

INNOWACYJNE ROZWIĄZANIA I TECHNOLOGIE ZAGOSPODAROWANIA ÓSADÓW SCIEKOWYCH W PRZEDSIĘBIORSTWIE WODOCIĄGÓW I KANALIZACJI ŚP. Z O.O. W RYBNIKU

JANUSZ KARWOT

JAN BONDARUK

MARCIN GŁODNIOK



GŁÓWNY INSTYTUT GÓRNICITWA
KATOWICE 2019

G I G

Janusz Karwot
Jan Bondaruk
Marcin Głodniok

Innowacyjne rozwiązania i technologie
zagospodarowania osadów ściekowych
w Przedsiębiorstwie Wodociągów
i Kanalizacji Sp. z o.o. w Rybniku



G I G

GŁÓWNY INSTYTUT GÓRNICTWA
Katowice 2019

Rada Programowa ds. Wydawnictw: prof. dr hab. inż. Antoni Tajduś (przewodniczący), prof. Roman Ditchkovsky, prof. Dou Lin Ming, prof. dr hab. inż. Józef Dubiński, czł. koresp. PAN, prof. Juraj Durove, prof. dr hab. inż. Czesława Rosik-Dulewska, czł. koresp. PAN, doc. ing. Richard Snuuparek, prof. Tomasz S. Wiltowski, prof. dr hab. inż. Teodor Winkler, prof. Valery N. Zakharov

Komitet Kwalifikacyjno-Opiniodawczy: prof. dr hab. Adam Smoliński (przewodniczący), dr hab. inż. Małgorzata Wysocka, prof. GIG (zastępca przewodniczącego), dr hab. inż. Stanisław Chałupnik, prof. GIG, dr hab. inż. Natalia Howaniec, prof. GIG, prof. dr hab. inż. Józef Kabiesz, dr hab. inż. Grzegorz Mutke, prof. GIG, prof. dr hab. inż. Krzysztof Stańczyk, prof. dr hab. inż. Jan Wachowicz

Recenzent

prof. dr hab. inż. Krystyna Czaplicka-Kolarz

Redakcja wydawnicza

Małgorzata Kuśmirek-Zegadło

Korekta

Barbara Dusik

Skład, łamanie

Krzysztof Galikowski

ISBN 978-83-65503-24-4

Printed in Poland

All rights reserved

Copyright by Główny Instytut Górnictwa

Sprzedaż wydawnictw Głównego Instytutu Górnictwa prowadzi

Zespół Wydawnictw i Usług Poligraficznych

wydawnictwa.gig.eu

tel. 32 259-24-03, 32 259-24-04, e-mail: mkusmirek@gig.eu

Katowice, GIG 2019. Ark. wyd. 6,4. Format B5.

Druk i oprawa: Zakład Poligraficzny „Węgloryt”, Katowice.

Spis treści

Wykaz najczęściej używanych skrótów	5
ROZDZIAŁ 1	
Kierunki gospodarowania osadami ściekowymi na świecie	7
1.1. Wprowadzenie.....	7
1.2. Europejskie i krajowe uwarunkowania prawne gospodarowania osadami ściekowymi.....	8
1.3. Komunalne osady ściekowe jako produkt procesu oczyszczania.....	13
1.4. Kierunki wykorzystywania osadów ściekowych	17
1.5. Podsumowanie	21
ROZDZIAŁ 2	
Rozwój gospodarki osadowej w świetle krajowych regulacji prawnych i nowoczesnych rozwiązań technologicznych	22
2.1. Wprowadzenie.....	22
2.2. Suszenie termiczne osadu	23
2.3. Spalanie i współspalanie	24
2.4. Piroliza niskotemperaturowa i piroliza wysokotemperaturowa (zgazowanie).....	26
2.5. Witryfikacja osadów ściekowych.....	29
2.6. Hydroliza termiczna – proces Cambi	30
2.7. Alternatywne wykorzystywanie osadów ściekowych.....	32
2.7.1. Wykorzystywanie osadów do produkcji antropogrunty.....	32
2.7.2. Produkcja nawozów organicznych.....	33
2.8. Podsumowanie.....	34
ROZDZIAŁ 3	
Przeróbka osadów ściekowych pochodzących z oczyszczalni ścieków w Rybniku-Orzepowicach	35
3.1. Wprowadzenie.....	35
3.2. Proces technologiczny konwersji biomasy	37
3.3. Podsumowanie	40
ROZDZIAŁ 4	
Doświadczenia z pilotażowych i demonstracyjnych rozwiązań technologicznych zagospodarowania osadów ściekowych w PWIK Sp. z o.o. w Rybniku	41
4.1. Wprowadzenie.....	41
4.2. Sposób przeprowadzania biokonwersji odpadów	41
4.3. Produkcja granulatów nawozowych z osadów ściekowych	44
4.4. Podsumowanie	45
ROZDZIAŁ 5	
Analiza porównawcza rozwiązań technologicznych możliwych do wdrożenia przez PWIK Sp. z o.o. w Rybniku z uwzględnieniem bezpieczeństwa i skuteczności procesu	46
5.1. Wprowadzenie.....	46
5.2. Wybrane technologie i ich analiza	49
5.3. Podsumowanie	52

ROZDZIAŁ 6

Aspekt ekonomiczny wprowadzania nowych rozwiązań technologicznych

do gospodarki osadami ściekowymi w PWIK Sp. z o.o. w Rybniku	53
6.1. Wprowadzenie.....	53
6.2. Efektywność inwestycyjna w sektorze wodociągowo-kanalizacyjnym.....	56
6.3. Działalność inwestycyjna i potencjał rozwojowy PWIK Sp. z o. o. w Rybniku.....	58
6.4. Analiza efektywności ekonomicznej wybranych projektów innowacyjnych.....	61
6.5. Podsumowanie	69

ROZDZIAŁ 7

Możliwość wdrożenia innowacyjnych technologii w perspektywie zapewnienia bezpieczeństwa środowiskowego produktów wytwarzanych

z osadów ściekowych przez PWIK Sp. z o.o. w Rybniku	71
7.1. Wprowadzenie.....	71
7.2. Badania jakościowe osadów na zawartość farmaceutyków i skuteczność metody ich usuwania.....	71
7.3. Obecność innych mikrozanieczyszczeń w osadach ściekowych	79
7.4. Badania biologiczne na obecność genów lekoopornych w osadach ściekowych.....	79
7.5. Podsumowanie	83
Podsumowanie	84
Literatura.....	87
Streszczenie.....	96
Abstract.....	96
Spis rysunków i fotografii	98
Spis tabel.....	98
Notki biograficzne autorów	99

WYKAZ NAJCZĘŚCIEJ UŻYWANYCH SKRÓTÓW

ARB	ang. <i>antibiotic resistant bacterias</i> – bakterie odporne na antybiotyki
ARGs	ang. <i>antibiotic resistance genes</i> – geny odporne na antybiotyki
BAT	ang. <i>best available technology</i> – najlepsza dostępna technologia
BAT WTI	ang. <i>BAT waste treatment industries</i> – BAT dla zakładów przetwarzania odpadów
BAT WI	ang. <i>BAT waste incineration</i> – BAT dla spalarni odpadów
CBA	ang. <i>cost-benefit analysis</i> – analiza kosztów i korzyści
CHP	ang. <i>combined heat and power</i> – kogeneracja
ChZT	chemiczne zapotrzebowanie na tlen
DGC	ang. <i>dynamic generation cost</i> – wskaźnik dynamicznego kosztu jednostkowego
GOZ	gospodarka o obiegu zamkniętym
IOB	instytucje otoczenia biznesu
KPGO	Krajowy plan gospodarki odpadami
KPOŚK	Krajowy program oczyszczania ścieków komunalnych
LCA	ang. <i>Life Cycle Assessment</i> – ocena cyklu życia
LCC	ang. <i>Life Cycle Costing</i> – analiza kosztów cyklu życia
LKT	lotne kwasy tłuszczowe
NGS	ang. <i>next generation sequencing</i> – metoda sekwencjonowania nowej generacji
NLPZ	niesteroidowe leki przeciwzapalne
NPV	ang. <i>net present value</i> – wartość zaktualizowana netto
NUR	szybkość denitryfikacji
OUR	szybkość poboru tlenu
OZE	odnawialne źródła energii
PAO	bakterie akumulujące fosfor
PCPs	ang. <i>personal care products</i> – środki ochrony osobistej
PPCPs	ang. <i>pharmaceuticals and personal care products</i> – środki ochrony osobistej wraz z farmaceutykami
POIG	Program Operacyjny Innowacyjna Gospodarka
RLM	równoważna liczba mieszkańców
RTC	ang. <i>real time clock</i> – zegar czasu rzeczywistego
SII	ang. <i>summary innovation index</i> – sumaryczny wskaźnik innowacyjności
s.m.	sucha masa
s.m.o.	sucha masa organiczna
SPO WKP	Sektorowy Program Operacyjny Wzrost Konkurencyjności Przedsiębiorstw
THP	termiczna hydroliza osadu
WKfZ	wydzielone komory fermentacyjne zamknięte
ZZWO	zewnętrzne źródła węgla organicznego

KIERUNKI GOSPODAROWANIA OSADAMI ŚCIEKOWYMI NA ŚWIECIE

1.1. Wprowadzenie

Gospodarowanie komunalnymi osadami ściekowymi jest ważnym i trudnym zagadnieniem ze względu na rosnącą w globalnej skali ilość osadów ściekowych i wzajemne oddziaływanie wielu czynników wpływających na te działania. Przewiduje się dynamiczny rozwój gospodarki osadami ściekowymi w krajach, które inwestują w rozbudowę oczyszczalni ścieków i gospodarowanie osadami ściekowymi, tj. przede wszystkim w Chinach, Brazylii, Indiach oraz krajach Europy Wschodniej (He i in., 2018). Technologia oczyszczania, w tym odwadnianie, zagęszczanie i stabilizacja osadów, będzie determinowała rozwój inwestycji w najbliższych latach. Wyzwania, przed którymi stają kraje, są związane przede wszystkim z brakiem podstawowych urządzeń sanitarnych dla około 3 miliardów ludzi na świecie, stąd też intensyfikacja badań i rozwój innowacji w tym obszarze. Problem wzrostu ilości osadów ściekowych, które muszą być przetwarzane, wynika z potrzeby utrzymania i poprawy stanu środowiska, zdrowia i bezpieczeństwa ludzi. O randze problemu gospodarowania osadami ściekowymi świadczy również fakt, że główne kwestie związane z realizacją tego procesu podlegają międzynarodowym i krajowym przepisom prawnym. Problematyka zagospodarowania komunalnych osadów ściekowych jest również przedmiotem opracowywanych krajowych programów i strategii. Pociąga to konieczność zapewnienia dostępności do środków finansowych na inwestycje, odpowiedniego poziomu wiedzy naukowej i technicznej, a także tworzenia innowacyjnych rozwiązań technologicznych (Stamatelatos i Tsagarakis, 2015). Równie istotnym problemem dotyczącym komunalnych osadów ściekowych jest inwentaryzacja informacji o ilości odpadów wyprodukowanych przez oczyszczalnie ścieków. Luka informacyjna w tym zakresie uniemożliwia podejmowanie decyzji i działań inwestycyjnych prowadzących do przetwarzania, odzysku i unieszkodliwiania osadów ściekowych. Przyrosty ilości osadów ściekowych, będące wynikiem działań podjętych w ramach Krajowego programu oczyszczania ścieków komunalnych (KPOŚK), wiążą się z budową, rozbudową i modernizacją oczyszczalni ścieków. Przyrastająca ilość osadów ściekowych i restrykcyjne wymagania w zakresie postępowania z nimi, stają się czynnikami, które wpływają na intensyfikację prac badawczych i eksperymentalnych oraz prac wdrożeniowych związanych z rozwojem technologii ich zagospodarowania. Prace te docelowo powinny prowadzić do opracowania rozwiązań, które można zastosować na skalę przemysłową. Kierunki rozwoju nowych technologii gospodarowania osadami ściekowymi są obecnie również silnie podporządkowane zmieniającemu się paradygmatowi gospodarowania, tj. gospodarce obiegu

zamkniętego (ang. *circular economy*), która wiąże się z wykorzystaniem ich, po odpowiedniej przeróbce, jako surowca do produkcji nowych wyrobów lub energii (Papa i in., 2017).

1.2. Europejskie i krajowe uwarunkowania prawne gospodarowania osadami ściekowymi

Obowiązujące przepisy prawne polskie (*Ustawa z dnia 14 grudnia 2012 r. o odpadach*) i europejskie (Dyrektywa Osadowa) precyzują termin komunalnych osadów ściekowych w sposób jednoznaczny. Obok funkcjonujących terminów prawnych, w literaturze przedmiotu można także spotkać się z szerszym spojrzeniem na omawiany temat (Bilitewski, Härdtle i Marek, 2003). Definicja osadu ściekowego, rozumianego jako wynik i/lub produkt procesu oczyszczania ścieków, znajduje się w aktach prawa unijnego (tab. 1).

Tabela 1. Wybrane dokumenty unijne definiujące osady ściekowe

Symbol dokumentu	Nazwa dokumentu
2008/98/WE	Dyrektywa z dnia 19 listopada 2008 r. w sprawie odpadów oraz uchylająca niektóre dyrektywy (Ramowa Dyrektywa Odpadowa)
1999/31/WE	Dyrektywa z dnia 26 kwietnia 1999 r. w sprawie składowania odpadów (Dyrektywa Składowiskowa)
86/278/EWG	Dyrektywa z dnia 12 czerwca 1986 r. w sprawie ochrony środowiska, w szczególności gleby, w przypadku wykorzystania osadów ściekowych w rolnictwie (Dyrektywa Osadowa)
ENV.E.3/LM	Working Document on Sludge 3 rd Draft
3 rd Working Document	Technical Report for End-of-Waste Criteria on Biodegradable Waste Subject to Biological Treatment – Third Working Document
COD 2006/0086	Projekt ramowej dyrektywy glebowej (COD) – dyrektywa ustanawiająca ramy dla ochrony gleb
2009/28/WE (RES)	Dyrektywa 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 (Dyrektywa RES)
2000/60/WE	Dyrektywa z dnia 23 października 2000 r. ustanawiająca ramy wspólnotowego działania w dziedzinie polityki wodnej (Ramowa Dyrektywa Wodna)
2008/15/WE	Dyrektywa z dnia 16 grudnia 2008 r. w sprawie środowiskowych norm jakości w dziedzinie polityki wodnej
91/676/EWG	Dyrektywa z dnia 12 grudnia 1991 r. dotycząca ochrony wód przed zanieczyszczeniami powodowanymi przez azotany pochodzenia rolniczego (Dyrektywa Azotanowa)
2006/118/WE	Dyrektywa z dnia 12 grudnia 2006 r. w sprawie ochrony wód podziemnych przed zanieczyszczeniami
91/271/WE	Dyrektywa z dnia 21 maja 1991 r. w sprawie oczyszczania ścieków komunalnych (Dyrektywa Ściekowa)
2008/56/WE	Dyrektywa z dnia 17 czerwca 2008 r. ustanawiająca ramy działań wspólnoty w dziedzinie polityki środowiska morskiego (Dyrektywa Morska)

Symbol dokumentu	Nazwa dokumentu
2010/75/UE	Dyrektywa z dnia 24 listopada 2010 r. w sprawie emisji przemysłowych (zintegrowane zapobieganie zanieczyszczeniom i ich kontrola) (Dyrektywa IED)
2008/1/WE	Dyrektywa z dnia 15 stycznia 2008 r. dotycząca zintegrowanego zapobiegania zanieczyszczeniom i ich kontroli (tzw. Dyrektywa IPPC)
BAT [WTI]	Integrated Pollution Prevention and Control Reference Document on Best Available Techniques for the Waste Treatments Industries, August 2006
BAT [WI]	Best Available Techniques (BAT) Reference Document on Waste Incineration, July 2006
2001/80/WE	Dyrektywa z dnia 24 listopada 2001 r. w sprawie ograniczenia emisji niektórych zanieczyszczeń do powietrza z dużych obiektów energetycznego spalania (LCP)
2000/76/WE	Dyrektywa z dnia 4 grudnia 2000 r. w sprawie spalania
2004/35/WE	Dyrektywa z dnia 21 kwietnia 2004 r. w sprawie odpowiedzialności za środowisko w odniesieniu do zapobiegania i zaradzania szkodom wyrządzonym środowisku naturalnemu
1907/2006/WE	Rozporządzenie Parlamentu Europejskiego i Rady z dnia 18 grudnia 2006 r. w sprawie rejestracji, oceny, udzielania zezwoleń i stosowanych ograniczeń w zakresie chemikaliów (REACH) i utworzenia Europejskiej Agencji Chemikaliów, zmieniające dyrektywę 1999/45/WE oraz uchylające rozporządzenie Rady (EWG) nr 793/93 i rozporządzenie Komisji (WE) nr 1488/94, jak również dyrektywę Rady 76/769/EWG i dyrektywy Komisji 91/155/EWG, 93/67/EWG, 93/105/WE i 2000/21/WE (z późn. zm.)
2012/1063/UE	Rozporządzenie Komisji (UE) z dnia 13 listopada 2012 r. zmieniające rozporządzenie (UE) nr 142/2011 w sprawie wykonania rozporządzenia Parlamentu Europejskiego i Rady (WE) nr 1069/2009 określającego przepisy sanitarne dotyczące produktów ubocznych pochodzenia zwierzęcego, nieprzeznaczonych do spożycia przez ludzi, oraz w sprawie wykonania dyrektywy Rady 97/78/WE w odniesieniu do niektórych próbek i przedmiotów zwolnionych z kontroli weterynaryjnych na granicach w myśl tej dyrektywy
2011/749/UE	Rozporządzenie Komisji (UE) z dnia 29 lipca 2011 r. zmieniające rozporządzenie (UE) nr 142/2011 w sprawie wykonania rozporządzenia Parlamentu Europejskiego i Rady (WE) nr 1069/2009 określającego przepisy sanitarne dotyczące produktów ubocznych pochodzenia zwierzęcego, nieprzeznaczonych do spożycia przez ludzi, oraz w sprawie wykonania dyrektywy Rady 97/78/WE w odniesieniu do niektórych próbek i przedmiotów zwolnionych z kontroli weterynaryjnych na granicach w myśl tej dyrektywy

Z przedstawionych dokumentów najważniejsze są:

- *Dyrektywa Rady 86/278/EWG z dnia 12 czerwca 1986 r. w sprawie ochrony środowiska, w szczególności gleby, w przypadku wykorzystania osadów ściekowych w rolnictwie*, która wprowadza ograniczenia dla wykorzystania osadów w rolnictwie. Dyrektywa ta, mimo trwających od lat prac związanych z aktualizacją, nie została poddana żadnym zmianom. W dyrektywie rozróżniono pojęcie osadu i osadu oczyszczonego. Osadem określa się:

- pozostały osad z oczyszczalni zajmujących się oczyszczaniem ścieków z gospodarstw domowych i ścieków komunalnych i z innych oczyszczalni oczyszczających ścieki o składzie zbliżonym do ścieków z gospodarstw domowych i ścieków komunalnych,
- pozostały osad z szamb i innych podobnych instalacji przeznaczonych do oczyszczania ścieków,
- pozostały osad z oczyszczalni innych niż określone powyżej.

