrektywa o odnawialnych źródłach energii (propozycja COM (2016) 767 z dnia 30.11.2016 r. przekształcona z dyrektywy Parlamentu Europejskiego i Rady 2009/28/WE z dnia 23 kwietnia 2009 r. w sprawie promowania stosowania energii ze źródeł odnawialnych zmieniająca i w następstwie uchylająca dyrektywy 2001/77/WE oraz 2003/30/WE.
- Fundacja im. Heinricha Bölla, 2015: *Niemiecka transformacja energetyczna. Fakty*, Warszawa.
- Komisja Europejska, 2016: *Czysta energia dla wszystkich Europejczyków (pakiet ustaw)*, Bruksela, <https://ec.europa.eu/energy/en/news/commission-proposes-new-rules-consumer-centred-clean-energy-transition>.
- Koncepcja funkcjonowania klastrów w Polsce*, 2016: Opracowanie, na zlecenie Skarbu Państwa – Ministra Energii, Warszawa
- OEDC/IEA, *Generation Wind and Solar Power From cost to value*, Bruksela 2016.
- Ośrodek Studiów Wschodnich, 2012: *Niemiecka Transformacja Energetyczna. Trudne Początki*, Warszawa.
- Pietrewicz J.W. i Sobiecki R. 2016 – *Przedsiębiorczość sharing economy*. [W:] *Sharing economy*, SGH, Warszawa.
- The Ellen MacArthur Foundation, <https://www.ellenmacarthurfoundation.org/circular-economy/interactive-diagram>.
- Polski Komitet Energii Elektrycznej, 2016: *Raport francusko-niemiecki. Transformacja energetyczna i mechanizmy mocowe. Omówienie raportu przygotowanego przez BDEW i UFE*, Warszawa.
- Ustawa z dnia 20 lutego 2015 r. o odnawialnych źródłach energii (Dz.U. z 2015, poz. 478, z późn. zm.).
- Yin R.K. 2015 – *Studium przypadku w badaniach naukowych. Projektowanie i metody*. Wyd. Uniwersytetu Jagiellońskiego, Kraków.

Natalia GENEROWICZ*

Ekoprojektowanie paneli fotowoltaicznych

STRESZCZENIE. Instalacje fotowoltaiczne pozwalają na przetworzenie i wykorzystanie energii słonecznej na energię elektryczną. W projektowaniu takich instalacji ma znaczenie wiele czynników, np. strefy klimatyczne, różne strefy obciążenia śniegiem, lokalizacja budynku względem kierunków świata, kąt nachylenia dachu, poziom rozbudowania dachu, jego powierzchnia oraz ilość energii, na jaką dom ma zapotrzebowanie.

Projektowanie tego rodzaju instalacji wymaga odpowiedniej wiedzy technicznej w zakresie znajomości instalacji, warunków klimatycznych, ekonomii rozwiązań czy właściwego doboru komponentów instalacji. W pracy przedstawione zostaną przyjazne dla środowiska praktyczne możliwości rozwiązań technicznych instalacji fotowoltaicznych na rzeczywistych obiektach budowlanych.

Ecodesigning of photovoltaic panels

ABSTRACT. Photovoltaic systems allow the conversion and use of solar energy for electricity. Many factors are important in the design of such equipment, such as the climate zone, other snow load areas, the localization of the directions of the world, the angle of inclination of the roof, the level of roof expansion, its area and the amount of energy the house needs. Design of this type of installation requires appropriate technical knowledge in terms of installation knowledge, climatic conditions, economics of solutions or proper selection of installation components. The work will present environmental friendly practical possibilities of technical solutions of photovoltaic installations on real buildings.

1. Wstęp

W dobie wzrastającego rozwoju przemysłu i urbanizacji coraz częstszym tematem w zakresie ochrony i inżynierii środowiska jest ograniczanie emisji gazów cieplarnianych do

* Mgr, AGH Akademia Górniczo-Hutnicza, Wydział Geologii, Geofizyki i Ochrony Środowiska, Kraków.

środowiska. Narzuca to między innymi Protokół z Kioto (https://www.mos.gov.pl/fileadmin/user_upload/srodowisko/Protokol_z_Kioto_do_Ramowej_Konwencji_Narodow_Zjednoczonych_w_sprawie_zmian_klimatu.pdf), który mówi o redukcji gazów cieplarnianych średnio o 5% do roku 2012 w stosunku do roku wyjściowego. Dodatkowo o ograniczeniu emisji szkodliwych związków do atmosfery mówi również Pakiet energetyczno-klimatyczny inaczej nazywany pakietem „3x20%“, w którym to jednym z najważniejszych założeń było zwiększenie udziału zużycia energii pochodzącej z odnawialnych źródeł energii o 20%. Założenia te wymusiły zastosowanie takich metod, które umożliwią sukcesywną likwidację gazów niebezpiecznych z atmosfery. Wyzwaniom tym sprzyja zastosowanie odnawialnych źródeł energii, wśród których można wymienić bardzo dobrze rozwijający się sektor energii słonecznej.

W ostatnich latach wykorzystanie energii słonecznej w znaczny sposób zaczęło wzrastać. Spowodowane było to znacznym rozwojem technologii w instalacjach fotowoltaicznych oraz wzrostem świadomości konsumentów w zakresie ochrony środowiska, co miało wpływ na dalszy rozwój. W dziedzinie energii słonecznej cały czas szukane są nowe rozwiązania, które umożliwią optymalizację systemów fotowoltaicznych, dzięki czemu będą mogły one pracować o wiele sprawniej niż do tej pory. Rozwiązaniem, które wychodzi naprzeciw tym oczekiwaniom jest system SolarEdge.

2. Klasyczna instalacja fotowoltaiczna

2.1 Rodzaje i sposób działania instalacji fotowoltaicznej

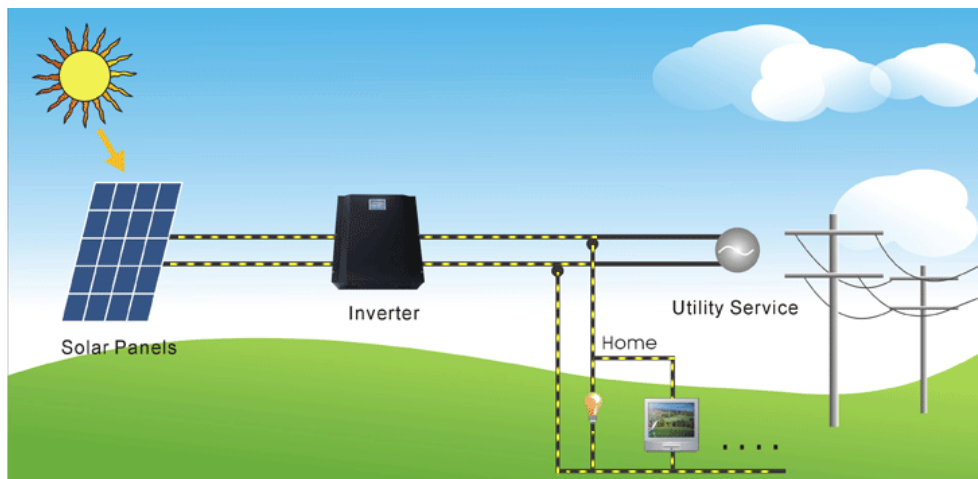
Do tej pory w systemach fotowoltaicznych wykorzystywano dwa typy instalacji:

- *on-grid*,
- *off-grid*.