Osadem oczyszczonym jest natomiast osad poddany oczyszczaniu (przeróbce) biologicznemu, chemicznemu lub cieplnemu, długoterminowemu składowaniu lub każdemu innemu procesowi znacznie zmniejszającemu jego podatność na fermentację i zagrożenie dla zdrowia, wynikające z jego stosowania. Jako formę wykorzystania osadu wskazuje się jego rozproszanie na powierzchni gleby lub każdą inną formę zastosowania osadu na powierzchni i wewnątrz gleby.

- *Dyrektywa Rady 91/271/EWG z dnia 21 maja 1991 r. dotycząca oczyszczania ścieków komunalnych* zawiera krótką definicję osadu, wskazując, że jest to oczyszczony lub nieoczadzony osad pochodzący z oczyszczalni ścieków komunalnych. Zawiera ona również zapis dotyczący recyklingu osadów.
- *Dyrektywa Parlamentu Europejskiego i Rady z dnia 19 listopada 2008 r. 2008/98/WE w sprawie odpadów* traktuje osady jako odpad, czyli każdą substancję lub przedmiot, których posiadacz pozbywa się, zamierza się pozbyć, lub do których pozbycia został zobowiązany.
- *Dyrektywa 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* wprowadza definicję biomasy, czyli ulegającą biodegradacji część produktów, odpadów lub pozostałości pochodzenia biologicznego z rolnictwa (łącznie z substancjami roślinnymi i zwierzęcymi), leśnictwa i związanych działów przemysłu, w tym rybołówstwa i akwakultury, a także ulegającej biodegradacji części odpadów przemysłowych i miejskich.

Poza dokumentami bezpośrednio odnoszącymi się do kwestii gospodarowania osadami ściekowymi warto zwrócić uwagę, że na gospodarkę osadami mają wpływ także dyrektywy dotyczące ochrony wód i oczyszczania ścieków komunalnych. Za najistotniejszą należy uznać dyrektywę 2000/60/WE z dnia 23 października 2000 r., tzw. Ramową Dyrektywę Wodną (RDW), która ustala ramy działania w zakresie polityki wodnej, osady traktuje jako „produkt” oczyszczania ścieków. Dokument ten obliguje państwa członkowskie do wdrażania kompleksowych rozwiązań w zakresie gospodarki wodno-ściekowej w celu osiągnięcia statusu dobrego stanu wód najpóźniej do roku 2021 lub 2027 w przypadku zastosowania odstępstwa czasowego (art. 4 ust. 4 RDW). Z Ramowej Dyrektywy Wodnej wynikają również regulacje zawarte w *Dyrektywie Parlamentu Europejskiego i Rady 2008/56/WE z dnia 17 czerwca 2008 r. ustanawiającej ramy działań Wspólnoty w dziedzinie polityki w zakresie środowiska morskiego*, które mogą

skutkować zwiększeniem ilości osadów chemicznych (strącanie fosforu). Z punktu widzenia gospodarki osadowej istotna jest również dyrektywa 2004/35/WE w sprawie odpowiedzialności za środowisko z uwagi na zapobieganie szkodom wyrządzonym środowisku naturalnemu, w której ustalono ramy odpowiedzialności za środowisko w oparciu o zasadę „zanieczyszczający płaci”. Dokumentami znacząco utrudniającymi tzw. rolnicze wykorzystanie osadów ściekowych są *Dyrektywa Rady 91/676/EWG z dnia 12 grudnia 1991 r. dotycząca ochrony wód przed zanieczyszczeniami powodowanymi przez azotany pochodzenia rolniczego* i *Dyrektywa 2008/15/WE z dnia 16 grudnia 2008 r. w sprawie środowiskowych norm jakości w dziedzinie polityki wodnej*. Ich zapisy mogą spowodować zwiększenie ilości odpadów kierowanych na składowiska, podczas gdy *Dyrektywa 99/31/WE z dnia 26 kwietnia 1999 r. w sprawie składowania odpadów* wprowadza ograniczenia dotyczące składowania osadów i pośrednio stymuluje rozwój innych metod ich zagospodarowania.

Państwa członkowskie UE są zobowiązane do transponowania dyrektyw UE do krajowych przepisów prawnych, które nie mogą zawierać mniej rygorystycznych zapisów niż dyrektywy. Stąd też w Polsce proces implementacji prawa wspólnotowego i rozwiązań w zakresie gospodarki osadami ściekowymi realizowany jest w podobnej strukturze jak w krajach członkowskich UE i obejmuje zagadnienia z zakresu gospodarki wodnej, gospodarki odpadowej wraz z regulacjami dotyczącymi poziomów emisji zanieczyszczeń, ochrony środowiska i wytycznymi zaczerpniętymi z prawa energetycznego i nawozowego (tab. 2).

Tabela 2. Wybrane polskie akty prawne regulujące kwestie środowiskowe związane z problematyką osadów ściekowych

Nr Dz. U.	Nazwa/tytuł aktu
Dz.U.2018.2268	Ustawa z dnia 20 lipca 2017 r. Prawo wodne
Dz.U.2018.1152	Ustawa z dnia 7 czerwca 2001 r. o zbiorowym zaopatrzeniu w wodę i zbiorowym odprowadzaniu ścieków
Dz.U.2015.1456	Rozporządzenie Ministra Infrastruktury i Rozwoju z dnia 25 sierpnia 2015 r. zmieniające rozporządzenie w sprawie sposobu realizacji obowiązków dostawców ścieków przemysłowych oraz warunków wprowadzania ścieków do urządzeń kanalizacyjnych
Dz.U.2003.444	Rozporządzenie Ministra Środowiska z dnia 23 grudnia 2002 r. w sprawie szczegółowych wymagań, jakim powinny odpowiadać programy działań mających na celu ograniczenie odpływu azotu ze źródeł rolniczych
Dz.U.2018.992	Ustawa z dnia 14 grudnia 2012 r. o odpadach
Dz.U.2018.1454	Ustawa z dnia 13 września 1996 r. o utrzymaniu czystości i porządku w gminach
Dz.U.2015.257	Rozporządzenie Ministra Środowiska z dnia 6 lutego 2015 r. w sprawie komunalnych osadów ściekowych
Dz.U.2014.1923	Rozporządzenie Ministra Środowiska z dnia 9 grudnia 2014 r. w sprawie katalogu odpadów
Dz.U.2015.132	Rozporządzenie Ministra Środowiska z dnia 20 stycznia 2014 r. w sprawie procesu odzysku R10

Nr Dz. U.	Nazwa/tytuł aktu
Dz.U.2018.1259	Ustawa z dnia 10 lipca 2007 r. o nawozach i nawożeniu
Dz.U.2018.799	Ustawa z dnia 27 kwietnia 2001 r. Prawo ochrony środowiska
Dz.U.2016.108	Rozporządzenie Ministra Rozwoju z dnia 21 stycznia 2016 r. w sprawie wymagań dotyczących prowadzenia procesu termicznego przekształcania odpadów oraz sposobów postępowania z odpadami powstałymi w wyniku tego procesu
Dz.U.2018.2527	Rozporządzenie Ministra Środowiska z dnia 13 grudnia 2018 r. w sprawie wykazów zawierających informacje i dane o zakresie korzystania ze środowiska oraz o wysokości należnych opłat
Dz.U.2015.1277	Rozporządzenie Ministra Gospodarki z dnia 16 lipca 2015 r. w sprawie dopuszczania odpadów do składowania na składowiskach
Dz.U.2018.2081	Ustawa z dnia 3 października 2008 r. o udostępnianiu informacji o środowisku i jego ochronie, udziale społeczeństwa w ochronie środowiska oraz o ocenach oddziaływania na środowisko
Dz.U.2013.817	Rozporządzenie Rady Ministrów z dnia 25 czerwca 2013 r. zmieniające rozporządzenie w sprawie przedsięwzięć mogących znacząco oddziaływać na środowisko
Dz.U.2018.954	Ustawa z dnia 13 kwietnia 2007 r. o zapobieganiu szkodom w środowisku i ich naprawie

Gospodarka osadami ściekowymi w Polsce regulowana jest przez trzy główne akty prawne, z których najważniejsza jest *Ustawa z dnia 14 grudnia 2012 r. o odpadach*, wprowadzająca podstawowe wymagania dla rolniczego lub przyrodniczego wykorzystywania osadów. Zgodnie z art. 96 ust. 1 tej Ustawy osady ściekowe mogą być stosowane:

- w rolnictwie rozumianym jako uprawa wszystkich płodów rolnych wprowadzonych do obrotu handlowego, w tym przeznaczonych do produkcji pasz,
- do uprawy roślin przeznaczonych do produkcji kompostu,
- do uprawy roślin nieprzeznaczonych do spożycia i do produkcji pasz,
- do rekultywacji terenów, w tym gruntów na cele rolne,
- przy dostosowywaniu gruntów do określonych potrzeb wynikających z planów gospodarki odpadami, planów zagospodarowania przestrzennego lub decyzji o warunkach zabudowy i zagospodarowania terenu.

Ustawa wprowadza również zakaz zbierania osadów ściekowych poza miejscem ich wytwarzania.

Drugi i trzeci istotny akt prawny odnoszący się do oczyszczania ścieków komunalnych to *Ustawa z dnia 20 lipca 2017 r. Prawo wodne* i *Ustawa z dnia 27 kwietnia 2001 r. Prawo ochrony środowiska*. Ustawy te, regulując ogólne ramy działania, zawierają jednocześnie delegację określonych działań do aktów wykonawczych, w tym do:

- *Rozporządzenia Ministra Środowiska z dnia 9 grudnia 2014 r. w sprawie katalogu odpadów*, które dzieli odpady w zależności od źródła ich powstania na 20 grup, w tym grupa 19. obejmuje odpady z instalacji i urządzeń służących zagospodarowaniu odpadów z oczyszczalni ścieków oraz z uzdatniania wody pitnej i wody do celów przemysłowych.

- *Rozporządzenia Ministra Środowiska z dnia 6 lutego 2015 r. w sprawie komunalnych osadów ściekowych*, w którym podano między innymi warunki, jakie muszą być spełnione przy wykorzystywaniu komunalnych osadów ściekowych i określono czas, jaki powinien upłynąć między przywozem komunalnych osadów ściekowych, a wprowadzaniem ich do gruntu; sformułowano także warunki nawożenia gleby pierwiastkami, takimi jak azot i fosfor (występującymi w osadach) – w zależności od potrzeb pokarmowych roślin; wpływa to na zmniejszenie zanieczyszczenia wód podziemnych i powierzchniowych tymi pierwiastkami i ogranicza produkcję roślinną o zbyt wysokiej zawartości azotanów.
- *Rozporządzenia Ministra Gospodarki z dnia 16 lipca 2015 r. w sprawie dopuszczania odpadów do składowania na składowiskach*, które reguluje kwestie związane z zagospodarowaniem osadów ściekowych, gdyż wprowadza zakaz składowania nieprzetworzonych osadów ściekowych (obowiązuje od 1.01.2016 r.).

W opracowanym przez Ministerstwo Środowiska dokumencie *Strategia postępowania z komunalnymi osadami ściekowymi na lata 2019–2022* (Strategia, 2018) wskazuje się na potencjalnie duży wpływ regulacji dotyczącej odnawialnych źródeł energii, według której biodegradowalną część osadów ściekowych zalicza się do biomasy (*Ustawa z dnia 20 lutego 2015 r. o odnawialnych źródłach energii*).

Przedstawiony przegląd polskich regulacji prawnych w zakresie gospodarki osadami ściekowymi prowadzi do konkluzji, że są one zgodne z przyjętymi w UE wytycznymi zawartymi w dyrektywach. Dotyczą one między innymi obszaru wykorzystania osadów ściekowych i wymaganych efektów stosowania metod obróbki wstępnej osadów ściekowych (co powinno prowadzić m.in. do ich stabilizacji i ustalenia dopuszczalnej zawartości zanieczyszczeń w osadach i glebach).

1.3. Komunalne osady ściekowe jako produkt procesu oczyszczania

W regulacjach unijnych można znaleźć kilka definicji osadów ściekowych. W każdej z nich wychodzi się z podstawowego założenia, że osad ściekowy jest odpadem. W *Dyrektywie Rady 86/278/EWG z dnia 12 czerwca 1986 r. w sprawie ochrony środowiska* występują przytoczone już wcześniej pojęcia osadu i osadu oczyszczonego, w których osad można traktować jako pierwotny produkt procesu realizowanego w oczyszczalni ścieków pochodzących z gospodarstw domowych i ścieków komunalnych oraz z innych oczyszczalni oczyszczających ścieki o składzie zbliżonym do ścieków z gospodarstw domowych i ścieków komunalnych oraz szamb i innych zbliżonych instalacji, natomiast osad oczyszczony to wynik oczyszczania (przeróbki) biologicznego, chemicznego lub cieplnego, długoterminowego składowania lub każdego innego procesu

pozwalającego na znaczne zmniejszenie jego podatności na fermentację i zagrożenie dla zdrowia wynikające z jego stosowania. W *Dyrektywie Rady 91/271/EWG z dnia 21 maja 1991 r. dotyczącej oczyszczania ścieków komunalnych* pojawia się szereg pojęć związanych z osadami ściekowymi:

- ścieki komunalne, czyli ścieki bytowe lub mieszanina ścieków bytowych ze ściekami przemysłowymi i/lub wodami opadowymi,
- ścieki bytowe, określane jako ścieki z osiedli mieszkaniowych i terenów usługowych, związane z podstawowymi funkcjami metabolicznymi człowieka oraz z funkcjonowaniem gospodarstw domowych,
- ścieki przemysłowe to wszelkie ścieki odprowadzane z obszarów, na których prowadzi się działalność produkcyjną, usługową i/lub handlową, które nie są ściekami bytowymi lub wodami opadowymi,
- osad – oznacza pozostający osad komunalny, oczyszczony lub nie, pochodzący z oczyszczalni ścieków komunalnych.

W dyrektywie 91/271/EWG zdefiniowano także dwa główne procesy związane z oczyszczaniem ścieków komunalnych – oczyszczanie pierwotne i wtórne. Oczyszczanie pierwotne jest realizowane jako proces fizyczny i/lub chemiczny, obejmujący osadzanie zawiesiny lub inny proces powodujący, że BZT₅ dopływających ścieków jest przed odprowadzeniem zmniejszany o co najmniej 20%, a zawiesina jest zmniejszana o co najmniej 50%. Oczyszczanie wtórne odbywa się z wykorzystaniem wybranego procesu i/lub systemu usuwania pozwalającego wodom, do których odprowadzane są ścieki, osiągać odpowiednie parametry jakości.

Osad traktowany jest jako odpad, warto więc przyjrzeć się podstawowym definicjom związanym z odpadami, które zawarto w *Dyrektywie Parlamentu Europejskiego i Rady z dnia 19 listopada 2008 r. 2008/98/WE w sprawie odpadów*. Za odpad uważa się każdą substancję lub przedmiot, których posiadacz pozbywa się, zamierza się pozbyć, lub do których pozbycia został zobowiązany. Odpady powinny być poddawane odzyskowi i/lub unieszkodliwiane. Odzysk oznacza jakikolwiek proces, którego głównym wynikiem jest doprowadzenie do sytuacji, w jakiej odpady będą miały praktyczne zastosowanie przez zastąpienie innych materiałów, które w przeciwnym wypadku zostałyby użyte do spełnienia danej funkcji, lub w wyniku którego odpady są przygotowywane do pełnienia takiej funkcji w danym zakładzie, lub szerzej, w gospodarce. Jedną z metod odzysku jest recykling, w ramach którego materiały odpadowe są ponownie przetwarzane na produkty, materiały lub substancje wykorzystywane w pierwotnym celu lub w innych celach. Obejmuje to ponowne przetwarzanie materiału organicznego, ale nie obejmuje odzysku energii i ponownego przetwarzania na materiały, które mają być wykorzystane jako paliwa lub do wypełniania wyrobisk. Unieszkodliwianie oznacza jakikolwiek proces, który nie jest odzyskiem, nawet, jeżeli wtórnym skutkiem takiego procesu jest odzysk substancji lub energii. Rysunek 1 przedstawia rekomendowaną hierarchię postępowania z odpadami. Wskazano kolejność podejmowania działań związanych z najlepszym kompleksowym

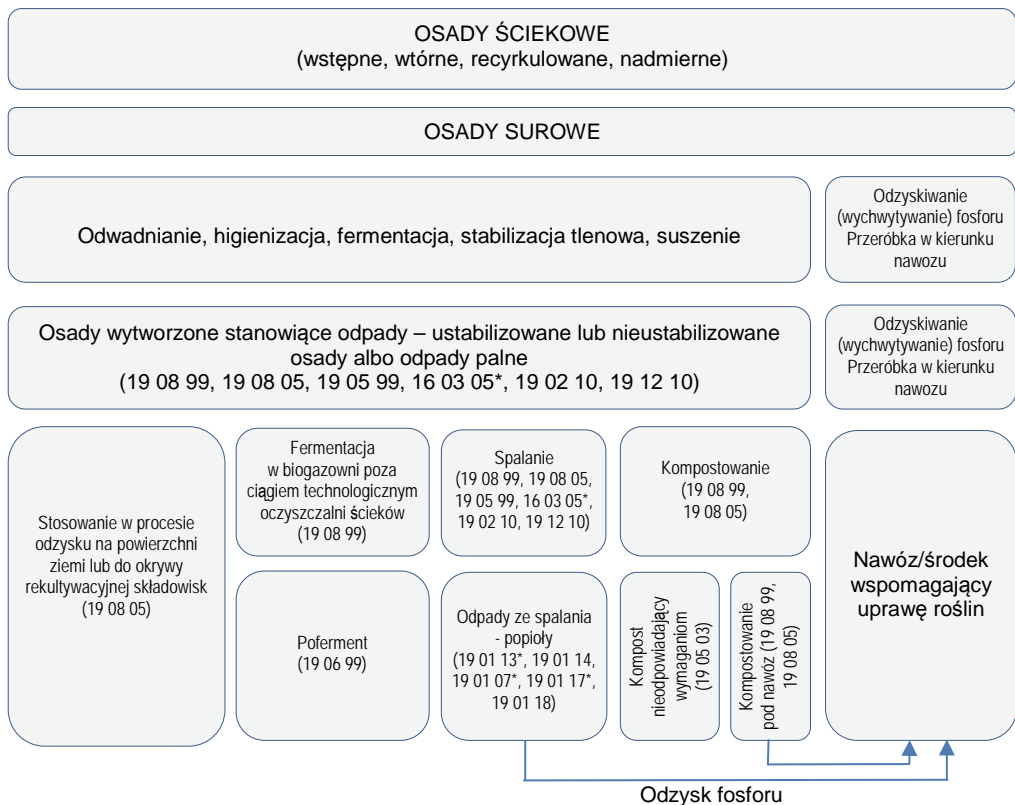
rozwiązaniem dla środowiska. Odstępstwo od wskazanych zasad jest zasadniczo niedopuszczalne, chyba że w przypadku określonych strumieni odpadów. Odstępstwo takie musi być uzasadnione, na przykład brakiem możliwości technicznych, nieopłacalnością ekonomiczną, zachowaniem zasad ochrony środowiska. Ze wskazanej hierarchii wynika, że jako pierwsze należy podejmować działania, które pozwolą na uniknięcie powstania odpadów. Jest to działanie będące w interesie przedsiębiorców, ponieważ realizacja tej zasady wiąże się z lepszą efektywnością wykorzystania surowców, co przekłada się na obniżenie kosztów ich nabycia i zmniejszenie ubytków, a to z kolei pozwala na redukcję kosztów odbioru odpadów. Jeżeli jednak nie można uniknąć powstania odpadów, to zasadne jest rozważenie ich odzysku, na przykład przez ponowne użycie, recykling czy odzysk energii. Jako ostateczne rozwiązanie wymienia się składowanie odpadów. A zatem kolejność działań to przede wszystkim zapobieganie powstawaniu odpadów, a jeśli nie jest to możliwe, ponowne wykorzystanie i recykling, ewentualnie odzysk energii z odpadów, o ile są to najbardziej ekologiczne z dostępnych metod. Efektem takiego podejścia powinien być najlepszy dla środowiska wynik całkowity związany z zagospodarowaniem odpadów.



Rysunek 1. Hierarchia działań związanych z zagospodarowaniem odpadów (oprac. na podstawie Biegańska i Ciuła, 2011)

W polskim prawodawstwie osady ściekowe zostały ujęte w *Ustawie z dnia 14 grudnia 2012 r. o odpadach* (z późn. zm.), w której pojawia się wprost definicja komunalnych osadów ściekowych. Komunalne osady ściekowe to pochodzące z oczyszczalni ścieków osady z komór fermentacyjnych i innych instalacji służących do oczyszczania ścieków komunalnych oraz innych ścieków o składzie zbliżonym do składu ścieków komunalnych. W *Rozporządzeniu Ministra Środowiska z dnia 9 grudnia 2014 r. w sprawie katalogu odpadów* osady ściekowe zaliczone zostały do grupy 19. o kodzie 19 08 05. Dlatego też wszelkie działania podejmowane w gospodarce osadami ściekowymi regulowane są przede wszystkim przepisami właściwymi dla sektora gospodarki odpadowej, ze szczególnym wskazaniem Ramowej Dyrektywy Odpadowej. Ustawa o odpadach

reguluje również możliwe zastosowanie komunalnych osadów ściekowych, wskazując między innymi na rozprowadzanie komunalnych osadów ściekowych na powierzchni ziemi lub wprowadzanie ich do gleby. Rysunek 2 przedstawia syntetyczne ujęcie kierunków przeróbki osadów w oczyszczalni ścieków i procesów przetwarzania komunalnych osadów ściekowych jako odpadów.



Rysunek 2. Możliwe kierunki przeróbki osadów w oczyszczalni ścieków i procesów przetwarzania komunalnych osadów ściekowych (oprac. na podstawie Strategia, 2018)

Warto zwrócić uwagę, że w polskim prawodawstwie funkcjonują obecnie trzy dokumenty regulujące gospodarkę ściekową:

- Krajowy plan gospodarki odpadami (KPGO 2022) identyfikujący aktualne problemy w gospodarce osadowej, cele dla gospodarki osadami ściekowymi i wyznaczający kierunki działań.
- Krajowy program oczyszczania ścieków komunalnych (KPOŚK), który ma na celu realizację postanowień Traktatu Akcesyjnego w zakresie oczyszczania ścieków komunalnych i wskazuje sposoby wykorzystywania komunalnych osadów ściekowych. Zawiera też podstawy prawne i administracyjne dotyczące sposobów wykorzystania osadów ściekowych, na przykład stosowanie: w rolnictwie, do rekultywacji terenów, do produkcji roślin na kompost, a także przekształcanie termiczne, przeznaczanie na inne cele, składowanie.

- Strategia postępowania z komunalnymi osadami ściekowymi na lata 2019–2022, która tworzy warunki i dostarcza mechanizmów sprzyjających rozwiązaniu problemu zagospodarowania komunalnych osadów ściekowych stanowiących odpady. Zakres zadań w Strategii skupia się na procesach przetwarzania komunalnych osadów ściekowych jako odpadów.

Z przeprowadzonego przeglądu literatury dotyczącej gospodarki osadami ściekowymi wynika precyzyjna definicja ścieków i ich rozróżnienie w zależności od składu (np. obecność substancji organicznej, obecność domieszek specyficznych – charakterystycznych dla głównych gałęzi przemysłu) i pochodzenia (źródła) – sektor przemysłowy – ścieki przemysłowe – najbardziej obciążone zanieczyszczeniami, takimi jak: cyjanki, chlorowane węglowodory, toksyczne substancje organiczne (np. akroleina, chloropikryna, siarczan dimetylu, dinitrobenzen, dinitrofenol, nitroanilina, pentachlorofeol, metale: As, Cd, Cr, Cu, Hg, Pb, Se, Zn, nie mogą być odprowadzane do kanalizacji miejskiej lub wód powierzchniowych bez oczyszczenia), czy sektor komunalny, gdzie jest to mieszanina ścieków bytowo-gospodarczych. Komunalne osady ściekowe są osadami pochodzącymi z procesów oczyszczania ścieków komunalnych i ścieków o składzie zbliżonym do ścieków komunalnych.

1.4. Kierunki wykorzystywania osadów ściekowych

Ilość osadów ściekowych szybko wzrasta, tworząc grupę „problematycznych” odpadów, które wymagają, zgodnego z prawem wspólnotowym, rozwiązania kwestii ich zagospodarowania. Mimo że wachlarz proponowanych, możliwych do zastosowania, rozwiązań zagospodarowania komunalnych osadów ściekowych jest bardzo szeroki, obowiązujące przepisy prawne w znacznym stopniu ograniczają ten wybór. Termiczne przekształcanie osadów ściekowych zostało uznane za podstawową metodę, która według nieaktualnego już KPGO 2014, miała objąć w roku 2018 około 60% (około 424 tys. Mg s.m.) całkowitej masy tych odpadów, cel ten jednak nie został osiągnięty. Inną metodę miał stanowić recykling organiczny.

Istotne wyzwanie stanowią unijne wymogi w zakresie gospodarki osadami ściekowymi, a w szczególności wynikająca z zapisów Ramowej Dyrektywy Wodnej (2000/60/WE) przynależność Polski do strefy tzw. obszaru wrażliwego ze względu na zagrożoną eutrofizacją zlewnię Morza Bałtyckiego. Implikuje to konieczność osiągnięcia dobrego stanu wód morskich do roku 2020, do czego zobligowała się Polska w ramach przynależności do ww. strefy. Skutkować to może zatem zaostrzeniem standardów jakościowych dla biogenów, co w przełożeniu na wymagania dotyczące jakości ścieków oczyszczonych odprowadzanych do odbiorników wodnych, będzie warunkowało zwiększenie osadu „chemicznego” w masie osadów komunalnych. Postanowienia zawarte w RDW spowodowały umiędzynarodowienie problemu jakości wód i znacznie zwiększyły koszt jej ochrony, co wynika z zaostrzonych wymogów dotyczących

ich oczyszczania. Zwiększanie ochrony wód przed zanieczyszczeniem w zlewniach i dorzeczach wymaga nowych rozwiązań w zakresie oczyszczania ścieków i zagospodarowania produktów tego procesu.

Warto zwrócić uwagę na nowy paradygmat N-E-W (Nutrienty – Energia – Woda) dla przedsiębiorstw wodociągowo-kanalizacyjnych, przyjęty przez światową Federację Środowiska Wodnego (*Water Environment Federation*, WEF). Jego założenia są oparte na przekształcaniu oczyszczalni ścieków w przedsiębiorstwa ukierunkowane na odzyskiwanie zasobów. Podejście to koresponduje z koncepcją gospodarki obiegu zamkniętego. Przesłanki paradygmatu N-E-W wynikają z obserwowanych zmian klimatycznych i demograficznych, rosnącego zanieczyszczenia wód substancjami biogennymi, co powoduje przyspieszenie procesu eutrofizacji wód i narzuca konieczność realizacji zasady zrównoważonego rozwoju.

W grudniu 2015 roku Komisja Europejska ogłosiła komunikat „Zamknięcie obiegu – plan działania UE dotyczący gospodarki o obiegu zamkniętym”, w którym wyznaczono nowe kierunki działań mające na celu dużą transformację gospodarki europejskiej. W dokumencie tym podkreślono konieczność odchodzenia od tradycyjnego modelu gospodarki liniowej i zmierzanie do gospodarki obiegu zamkniętego (GOZ), w której wartość produktów, materiałów i zasobów jest zatrzymywana w obiegu tak długo, jak tylko jest to możliwe. Oczyszczalnie ścieków w świetle tego dokumentu staną się w przyszłości istotnym, a nawet kluczowym, ogniwem w realizacji postulatu domykania obiegu. Wymaga to wdrożenia innowacyjnych technologii do przetwarzania osadów ściekowych powstających w procesie oczyszczania ścieków, co wpłynie na poprawę bilansu energetycznego całej oczyszczalni i stworzy możliwości wykorzystania osadów jako surowca w innych gałęziach przemysłu. Gospodarka obiegu zamkniętego jest szansą nowego sposobu rozwiązywania problemów związanych z odpadami powstającymi w oczyszczalniach. Zbieżność gospodarki cyrkulacyjnej z paradygmatem N-E-W w gospodarce wodnej, ściekowej i osadowej jeszcze intensywniej przełoży się na poszukiwanie nowych kierunków wykorzystywania komunalnych osadów ściekowych. Pojawia się szansa na rozszerzenie tradycyjnej roli systemów wodno-ściekowych (oczyszczanie i przeróbka) o produkcję, na przykład wody, substancji biogennych czy energii.

Równie istotnym czynnikiem, z punktu widzenia potencjalnego wykorzystania osadów ściekowych, jest wpływ *Dyrektywy 86/278/EWG z dnia 12 czerwca 1986 r. w sprawie ochrony środowiska, w szczególności gleby, w przypadku wykorzystania osadów ściekowych w rolnictwie*, wprowadzającej ograniczenia w używaniu osadów ściekowych w rolnictwie. Dyrektywa ta reguluje głównie kwestie związane z dopuszczalnymi stężeniami metali ciężkich w osadach, w przypadku ich rolniczego i przyrodniczego wykorzystania. Została ona uzupełniona o tzw. *Dyrektywę Odpadową* i przeniesiona na grunt prawa krajowego. Uregulowano w niej zagadnienia dotyczące postępowania z osadami, określając warunki, jakie muszą być spełnione przy wykorzystywaniu osadów

ściekowych w rolnictwie, do rekultywacji i do uprawy roślin. Uszczegółowiono wymagania w zakresie stosowania zasady dobrej praktyki rolniczej w dostosowywaniu dawki komunalnego osadu ściekowego pod względem zawartości azotu i fosforu do potrzeb pokarmowych roślin.

Do tej pory końcowym etapem przeróbki osadów ściekowych w oczyszczalniach było ich mechaniczne odwadnianie, a następnie składowanie. Osady powstające w oczyszczalniach ścieków wymagały oczyszczania nie tylko z przyczyn prawnych, ale także higienicznych i praktycznych. Zgodnie z polityką proekologiczną, o ile to możliwe, osady po przetworzeniu powinny powracać do środowiska naturalnego. Dla średnich i małych oczyszczalni, jako kierunek zagospodarowania osadów, zalecane jest ich rolnicze wykorzystywanie. Dla dużych oczyszczalni ścieków, z uwagi na niespełnianie wymagań jakościowych osadów (nieodpowiednie właściwości fizykochemiczne i ponadnormatywne stężenia metali ciężkich), droga do ich rolniczego wykorzystania jest praktycznie zamknięta.

W zakresie regulacji gospodarki ściekowej dyrektywą operacyjną dla RDW jest *Dyrektywa z dnia 21 maja 1991 r. w sprawie oczyszczania ścieków komunalnych* (91/271/EWG z poprawką 98/15/WE). Jednym z jej głównych założeń było zapewnienie 75% redukcji związków azotu i fosforu ogólnego, pochodzących ze źródeł komunalnych na terenie Polski i odprowadzanych do wód. Skutkiem tego zapisu jest konieczność budowy nowych sieci kanalizacyjnych, a także budowa nowych oraz modernizacja istniejących oczyszczalni ścieków, co bezpośrednio przyczyni się do wzrostu strumienia masy produkowanych osadów. Najistotniejsze z punktu widzenia gospodarki osadowej są jednak zapisy zawarte w art. 14 *Dyrektywy*, nakazujące przetwarzanie osadów ściekowych. Warto zwrócić uwagę na energetyczne wykorzystanie osadów ściekowych. *Dyrektywa 2010/75/UE z dnia 24 listopada 2010 r. o emisjach przemysłowych* jest nową regulacją w zakresie emisji zanieczyszczeń z instalacji energetycznych, w tym z instalacji termicznego przekształcania odpadów i osadów. *Dyrektywa*, przez zaostrożenie norm emisyjnych, dodatkowo podkreśla rolę OZE w gospodarce osadowej, co może sprzyjać rozwojowi zaawansowanych metod ich przetwarzania. Ważnymi dokumentami stanowiącymi uzupełnienie *Dyrektyw* są między innymi wytyczne BAT WTI i BAT WI. Dokumenty te wskazują promowane kierunki rozwoju w dziedzinie gospodarki osadami ściekowymi i charakteryzują najlepsze dostępne techniki zarówno w zakresie recyklingu organicznego, jak i termicznych metod ich zagospodarowania.

Duży wpływ na wspólnotową politykę odpadową mają również regulacje wspierające odnawialne źródła energii, produkowane między innymi z odpadów, które zakładają, że w roku 2020 ze źródeł odnawialnych będzie pochodzić 20% energii i 10% paliw w sektorze transportu.

Szczególnie istotną regulacją w zakresie OZE dla operatorów oczyszczalni ścieków jest zaktualizowany projekt polityki energetycznej Polski pn. *Polityka energetyczna Polski do 2040 r.* Głównymi celami prowadzonej polityki energe-

tycznej w obszarze mogącym mieć wpływ na gospodarkę osadową są: wzrost udziału odnawialnych źródeł energii w finalnym zużyciu energii, co najmniej do 15% w roku 2020, osiągnięcie w tym samym roku 10% udziału biopaliw w rynku paliw transportowych wraz ze zwiększeniem wykorzystania biopaliw II generacji, ochrona lasów przed nadmiernym eksploataowaniem w celu pozyskania biomasy i zrównoważone wykorzystanie obszarów rolniczych na cele OZE, a także zwiększenie stopnia dywersyfikacji źródeł dostawy oraz stworzenie optymalnych warunków do rozwoju energetyki rozproszonej, opartej na lokalnie dostępnych surowcach. Komunalne osady ściekowe, zgodnie z polskimi regulacjami prawnymi (*Ustawa z dnia 20 lutego 2015 r. o odnawialnych źródłach energii*), klasyfikowane są jako jedna z form biomasy, która może zostać wykorzystana między innymi w instalacjach służących do termicznego przekształcania odpadów. Instalacje te definiowane są jako instalacje odnawialnych źródeł energii, będące spalarnią odpadów lub współspalarnią odpadów, w której część wytwarzanej energii elektrycznej i ciepła pochodzi z ulegającej biodegradacji części odpadów przemysłowych lub komunalnych, pochodzenia roślinnego lub zwierzęcego, w tym odpadów z instalacji do przetwarzania odpadów oraz odpadów z uzdatniania wody i oczyszczania ścieków, w szczególności osadów ściekowych, zgodnie z przepisami o odpadach w zakresie kwalifikowania części energii odzyskanej z termicznego przekształcania odpadów.

Kierunki wykorzystania osadów ściekowych zawarte w regulacjach prawnych i dokumentach programowych są również przedmiotem prac badawczych. Przegląd literatury przedmiotu pod kątem kierunków badań związanych z zagospodarowaniem osadów ściekowych, wskazuje na działania zmierzające do redukcji ilości węgla w osadach ściekowych z wykorzystaniem metod fizycznych (mechanicznych i termicznych) (Budzianowski, 2016), chemicznych (Xiao i in., 2016) i biologicznych (Zhu i in., 2016; Kurahashi i in., 2017). Prezentowane są również (Joo i in., 2015) metody obróbki wstępnej osadów, nie tylko w celu zminimalizowania ich ilości, ale również w celu usunięcia substancji niebezpiecznych. Działania te mają zwiększać efektywność gospodarki osadami ściekowymi. Odrębnym zagadnieniem jest unieszkodliwianie nierozpuszczonych i/lub wchłoniętych zanieczyszczeń znajdujących się w osadach ściekowych. W pracy Menga i innych (2016) wskazano szczególnie na substancje chemiczne zaburzające gospodarkę hormonalną oraz produkty farmaceutyczne i higieny osobistej, w tym estry, pochodne parafin, silikonu, związków anionowych, związków fluoropochodnych oraz nanocząsteczek metali/tlenków metali.