Podłączenie instalacji on-grid dostarcza całą wytworzoną energię elektryczną do sieci energetycznej. Wielkość instalacji zależy od możliwości finansowych, miejsca montażu, jak również obowiązujących przepisów. Ilość miejsca potrzebna do zainstalowania małej elektrowni słonecznej zależy również od technologii w jakiej wyprodukowane są moduły fotowoltaiczne. W skład takiego systemu wchodzi:

- panele fotowoltaiczne,
- system mocowania paneli fotowoltaicznych do dachu,
- inwerter DC/AC zamieniający prąd stały na prąd zmienny,
- zabezpieczenia umożliwiające automatyczne wyłączenie instalacji w przypadku niesprawności sieci,
- okablowanie,
- licznik energii, który mierzy, ile energii system fotowoltaiczny oddaje do sieci energetycznej.

Schemat instalacji typu on-grid przedstawia rysunek 1.



Rys. 1. Schemat instalacji on-grid

Źródło: <http://soleopv.pl/wp-content/uploads/2016/10/On-Grid-System-schemat.gif>

Instalacja typu *off-grid* działa niezależnie od publicznej sieci energetycznej. Energia słoneczna zamieniana jest na prąd elektryczny o stałym napięciu, dzięki modułom fotowoltaicznym. Następnie energia ta jest przekazywana do akumulatorów, gdzie jest magazynowana i może być dostarczana bezpośrednio do urządzeń elektrycznych. Zastosowanie tego typu instalacji ma miejsce głównie np. w małych domkach letniskowych. Pozwala to na niezależność dostaw energii elektrycznej z zewnątrz. W skład takiego autonomicznego systemu wchodzi:

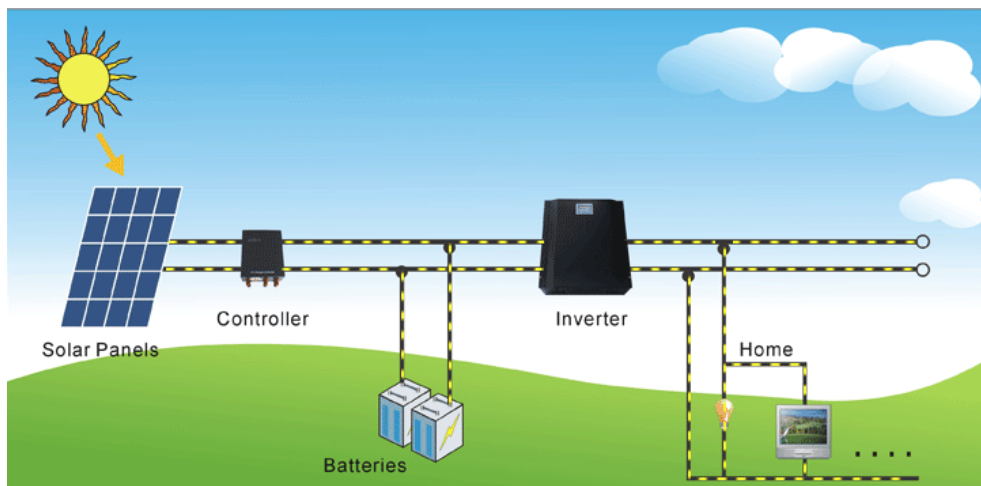
- panele fotowoltaiczne,
- system mocowania paneli,
- regulatory ładowania,
- akumulatory,
- okablowanie.

Schemat instalacji typu off-grid przedstawia rysunek 2.

2.2. Aspekty działania instalacji fotowoltaicznej

Opisane w punkcie 2.1 rodzaje instalacji oraz sposób ich funkcjonowania w znacznym stopniu przyczyniają się do zmniejszenia emisji gazów cieplarnianych do atmosfery, wpływając jednocześnie na obniżenie opłat za energię elektryczną. Jest to bardzo korzystne rozwiązanie dla wielu potencjalnych konsumentów, którzy są zainteresowani ograniczeniem kosztów eksploatacji urządzeń elektrycznych w domu, dodatkowo pozytywnie wpływając na środowisko.

Jednak tego typu instalacje fotowoltaiczne mają pewne wady. Są to systemy, które działają tak jak ich najłabsze ogniwo. W momencie, gdy na jeden z kilkunastu paneli fotowolta-



Rys. 2. Schemat instalacji off-grid

Źródło: <http://soleopv.pl/wp-content/uploads/2016/10/Off-Grid-System-schemat.gif>

icznych zamontowanych na dachu padnie cień, spowodowany np. pogorszeniem pogody lub obecnością jakiegoś przedmiotu w otoczeniu instalacji, wówczas sprawność całego systemu spada, zmniejszając produkcję energii elektrycznej z takiej instalacji. Dodatkowo, jeśli dach, na którym planowany jest montaż instalacji, jest bardzo rozbudowany przez różnego rodzaju wieżyczki, jaskółki i kominy, czy powierzchnia dachu nie jest skierowana bezpośrednio na południe, wówczas zamontowanie instalacji fotowoltaicznej staje się bardziej problematyczne przez ograniczoną powierzchnię dachu, na której można zamontować panele. Może to spowodować, że instalacja fotowoltaiczna nie sprosta zapotrzebowaniu całego domu w energię elektryczną.

Na tego typu problemy przychodzi z pomocą nowa technologia, nazwana systemem SolarEdge.

3. SolarEdge

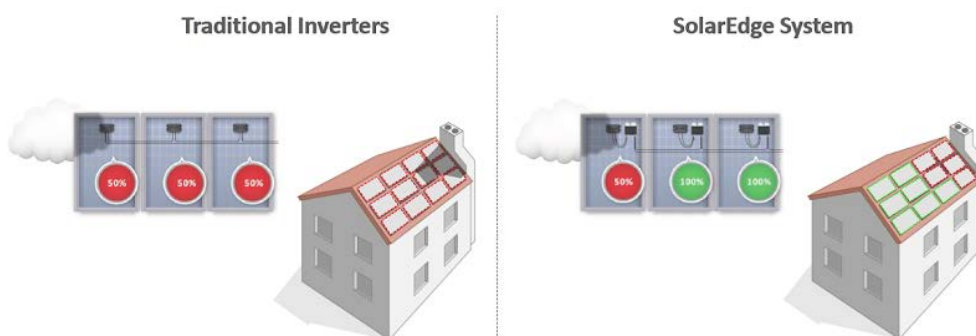
SolarEdge jest pionierskim rozwiązaniem w zakresie optymalizacji systemów fotowoltaicznych po stronie stałoprądowej (DC). Zastosowanie tego typu instalacji daje szeroki zakres korzyści, które pozwolą na lepsze wykorzystanie energii słonecznej. Pozwala on na optymalizację mocy instalacji fotowoltaicznych na poziomie paneli.

3.1. Optyimizery mocy

W skład systemu fotowoltaicznego opartego na rozwiązaniu SolarEdge wchodzi optyimizery mocy. Są to kompaktowe urządzenia mocowane na panelu fotowoltaicznym. Istotne

jest to, że każdy z zamontowanych optymizerów odnotowuje wydajność każdego z paneli z osobna. Dzięki temu instalacja fotowoltaiczna osiąga swoją maksymalną wydajność, a moc wyjściowa paneli może być podniesiona nawet o 25%.

Na rysunku 3 przedstawiono efekt pracy klasycznej instalacji oraz instalacji z rozwiązaniem SolarEdge.



Rys. 3. Porównanie klasycznej instalacji fotowoltaicznej oraz instalacji wyposażonej w rozwiązanie SolarEdge
Źródło: <http://www.soleopv.pl/o-solaredge/>

3.2. Indywidualne śledzenie punktu maksymalnej mocy

Optymizery mocy podłączone do każdego panelu fotowoltaicznego dobierają punkt maksymalnej mocy modułu indywidualnie dla niego. Dzięki temu poszczególne panele w instalacji pracują z maksymalną wydajnością. Dodatkowo optymizery w znaczący sposób redukują straty wywołane częściowym zacięciem instalacji. W przypadku klasycznych systemów, zacięciem jednego modułu w znaczący sposób obniża sprawność całej instalacji. Jednak dzięki zastosowaniu optymizerów mocy spadek wydajności dotyczy wyłącznie zacięzionych modułów. Natomiast pozostałe panele pracują na 100% swoich możliwości.

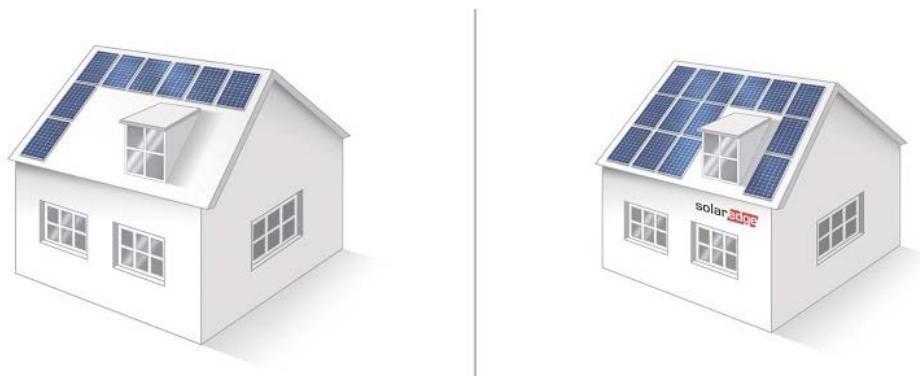
3.3. Możliwość elastycznego projektowania instalacji

W klasycznych instalacjach fotowoltaicznych, nawet częściowe zacięciem instalacji powoduje obniżenie wydajności całego systemu. Dlatego też wszystkie moduły powinny pracować w jednakowych warunkach nasłonecznienia, co przyczynia się do ograniczonej powierzchni, na której można by zainstalować moduły.

Dzięki zastosowaniu optymizerów mocy poszczególne moduły pracują niezależnie od pozostałych, co umożliwia swobodę w rozmieszczeniu paneli słonecznych bez wpływu na sprawność instalacji w momencie zacięciem. Rozwiązanie to może być stosowane np. przy znacznym urozmaiceniu powierzchni dachów, a dodatkowo umożliwia zainstalowanie paneli na dachach o orientacji innej niż południowa (np. jednocześnie na połaci wschodniej i zachodniej) bez konieczności montowania dodatkowych inwerterów.

Kolejną zaletą SolarEdge jest fakt, że umożliwia on łączenie łańcuchów modułów o różnych długościach, co nie jest możliwe w przypadku klasycznych rozwiązań.

Całość sprawia, że projektowanie instalacji fotowoltaicznej dla potencjalnych klientów, jest znacznie łatwiejsze i umożliwia w znacznie większym stopniu wykorzystanie energii słonecznej. Sposób zaprojektowania takiej instalacji przedstawiono na rysunku 4.



Rys. 4. Porównanie projektu klasycznej instalacji fotowoltaicznej oraz projektu z zastosowaniem rozwiązania SolarEdge

Źródło: <http://www.soleopv.pl/elastyczne-projektowanie/>

3.4. Monitoring instalacji fotowoltaicznej

W momencie zamontowania instalacji na dachu, istnieje możliwość monitoringu całego systemu poprzez przeglądarkę internetową czy aplikację na telefon. Pozwala to na wykrycie wszelkich mankamentów w pracy paneli oraz inwertera w rzeczywistym momencie jego pracy. System diagnozuje ewentualne nieprawidłowości w pracy, automatycznie wysyłając użytkownikowi raporty. Dzięki temu ogranicza się koszty serwisowe, jednocześnie zapewniając maksymalną kontrolę nad systemem, co wydłuża jego żywotność.

4. Wnioski

System SolarEdge to technologia, która w znacznym stopniu usprawnia działanie instalacji fotowoltaicznych, umożliwiając redukcję emisji gazów cieplarnianych do środowiska. Jest to rozwiązanie najbardziej efektywne dla instalacji domowych, komercyjnych oraz dużych instalacji przemysłowych.

Zainstalowanie rozwiązania SolarEdge nie wyklucza wykorzystania również na dachu klasycznej instalacji fotowoltaicznej. Istnieje możliwość zamontowania obu rozwiązań jednocześnie, tak aby cały system nie generował dużych kosztów przy jego instalacji. Można np. zaprojektować go w ten sposób, aby te części dachu które są zacienione były wyposażone w system SolarEdge, a pozostała część składała się z klasycznych modułów. Obecnie jest to często wykorzystywany sposób, który nie generuje dodatkowych kosztów.

Dzięki zastosowaniu rozwiązania SolarEdge zostaje zwiększona moc paneli nawet o 25%. Powstaje możliwość swobodnego projektowania instalacji bez ograniczeń powierzchni dachu. Dodatkowo system jest wyposażony w monitoring ostrzegający o ewentualnej awarii paneli, a całą pracę instalacji można zdalnie obserwować z domu. Warto również wspomnieć o gwarantowanym bezpieczeństwie które daje ta technologia. W momencie, gdy w instalacji zaczyna działać coś nieprawidłowo rozwiązanie SafeDC™ sprawia, że po odłączeniu inwertera od sieci napięcie spada do bezpiecznego poziomu 1V na każdym module i przewodach, gwarantującym tym samym pełne bezpieczeństwo funkcjonowania instalacji.

SolarEdge jest coraz bardziej docenianym rozwiązaniem w sektorze energii słonecznej, nie tylko ze względu na korzystne warunki ekonomiczne, ale również ze względu na pozytywny wpływ na środowisko

Literatura

<http://www.soleopv.pl>

Koniszewski A. 2010 – *Instalacje solarne jako źródło darmowej energii słonecznej*. Technika chłodnicza i klimatyzacyjna, Wyd. Inżynierskie Przedsiębiorstwo Produkcyjno-Usługowe „MASTA” Sp. z o.o.

Wiśniewski G. i in. 2008 – *Kolektory słoneczne – energia słoneczna w mieszkalnictwie, hotelarstwie i drobnym przemyśle*. Wyd. MEDIUM, Warszawa.

Protokół z Kioto, grudzień 1997.

<http://gramzielone.pl/energia-sloneczna/18737/system-solaredge-to-szereg-unikalnych-rozwiazan-w-technologii-fotowoltaicznej>

Robert BOCIANOWSKI*, Zenon FOLTYNOWICZ**

Analiza wstępna poprzedzająca badania środowiskowe innowacyjnej metody szczelinowania łupków gazonośnych sprężonym metanem (CNG)

STRESZCZENIE. W publikacji przeanalizowano metodę szczelinowania za pomocą metanu w postaci CNG (Compressed Natural Gas). Założenia wymienionej metody oparto na opatentowanej w Stanach Zjednoczonych technologii – US Patent #8,342,246. Analizę rozpoczęto od identyfikacji poszczególnych etapów/sekwencji procesu szczelinowania, przy jednoczesnym wskazaniu ich potencjalnego oddziaływania na środowisko. Wskazano dodatkowo rozwiązania technologiczne posiadające potencjał mogący wpłynąć na zmniejszenie wpływu na środowisko poszczególnych etapów szczelinowania i w dalszej konsekwencji również całego procesu. Wspomniane nowoczesne, dodatkowe rozwiązania technologiczne stanowią innowacje związane z obsługą procesu szczelinowania CNG, będące alternatywnymi propozycjami w zakresie transportu, jak i źródeł niezbędnej do jego przeprowadzenia energii elektrycznej. W wyniku przeprowadzonej analizy uzyskano w zarysie schemat procesu szczelinowania metanem w postaci sprężonej. Praca stanowi element serii analiz nad możliwym do przyjęcia wyników optymalnym modelem LCA pod względem proekologicznych rozwiązań możliwych do przyjęcia w procesie wydobycia gazu z łupków, szczególnie w polskich warunkach geologicznych. Prezentowane opracowanie jest etapem wstępnym/przygotowawczym polegającym na rozpoznaniu istoty emisji towarzyszących procesowi szczelinowania CNG przed późniejszym pełnym badaniem cyklu życia LCA. Etap ten jest niezbędny dla zachowania uporządkowania przed docelowym zebraniem danych i w dalszej perspektywie czasowej podstawą do wykonania analizy zbioru wejść i wyjść (LCI). Należy przy tym zauważyć że u podstawy możliwości realizacji badania LCA, jako całości, znajduje się dostępność do rzeczywistych danych.