Badania koncentrują się obecnie na przetwarzaniu przyrastającej ilości osadów ściekowych i związanym z tym zagrożeniem. Wynikiem badań nad gospodarką ściekową i osadową są innowacyjne rozwiązania dotyczące między innymi obróbki osadów ściekowych wraz z modelowaniem i optymalizacją procesów, odzysk węgla, fosforu, azotu i energii oraz ich ponowne wykorzystanie.

1.5. Podsumowanie

Projektowanie i wprowadzanie zrównoważonych działań do gospodarki wodno-ściekowej dotyczy zaopatrzenia w wodę pitną, efektywnego oczyszczania ścieków i zagospodarowania osadów ściekowych. Coraz więcej wagi przywiązuje się do przekształcania systemów oczyszczania ścieków w nowoczesne i innowacyjne systemy uwzględniające ponowne wykorzystanie osadów ściekowych. Przyjęcie założenia, że ścieki i osady ściekowe są źródłem cennych substancji i energii, stworzyło nowe perspektywy środowiskowe i ekonomiczne oraz stało się bodźcem do opracowania i wdrożenia wielu innowacyjnych rozwiązań wymagających zapewnienia spójności i integracji systemów zaopatrzenia w wodę, oczyszczania ścieków i przeróbki osadów ściekowych już na poziomie ogólnych koncepcji. Zagospodarowanie osadów ściekowych jest nie bez znaczenia dla wypełnienia rekomendacji w zakresie gospodarki obiegu zamkniętego. Odzysk substancji biogennych, szczególnie fosforu, z osadów ściekowych, który nabiera znaczenia z uwagi na zmniejszającą się dostępność zasobów i wzrost zapotrzebowania na te surowce w produkcji rolnej, to główna siła napędowa rozwoju i aplikacji nowych technologii. Tym bardziej, że wiele istniejących instalacji do przetwarzania osadów ściekowych nie gwarantuje pełnego zagospodarowania osadów i nie wpisuje się w aktualne trendy i wyzwania.

Rozwój innowacyjnych rozwiązań wynika przede wszystkim z zaostrzenia prawa unijnego i krajowego, a zwłaszcza z ograniczeń związanych ze składowaniem osadów ściekowych (posiadających zawartość ogólnego węgla organicznego powyżej 5%) na składowiskach odpadów, czy rozszerzenia zakresu ochrony wód przed zanieczyszczeniem, ujętego w Ramowej Dyrektywie Wodnej i Dyrektywie Morskiej. Nowe standardy pozytywnie wpływają na rozwój i stopniowo prowadzą do tworzenia krajowego i regionalnego systemu unieszkodliwiania i zagospodarowania komunalnych osadów ściekowych, który może zintegrować innowacyjne technologie i pozwoli na osiągnięcie korzyści ekonomicznych z procesów wykorzystywania osadów.

ROZWÓJ GOSPODARKI OSADOWEJ W ŚWIETLE KRAJOWYCH REGULACJI PRAWNYCH I NOWOCZESNYCH ROZWIĄZAŃ TECHNOLOGICZNYCH

2.1. Wprowadzenie

Wprowadzane przez Unię Europejską regulacje (dyrektywy: 86/278/EEC, 98/15/EC, 99/31/EC) wymuszają poszukiwanie nowych i efektywniejszych rozwiązań usuwania i zagospodarowania osadów ściekowych. Ze względu na rosnącą ilość tych osadów w Polsce i wymagania związane z wdrażaniem Ramowej Dyrektywy Wodnej opracowuje się i wdraża nowoczesne instalacje. Wykorzystywanie wysokoefektywnych metod oczyszczania ścieków powoduje wytwarzanie znacznych ilości osadów ściekowych, które muszą zostać w odpowiedni sposób zagospodarowane (Bień, 2012). Procesy zagospodarowania osadów ściekowych to głównie procesy biologiczne, chemiczne i termiczne (tab. 3). Pod pojęciem biologicznego kierunku zagospodarowania odpadów rozumie się metody obejmujące procesy biologiczne związane z recyklingiem organicznym. Termiczne zagospodarowanie osadów ściekowych związane jest z wykorzystaniem osadów w celu pozyskania z nich energii cieplnej – tzw. recykling materiałowy i energetyczny (Wójtowicz, 2014). Znajduje to swoje odzwierciedlenie w Krajowym programie gospodarki odpadami, który do roku 2020 przewiduje między innymi:

- termiczne przekształcanie,
- wykorzystywanie do rekultywacji,
- produkcję kompostu,
- wykorzystywanie rolnicze i przyrodnicze.

Tabela 3. Metody zagospodarowania osadów ściekowych

Wykorzystanie przyrodnicze	Metody termiczne	Składowanie	Inne wykorzystanie
Nawożenie użytków rolnych	spalanie	składowiska jednorodne	produkcja biogazu
Rekultywacja gruntów bezglebowych	współspalanie	składowanie z innymi odpadami	produkcja mas plastycznych z osadu czynnego
Zestalenie roślin z podłożem	procesy alternatywne: piroliza, zgazowanie, nityfikacja	składowiska specjalne	produkcja kruszyw lekkich z odpadów
Produkcja kompostu			produkcja dodatku mineralnego do betonu

Źródło: Bień, 2007; Niemiec, Sobolewska i Jasiński, 2007; Góralczyk i Kukielska 2009; Kosior-Kazberuk, 2011; GUS, 2000–2010.

Wśród wymienionych głównych kierunków zagospodarowania osadów ściekowych dominującą rolę odgrywają metody termiczne.

Głównych przyczyn preferowania metod termicznych upatruje się w pewnych ograniczeniach związanych z możliwością rolniczego wykorzystania osadów ściekowych i brakiem możliwości ich składowania (Bień, 2012). Metody zagospodarowania osadów ściekowych z wykorzystaniem etapu stabilizacji termicznej uzyskują przewagę nad niskotemperaturowymi procesami dzięki osiąganemu przy ich stosowaniu, wysokiemu stopniowi zmineralizowania osadów (Donatello i Cheeseman, 2013). Ze względu na charakter regionu i lokalizację oczyszczalni w Rybniku-Orzepowicach, jako docelowe kierunki do dalszej analizy rozwiązań technologicznych, wskazano metody termiczne.

2.2. Suszenie termiczne osadu

Wykorzystanie osadów ściekowych jako źródła energii wymaga najpierw poddania ich procesowi suszenia. Zaletą suszenia termicznego jest zmniejszenie objętości osadu, co z kolei wpływa na dobre właściwości transportowe osuszonych osadów, istotne z punktu widzenia ekonomicznego. Jeśli zawartość suchej masy w nieosuszonym osadzie wynosi 25%, a w osuszonym metodą termiczną 95%, masa osadu zmniejsza się o około 73,7% w porównaniu z masą pierwotną. Ponadto działanie wysokiej temperatury stabilizuje i higienizuje osad. Gazy odlotowe i odparowaną wodę można dodatkowo przefiltrować, co ma istotne znaczenie z ekologicznego punktu widzenia. Główną wadą suszenia termicznego jest energochłonność i wysokie koszty związane z budową linii technologicznej, zatem najczęściej jest ono stosowane w dużych oczyszczalniach (Fieducik i Gawroński, 2010). Kosztocłonność procesu związana jest z koniecznością odparowywania wody z osadu poddawanego suszeniu, zatem ważne jest jego wstępne odwodnienie (Skalmowski, 2006) do co najmniej 20% s.m.o. (Heidrich i Witkowski, 2010). Energochłonność suszenia wynika z wysokiego ciepła parowania wody, które dla temperatury 20°C przyjmuje wartość 2454 kJ/kg odparowanej wody (Wawrzyniak, 2011). Ważne jest, aby bilans cieplny był dodatni, czyli aby energia uzyskana w wyniku termicznego przekształcania osadów, była większa od włożonej w proces suszenia (Szczygieł, 2004). Źródłem energii dla procesów suszenia termicznego mogą być: biogaz, para, gaz ziemny, olej opałowy lub jakiegokolwiek źródło ciepła zewnętrznego (Malej, 2004). Zaleca się zatem ulokowanie instalacji do suszenia termicznego w miejscu, gdzie można pozyskać tanią energię cieplną. W procesie tym dobrze jest wykorzystywać nadmiar energii cieplnej pochodzącej z instalacji do fermentacji beztlenowej bądź spalarni odpadów, lokalnych sieci ciepłowniczych lub pobliskich szklarni. Z punktu widzenia ochrony środowiska stosowanie paliw kopalnych do suszenia nie jest zalecane. Proces spalania materiału o zawartości suchej masy przekraczającej 50% jest samowystarczalny (autotermiczny).

Suszenie osadów nie wymaga zazwyczaj stosowania chemikaliów. Proces ten nie wymaga także dodatkowej ingerencji personelu. Jednak jego operatorzy

powinni posiadać umiejętności i specjalne kompetencje w zakresie procesów termicznych i czynności konserwacyjnych prowadzonych w strefach zagrożenia wybuchem, które wykraczają poza uregulowany zakres pracy oczyszczalni ścieków (projekt PURE, 2012 r.).

Od strony technicznej prowadzenia procesu można wyróżnić suszenie całkowite, kiedy zawartość suchej masy osadu wynosi 90–92%, suszenie częściowe, kiedy dopuszczalna zawartość s.m.o. jest niższa niż 80%, ale nie mniejsza niż 50–65% s.m.o. (Górski i Zabawa, 2008). Całkowicie osuszony produkt ma postać pyłu lub granulek. Pył zwykle kierowany jest bezpośrednio do spalania, zaś osad granulowany jest gromadzony w celu jego dalszej dystrybucji (transportu). Osad granulowany można wykorzystać w rolnictwie jako nawóz. Zawartość suchej masy rzędu 85–90% predestynuje go do przechowywania w silosach lub dużych workach. W przypadku stosowania produktu jako paliwa zawartość suchej masy ustalana jest w zależności od potrzeb. Minimalna zawartość suchej masy w materiale przeznaczonym do spalania, bez udziału dodatkowego paliwa, wynosi 45–60%. Stosowanie tej technologii wiąże się jednak z pewnymi trudnościami. Jedną z nich jest unoszenie się w powietrzu pyłu podczas pracy z produktem, wymagane jest więc użycie sprzętu ochrony osobistej. Ponieważ istnieje ryzyko wybuchu pyłu, konieczne jest również stosowanie środków ochrony przeciwwybuchowej. Zagrożenie wybuchem może także występować podczas jego transportu i przechowywania. Unoszący się w powietrzu pył organiczny może także ulec nagłemu zapłonowi w obecności ognia. Podczas suszenia do atmosfery emitowane są pyły, wydziela się też odór, co wpływa niekorzystnie na środowisko. Emisję pyłów można skutecznie zredukować przy użyciu filtrów do gazów spalinowych, natomiast odory (gazy złowonne) – za pomocą płuczek gazowych (Janosz-Rajczyk, 2004; Dobre praktyki, 2012).

Suszenie termiczne zwiększa wartość opałową osadu, dzięki czemu można go wykorzystać w sposób bardziej efektywny do produkcji energii.

2.3. Spalanie i współspalanie

Spalanie odpadów jest najbardziej radykalnym procesem ich przeróbki, pozwalającym na dużą redukcję masy i objętości. Istnieje także możliwość jednoczesnego odzysku energii. Metoda ta może być stosowana zarówno w przypadku osadów ściekowych, jak i innych odpadów ulegających biodegradacji. Według Heidricha i Witkowskiego (2010) spalanie to utlenianie związków organicznych do CO_2 i H_2O , którego celem jest zmniejszenie objętości produkowanych osadów. Metoda wykorzystywana jest tam, gdzie nie można rolniczo wykorzystać osadów ściekowych z powodu chociażby wysokiej zawartości stężeń metali ciężkich (Gluzińska, 2009).

Rolą technologii monospalania jest proste niszczenie osadu. Ilość odzyskanej energii związana jest bezpośrednio ze stopniem odwodnienia osadów. Obecność wody w osadach ściekowych powoduje, że mimo kaloryczności zbliżonej do kaloryczności węgla brunatnego, temperatura spalania 700–900°C jest o wiele

niższa od temperatury spalania węgla wynoszącej 1500–1700°C. Część energii uzyskanej na drodze spalania osadów jest zatem wykorzystywana do jej odparowania (Donatello i Cheeseman, 2013). Możliwe jest ograniczenie zużycia energii nawet o połowę, gdy produkt wyjściowy zamiast 77% wag. zawiera 65% wag. H₂O (Gil-Lalaguna i in., 2014). Wcześniejsze przeprowadzanie procesu fermentacji beztlenowej z odzyskiem biogazu również skutkuje obniżeniem kaloryczności osadów ściekowych, przez co spopielenie osadów ściekowych może wiązać się z pewnymi problemami. W przypadku niskiego stopnia odwodnienia osadów proces utylizacji termicznej może nie odbyć się autotermicznie, przez co konieczne okazuje się dodawanie innych mediów palnych do procesu (metan lub olej opałowy) (Samolada i Zabaniotou, 2014). Technologia możliwa do zastosowania w przypadku monospalania związana jest ze stosowaniem kotłów fluidalnych, które mogą również być wykorzystane podczas współspalania. Kotły fluidalne znajdują swoje zastosowanie podczas spalania wilgotnych, maziowatych odpadów. Reakcja zachodząca w złożu fluidalnym jest niezwykle szybka i zupełna (odpady spalane są równocześnie w całej objętości wsadu). Metoda ta, przy odpowiednio osuszonych osadach, pozwala na odzysk ciepła nawet z odpadów o bardzo niskiej wartości opałowej i ograniczenie zużycia paliwa. Kotły wymagają jednak stałego dostarczania piasku ze względu na redukcję jego ilości podczas procesów spalania (Dobre praktyki, 2012).

Współspalanie może zachodzić ze stałymi odpadami komunalnymi, co obniża koszty inwestycyjne związane z produkcją ciepła potrzebnego do odparowania wody z osadów ściekowych i nadwyżek ciepła do tworzenia pary, a także wspomaga spalanie odpadów i osadów (Heidrich i Witkowski 2010). Spalając osady w kotłowniach węglowych uzyskuje się dobre warunki do likwidacji składników organicznych znajdujących się w tych odpadach, a także wykorzystania ich zasobów energetycznych (Heidrich i Witkowski, 2010). Współspalanie odbywa się także w piecach cementowych i jest bezpiecznym sposobem spalania różnych odpadów organicznych (Zarzycki i Wielgościński, 2003).

Udział osadów w procesie współspalania wynosi standardowo 5–15%. W mieszaninie paliw musi on być nie większy niż 20% wag., jeśli zastosowany został piec z paleniskiem rusztowym (Wielgościński i Pająk, 2003). Kocioł ten znajduje swoje zastosowanie jedynie w przypadku metody współspalania.

Jeżeli wartość opałowa odpadów komunalnych jest odpowiednio wysoka, istnieje możliwość wykorzystania części strumienia ciepła z procesu spalania odpadów komunalnych do osuszania osadów. Ponadto w dużym stopniu wykorzystywana jest infrastruktura spalarni odpadów dla realizacji procesu spalania osadów, na przykład wspólny węzeł oczyszczania spalin, odżuźlacz, składowanie i przerób żużla i popiołów (Pająk i Wielgościński, 2003).

Koszty inwestycyjne prostego monospalania są niższe niż współspalania, przy czym koszty operacyjne są tu znacznie wyższe z uwagi na konieczność stosowania paliwa pomocniczego i brak dochodów ze sprzedaży energii cieplnej i elektrycznej.

Liczba i całkowita wydajność monospalarni działających w regionie Morza Bałtyckiego są znacznie niższe od analogicznych danych dotyczących współspalarni. Proces monospalania sprzyja w większym stopniu odzyskowi fosforu, ponieważ wytwarzany w nim popiół zawiera ten pierwiastek i jest mniej zanieczyszczony metalami ciężkimi w porównaniu z popiołem powstającym w procesie współspalania. Zawartość metali ciężkich lub innych zanieczyszczeń obojętnych w popiele powstałym w procesie spalania zależy od ich zawartości w osadach.

2.4. Piroliza niskotemperaturowa i piroliza wysokotemperaturowa (zgazowanie)

Piroliza, jak wynika z definicji, jest procesem degradacji (rozkładu) cząsteczki związku chemicznego pod wpływem dostatecznie wysokiej temperatury (300–1100°C) (Wandrasz i Wandrasz, 2006). Zachodzi w środowisku beztlenowym, przy braku obecności innych czynników utleniających (Kim i Parker, 2008; Pikoń i Rejman, 2009). Jak wyżej wspomniano, jest procesem endotermicznym, czyli wymagającym nakładu energii cieplnej z zewnątrz (Żmuda, Budzyń i Tora, 2006). Może być procesem samodzielnym lub być jednym z etapów procesu zgazowania czy spalania (Piechocki, Sołowiej i Neugebauer, 2010). Technologia pirolizy wydaje się być obiecującym i stosunkowo tanim procesem termicznego przekształcania osadów ściekowych na tle pozostałych metod termicznych (Klein i in., 2011), dzięki możliwości uzyskania użytecznych substancji chemicznych i paliw oraz ze względu na kogeneracyjną produkcję energii elektrycznej i cieplnej. W wyniku pirolizy osadów ściekowych powstają głównie: frakcja gazowa, której głównymi składnikami są: H_2 , CH_4 , CO i CO_2 , frakcja stała, stanowiąca tzw. koks pirolityczny i frakcja ciekła, złożona głównie ze smół i olejów oraz wody (Ocena możliwości, 2004). Proporcje między poszczególnymi składnikami zależą przede wszystkim od temperatury i ciśnienia procesu.

Uzyskiwana w trakcie procesu frakcja gazowa może być wykorzystywana do pozyskiwania energii użytkowej, natomiast frakcja ciekła jako surowiec wtórny, może być stosowana w przemyśle chemicznym i petrochemicznym (Wzorek, 2008).

Dużą zaletą pirolizy jest większa niż w przypadku spalania łatwość transportowania produktu wyjściowego.