Preliminary analysis prior to environmental studies of an innovative method of shale gas fracturing based on compressed natural gas application (CNG)

ABSTRACT. The paper analyses the fracturing method with methane in CNG stage. Assumptions mentioned method are based on the patented technology – US Patent # 8,342,246. The analysis was begun with the identification of

* Mgr inż., doktorant, ** Prof. dr hab., prof. zw. UEP, Uniwersytet Ekonomiczny w Poznaniu, Wydział Towaroznawstwa Katedra Towaroznawstwa i Ekologii Produktów Przemysłowych.

stages of fracturing process with also indicating their potential impact on the environment. In addition, technological solutions have been identified that have the potential to reduce the environmental impact of the individual fracturing steps and the whole process. These mentioned above additional modern technological innovations are associated with the fracturing process by CNG, which are alternative proposals in the area of transport and the solutions of in-situ power generation. The schema of the fracturing process by methane was obtained as a result of the analysis. The work is part of a series of analyses of the LCA model that is optimally acceptable for the shale gas extraction process under condition of Polish geology. The study is a preliminary stage of identifying the matter of the emissions associated with CNG fracturing process before a whole LCA analysis of shale gas extraction. This stage is basis for the analysis of input and output (LCI) which is necessary also to maintain order before the target data collection and in the longer term. It should be noted that the basis for the possibility of carrying out the LCA as a whole is the availability of actual data.

1. Wstęp

1.1. Cel i przesłanki

Celem pracy jest wstępna analiza ekologiczna metody opartej na technologii opatentowanej w USA – US Patent #8,342,246, poprzedzająca inwentaryzację opartą na rzeczywistych danych, polegającą na docelowym oszacowaniu zbioru wejścia i wyjścia (*Life Cycle Inventory* – LCI). Pierwszym etapem analizy była identyfikacja poszczególnych etapów/sekwencji procesu szczelinowania, wraz ze wskazaniem w zarysie ich potencjalnego oddziaływania na środowisko. Elementem dodatkowym/uzupełniającym są proponowane rozwiązania technologiczne posiadające potencjał mogący wpłynąć na zmniejszenie wpływu na środowisko poszczególnych etapów szczelinowania i w dalszej konsekwencji również całego procesu. Wspomniane nowoczesne, dodatkowe rozwiązania technologiczne stanowią innowacje związane z obsługą procesu szczelinowania CNG, będące alternatywnymi propozycjami obejmującymi zakresy: paliwa dla transportu, jak i źródeł energii elektrycznej niezbędnej do jego przeprowadzenia. Celem publikacji jest wstępne wskazanie potencjalnych proekologicznych rozwiązań, które towarzyszą nieodzownemu i determinującemu procesowi wydobywania gazu łupkowego, szczelinowaniu sprężonym gazem wysokometanowym bazującym na technologii VRGE proponowanej przez Expansion Energy LLC. Kolejnym celem jest propozycja zarysu cyklu LCA (*Life Cycle Assessment*) wyżej wymienionego procesu szczelinowania, zoptymalizowanego pod względem minimalizacji oddziaływań na środowisko. Zarys cyklu obejmuje również wskazanie dodatkowych rozwiązań uzupełniających materię w zakresie oddziaływań środowiskowych w relacji do propozycji Expansion Energy LLC. Analizy oparto na literaturze naukowej, dostępnych wynikach badań oraz na materiałach pochodzących od firm będących producentami wybranych proekologicznych rozwiązań. Wydobywanie naturalnych zasobów surowców energetycznych wiąże się z intensywną działalnością oddziałującą w znaczny sposób na środowisko. Niekonwencjonalne złoża węglowodorów są udostępniane do eksploatacji dzięki górnictwu otworowemu, będącemu również wzmożoną formą oddziaływania na otoczenie. Mając na uwadze zmniejszenie niepożądanych oddziaływań należy poszukiwać technologii, jak i rozwiązań mniej destruktywnych dla środowiska. Odnośnie posiadanych przez Polskę zasobów gazu łupkowego to pracownicy naukowcy z Państwowego Instytutu Geologicznego wstępnie oszacowali jego

zasoby od 346 do 768 mld m³ (Kiersnowski i Dyrka 2013). Wspomniana ilość, przy podanym przez Ministerstwo Energii rocznym i zwiększającym się zużyciu wynoszącym za 2016 rok około 15,99 mld m³ (wzrost o 4,43% w stosunku do roku 2015) (Ministerstwo Energii 2017) zapewniłaby „niezależność gazową” naszego kraju na czasokres od ok. 21 do 48 lat przy spełnieniu wariantu najbardziej optymistycznej prognozy.

Krajowe zasoby gazu łupkowego to podstawa niezależności energetycznej, a także uzyskania „taniej i własnej” energii, niezbędnej do wzrostu i rozwoju potencjału całego przemysłu, jak i napędzenia całej krajowej gospodarki. Kierując się wymienionymi argumentami, technologia VRGE opracowana przez Expansion Energy LLC, wydaje się być atrakcyjnym rozwiązaniem, oczywiście pod warunkiem pełnego dostosowania do naszej rodzimej budowy geologicznej. Dodatkowo, po spełnieniu tego warunku, a także przy jednoczesnym zastosowaniu technologii towarzyszących procesowi, cechujących się mniejszym destruktywnym wpływem na środowisko, uzyskuje się zestaw technik i narzędzi, dzięki którym w przyszłości będzie możliwa, „bezpieczniejsza” w pojęciu środowiskowym, eksploatacja polskich łupków gazonośnych. Producent technologii szczelinowania CNG oferuje rozwiązanie kompleksowe i modułowe, mogące obsługiwać kopalnię gazu łupkowego lub też zostać przemieszczone na nowe miejsce wykonania zabiegu szczelinowania. W dość powszechnej opinii gaz ziemny wysokometanowy traktowany jest jako „prześciowy” nośnik energii (Toscano i in. 2016) umożliwiający w przyszłości oparcie energetyki na znacząco większym udziale OZE (Odnawialne Źródła Energii). Kluczowym argumentem jest to, że gaz będący jedynym przykładem paliwa kopalnego, cechuje się najniższą emisyjnością podczas produkcji energii (Chang i in. 2015) (International Energy Agency 2016). Kolejnym atutem gazu jest możliwa synergia z systemami OZE (Garmsiri i in. 2013). Stosowanie generujących prąd agregatów gazowych, stabilizuje w dość krótkim czasie dany, wspomagany system energetyczny. Konkurencyjne systemy generacji oparte na węglu (Chmielniak, Lepsi 2013) wymagają dłuższego czasu na rozruch i rozpoczęcie produkcji energii elektrycznej. Układ ten sprawdza się szczególnie w przypadku, gdy np. turbiny wiatrowe będące elementem energetycznego systemu opartego o OZE nie mogą sprostać popytowi na energię ze względu na niewłaściwe parametry robocze osiągnięte przez wiatr (Garmsiri i in. 2013).

Należy wspomnieć, że krajowe zasoby niekonwencjonalne (gaz łupkowy i metan z pokładów węgla) są jednym z elementów ujętych w projekcie Strategii na rzecz Odpowiedzialnego Rozwoju (Ministerstwo Rozwoju 2017). W ujęciu bardziej globalnym, wzrastający popyt na energię (szczególnie z tradycyjnych kopalnych nośników energii) potwierdza tezę, że te zasoby zostaną w dalszej perspektywie całkowicie wyczerpane i dlatego też należy rozważyć rozwój technologii umożliwiających eksploatację krajowych zasobów gazu łupkowego przy zachowaniu jak największej dbałości o środowisko. Podsumowując wydaje się jak najbardziej słuszne rozpatrywanie XXI wieku jako „Złotego wieku gazu” (Toscano i in. 2016).

1.2. Przyjęta technika badawcza

Od czasu konferencji SETAC w 1990 r., LCA stała się techniką zarządzania środowiskowego z powodzeniem wdrażaną w Europie Zachodniej i USA (Dąbrowski i Dzikusi

2012). Międzynarodowa Organizacja Normalizacyjna – International Organization for Standardization (ISO), w celu standaryzacji oceny środowiskowej opartej na szacowaniu cyklu życia, wydała rodzinę standardów z założenia definiującą normatywną podstawę LCA zawartą w normach ISO seria 14040x (PN 2000a, 2000b, 2000c, 202a, 2002b, 2006, 2009). Dlatego też, kierując się założeniami zawartymi we wspomnianej rodzinie norm, zdefiniowano, że szacowany wyrób kopalni gazu łupkowego jest energią ściśle związaną z daną ilością uzyskanego gazu. Dalszym ocenom podlegają również wszystkie etapy życia gazu łupkowego, począwszy od poszukiwania, wydobywania i transportu (Stamford i Azapagic 2014). Dzięki temu uzyskuje się wynik określający nie tylko zasięg oddziaływania, ale i sposób w jaki wpływa na środowisko cykl życia wyrobu kopalni gazu łupkowego jako całość.

LCA to technika środowiskowa umożliwiająca stworzenie zarysów oddziaływań na środowisko, na podstawie których powstaną kluczowe wynikowe analizy (Foltynowicz i Lewandowska 2004, 2010). Przeprowadzone analizy na rzeczywistych danych, pozwolą na wskazanie korzystnych, pod względem środowiskowym, technologii i procesów. Jako przykład należy przytoczyć proces szczelinowania, czyli porównanie technologii tradycyjnej z wykorzystaniem znacznych zasobów wody do technologii nie wykorzystującej wody, proponowanej przez Expansion Energy LLC. W rezultacie otrzymuje się dwa wyniki liczbowe, po jednym dla każdej ze wspomnianych odmiennych technik szczelinowania (tradycyjna oparta na wodzie i dla technologii CNG firmowanej przez Expansion Energy LLC). Większa wartość z danych porównywanych rezultatów świadczy o jego bardziej negatywnym wpływie na otoczenie. LCA to zbiór analiz obejmujących określenie celu i zakresu (*Goal and Scope Definition*); analizę zbioru wejść i wyjść (*Life Cycle Inventory LCI*); ocenę wielkości wpływu (*Life Cycle Impact Assessment LCIA*); interpretację wyników (*Interpretation*). Należy wspomnieć, że z szacowania cyklu życia wywodzą się także analizy: metoda szacowania kosztów życia (*Life Cycle Costing LCC*) i analiza stanowiąca społeczną ocenę cyklu życia (*Social Life Cycle Assessment SLCA*). Te dwie wspomniane techniki szacowania i analiz są uzupełnieniem oszacowanego wyniku oddziaływania na środowisko. W przypadku LCC jest to koszt wynikający z zastosowania danych technologii użytych w cyklu życia kopalni gazu z łupków, a w przypadku SLCA dodatkowo otrzymujemy ocenę wpływu wymienionego LCA czyli w istocie oddziaływania na postrzeżenie społeczne. Oczywiście ważne jest pozyskanie od przedsiębiorstw, związanych z polskim przemysłem łupkowym, niezbędnych rzeczywistych danych do analiz LCA. Dane te pomogą oszacować obszar związany z wyeksploatowaniem zasobów łupkowych (*Depletion of Reserves*) w skali całego kraju (Lewandowska i Witczak 2011). Zużywanie zasobów nie jest bezpośrednio związane tylko z postępującą eksploatacją gazu łupkowego, ale także zużyciem zasobów wody wysokiej jakości stosowanej do tradycyjnego szczelinowania hydraulicznego (Labuda 2014). Wcześniej dokonano identyfikacji, obszaru badawczego oraz granic systemu, będącej wstępem do badania cyklu życia. W rezultacie tej identyfikacji, dokonano wyboru funkcji dla szacowanego cyklu życia. Funkcję określono „roboczo” jako: „pokrycie zapotrzebowania na gaz ziemny krajowego sieciowego systemu gazowniczego”, określono również jednostkę funkcjonalną czyli „wydobycie/wyprodukowanie i dostarczenie gazu ziemnego o normatywnych parametrach i energii w nim zawartej, do krajowego sieciowego syste-

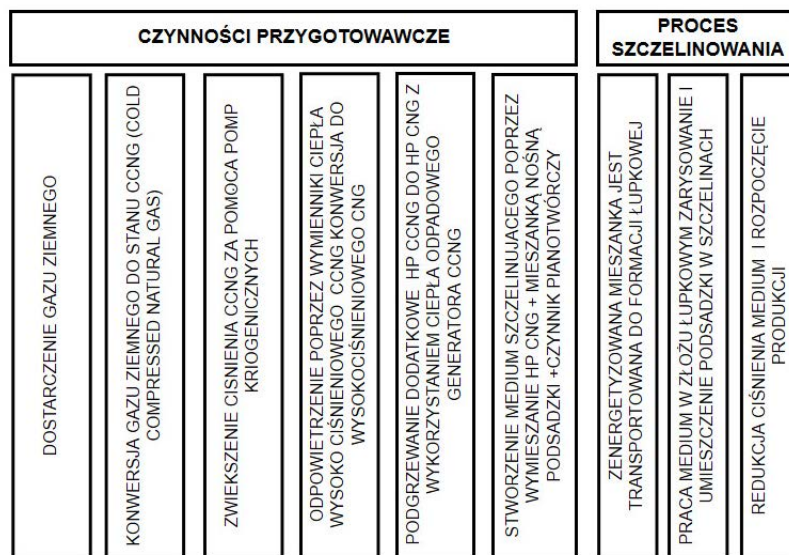
mu gazowniczego, wystarczającej na pokrycie „czasokresu zapotrzebowania” wynoszącego 1 minutę”. Zaproponowano daną ilość energii i „efektywność wyrobu” (Bocianowski 2016, 2017). Konieczne będzie dostarczenie niezbędnych zasobów do funkcjonowania systemu. Procesowi będą towarzyszyć odpady produkcyjne (PIG-PIB 2015), a także emisje do: gruntu (wraz ze zmianami w strukturze), wód gruntowych, atmosfery (w formie hałasu czy drgań i z małym prawdopodobieństwem wzbudzenia/indukowania wstrząsów sejsmicznych).