W zależności od wysokości temperatury procesu wyróżnia się pirolizę niskotemperaturową (400–550°C) i wysokotemperaturową (600–1100°C) (Borkowski, 2012). W przypadku, gdy piroliza prowadzi do rozkładu substancji stałych, proces nazywany jest odgazowaniem, natomiast w przypadku pirolizy paliw ciekłych, proces nazywa się krakingiem (Pikoń i Rejman, 2009). W zależności od szybkości przyrostu temperatury w trakcie procesu rozróżnia się pirolizę powolną (od kilku do kilkunastu kelwinów na minutę) i szybkościową (od kilkudziesięciu do nawet kilkudziesięciu tysięcy kelwinów na minutę) (Pikoń i Rejman, 2009).

Dużą zaletą procesu pirolizy jest możliwość zorientowania go na maksymalny uzysk jednego z trzech produktów stanowiących potencjalne paliwo: karbo-nizatu, oleju lub gazu, przez dobór i sterowanie parametrami przebiegu pirolizy. Do parametrów tych należą: rodzaj wsadu, szybkość nagrzewania wsadu, temperatura pracy reaktora, czas przebywania par w reaktorze. Przy niższej temperaturze (300–500°C) uzyskuje się więcej produktów płynnych, natomiast przy wyższej (500–900°C) powstaje większa ilość produktów gazowych.

Do tej pory przeprowadzono wiele analiz wpływu temperatury na proces pirolizy. W badaniu przeprowadzonym przez Yana i innych (2005) procesowi pirolizy niskotemperaturowej poddano mieszaninę odpadów pochodzących z gospodarstw domowych (gumy, warzywa, PCV, PE, tkaniny, papier, ryż, łuski owoców, wióry drewna). Wydajność w postaci produkcji frakcji gazowej stopniowo wzrastała wraz ze wzrostem temperatury w całym badanym zakresie (300–700°C). Natomiast wydajność produkcji frakcji ciekłej rosła wraz ze wzrostem temperatury, osiągając maksymalną wielkość w 550°C, a po przekroczeniu tej wartości malała. Wykorzystanie procesu pirolizy do neutralizacji odpadów i osadów ściekowych jest przedmiotem badań naukowych i pozostaje we wczesnej fazie rozwoju, w porównaniu do innych technologii rozkładu termicznego. Werle i Wilk (2010) wykazali, że piroliza jest jedną z technologii pozwalających na unieszkodliwianie osadów ściekowych i odzysk cennych surowców.

Piroliza niskotemperaturowa – Oil From Sludge

Do neutralizacji osadów ściekowych w niskiej temperaturze może być wykorzystywana na przykład technologia Oil From Sludge, w której procesowi pirolizy (temperatura 450°C; ciśnienie atmosferyczne) poddawany jest osad ściekowy o zawartości 95% suchej masy przez okres dłuższy niż 30 min. W wyniku tego procesu otrzymuje się węglowodory, koks pirolityczny, a także ciecz węglowodorową, która może być wykorzystywana między innymi jako surowiec w przemyśle petrochemicznym.

W przypadku pirolizy osadu ściekowego z zastosowaniem technologii Carvera-Greenfielda otrzymuje się paliwo stałe i frakcję ciekłą, która zwracana jest do układu. Proces ten daje jednocześnie możliwość suszenia osadów przed podaniem ich do spalania czy zgazowania. Istotą procesu jest mieszanie surowych osadów z olejem odpadowym (np. silnikowym). Mieszaną taką poddaje się dalszej obróbce w systemie wyparnym w celu odparowania wody. Po osuszeniu szlam podaje się do wirówki celem oddzielenia fazy ciekłej od cząstek stałych. W efekcie uzyskuje się paliwo stałe i fazę ciekłą zwracaną do układu (Werle i Wilk, 2010).

Piroliza wysokotemperaturowa (zgazowanie osadów)

Piroliza wysokotemperaturowa nazywana jest zgazowaniem i polega na termiczno-chemicznej konwersji stałej lub ciekłej substancji organicznej do gazu o określonej wartości kalorycznej. Oprócz gazu palnego powstają substancje

ciekłe i smoliste oraz stałe (koksik, żużel). Proces ten prowadzony jest w warunkach niedomiaru tlenu, przy udziale czynnika zgazowującego, którym może być powietrze czy para wodna. Od rodzaju zastosowanego czynnika zgazowującego zależy skład i wartość opała otrzymanego gazu.

W zależności od zastosowanego czynnika zgazowującego proces zgazowania można określić jako bezpośredni lub pośredni. Bezpośrednie zgazowanie zachodzi, gdy czynnik zgazowujący jest częściowo wykorzystywany do utleniania materiału wsadowego. Energia uzyskana w wyniku reakcji utleniania pozwala na utrzymanie temperatury procesu. Proces pośredniego zgazowania wymaga doprowadzenia zewnętrznego źródła energii i zachodzi w obecności pary wodnej jako czynnika zgazującego. Częstość stosowania pary wodnej wynika nie tylko z łatwości jej wytwarzania, ale także z pozytywnego wpływu na podwyższenie zawartości wodoru w otrzymany gazie.

Zastosowanie zgazowania jako metody termicznej utylizacji osadów ściekowych jest stosunkowo nową metodą, będącą na etapie badań i opracowywania rozwiązań technologicznych, co ogranicza powszechność jej stosowania. Cieszy się jednak udanym wdrożeniem, na przykład w mechaniczno-biologicznej oczyszczalni ścieków w Balingen (Niemcy) oczyszczającej ponad 10 mln m³ ścieków rocznie. Gaz poddawany procesowi oczyszczania i następnie kierowany do turbiny gazowej w tej oczyszczalni wytwarza energię elektryczną o mocy 70 kW i energię cieplną o mocy 140 kW, zaspokajając tym samym potrzeby oczyszczalni. Powstały stały produkt zgazowania, posiadający gruzełkową strukturę, jest całkowicie inertny i suchy. Produkt ten spełnia niemieckie normy dotyczące stosowania go do produkcji asfaltu. W procesie tym możliwy jest również odzysk cennego surowca, jakim jest fosfor. Instalacja spełnia niemieckie normy dotyczące wprowadzanych do atmosfery substancji gazowych i stanowi uzasadniony ekonomicznie sposób postępowania z coraz większą ilością osadów ściekowych (Bień, Szymanek i Bień, 2011).

Analiza technologii pirolizy i zgazowania osadów ściekowych pod kątem jej przydatności do produkcji energii elektrycznej i cieplnej z wykorzystaniem metody oceny cyklu życia (ang. *Life Cycle Assessment*) wykazała, że technologia ta jest znacznie bardziej korzystna dla środowiska w porównaniu z innymi technologiami spalania odpadów (Zaman, 2013). Dużą jej zaletą jest zdecydowanie większa produkcja energii elektrycznej i cieplnej niż w procesie spalania. Technologia pirolizy, połączona z procesem zgazowania, jest według Zamana (2013) nowoczesną metodą produkcji energii podczas procesu utylizacji odpadów w Szwecji.

Według Fontsa i innych (2012) piroliza osadów ściekowych jako proces produkcji ciekłego paliwa jest obecnie przedmiotem wielu badań naukowych. Przeprowadzona analiza wykazała, że wartość temperatury w zakresie 450–550°C potwierdza wydajność frakcji ciekłej. Udowodniono także, że faza organiczna tego procesu może zostać wykorzystana do produkcji paliwa samodzielnie lub przez zmieszanie z olejem napędowym lub biodieslem.

Badania możliwości otrzymania biooleju z procesu pirolizy osadów ściekowych przeprowadzone przez Kima i Parkera (2008) wykazały, że wartość ekonomiczna oleju produkowanego z osadów pierwotnych wynosi 0,099 USD/kg s.m. Powstające produkty gazowe sprężane są w kompresorach jako nośniki energii. W niektórych technologiach część otrzymywanego gazu jest wykorzystywana do kontynuowania procesu pirolizy, podczas gdy pozostała część jest przetwarzana na energię elektryczną (Żmuda, Budzyń i Tora, 2006). Połączenie procesu pirolizy z procesem zgazowania ma coraz większe znaczenie dla przemysłu ze względu na dobre efekty ekologiczne i wysokie efekty ekonomiczne, bowiem uzyskane w procesie utylizacji półprodukty mogą zostać wykorzystane w przemyśle rafineryjno-petrochemicznym i elektrociepłowniczym. Na szczególną uwagę zasługuje fakt, że proces pirolizy, połączony z procesem zgazowania, wykazuje większy stopień wykorzystania materiałowego w porównaniu do innych technologii (Kotowski i Konopka, 2008).

2.5. Witryfikacja osadów ściekowych

Metody termiczne, w tym nitryfikacja, cieszą się popularnością ze względów biologicznych, ponieważ umożliwiają higienizację odpadu. Nie rozwiązują jednak problemu występowania w osadach ściekowych zanieczyszczeń, takich jak metale ciężkie. Jednym ze skuteczniejszych sposobów ich unieszkodliwiania wydaje się być proces witryfikacji, czyli zeszkliwania. Witryfikacja jest innowacyjnym rozwiązaniem umożliwiającym kompleksowe zagospodarowanie osadów ściekowych. Wysoka temperatura procesu (ponad 1300°C) zapewnia eliminację związków organicznych, co znacząco redukuje także ilość spalin i gwarantuje całkowite rozpuszczenie frakcji nieorganicznych, które w efekcie zostają przekształcone do postaci szkła budowlanego. Zeszkliwienie (witryfikacja) polega na wytworzeniu nieprzepuszczalnej, trwałej i szklistej struktury w wyniku podgrzania substancji do stanu półpłynnego, a następnie szybkiego jej schłodzenia. Składniki substancji, jak wspomniane związki metali ciężkich, są szczelnie zamykane wewnątrz tej struktury, co uniemożliwia ich migrację do otoczenia. Substancje niebezpieczne są unieszkodliwiane zarówno przez wiązanie cząsteczek w strukturze krystalicznej szkliva, jak i przez hermetyzację (Bingham i Hand, 2006).

Witryfikacja wymaga dostarczenia dużej ilości energii cieplnej i zastosowania specjalnych instalacji grzewczych. Jednak przy stapianiu odpadów organicznych znajdujących się w osadach ściekowych, duże zapotrzebowanie na energię cieplną występuje tylko w początkowej fazie procesu. W czasie trwania procesu spalania dostarczane w osadach składniki organiczne są nośnikiem energii podtrzymującym wysoką temperaturę (Uzunow i Mazela, 2008). Tym samym zapotrzebowanie na energię z zewnątrz spada, co obniża koszty eksploatacji urządzenia i całego procesu. Badania (Uzunow i Mazela, 2008) potwierdzają

możliwość zeszkliwania osadów ściekowych, odpadów krzemionki i odpadowego szkła, w temperaturach znacznie niższych niż dotychczas stosowane w procesach witrafikacji (1600°C) i procesach spalania osadów ściekowych w cementowniach (1400°C). Proces witrafikacji może odbywać się z wykorzystaniem instalacji jednostopniowych lub dwustopniowych. Jeśli proces jest jednostopniowy wtedy, w specjalnych tyglach grzewczych, nagrzewa się substancję do temperatury 1300–1450°C, dzięki czemu dochodzi do częściowego upłynnienia odpadów. Następnie kontynuuje się wygrzewanie do momentu zakończenia procesu migracji składników. W tej instalacji niezbędne jest dodanie, spełniającego funkcję topnika, rozdrobnionego szkła. Dodanie topnika umożliwia doprowadzenie mieszanki do postaci półpłynnej pasty. Jeśli proces odbywa się dwustopniowo, poszczególne etapy nagrzewania i wygrzewania substancji odbywają się w różnych urządzeniach. Metoda ta służy także do zeszkliwienia odpadów niebezpiecznych, czy trudnych do przetopienia, na przykład odpadów medycznych, azbestu, żużli itp. (Colombo i in., 2003; Kordylewski, Zacharczuk i Kasprzyk, 2003; Sobiecka i Sroczyński, 2011). Produktem witrafikacji osadów ściekowych jest także kruszywo, które można stosować między innymi w budownictwie, a także do produkcji spieków ceramicznych, takich jak dachówki czy kształtki. Prowadzone na świecie i w kraju badania potwierdziły hipotezę, że osady ściekowe mogą być wykorzystane jako surowiec spęczniający do produkcji kruszywa lekkiego. Badania te obejmowały także pomiary poziomu emisji zanieczyszczeń gazowych emitowanych w trakcie wypalania osadu ściekowego, gliny oraz mieszanki glinowo-osadowej. Wykazały, że udział gliny w mieszance surowcowej wpłynął na zmniejszenie poziomu emisji zanieczyszczeń, takich jak: CO, CO₂, NO, SO₂, H₂S, C_xH_y. Sposób utylizacji osadów ściekowych za pomocą tej metody jest bezodpadowy, gdyż popiół z osadów, zawierający także metale ciężkie, wbudowuje się w strukturę spieku ceramicznego. Gazy odlotowe uwalniające się z rozkładu materii organicznej osadów wspomagają pęcznienie surowca glinowego. Po uwolnieniu się poza strukturę spieku podlegają spalaniu w wysokiej temperaturze w atmosferze pieca.

2.6. Hydroliza termiczna – proces Cambi

Hydroliza termiczna jest metodą obróbki osadu przed skierowaniem go do zamkniętych komór fermentacyjnych, w których na drodze fermentacji mezofilowej, uzyskiwany jest metan. Hydroliza termiczna osadu (ang. *thermal hydrolysis process*, THP) w technologii norweskiej firmy Cambi, jest nowoczesnym stosowanym w praktyce procesem dezintegracji.

Po wstępnym odwodnieniu na wirówce osad kierowany jest przez silos do zbiornika mieszającego, skąd podawany jest naprzemiennie do zbiorników reaktorów. Osad wstępnie podgrzany do 97°C w zbiorniku mieszającym, w reaktorach jest poddawany działaniu pary o temperaturze około 165°C

i ciśnieniu 6 bar przez około 25 min, a następnie poddawany gwałtownemu obniżeniu ciśnienia (Cambi, 2019). Wysoka temperatura i ciśnienie powodują rozkład błon komórkowych i uwolnienie materii wewnątrzkomórkowej do cieczy procesowej, która staje się łatwo przyswajalną pożywką dla bakterii metanogennych (Świsłowski i Kalinichenko, 2015). Dzięki hydrolizie w procesie fermentacji uzyskuje się o wiele wyższy niż w tradycyjnych instalacjach współczynnik transformacji lotnych substancji organicznych w metan. Z reaktorów, przez zbiornik uwalniania, zhydrolizowany osad po schłodzeniu do temperatury 37°C podawany jest do zamkniętych komór fermentacyjnych. Dzięki hydrolizie termicznej zwiększa się zdolność osadów do odwodnienia po fermentacji, następuje znaczne zmniejszenie masy osadów stanowiących odpad w procesie oczyszczania ścieków o 40–50% i zwiększa się ilość wytwarzanego biogazu również o 40–50%, dodatkowo proces działa sterylizująco (IGWP, 2019).

W podsumowaniu można stwierdzić, że instalacja THP Cambi, łącząca procesy hydrolizy termicznej, dezintegracji struktur i sterylizacji osadów, umożliwia:

- zmniejszenie zawartości związków organicznych w osadzie,
- otrzymanie maksymalnej ilości biogazu (odzysk energii),
- usunięcie związków złowonnych,
- poprawę odwadnialności osadów po fermentacji,
- uzyskanie osadu sterylizowanego w 100% (całkowite usunięcie patogenów w formach wegetatywnych i przetrwalnikowych).

Wielofunkcyjność procesu THP i osiągnięte w skali technicznej efekty w wielu instalacjach na świecie mogą być również zastosowane w oczyszczalni ścieków w Rybniku-Orzepowicach. Instalacja hydrolizy termicznej Cambi, jako część procesu gospodarki osadowej w oczyszczalni ścieków, może być stosowana do przeróbki osadu wstępnego zmieszanego z nadmiernym osadem czynnym lub samego osadu czynnego nadmiernego. THP Cambi jest zawsze zintegrowana z procesem fermentacji metanowej i zwykle instaluje się ją przed zamkniętymi komorami fermentacyjnymi, co w przypadku wprowadzenia tej technologii w OŚ Rybnik-Orzepowice, wiąże się z koniecznością przeprowadzenia prac adaptacyjnych w WKFZ. Optymalizacja parametrów procesu jest każdorazowo prowadzona w trakcie rozruchu technologicznego instalacji i ma na celu optymalne połączenie bilansu energetycznego procesu z jego efektami. W THP Cambi jako wsad energetyczny do procesu zwykle wykorzystuje się ciepło odzyskane z instalacji do kogeneracji (ang. *combined heat and power*, CHP).

Przykłady instalacji krajowych i zagranicznych, które stosują ww. metody termiczne przedstawia tabela 4.

Wszystkie przedstawiane technologie mają potencjał wdrożeniowy, co potwierdzają przykłady ich wdrażania w warunkach krajowych (poza zgazowaniem).

Tabela 4. Przykładowe instalacje pracujące w wybranych technologiach zagospodarowania odpadów

Technologia	Opis wdrożenia
Witryfikacja	W USA funkcjonuje wiele instalacji witryfikacji popiołów zarówno pochodzących z osadów ściekowych, jak i innych odpadów komunalnych. W polskich warunkach instalacja funkcjonuje w spółce SEWIK (Tatrzańska Komunalna Grupa Kapitałowa Sp. z o.o.).
Proces Cambi	Instalacja do procesu Cambi zlokalizowana jest np. w Bydgoszczy, w oczyszczalni ścieków „Kapuściska”.
Suszenie termiczne	Suszarnia termiczna osadów zlokalizowana jest m.in. w oczyszczalni ścieków w Opolu.
Spalanie	Spalarnia odwodnionych osadów ściekowych zlokalizowana jest m.in. w GOŚ „Dębogórze” w Gdyni i w Krakowie-Płaszowie.
Współspalanie	Współspalanie odbywa się obecnie w dużych instalacjach energetycznych, np. Tauron i w cementowniach, np. Heidelberg Cement.
Zgazowanie	Technologia jest obecnie na etapie badań przemysłowych, pierwsze wdrożenia miały miejsce w Japonii w Kiyose Water Reclamation Center.
Piroliza niskotemperaturowa	Testowa instalacja pirolizy osadów ściekowych zlokalizowana jest w Oleśnie (woj. opolskie), wielkoskalowa instalacja Pyro-Kat funkcjonuje w firmie FABIOS w Makowie Podhalańskim.
Grunty antropogeniczne	Instalacja produkcji antropogrunтів pod nazwą BioCarbohumus znajduje się w woj. śląskim i jest własnością spółki Haldex.
Nawozy organiczne	Sztandarowym przykładem produkcji wysokiej jakości nawozów organicznych na bazie osadów ściekowych jest produkt Milorganite produkowany w USA. W Polsce jedynym obecnie przykładem takiego produktu jest nawóz mineralno-organiczny produkcji firmy OMEGA.