2. Część analityczna

2.1. Opis technologii wraz z jej oddziaływaniem środowiskowym

Technologia oparta na US Patent #8,342,246 (VRGE – firmy Expansion Energy LLC) polega na zastosowaniu gęstej (ale nie ciekłej) fazy skupienia gazu ziemnego wysokometanowego do szczelinowania skały łupkowej celem wydobywania zasobów. Uzyskanie Meta-krytycznego (MetacriticalTM) stanu gazu ziemnego polega na osiągnięciu warunków kiedy ciśnienie gazu będzie powyżej wartości jego ciśnienia krytycznego (dla metanu ciśnienie krytyczne wynosi około 4,63 MPa) i jednocześnie gdy wartość temperatury będzie poniżej temperatury krytycznej (przy wspomnianym ciśnieniu krytycznym temperatura krytyczna dla metanu wynosi około $-82,6^{\circ}\text{C}$) (Nieżgoda i in. 2016). Zaleca się produkcję skompresowanego „na zimno” gazu ziemnego (CCNG – *Cold Compressed Natural Gas*, będący synonimem handlowej nazwy MetacriticalTM) z możliwie najbliższym zlokalizowanego źródła (z reguły jest to pobliski odwiert produkcyjny gazu ziemnego). Dzięki temu zabiegowi otrzymuje się ciecz szczelinującą oraz w części spieniony płyn umożliwiający dzięki tej modyfikacji przenoszenie podsadzki. Ponieważ otrzymany stan skupienia metanu przypomina gęstością ciecz, dlatego też można transportować go za pomocą pomp do skały złożowej. Oczywiście wyjście produkcji z otworu uzyskuje się w ten sam sposób jak przy produkcji uzyskanej poprzez zastosowanie szczelinowania hydraulicznego. Ze względów bezpieczeństwa przy pompach CCNG stosuje się wydłużony wał napędowy lub napędy elektryczne w celu zapewnienia izolacji źródeł zapłonu od cieczy palnych. Zgodnie z zaleceniem producenta pierwszy etap procesu to dostarczenie gazu ziemnego wysokometanowego (optymalnie z pobliskiego otworu produkcyjnego lub też z formacji docelowej) na miejsce wykonania zabiegu. Drugi etap polega na konwersji gazu ziemnego do stanu sprężonego na zimno gazu CCNG. Trzeci etap stanowi sprężenie CCNG za pomocą pomp kriogenicznych do wysokiego ciśnienia. Kolejny czwarty etap polega na odpowietrzeniu układu z wysokociśnieniowym CCNG poprzez wymienniki ciepła do wartości obniżonej, czyli wysokociśnieniowego CNG. Następnym etapem jest przyspieszenie przejścia z wysokociśnieniowego CCNG do wysokociśnieniowego CNG dzięki ciepłu odpadowemu z lokalnej wytwórni CCNG. Szósty etap to wymieszanie wysokociśnieniowego CNG z wysokociśnieniową cieczą nośną dla podsadzki wraz z czynnikiem pianotwórczym. Siódmy etap to zatłaczanie do otworu zenergetyzowanej i podgrzanej, uzyskanej wcześniej mieszanki szczelinującej. Ósmy etap polega na wykonaniu zarysowania formacji łupkowej przez czynnik szczelinujący, w wyniku któ-

rego następuje rozszerzenie szczelin i umieszczenie w nich podsadzki zapobiegającej ich zasklepieniu. Dziewiąty, ostatni etap szczelinowania polega na redukcji ciśnienia roboczego, podsadzka gwarantuje otwarcie szczelin z których zostaje uwolniony gaz łupkowy (rys. 1).



Rys. 1. Schemat procesu szczelinowania CNG

Źródło: Opracowanie własne na podstawie: Expansion Energy LLC 2015

Proces szczelinowania jest wspierany przez „wstrząs termiczny” wywołany różnicą temperatur między złożem a zimnym medium szczelinującym. Proces szczelinowania gazem ziemnym wysokometanowym wydaje się być bardziej korzystny dla środowiska niż tradycyjne szczelinowanie ponieważ, dzięki jego zastosowaniu nie zużywa się wysokowartościowej wody pitnej oraz nie muszą być stosowane dodatki chemiczne, które są bezpośrednim zagrożeniem dla wód gruntowych. Kolejną korzyścią środowiskową są minimalne ilości odpadów złożowych, a także znaczne zmniejszenie ruchu ciężarówek obsługujących proces i tym samym obciążenia lokalnych dróg. Korzyścią zmniejszającą obciążenie środowiskowe jest „dostępność” (jedynie poza etapem inicjacji wydobywania na nowym złożu) gazu ziemnego będącego podstawą medium szczelinującego (Expansion Energy LLC 2015).

2.2. Dodatkowe proekologiczne rozwiązania

Polegając na wstępnej analizie i ocenie dotychczas uzyskanych danych rzeczywistych oparto się głównie na podobieństwach z tradycyjną metodą szczelinowania. Stwierdzono, że procesowi szczelinowania za pomocą gazu CNG towarzyszą także emisje środowiskowe związane z urządzeniami i maszynami obsługującymi proces, niezbędnymi do jego prawi-

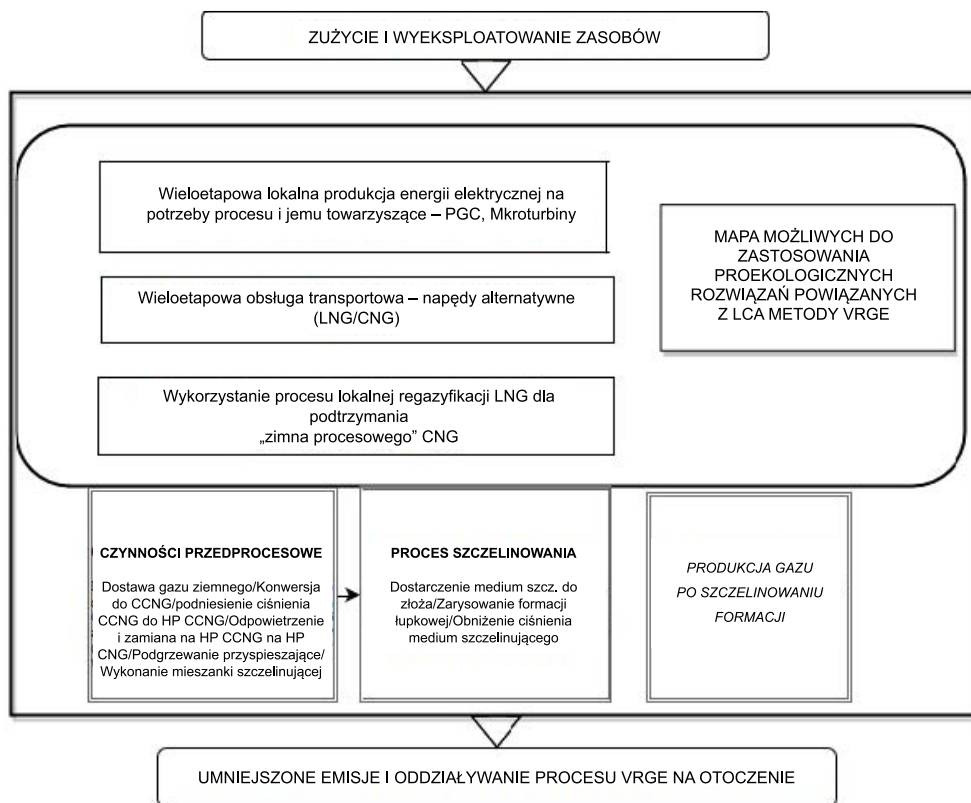
dłowego przeprowadzenia. Sprzęt i urządzenia związane są z wykorzystywanym transportem samochodowym, czy też z lokalną produkcją energii elektrycznej na potrzeby procesu (w dwóch przypadkach, czyli: niedostępności wynikającej z braku infrastruktury energetycznej; czy też proekologicznym wyborem związanym z rezygnacją z energii produkowanej z węgla). Następny obszar stanowią napędy (możliwe zasilanie spalinowe lub elektryczne) zestawów pomp kriogenicznych, a także występujące na etapie po rozszczelnieniu formacji niepożądane emisje gazu z instalacji, armatury i przewodów rurowych, na które składają się nieszczelności na połączeniach technologicznych czy wynikające ze specyfiki zabezpieczeń przed wzrostami ciśnienia w instalacji i także związane z podejmowanymi czynnościami eksploatacyjnymi. Bazując głównie na schemacie stworzonym na podstawie etapów wskazanych przez Expansion Energy LLC (rys. 1) i dodatkowo kierując się możliwymi zmniejszonymi emisjami oraz skróconym czasem negatywnej ekspozycji na środowisko dokonano wyboru możliwych do zastosowania na etapie szczelinowania technologii wspomagających obsługę procesu. Proponuje się zastąpienie tradycyjnego ciężkiego transportu napędzanego olejem spalinowym przez zastosowanie pojazdów zasilanych gazem ziemnym, w szczególności w postaci skroplonej LNG (*Liquefied Natural Gas*) lub sprężonej CNG (*Compressed Natural Gas*). Wspomniane formy paliwa gazowego można uzyskać dzięki urządzeniom związanym z technologią szczelinowania sprężonym gazem metanowym. Dodatkowo gaz przeznaczony na paliwo może pochodzić z lokalnej formacji łupkowej. Silniki napędzane LNG lub CNG emitują mniejsze ilości CO₂ oraz sadzy w stosunku do tradycyjnych napędów spalinowych. Jeżeli chodzi o kwestie bezpieczeństwa związane z użytkowaniem LNG i CNG to występuje minimalne zagrożenie wybuchem, gdyż na skutek ewentualnej nieszczelności dochodzi do gwałtownego rozproszenia wymienionych paliw gazowych (Buczaj 2006). Następnie ze względów ekologicznych, proponuje się zastąpienie lokalnych generatorów prądu wypalających olej napędowy, agregatami gazowymi, łącznie z przypadkiem wynikającym z rezygnacji z lokalnej sieci energetycznej opartej na krajowej mieszance węglowej. Można też zaproponować następujące rozwiązania związane z lokalną produkcją energii obejmujące użycie węglowodorów ekonomicznie niewykorzystywanych czyli wypalanych na flarze czy też wypuszczanych bezpośrednio do atmosfery przez urządzenia rozprężające, jak i w wyniku upuszczania na etapie przedprodukcyjnym. Power Generating Combustor (PGC™) (Alphabet Energy 2017) jest pierwszym z proponowanych rozwiązań, a jego zasada działania polega na zamianie ciepła z palnika na moc elektryczną w trakcie procesu polegającego na wysokoefektywnym spalaniu.