2.7. Alternatywne wykorzystywanie osadów ściekowych

W strategicznym podejściu do gospodarki osadowej należy brać pod uwagę nie tylko możliwość wykorzystania osadów ściekowych jako źródła energii, ale także wykorzystywanie ich dla potrzeb związanych z rolnictwem. Z zastosowania takiego podejścia wybrano i poddano analizie dwa sposoby prowadzenia gospodarki osadowej: przeznaczenie osadów do produkcji gruntów antropogenicznych wykorzystywanych do celów rekultywacyjnych i ich wykorzystywanie do produkcji specjalistycznych nawozów organicznych.

2.7.1. Wykorzystywanie osadów do produkcji antropogrunтів

Pod pojęciem gruntów antropogenicznych należy rozumieć odpady stałe związane z działalnością człowieka oraz grunty naturalne przemieszczone i ponownie zdeponowane (Draǳowski, 1979). Stanowią one warstwę przypowierzchniową, często dochodzącą do kilkunastu metrów miąższości. Mogą występować w formie nadpoziomowych lub ciągłych warstw modyfikujących pierwotną powierzchnię terenu.

Antropogrunty oparte na ustabilizowanych osadach ściekowych charakteryzują się dużą zdolnością glebotwórczą, cenną szczególnie przy rekultywacji obszarów przemysłowych i obszarów wyjałowionych z substancji organicznych zawierających fosfor i azot.

Przykładem podłoża glebotwórczego stosowanego do rekultywacji terenów jest BioCarbohumus, który został wyprodukowany przez firmę Haldex we współpracy z ośrodkami naukowymi. Jest to produkt wytwarzany na bazie komunalnych osadów ściekowych w formie zgranulowanej, ale będący kompozycją różnych materiałów, także z dodatkiem odpadów przemysłowych. Proces jego produkcji jest więc procesem ograniczającym ilość odpadów w środowisku, co jest zgodne z racjonalną gospodarką odpadami i wpisuje się w cele gospodarki o obiegu zamkniętym. Osady ściekowe wchodzące w skład BioCarbohumusu spełniają wymagania stawiane komunalnym osadom ściekowym stosowanym w rolnictwie do rekultywacji, zgodnie z *Rozporządzeniem Ministra Środowiska z dnia 15 lipca 2010 r. w sprawie komunalnych osadów ściekowych*. Wysoka zawartość azotu i fosforu w osadach ściekowych przyczynia się do zasobności BioCarbohumusu w składniki pokarmowe niezbędne do wzrostu i rozwoju roślin. Przygotowany produkt na bazie osadów ściekowych znajduje zastosowanie głównie w rekultywacji terenów przemysłowych i/lub zdegradowanych. Planowane działania wspomagające rewitalizację terenów przemysłowych, między innymi w ramach *Regionalnego Programu Operacyjnego dla Województwa Śląskiego na lata 2014–2020*, mogą wzbudzać zainteresowanie tego typu rozwiązaniami i przyczyniać się do rozwoju prac wdrożeniowych i demonstracyjnych w tym zakresie (Kugiel i Piekło, 2012).

2.7.2. Produkcja nawozów organicznych

Osady ściekowe powstałe w wyniku oczyszczania ścieków komunalnych mają dużą wartość glebotwórczą i nawozową. Są źródłem głównych pierwiastków niezbędnych dla wzrostu i rozwoju roślin, z wyłączeniem potasu (tab. 5). Właściwości fizyczne i chemiczne są zbliżone do tych charakteryzujących próchnicę glebową. Wykorzystanie osadów do rekultywacji gruntów bezglebowych skutkuje intensywnym wzrostem roślin (Siuta, Wasiak i Chłopecki, 1996; Siuta i Sienkiewicz, 2001). Kierunkiem zagospodarowania osadów ściekowych, który może być rozwijany, jest produkcja nawozów organicznych o średniej zawartości azotu 5% i fosforu 2%. Technologia produkcji takich nawozów jest relatywnie prosta i nie wymaga skomplikowanych instalacji. Najczęściej polega ona na wstępnym odwadnianiu osadów ściekowych, prasowaniu na cienki placek, a następnie suszeniu w temperaturze 450–650°C. Po wysuszeniu (wyprażeniu), osad jako produkt bezpieczny pod względem mikrobiologicznym, jest granulowany i konfekcjonowany jako gotowy nawóz organiczny. Przykładem takiego rozwiązania jest amerykański produkt Milorganite, produkowany w opisany wyżej sposób.

Tabela 5. Dopuszczalna zawartość pierwiastków w nawozach organicznych

Pierwiastek	Dopuszczalna zawartość zgodnie z normą EPA	Średnia zawartość w produkcie Milorganite
Arsen	41 mg/kg	8,1 mg/kg
Kadm	39 mg/kg	1,7 mg/kg
Chrom	-	217 mg/kg
Miedź*	1500 mg/kg	254 mg/kg
Ołów	300 mg/kg	49 mg/kg
Rtęć	17 mg/kg	0,4 mg/kg
Molibden*	40 mg/kg	10 mg/kg
Nikiel	420 mg/kg	37 mg/kg
Selen	100 mg/kg	1,5 mg/kg
Cynk*	2800 mg/kg	498 mg/kg

* Istotne mikroelementy.

Źródło: <https://www.epa.gov/sites/production/files/documents/handbook1.pdf>.

W Polsce brak jest mechanizmów sprzyjających wykorzystywaniu osadów ściekowych w rolnictwie, nie ma bowiem żadnego instrumentu prawnego, który ułatwiłyby te procesy. Obowiązujące regulacje dotyczące nieprzekraczalnej zawartości, między innymi metali ciężkich, są głównym czynnikiem ograniczającym wykorzystanie nawozów wytwarzanych na bazie osadów w rolnictwie. Dla przykładu w USA wprowadzono zakaz stosowania nawozów nieorganicznych na terenach zieleni miejskiej i na wielkoobszarowych areałach zielonych, co skutkowało rozwojem rynku nawozów organicznych, na którym silną pozycję mają produkty na bazie osadów ściekowych (wyprażonej biomasy mikroorganizmów). Krajowym przykładem może być nawóz mineralno-organiczny „Oskar” produkcji firmy Omega, który poza osadami ściekowymi, zawiera magnezyt prażony i kwas siarkowy.

2.8. Podsumowanie

Zebrane i opisane wyżej rozwiązania technologiczne stanowią główne kierunki przekształcania osadów ściekowych. Dobór ostatecznego rozwiązania dla danego obiektu wiąże się z koniecznością przeprowadzenia szeregu analiz zarówno technologicznych, jak i ekonomicznych. Istotne jest również precyzyjne określenie warunków brzegowych dla wdrożenia danej technologii, ponieważ osady ściekowe mogą znacząco różnić się pod względem swej struktury, składu, podatności na odwodnienie, czy charakterystyki ścieków dopływających do oczyszczalni oraz zlewni danej oczyszczalni. Istnieje wiele technologii przekształcania osadów ściekowych, dla których kluczowym parametrem jest zawartość suchej masy w osadzie odwodnionym, stąd czasem wdrożenie danego rozwiązania może wiązać się z koniecznością modernizacji istniejącego węzła osadowego. Przedstawione technologie porównano ze sobą pod względem kosztów wdrożeniowych i operacyjnych w rozdziale 5 niniejszej monografii i wskazano, które z nich stanowią obiecujące kierunki wdrożeniowe dla PWiK Sp. z o.o. w Rybniku.

PRZERÓBKA OSADÓW ŚCIEKOWYCH POCHODZĄCYCH Z OCZYSZCZALNI ŚCIEKÓW W RYBNIKU-ORZEPOWICACH

3.1. Wprowadzenie

Gospodarka osadowa to jeden z kluczowych obszarów w działalności oczyszczalni ścieków. Sprawne realizowanie prac związanych z zagęszczaniem i odwadnianiem osadów ściekowych wpływa na wynik ekonomiczny przedsiębiorstwa. Przedsiębiorstwo Wodociągów i Kanalizacji Sp. z o.o. w Rybniku posiada pozwolenie na wytwarzanie odpadów, które obejmuje wytwarzanie ustabilizowanych komunalnych osadów ściekowych (19 08 05) w ilości 12 000 Mg/rok.

Zgodnie z *Rozporządzeniem Ministra Środowiska z dnia 6 lutego 2015 r. w sprawie komunalnych osadów ściekowych* i *Ustawą z dnia 14 grudnia 2012 r. o odpadach*, w świetle uzyskanych wyników (patrz tab. 8, s. 38), badany osad ściekowy może być stosowany:

- w rolnictwie i do celów rekultywacji gruntów na cele rolne, zgodnie z praktyką przyjętą dla tego typu odpadów,
- do rekultywacji terenów na cele nierolne,
- przy dostosowywaniu gruntów do określonych potrzeb wynikających z planów gospodarki odpadami, planów zagospodarowania przestrzennego lub decyzji o warunkach zabudowy i zagospodarowaniu terenu, do uprawy roślin przeznaczonych do produkcji kompostu, do uprawy roślin nieprzeznaczonych do spożycia i produkcji pasz.

Oczyszczalnia ścieków w Rybniku-Orzepowicach przyjmuje ścieki z mieszanego systemu kanalizacji, który w dużej części ma obecnie charakter ogólnospławny. W układzie przeróbki osadu stosuje się beztlenową stabilizację wstępnie zagęszczonych osadów i końcowe odwadnianie mechaniczne. Po odwodnieniu osad poddawany jest higienizacji wapnem, a następnie przenośnikiem ślimakowym transportowany do przyczep, z których przewożony jest na miejsce tymczasowego gromadzenia na terenie oczyszczalni. Osad z terenu oczyszczalni jest sukcesywnie wywożony.

Część osadowa oczyszczalni ścieków w Rybniku-Orzepowicach składa się z następujących elementów:

Zagęszczacz grawitacyjny osadu surowego

Osad surowy, zagęszczony w lejach osadowych osadników wstępnych, transportowany jest do zagęszczacza grawitacyjnego osadu. Jest to zbiornik żelbetowy o średnicy $D = 12$ m i głębokości 4,5 m, wyposażony w mieszadło prętowe wolnoobrotowe z dennym zgarniaczem. W zagęszczaczu zachodzi proces hydrolizy.

Zagęszczacz mechaniczny osadu nadmiernego

Osad czynny z reaktorów biologicznych, przez pompownię recyrkulatu, jest transportowany do zagęszczacza mechanicznego osadu, który znajduje się w budynku odwadniania osadu, w hali razem z prasą do osadu.

Wydzielone komory fermentacyjne zamknięte

W oczyszczalni istnieją dwie komory fermentacyjne zamknięte, wykonane jako konstrukcja stalowa z płyt szklawionych. Pojemność każdej komory wynosi 2500 m³, a wymiary to: średnica – 16 m, wysokość części walcowej – 12,6 m. W komorze znajduje się mieszadło mechaniczne do osadu, umieszczone centralnie. Na stropach komór umieszczone są łapacze gazu z zaworami bezpieczeństwa. Ujmowany gaz jest wykorzystywany w jednostce kogeneracyjnej, która zasila wymienniki ciepła WKFZ-ów i układ centralnego ogrzewania pomieszczeń stacji odwadniania osadu. Nadmiar gazu jest spalany w pochodni.

Stacja odwadniania osadu

Stacja odwadniania znajduje się w budynku wraz z mechanicznym zagęszczaczem. Jest to prasa normalnościennowa, taśmowa, która odwadnia osad do 20% s.m.o. Urządzeniami pomocniczymi dla procesu odwadniania i zagęszczania są: stacja polielektrolitu, pompy dla roztworu podstawowego polielektrolitu, pompa osadu rzadkiego i podajnik ślimakowy oraz dodatkowe oprzyrządowanie, jak: pompki myjące, sprężarka i przenośnik osadu, a także urządzenie do wapnowania osadu. Linia do odwadniania składa się z następujących elementów: pompy śrubowej, prasy taśmowej, stacji przygotowania polielektrolitu, pompy dla roztworu podstawowego polielektrolitu, przenośnika ślimakowego oraz dodatkowego oprzyrządowania.

PWiK Sp. z o.o. w Rybniku zrealizowało projekt pn. „Innowacyjny sposób zagospodarowania osadów ściekowych celem spełnienia dyrektywy Unii Europejskiej w zakresie ochrony środowiska i energetyki”¹. Przedsięwzięcie dofinansowano ze środków Europejskiego Funduszu Rozwoju Regionalnego w ramach Programu Operacyjnego Innowacyjna Gospodarka. W ramach projektu opracowano instalację sekwencyjnej konwersji biomasy celem spełnienia wymagań Unii Europejskiej w zakresie ochrony środowiska i energetyki, do produkcji kompozytowej biomasy o symbolu KBP-01 i określonym składzie (tab. 6).

Aparaty i urządzenia ww. instalacji znajdują się w wolno stojącym budynku typu niskiego o wymiarach 32,84 × 6,18 m i wysokości 4,27 m, na terenie oczyszczalni w Rybniku-Orzepowicach przy ul. Rudzkiej.

¹ Dostęp do technologii jest możliwy na prawach licencji, nr patentu P213618 z dnia 11.03.2009 r. i P218268 z dnia 24.08.2010 r.

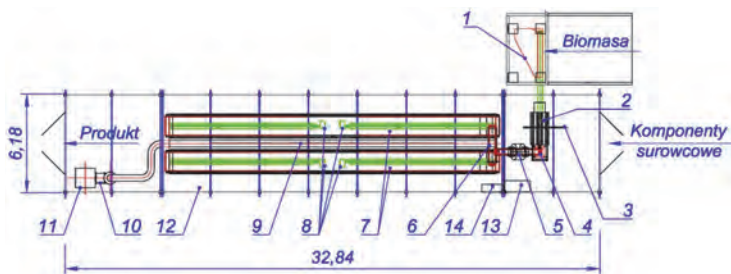
Tabela 6. Charakterystyka wyrobu gotowego – biomasy kompozytowej

Biomasa pofermentacyjna (powstała w wyniku beztlenowej fermentacji osadu ustabilizowanego w WKFz)	70% mas.
Muł węglowy	(0 ... 20)% mas.
Agromix	(0 ... 20)% mas.
Lignoceluloza	(5 ... 10)% mas.
Biofaza glicerolowa	(4 ... 5)% mas.
Trociny	(0 ... 4)% mas.
Aktywowana mikroflora aerobowa	0,1% mas.
Wilgotność paliwa	(20 ... 30)% mas.
Wartość opałowa	(16 ... 18) MJ/kg
Postać	granulowana (15 ... 20) ·10 ⁻³ m
Dostępność komercyjna	opakowania typu big-bag (500 ... 1000) kg

Źródło: Instrukcja obsługi instalacji sekwencyjnej konwersji biomasy celem spełnienia wymagań Unii Europejskiej w zakresie ochrony środowiska i energetyki, PWiK Sp. z o.o. w Rybniku, 2011.

3.2. Proces technologiczny konwersji biomasy

Lokalizację urządzeń procesowych sekwencyjnej metody konwersji biomasy przedstawia rysunek 3. Po zakończonej fermentacji metanowej ścieków komunalnych, zawiesina przepływa z WKF do zbiornika buforowego, a następnie jest kierowana, przez mechaniczny dezintegrator komórek, do filtra taśmowego. W filtrze następuje separacja biomasy pofermentacyjnej, którą kieruje się do zbiornika surowca (1). Biomasa pofermentacyjna dozowana jest do mieszarko-wytlaczarki (2) z zasobnika (1), natomiast pozostałe biokomponenty w zadanych proporcjach są dodawane do mieszarki (2) za pomocą elektrowciągu (3). Po wymieszaniu komponentów następuje formowanie wielokomponentowej biomasy z jednoczesnym pudrowaniem kształtek za pomocą drobnoziarnistych trocin. Materiał pudrujący dozowany jest z zasobnika (4) za pomocą podajnika ślimakowego o regulowanej wydajności. Tak przygotowane kształtki kierowane są na przenośnik taśmowy systemu mikrofalowego (5), w którym poddawane są krótkotrwałemu działaniu mikrofal powodujących metabiozę biomasy. Następnie kształtki transportowane są za pomocą rewersyjnego przenośnika (6) na lewy bądź prawy przenośnikowy bioreaktor (7). Po załadowaniu przenośnikowych bioreaktorów (7), wielokomponentowa – formowana biomasa, poddawana jest okresowemu procesowi biokonwersji w czasie 24 godzin. Nad przenośnikami (7) zamontowany jest system grzejników promiennikowych (8) opalanych gazem ziemnym. System promienników rurowych (8) włączany jest interwencyjnie celem stabilizacji temperatury złoża i termoinkluzji kształtek. Wilgotne powietrze zasysane jest kanałem (9) za pomocą wentylatora (10) i kierowane do kolumny (11), w której podlega kondycjonowaniu i higienizacji za pomocą wody obiegujowej. Opisane powyżej urządzenia zlokalizowane są w hali biokonwersji biomasy (12), wyposażonej w szafę zasilania i sterowania (13, 14). Po 24 godzinach następuje rozładunek pokonwersyjnej biomasy oraz jednoczesny załadunek surowej biomasy kompozytowej. Wydajność instalacji wynosi 1715 kg/dzień suchej formowanej biomasy.



Rysunek 3. Lokalizacja urządzeń procesowych sekwencyjnej metody konwersji biomasy celem spełnienia wymagań Unii Europejskiej w zakresie ochrony środowiska i energetyki

Źródło: Instrukcja obsługi instalacji sekwencyjnej konwersji biomasy celem spełnienia wymagań Unii Europejskiej w zakresie ochrony środowiska i energetyki, PWiK Sp. z o.o. w Rybniku, 2011.

Bilans ilościowo-jakościowy gospodarki osadowej PWiK Sp. z o.o. w Rybniku

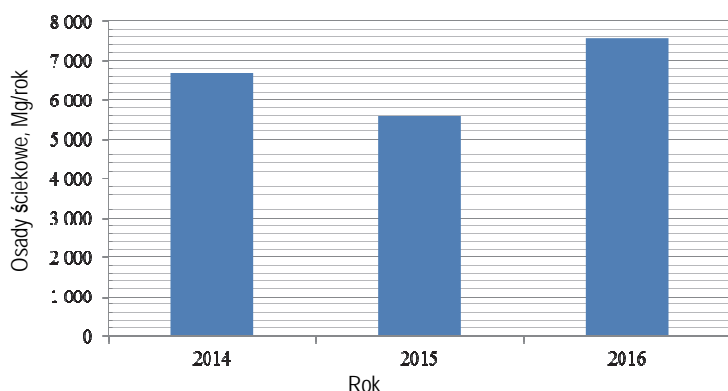
W oczyszczalni ścieków w Rybniku-Orzepowicach uzyskuje się około 18 Mg mokrej masy osadu na dobę o zawartości około 20% s.m. W tabeli 7 zestawiono ilości osadów, jakie zostały wytworzone na terenie oczyszczalni w latach 2014–2016.

Tabela 7. Ilość osadów ściekowych wytworzonych w OŚ Rybnik-Orzepowice w latach 2014–2016

Odpad	Jednostka	Rok		
		2014	2015	2016
Osady ściekowe	Mg/rok	6684,39	5595,98	7582,34

Źródło: dane PWiK Sp. z o.o. w Rybniku.

W celu dokładniejszego zobrazowania produkcji osadów ściekowych dane z tabeli 7 przedstawiono w formie wykresu (rys. 4).



Rysunek 4. Roczna produkcja osadów ściekowych w OŚ Rybnik-Orzepowice

W tabeli 8 przedstawiono wyniki badań osadów ściekowych w latach 2013–2016 wykonanych przez Laboratorium Zakładu Inżynierii Środowiska SGS EKO-PROJEKT Sp. z o.o.

Tabela 8. Wyniki badań ustabilizowanego osadu ściekowego z OŚ Rybnik-Orzepowice (osad po wapnowaniu) w latach 2013–2016

Badany parametr	Jednostka	Rok											
		2013			2014			2015			2016		
		średnia	min.	maks.	średnia	min.	maks.	średnia	min.	maks.	średnia	min.	maks.
Odczyn (pH)	-	12,02	11,30	12,30	10,42	6,80	12,30	9,97	8,00	12,00	9,65	8,00	12,80
Sucha masa	%	23,57	16,70	28,90	23,02	17,00	33,00	18,27	15,60	20,20	21,78	15,60	30,70
Substancja organiczna	% s.m.	45,95	41,40	53,10	40,83	17,10	52,00	56,92	51,00	63,90	46,70	21,00	78,10
Fosfor ogólny	% s.m.	2,27	1,89	3,00	2,25	1,54	3,13	2,80	2,05	3,59	4,35	0,78	17,70
Zawartość wapnia	% s.m.	13,14	9,92	17,90	13,18	7,43	26,10	6,46	3,78	9,67	8,81	2,53	28,80
Zawartość magnezu	% s.m.	0,62	0,50	0,78	0,60	0,45	0,70	0,62	0,56	0,68	0,57	0,36	0,89
Zawartość azotu amonowego	% s.m.	0,48	0,23	0,70	0,64	0,12	1,40	0,77	0,39	1,56	0,61	0,20	1,04
Zawartość azotu ogólnego	% s.m.	2,76	1,59	3,78	2,94	1,62	4,25	3,57	2,82	4,59	5,51	1,95	7,82
Kadm	mg/kg s.m.	2,58	2,34	2,91	2,14	1,33	2,73	2,28	1,81	2,81	2,07	1,25	4,84
Miedź	mg/kg s.m.	221,00	189,00	253,00	246,83	147,00	306,00	292,33	241,00	335,00	193,17	136,00	257,00
Nikiel	mg/kg s.m.	20,38	16,80	22,10	18,35	10,60	22,90	24,42	22,80	27,80	18,44	7,21	28,20
Ołów	mg/kg s.m.	38,37	34,90	43,60	37,00	19,10	57,90	39,25	31,80	45,70	26,98	15,30	45,50
Cynk	mg/kg s.m.	933,50	784,00	1049,00	935,33	540,00	1248,00	1144,83	1017,00	1308,00	865,00	336,00	1745,00
Rtęć	mg/kg s.m.	0,50	0,03	0,88	0,70	0,42	1,30	0,51	0,39	0,60	0,52	0,24	0,79
Chrom	mg/kg s.m.	30,98	27,90	34,50	29,43	18,80	39,60	42,13	37,90	53,10	41,55	14,10	72,60
Obecność bakterii chorobotwórczych z rodzaju <i>Salmonella</i>	-	nie stwierdzono			nie stwierdzono			nie stwierdzono			nie stwierdzono		
Liczba żywych jaj pasożytów jelitowych <i>Ascaris</i> sp.	liczba/kg	0			0			0			0		
Liczba żywych jaj pasożytów jelitowych <i>Trichuris</i> sp.	liczba/kg	0			0			0			0		
Liczba żywych jaj pasożytów jelitowych <i>Toxocara</i> sp.	liczba/kg	0			0			0			0		

Źródło: dane PWiK Sp. z o.o. w Rybniku.

3.3. Podsumowanie

W procesie oczyszczania ścieków w oczyszczalni ścieków w Rybniku-Orzepowicach powstają następujące rodzaje osadów:

- osad wstępny,
- osad wstępny zagęszczony grawitacyjnie,
- osad nadmierny,
- osad nadmierny po zagęszczeniu mechanicznym,
- osad po procesie fermentacji beztlenowej,
- osad odwodniony,
- osad odwodniony po procesie higienizacji.

Do komór fermentacyjnych trafia osad wstępny zagęszczony grawitacyjnie i osad nadmierny po zagęszczeniu mechanicznym. W układzie przeróbki osadu zastosowano beztlenową stabilizację wstępnie zagęszczonych osadów i końcowe odwadnianie mechaniczne. Po odwodnieniu osad poddawany jest higienizacji wapnem, a następnie przenośnikiem ślimakowym transportowany do przyczep. Osad z terenu oczyszczalni jest wywożony sukcesywnie. Zagospodarowanie osadów ściekowych stanowi również przedmiot aktywności B+R przedsiębiorstwa nakierowanej na optymalizację i poszukiwanie nowych innowacyjnych rozwiązań technologicznych służących poprawie efektywności prowadzenia procesu, z jednoczesnym obniżaniem jego presji na środowisko. Należy mieć również na uwadze wciąż rosnące koszty zagospodarowania osadów ściekowych przez zewnętrzne podmioty, co znacząco zwiększa atrakcyjność inwestowania we własne metody ich przekształcania. Jednym z głównych czynników decydujących o powodzeniu obranego kierunku zagospodarowania osadów ściekowych będzie więc analiza ekonomiczna.

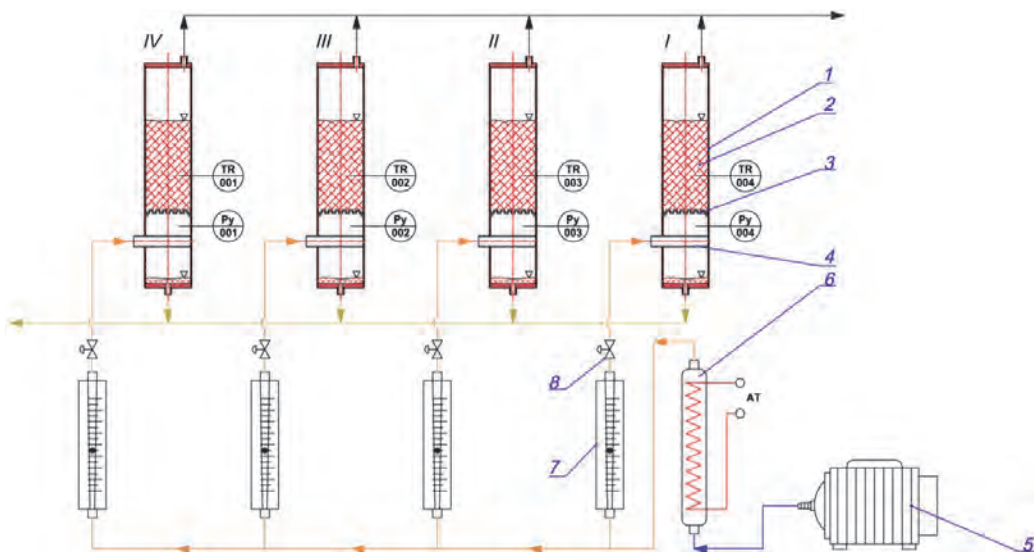
DOŚWIADCZENIA Z PILOTAŻOWYCH I DEMONSTRACYJNYCH ROZWIĄZAŃ TECHNOLOGICZNYCH ZAGOSPODAROWANIA OSADÓW ŚCIEKOWYCH W PWIK SP. Z O.O. W RYBNIKU

4.1. Wprowadzenie

W oczyszczalni ścieków w Rybniku-Orzepowicach prowadzono wiele prac o charakterze badawczo-rozwojowym, skierowanych na zagospodarowanie w innowacyjny sposób osadów ściekowych. Jednym z tych sposobów była biokonwersja osadów ściekowych szczegółowo opisana poniżej.

4.2. Sposób przeprowadzania biokonwersji odpadów

Badania biokonwersji osadów ściekowych prowadzono na stanowisku badawczym, którego schemat przedstawiono na rysunku 5. Stanowisko badawcze składało się z czterech (I–IV) zaizolowanych cieplnie bioreaktorów (1) o średnicy wewnętrznej 100 mm, sprężarki powietrza (5), podgrzewacza powietrza (6), czterech rotametrów (7) wyposażonych w zawory regulacyjne (8). Mieszanke osadu ściekowego wraz z dodatkami (2) umieszczono na dnie sitowym (3). Powietrze do bioreaktora było doprowadzane króćcem deflektorowym (4).



Rysunek 5. Schemat stanowiska do badań procesu biokonwersji osadów ściekowych (Raport końcowy, 2000)

Przeprowadzono wstępne badania procesu biokonwersji z zastosowaniem przedmuchu powietrza o regulowanej temperaturze i natężeniu przepływu

w zakresie 0,1–2 dm³/min. Zaobserwowano, że temperatura złoża podczas trwania procesu jest równa temperaturze doprowadzanego powietrza. Nawet przy niskich wartościach natężenia przepływu powietrza jego ilość była zbyt duża, aby można było zaobserwować wzrost temperatury wynikający z przemian mikrobiologicznych zachodzących w złożu (powstające ciepło było natychmiast odbierane przez strumień powietrza). Wzrost temperatury złoża następował dopiero po wyłączeniu sprężarki powietrza (5).

Ze względu na powyższe zdecydowano, że dalsze badania będą prowadzone w otwartych bioreaktorach (w celu zapewnienia dostępu tlenu) z okresowym przedmuchem powietrza symulującym mieszanie złoża. Do sporządzenia mieszanek poddawanych biokonwersji użyto następujących składników:

- biomasa pofermentacyjna O – o wilgotności 80,2% mas.,
- trociny T – o wilgotności 9,6% mas.,
- koncentrat flotacyjny węgla kamiennego KF1, KF2 – o wilgotności odpowiednio 5,2% mas. i 19,8% mas.,
- świeżo skoszona trawa TR – o wilgotności 67,7%,
- lignoceluloza L – o wilgotności 20,2%.

Do mikrobiologicznego zaszczepiania złóż zastosowano następujące aktywowane biopreparaty:

- A – mikroorganizmy saprofityczne immobilizowane na nośnikach mineralnych, przeznaczone do biologicznej obróbki gnojowicy i obornika,
- B – mikroorganizmy saprofityczne immobilizowane na nośnikach mineralnych, przeznaczone do rozkładu odpadków i przyspieszenia procesów kompostowania,
- K – uniwersalny preparat do kompostowania.

Jako dodatki wysokowęglowodanowe zastosowano mieszanki o następującym składzie:

- A – 5 g sacharozy; 2,5 g mąki pszennej; 2,5 g oleju rzepakowego,
- B – 7,5 g mąki pszennej,
- C – 7,5 g sacharozy; 7,5 g mąki pszennej,
- D – 15 g glicerolu,
- E – 25 g glicerolu; 10 g sacharozy; 15 g mąki pszennej,
- F – 25 g glicerolu; 25 g mieszaniny bioalkoholi.

Przeprowadzono 22 cykle biokonwersji z uwzględnieniem zmienności składu, rodzajów dodatków wysokowęglowodanowych, wilgotności mieszanki i kształtu elementów złoża. Na podstawie wyników badań sformułowano następujące spostrzeżenia i wnioski:

- Biokonwersja mieszanki składającej się głównie z biomasy pofermentacyjnej wymaga dodatku materiału wysokowęglowodanowego. Bez dodatku węglowodanów temperatura złoża w trakcie trwania procesu nie przekracza 30°C.
- Przebieg procesu biokonwersji w niewielkim stopniu zależy od składu mieszanki. Największy wpływ na osiąganą temperaturę złoża ma rodzaj zastosowanego dodatku węglowodanowego.
- Najlepsze wyniki uzyskano dla dodatków węglowodanowych A i E. Po ich dodaniu nastąpił wzrost temperatury złoża do maksymalnej wartości (odpo-

wiednio około 37°C i 45°C), który trwał około 12 godzin dla pożywki A i około 72 godzin dla pożywki E. Po wyczerpaniu się zapasów pożywki temperatura obniżyła się.

- Większa wilgotność wsadu wiąże się z dłuższym czasem ogrzewania złoża do maksymalnej wartości (znaczna ilość ciepła jest zużywana na podgrzanie wody).
- Najwyższy wzrost temperatury złoża (do około 46°C) obserwowano przy zastosowaniu biopreparatu K.

Biorąc pod uwagę wyniki cykli pomiarowych 1–22 przeprowadzono dodatkowy 23. cykl pomiarowy. Badania przeprowadzono dla mieszanki o optymalnym składzie:

- biomasa pofermentacyjna: 70% mas.,
- muł węglowy: (10 ... 20)% mas.,
- lignoceluloza: (0 ... 10)% mas.,
- trociny: (0 ... 5)% mas.,
- biofaza glicerolowa: (4 ... 5)% mas.,
- mieszanina bioalkoholi: 1% mas.

Mieszanekę zaszczerpiono biopreparatem K. Z tak sporządzonej mieszanki ukształtowano kulki o średnicy około 20 mm i obtoczono w lignocelulozie, a następnie umieszczono w biokonwertorach. Skład poszczególnych mieszanek podano powyżej. Do jednego biokonwertora wprowadzono 14 kształtek. Wyniki dla poszczególnych biokonwertorów, zestawione w tabeli 9, stanowią średnie wartości z pomiaru 14 kształtek.

Tabela 9. Wyniki ubytków masy wody po procesie biokonwersji dla różnych składów surogatu paliwowego

Skład	Otoczka	Nr bio-konwersji	Masa, g		Wilgotność, %		Sucha masa g	Masa początkowa wody g	Ubytek wody g	Ubytek wody %
			0 h	24 h	początkowa	końcowa				
1	lignoceluloza	1	13,82	8,81	60,0	37,2	5,53	8,29	5,01	60,4
		2	13,90	8,83	60,0	37,0	5,56	8,34	5,07	60,8
		3	13,73	8,42	60,0	34,8	5,49	8,24	5,31	64,5
		4	13,77	8,52	60,0	35,3	5,51	8,26	5,25	63,6
		średnio	13,81	8,65	60,0	36,1	5,52	8,28	5,16	62,3
2	lignoceluloza	1	13,23	8,34	62,2	40,0	5,00	8,23	4,89	59,4
		2	13,84	8,75	62,2	40,2	5,23	8,61	5,09	59,1
		3	13,57	8,57	62,2	40,1	5,13	8,44	5,00	59,2
		4	14,04	8,69	62,2	38,9	5,31	8,73	5,35	61,3
		średnio	13,67	8,59	62,2	39,8	5,17	8,50	5,08	59,8
3	lignoceluloza	1	13,99	8,77	61,1	37,9	5,45	8,54	5,22	61,1
		2	14,54	9,27	61,1	38,9	5,66	8,88	5,27	59,3
		3	14,02	8,82	61,1	38,1	5,46	8,56	5,20	60,7
		4	13,99	8,69	61,1	37,3	5,45	8,54	5,30	62,0
		średnio	14,14	8,89	61,1	38,1	5,50	8,63	5,25	60,8

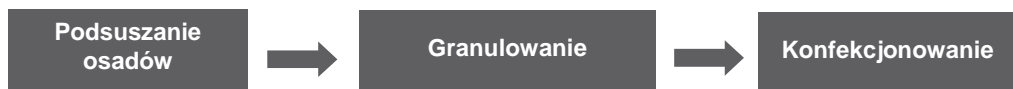
Źródło: Raport końcowy, 2000.

Objaśnienie symboli: O – biomasa pofermentacyjna, M – muł węglowy, L – lignoceluloza, T – trociny, G – glicerol, F – mieszanina bioalkoholi.

Analiza wyników przedstawionych w tabeli 9 wykazuje, że w trakcie 24 h procesu biokonwersji uzyskuje się średnio 60% redukcję wody w surowcu paliwowym, co przekłada się na jego średnią wilgotność końcową wynoszącą 38%.