Drugim proponowanym rozwiązaniem jest wykorzystanie mikroturbin, wytwarzających w skojarzeniu ciepło (z reguły zużywane również na ogrzewanie technologiczne rurociągów, lokalnych zabudowań oraz infrastruktury procesowej) (Capstone Turbine Corporation 2016; OPRA Turbines 2007). Przed uruchomieniem wydobywania inicjującego eksploatację danego złoża gazu łupkowego wymienione urządzenia mogą produkować niezbędne media z lokalnego mobilnego zbiornika, do którego są dostarczane węglowodory gazowe pod postacią LNG. Będą one odpowiednio przetwarzane poprzez system wymienników mogący podtrzymywać niską wartość temperatury szczelinującego CNG. W zakresie redukcji emisji hałasu, proponowane są dwa podejścia: odgrodzenie w całości miejsca przeprowadzania zabiegu dzięki mobilnym ekranom akustycznym oraz w skali lokalnej izolację akustyczną

poszczególnych emiterów hałasu (pompy kriogeniczne, napędy itp.) poprzez umieszczenie ich w wygłuszonych obudowach kontenerowych (Kijek-Baryś i in. 2012).

2.3. Zarys schematu oddziaływania

Stworzono zarys schematu oddziaływania środowiskowego (rys. 2), wyszczególniono na nim wszystkie proekologiczne opcje mające w konsekwencji wpływ na możliwe zmniejszenie emisji. Szczególnie proekologiczną opcją jest wybór lokalnej produkcji prądu opartej na gazie ziemnym (LNG, CNG) i w konsekwencji rezygnacja z zasilenia energią z sieci energetycznej (mieszanka oparta na węglu) maszyn i urządzeń uczestniczących w procesie. Wykorzystanie niskiej temperatury wymienionych paliw celem utrzymania „zimna procesowego” medium szczelinującego. W modelu ujęto (jako zarys) obszar produkcji będący bezpośrednim wpływem procesu szczelinowania.



Rys. 2. Schemat oddziaływania procesu szczelinowania CNG
Źródło: Opracowanie własne na podstawie: Expansion Energy LLC 2015

3. Wnioski

Na podstawie danych udostępnionych przez Expansion Energy LLC wykazano pewien potencjał proekologiczny wpływający na ograniczenie emisji środowiskowych. W przyszłości może to stanowić podstawę do dalszych szczegółowych badań opartych na danych rzeczywistych uzyskanych dzięki przeprowadzonym procesom szczelinowania metodą VERGE. Kolejnym rezultatem tych badań będzie możliwość poszukiwania optymalnych proekologicznych rozwiązań, których potencjał zostanie potwierdzony przez otrzymany wynik oszacowanego cyklu życia w porównaniu do bardziej tradycyjnych metod szczelinowania. Jedną z przyczyn blokujących rozwój polskiego sektora wydobywania gazu z łupków jest brak skutecznej technologii wydobywania, efektywnej dla polskich warunków geologicznych. Dlatego też należy przebadać technologię VERGE pod względem optymalizacji środowiskowej oraz kosztowej. Można zakładać, że metoda optymalna ze względu na dostosowanie do warunków geologicznych, tania i nieinwazyjna w stosunku do środowiska, może być szansą na rozwój kraju i jego niezależność od zewnętrznych dostaw gazu ziemnego na wzór rewolucji łupkowej w Stanach Zjednoczonych.

Literatura

- Alphabet Energy, Inc. 2017. *Power Generating Combustor PGC™*.
<https://www.alphabetenergy.com/product/power-generating-combustor/>.
- Bocianowski R. 2016 – *Gaz z polskich łupków jako wyrób/produkt końcowy – wprowadzenie do oceny środowiskowej opartej na metodologii LCA (Life Cycle Assessment)*. Gaz, Woda i Technika Sanitarna 05(90), s. 162–169; DOI:10.15199/17.2016.5.1.
- Bocianowski R. 2017 – *Analiza wybranych proekologicznych rozwiązań możliwych do zastosowania w procesie wydobywania gazu z łupków = Analysis of the selected pro-ecological technological solutions that could be applied in the shale gas extraction*. Gaz, Woda i Technika Sanitarna 8, s. 314–324.
- Buczaj M. 2006 – *Wykorzystanie alternatywnych źródeł zasilania pojazdów w świetle norm i dyrektyw UE na przykładzie Polski*. Komisja Motoryzacji i Energetyki Rolnictwa PAN Oddział w Lublinie. MOTROL Motoryzacja i Energetyka Rolnictwa 8, s. 12–19; ISSN 1730-8658.
- Capstone Turbine Corporation 2016 – “0715 Case Study CAP416”. http://content.stockpr.com/capstoneturbine/db/185/1021/pdf/CS_CAP416_Wintershall_lowres.pdf.
- Chang Y., Runze H., Robert J.R. i Eric M. 2015 – *Life-cycle comparison of greenhouse gas emissions and water consumption for coal and shale gas fired power generation in China*. Elsevier Ltd. Energy 86, s. 335–343. <http://dx.doi.org/10.1016/j.energy.2015.04.034>.
- Chmielniak T. i Lepszy S. 2013 – *Dobór struktur układów gazowo-parowych z uwzględnieniem wybranych aspektów technologicznych i rynkowych*. Polityka Energetyczna – Energy Policy Journal t. 16, z. 4, s. 49–62; ISSN 1429-6675.
- Dąbrowski R. i Dzikuć M. 2012 – *Ocena cyklu życia (LCA) w sektorze energetycznym*. Pomiary Automatyka Kontrola 9 (58), s. 819–821.
- Expansion Energy LLC. 2015 – *VRGE™ Overview Patented Waterless Fracturing & EOR Technology for Unconventional Oil & Gas Production*. http://www.expansion-energy.com/yahoo_site_admin/assets/docs/VRGE_Waterless_Fracturing_EOR_Technology_-_Expansion_Energy_LLC_-_July_2015.22783723.pdf.
- Foltynowicz Z. i Lewandowska A. 2004 – *Comparative LCA of Industrial Objects. Part 2. Case study for chosen industrial pumps*. The International Journal of Life Cycle Assessment 9(3), s. 180–186; DOI: 10.1065/lca2004.03.152.2.
- Foltynowicz Z. i Lewandowska A. 2010 – *Selected problems of products ecology*. Wydawnictwo Uniwersytetu Ekonomicznego w Poznaniu.

- Garmsiri S., Rosen M.A. i Smith G.R. 2013 – *Integration of Wind Energy, Hydrogen and Natural Gas Pipeline Systems to Meet Community and Transportation Energy Needs: A Parametric Study*. In Proceedings of the 3rd World Sustainability Forum. 1–30 November 2013. Sciforum Electronic Conference Series, Vol. 3; d009. doi:10.3390/wsf3-d009.
- International Energy Agency. 2016. *World Energy Outlook 2016. Executive Summary* IEA/OEC:5-6. ISBN 978 92 64 24365.
- Kiersnowski H. i Dyrka I. 2013 – *Potencjał złożowy ordowicko-sylurskich łupków gazonośnych w Polsce: omówienie dotychczasowych raportów i propozycje udoskonalenia metodyki oceny zasobów gazu w raporcie w 2014 r.* Przegląd Geologiczny 61 (6), s. 354–373.
- Kijek-Baryś J., Mirowska A., Obarowski M., Rogowska A. i Witowska K. 2012 – *Ocena oddziaływania na środowisko przedsięwzięcia polegającego na poszukiwaniu i rozpoznawaniu złóż ropy naftowej i gazu ziemnego w granicach koncesji GOLDAP*. SEGI-AT Sp. z o.o.
- Labuda W. 2014. *Zastąpić wodę – nowe metody szczelinowania*. <http://infołupki.pgi.gov.pl/pl/technologie/zastapic-wode-nowe-metody-szczelinowania>.
- Lewandowska A. i Witeczak J. 2011 – *Zasoby naturalne jako kategoria wpływu w badaniach LCA*. Przegląd Górniczy 66 (1067), s. 26–32.
- Ministerstwo Energii, Minister Energii. 2017. *Sprawozdanie Ministra Energii z wyników monitorowania bezpieczeństwa dostaw paliw gazowych za okres od dnia 1 stycznia 2016 r. do dnia 31 grudnia 2016 r.*
- Ministerstwo Rozwoju. 2017. *Strategia na rzecz Odpowiedzialnego Rozwoju do roku 2020 (z perspektywą do 2030 r.)*. Dokument przyjęty uchwałą Rady Ministrów w dniu 14 lutego 2017 r., s. 331–332.
- Niezgoda T., Miedzińska D., Sławiński G., Kędziński P. i Małek E. 2016 – *Podstawy metody wydobycia gazu z łupków sprężonej z magazynowaniem CO₂*. Wojskowa Akademia Techniczna im. Jarosława Dąbrowskiego; ISBN 978-83-7938-121-0
- OPRA Turbines, Opra Technologies AS. 2007. *OP16 Gas Turbine Engine*. <http://www.opraturbines.com/upload/Products/Spec%20sheet%20-%20general%20description.pdf>.
- PIG-PIB, AGH, Politechnika Gdańska. Generalna Dyrekcja Ochrony Środowiska. 2015. *Raport: Środowisko i prace rozpoznawcze dotyczące gazu z łupków*.
- PKN Polski Komitet Normalizacyjny. 2000. PN-EN ISO 14043: *Zarządzanie środowiskowe – Ocena cyklu życia – Interpretacja cyklu życia*.
- PKN Polski Komitet Normalizacyjny. 2000. *Polskie tłumaczenie ISO/TR 14049: Zarządzanie środowiskowe – Ocena cyklu życia – Przykłady zastosowania ISO 14041 do określania celu i zakresu oraz analizy zbioru*.
- PKN Polski Komitet Normalizacyjny. 2000. *Polskie tłumaczenie ISO/TS 14048: Zarządzanie środowiskowe – Ocena cyklu życia – Format dokumentowania danych*.
- PKN Polski Komitet Normalizacyjny. 2002. PN-EN ISO 14041: *Zarządzanie środowiskowe – Ocena cyklu życia – Określenie celu i zakresu oraz analiza zbioru*.
- PKN Polski Komitet Normalizacyjny. 2002. PN-EN ISO 14042: *Zarządzanie środowiskowe – Ocena cyklu życia – Ocena wpływu cyklu życia*.
- PKN Polski Komitet Normalizacyjny. 2006. PKN ISO/TR 14047: *Zarządzanie środowiskowe – Ocena wpływu cyklu życia – Przykłady stosowania ISO 14042*.
- PKN Polski Komitet Normalizacyjny. 2009. PN-EN ISO 14040: *Zarządzanie środowiskowe – Ocena cyklu życia – Zasady i struktura*.
- Stamford L. i Azapagic A. 2014. *Life cycle environmental impacts of UK shale gas*. Elsevier Ltd. Applied Energy 134 :506–518. <http://dx.doi.org/10.1016/j.apenergy.2014.08.063>.
- Toscano A., Bilotti F., Asdrubali F., Guattari C., Evangelisti L. i Basilicata C. 2016 – *Recent Trends in the World Gas Market: Economical, Geopolitical and Environmental Aspects*. Multidisciplinary Digital Publishing Institute AG. Sustainability 8(2), s. 154; doi:10.3390/su8020154.

W przedstawionej publikacji widać, jak szerokie są możliwości i jak cenne mogą być efekty wprowadzania gospodarki o obiegu zamkniętym we wszystkich praktycznie dziedzinach życia: technologicznej, środowiskowej, biznesowej, zarządczej. Pozwala to na tworzenie połączeń biznesowych i budowanie nowych strategii, które umożliwią ograniczenie ilości odpadów, zaoszczędzenie zasobów wody, ochronę środowiska i zdrowia ludzi, ale również stworzenie nowych miejsc pracy, nowych technologii, innowacyjnych rozwiązań, a przez to uniezależnienie wzrostu gospodarczego od topniejących zasobów naturalnych. Tematyka pracy jest bardzo aktualna i może stanowić początek nurtu nowoczesnego myślenia nt. gospodarki o obiegu zamkniętym.

dr hab. inż. Agnieszka Generowicz, prof. PK

W książce przedstawiono szeroki zakres problematyki odnoszącej się do gospodarki o obiegu zamkniętym (GOZ) z różnych dziedzin, m.in. recyklingu, biogospodarki i energetyki. Zaproponowano rozwiązania umożliwiające domknięcie obiegu materiałów i energii. Zwrócono uwagę na istotę poziomu wiedzy i świadomości społeczeństwa polskiego w zakresie wdrażania koncepcji i zasad GOZ, które są podstawą sprawnego jej funkcjonowania i osiągania wymiernych efektów środowiskowych, społecznych i ekonomicznych.

dr hab. inż. Elżbieta Pietrzyk-Sokulska, prof. IGSMiE PAN

ISBN 978-83-62922-81-9



Dofinansowano ze środków
Narodowego Funduszu
Ochrony Środowiska
i Gospodarki Wodnej