4.3. Produkcja granulatów nawozowych z osadów ściekowych

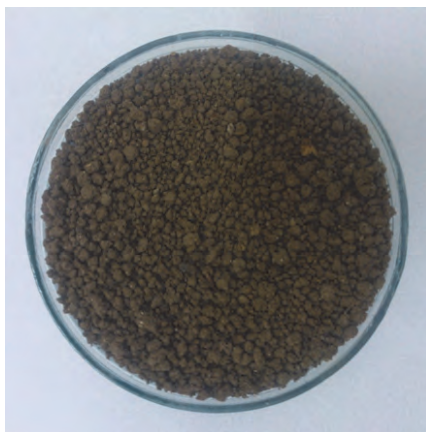
Jednym z rozważanych kierunków zagospodarowania osadów ściekowych była produkcja granulatów nawozowych. Celem prowadzonych prac była analiza możliwości wdrożenia instalacji do przeróbki osadów, umożliwiającej otrzymanie produktu, którego właściwości będą spełniały wszystkie wymagania nawozu organicznego. Zaproponowano produkcję granulatu nawozowego jako docelowej formy produktu, z wykorzystaniem opracowanej i opatentowanej przez Główny Instytut Górnictwa technologii (dostęp do technologii możliwy na prawach licencji do zgłoszenia wynalazku oznaczonego numerem P.420420 z dnia 8.02.2017 r.). W oparciu o wiedzę wynikającą ze zrealizowanych prac badawczo-rozwojowych z zakresu gospodarki osadowej, zaproponowano również wprowadzenie układu przeróbki termicznej powstających granul w celu ich wyprażenia. Wpłyne to na utrwalenie granul i rozkład termiczny ewentualnych mikrozanieczyszczeń występujących w osadach ściekowych (dotyczy tzw. mikrozanieczyszczeń pochodzenia farmaceutycznego). Na rysunku 6 przedstawiono kierunek przekształcania osadów (podejście bazowe).



Rysunek 6. Schemat przekształcania osadów ściekowych w OŚ Rybnik-Orzepowice

Jednym z podstawowych założeń prowadzonych prac B+R było określenie oczekiwanej formy produktu przekształcania osadów. W celu nadania produktowi atrakcyjnej postaci rynkowej ustalono, że powinien on mieć postać trwałych niepylących granul, łatwych do konfekcjonowania, transportowania oraz stosowania w zabiegach agrotechnicznych (również z zastosowaniem standardowych narzędzi agrotechnicznych).

Po przeanalizowaniu wyników badań osadów ściekowych za lata 2013–2016 (tab. 8) stwierdzono, że w świetle polskich przepisów prawa dotyczących nawozów, osady spełniają wymagania pod względem zawartości metali ciężkich. Analizując przedstawione wyniki nie stwierdzono przekroczeń dopuszczalnych wartości żadnego z wymaganych parametrów. Należy podkreślić, że osady ściekowe z OŚ Rybnik-Orzepowice charakteryzują się bardzo dobrymi parametrami pod względem zawartości azotu i fosforu, stąd przeznaczenie ich jako substrat do produkcji nawozu jest uzasadnione.



Fotografia 1. Nawóz – frakcja \varnothing 1,6–4 mm

Po przeprowadzeniu serii badań określono parametry produktu, jakim jest nawóz organiczny (fot. 1).

4.4. Podsumowanie

Badania prowadzone w PWiK Sp. z o.o. w Rybniku ukierunkowano na analizę możliwości wdrożenia technologii zagospodarowania osadów ściekowych do produkcji nowego nawozu organicznego. Przeprowadzone badania eksperymentalne wykazały, że opracowana mieszanka nawozowa będzie stanowiła kompletny nawóz organiczny. Zrealizowane badania doprowadziły do powstania koncepcji przedwdrozeniowej dla technologii granulacji osadów ściekowych. Stanowiło to rozszerzenie części badawczej prowadzącej do wyboru nowoczesnych i przyszłościowych kierunków zagospodarowania osadów ściekowych. Opracowana mieszanka nawozowa stanowi gotowy produkt przeznaczony do przyszłej certyfikacji, celem uzyskania niezbędnych pozwoleń umożliwiających bezpieczne wprowadzenie produktu nawozowego do obrotu. Kierunek przekształcania osadów ściekowych w produkty nawozowe jest wciąż kierunkiem rozwojowym, wpływa też na „domykanie” obiegu azotu i fosforu w przyrodzie, budzi jednak sporo kontrowersji. Stąd tak istotne jest, aby wprowadzać do środowiska jedynie osady przetworzone, a powstające z nich produkty obejmować pełną kontrolą jakości.

ANALIZA PORÓWNAWCZA ROZWIĄZAŃ TECHNOLOGICZNYCH MOŻLIWYCH DO WDROŻENIA PRZEZ PWIK SP. Z O.O. W RYBNIKU Z UWZGLĘDNIENIEM BEZPIECZEŃSTWA I SKUTECZNOŚCI PROCESU

5.1. Wprowadzenie

Technologie, które można wdrożyć w warunkach funkcjonowania PWiK Sp. z o.o. w Rybniku przedstawiono w rozdziale drugim monografii. Określenie warunków, jakie muszą być spełnione, aby dana technologia mogła być wdrożona, wymaga przeprowadzenia analizy, w której należy rozważyć kilka kluczowych czynników, takich jak: koszty wdrożeniowe, koszty operacyjne, złożoność obsługi instalacji, zagrożenie odorowe. Następnie, w odniesieniu do możliwości wdrożenia konkretnych rozwiązań technologicznych dobranych do warunków PWiK Sp. z o.o. w Rybniku, należy rozważyć zewnętrzne i wewnętrzne czynniki, które w istotny sposób mogą wpływać na ich wdrożenie. Lista technologii, uwzględniająca rozwiązania o najwyższym potencjale wdrożeniowym, została przedstawiona w tabeli 10. Poddano ją wstępnej weryfikacji w oparciu głównie o kryteria ekonomiczne i technologiczne.

Tabela 10. Zestawienie technologii wybranych dla PWiK Sp. z o.o. w Rybniku

Technologia	Opis istniejącego stanu
Witryfikacja	Jest to końcowy etap zagospodarowania osadów. Wdrożenie technologii witryfikacji musi być sprzężone ze wstępnym osuszeniem, a następnie spoieleniem osadów – optymalne uwodnienie osadów na wejściu do linii technologicznej zakończonej witryfikacją popiołów to 70% s.m.o. Parametry związane z zawartością metali ciężkich lub innych związków organicznych nie stanowią przeszkody przy wdrożeniu tego rozwiązania. Technologia wpisuje się w ideę zielonej gospodarki i <i>waste to product</i> , gdzie producent odpadu staje się producentem półproduktu do dalszego wykorzystania.
Proces Cambi	Istotny element ciągu technologicznego przetwarzania osadu, hydroliza osadu umożliwia lepsze jego odwodnienie na późniejszym etapie, a tym samym szybsze wytworzenie suszu osadowego do dalszego zagospodarowania. Sugeruje się, aby proces włączyć do docelowej linii technologicznej. Zdiagnozowane zarówno wewnętrzne, jak i zewnętrzne uwarunkowania nie stanowią przeszkody we wdrażaniu technologii.
Suszenie termiczne	Element niezbędny do otrzymania osadu o parametrach uwodnienia nadających się do spalania lub pirolizy. W zależności od wybranej technologii suszenia i dostępności energii wytworzonej w ramach własnej działalności wdrożenie technologii może różnić się pod względem efektów ekonomicznych. Rozważanie podstawowe zarówno w przypadku produkcji paliwa alternatywnego do rozwiązań o charakterze systemowym (przekształcanie termiczne w instalacjach zewnętrznych), jak i do zagospodarowania osadu w miejscu. Istotny jest dobór technologii tak, aby gwarantowała osiągnięcie 70% s.m.o. Warunkiem stanowiącym przeszkodę może być dostępność miejsca – suszarnia wymaga dodatkowej powierzchni.

Technologia	Opis istniejącego stanu
Spalanie	Końcowy sposób zagospodarowania termicznego wysuszonych osadów ściekowych, spalanie połączone z odzyskiem energii umożliwia wykorzystanie ciepła odpadowego do ogrzewania budynków i wody. Istotna jest dostępność miejsca i osadów o odwodnieniu min. 70% s.m.o.
Współspalanie	Analogicznie do spalania, tyle że w ujęciu systemowym, osady o odwodnieniu do 70% wywożone są do obiektów termicznego przekształcania zlokalizowanych poza oczyszczalnią.
Kompostowanie	Technologia, w której wytwarza się produkt do zastosowania w rolnictwie. Osady w PWiK Sp. z o.o. charakteryzują się niską zawartością metali ciężkich (bezpieczny poziom), co wskazuje, że nie ma przeszkód do ich zagospodarowania w ten sposób. Brak jest informacji o zawartości węglowodorów aromatycznych i substancji ropopochodnych w osadach. Kryterium dostępności miejsca jest istotne w przypadku wdrażania tej technologii.
Zgazowanie	Nowatorska metoda prowadząca do odzysku paliwa gazowego z osadów. Wsad musi być odwodniony – min. 70% s.m.o. Po przekształceniu termicznym otrzymuje się gazy palne, które w procesie kogeneracji mogą być przekształcane w energię elektryczną i ciepłą. Pozostałe popioły mogą być wykorzystane rolniczo – jeśli wsadem jest czysty osad lub poddane wityfikacji.
Piroliza niskotemperaturowa	Nowatorska metoda prowadząca do odzysku paliwa gazowego i olejów palnych z osadów. Wsad musi być odwodniony – min. 50% s.m.o. Po przekształceniu termicznym otrzymywane są oleje palne (półprodukt do rafinacji) i gazy, które w procesie kogeneracji mogą być przekształcane w energię elektryczną i ciepłą – ze względu na małą ilość gazów wykorzystywane są one głównie jako energia na potrzeby procesowe. Pozostałe popioły mogą być wykorzystane rolniczo – jeśli wsadem jest czysty osad lub poddane wityfikacji.
Grunty antropogeniczne	Technologia produkcji gruntów antropogenicznych wymaga instalacji przeróbki kruszyw i odpowiednich mieszalników. Przedsiębiorstwo w ramach własnej działalności może otworzyć zakład przeróbki osadów lub współpracować z funkcjonującym już zakładem i oddawać osady ustabilizowane na zasadach zbliżonych do przekazywania osadów na cele rolnicze (zgodnie z obowiązującymi zasadami i przepisami prawa).
Nawozy organiczne	Technologia produkcji nawozów organicznych wymaga instalacji do wyprażania i granulacji osadów. W Polsce jest to nowatorskie podejście. Wsad musi zostać dobrze odwodniony, następnie wyprażony – termicznie zmineralizowany.

Szersza analiza możliwości wdrożenia technologii termicznego przekształcania osadów wymaga przeprowadzenia analizy kalorymetrycznej.

Analiza wyników badań fizykochemicznych osadów przedstawionych w rozdziale 2 wskazuje, że zawartość materii organicznej w suchej masie osadu waha się w granicach od 40 do 60%, co wskazuje, że pozostałą część stanowi wypełnienie mineralne, będące główną częścią popiołów. Odnosząc się do tych wyników można postawić tezę, że przy takiej proporcji części organicznej do części mineralnej, wartość opałowa osadów może nie osiągnąć wysokich parametrów.

Kolejną kwestią jest określenie, czy przekształcaniu termicznemu będzie podlegał odwodniony osad surowy czy przefermentowany. Osad przefermentowany traci część kaloryczności, która odbierana jest pod postacią biogazu; według Lurgiego ten sam osad nieprzefermentowany o uwodnieniu 30% charakteryzuje się kalorycznością 12–20 MJ/kg, a przefermentowany o tym samym uwodnieniu: 8–14 MJ/kg. Na etapie doboru technologii istotne jest ustalenie miejsca jej wdrożenia, rodzaju osadu i jego kaloryczności, jako podstawowych informacji niezbędnych do docelowego wdrożenia.

Analiza przeprowadzona w Politechnice Śląskiej w ramach „Ekspertyzy w zakresie możliwości technicznej realizacji termoinkluzji wytworzonej biomasy energetycznej w PWiK Rybnik”, potwierdza niską wartość opałową osadów ściekowych. Osad w warunkach analitycznych (przy pełnym wysuszeniu) osiąga kaloryczność do 11 000 kJ/kg. Można zatem założyć, że osad o uwodnieniu 30% będzie charakteryzował się proporcjonalnie kalorycznością 7700–9400 kJ/kg. Jest to relatywnie niska wartość, niezbyt „atrakcyjna” dla odbiorców zewnętrznych. Kaloryczność osadów ściekowych może zostać zwiększona przez ich kondycjonowanie, na przykład w układzie mieszania z innymi odpadami organicznymi, mułami węglowymi o podwyższonej wartości opałowej od 18 000 do 20 000 kJ/kg.

Przy przeprowadzaniu analizy unieszkodliwiania osadów ściekowych pod postacią produktu – paliwa alternatywnego dla obiektów, takich jak cegielnie, cementownie czy zakłady produkcji ceramiki, należy mieć na uwadze bardzo restrykcyjne wymogi jakościowe dotyczące paliw. W tabeli 11 zestawiono przykładowe wymagania stawiane paliwom alternatywnym przez jedną z wiodących spółek cementowych.

W przypadku oczyszczalni ścieków posiadającej węzeł fermentacji osadu połączony z odzyskiem biogazu i kogeneracją trudno będzie osiągnąć ww. przykładowe parametry kaloryczności osadu. Można przyjąć, że potencjalni odbiorcy prowadzący działalność związaną z produkcją energii bądź produktów budowlanych (ceramika, spoiwa) nie będą zainteresowani osadami o relatywnie niskiej wartości opałowej. Obniżenie wartości opałowej przez fermentację i odzysk biogazu nie wyklucza dalszego ich termicznego przekształcania. Rozwiązaniem tej sytuacji jest współspalanie osadów przefermentowanych z innymi paliwami o wartości kalorycznej przekraczającej 15 MJ/kg. Wprowadzenie takiego rozwiązania będzie wymagało podjęcia prac innowacyjnych, wdrożenia podejścia systemowego i budowy (lub partycypacji w kosztach budowy) specjalnej instalacji umożliwiającej współspalanie odpadów o niskiej kaloryczności. Pozyskiwanie mułów o wymaganej kaloryczności i mieszanie ich z odwodnionymi osadami ściekowymi w celu przygotowania kalorycznej mieszanki paliwowej najkorzystniej jest prowadzić w pobliżu obiektu, takiego jak spalarnia. Ten kierunek wydaje się być bardzo trudny do zrealizowania samodzielnie przez jedno przedsiębiorstwo.

Tabela 11. Przykładowe wymagania stawiane paliwom alternatywnym

Parametr	Wartość zalecana przez odbiorcę	Wartości graniczne - niedotrzymanie parametrów powoduje odrzucenie dostawy przez zamawiającego
Wartość opałowa	ponad 18 000 kJ/kg	15 000 kJ/kg
Zawartość popiołu	poniżej 20,0%	35,0%
Zawartość siarki całkowitej	poniżej 2,0%	3,0%
Zawartość chloru	poniżej 0,7%	1,0%
Granulacja		do 30 mm
Zawartość wilgoci		do 10%*
Średnia gęstość usypowa		od 0,2 do 0,6 Mg/m ³
Dopuszczalna zawartość substancji chemicznych i metali ciężkich w paliwie zastępczym		
Fluor		do 100 ppm
Kadm		do 20 ppm
Rtęć		do 0,5 ppm
Tal		do 10 ppm
Arsen		do 10 ppm
Kobalt		do 50 ppm
Nikiel		do 50 ppm
Antymon		do 50 ppm
Ołów		do 250 ppm
Chrom		do 250 ppm
Miedź		do 250 ppm
Mangan		do 250 ppm
Wanad		do 250 ppm
Suma As, Co, Ni, Sb, Pb, Cr, Cu, Mn, V < 1400		

Źródło: oprac. na podstawie materiałów otrzymanych z jednej z wiodących spółek cementowych.

* W przypadku osadów ściekowych graniczna akceptowana wartość to 30%.

Przedstawione warunki wdrożenia technologii zagospodarowania osadów ściekowych dla aglomeracji Rybnik w odniesieniu do posiadanych danych nie wykluczają w zasadzie żadnej z nich, ale pozwalają na obiektywną ocenę porównawczą i udzielenie rekomendacji.

5.2. Wybrane technologie i ich analiza

Wybrane technologie zagospodarowania osadów wymagają weryfikacji pod kątem możliwości ich wdrożenia. Wstępna analiza została odniesiona do podstawowych kryteriów, jakimi są: prostota obsługi technologii, koszty wdrożenia, wymogi lokalizacyjne oraz finalny produkt poprocesowy. Założono, że najbardziej promowane rozwiązania powinny charakteryzować się oceną możliwości wytworzenia produktu, niskim kosztem wdrożeniowym i eksploatacyjnym oraz niewielkimi wymaganiami obszarowymi pod lokalizację inwestycji. Biorąc pod uwagę skład fizykochemiczny osadów ściekowych, istotne znaczenie

z uwagi na zawartość metali ciężkich i węglowodorów, będą miały kierunki rolniczego wykorzystania i przetwarzania (nawozy, kompost), ponieważ to właśnie te parametry wpływają na wykorzystanie osadów ściekowych w taki sposób.

W tabeli 12 zestawiono analizowane technologie zagospodarowania osadów, podając ich charakterystyczne parametry, a także wybrane warunki wdrażania i kryteria stosowania tych rozwiązań.

Przeprowadzenie analizy porównawczej wdrożenia rozpatrywanych technologii w aglomeracji Rybnik wymaga doprecyzowania istotnych parametrów i odniesienia ich do warunków lokalnych aglomeracji. Najważniejszym parametrem, warunkującym analizę kosztów, jest ilość i jakość osadów ściekowych przewidzianych do zagospodarowania w ciągu roku.

W celu określenia nakładów inwestycyjnych i kosztów eksploatacyjnych przyjęto następujące założenia:

- roczna ilość odwodnionych osadów ściekowych: 10 000 Mg/rok,
- zawartość suchej masy w osadach odwodnionych: 20%,
- koszt jednostkowy budowy instalacji: według danych z tabeli 12,
- koszt jednostkowy eksploatacji instalacji.

Przedstawione zestawienie (tab. 12) umożliwia wstępną weryfikację technologii w odniesieniu do zasadniczych kryteriów i ułatwia rekomendację technologii, które charakteryzują się największym potencjałem wdrożeniowym. Ze wstępnie zidentyfikowanych technologii szczególnie interesujące wydają się te, które uwzględniają zasady gospodarki cyrkularnej, tj. prowadzącej do domknięcia obiegu pierwiastków biogenych w przyrodzie.

Na podstawie oceny przedstawionej w tabeli 12 zaproponowano technologie, które mają potencjalne zastosowanie w warunkach aglomeracji Rybnik i na dalszym etapie prac, zostaną ocenione pod kątem wskaźnika kosztów:

- suszenie termiczne,
- współspalanie,
- piroliza niskotemperaturowa,
- produkcja gruntów antropogenicznych,
- produkcja nawozów organicznych.

Suszenie termiczne to technologia znana i zarazem jedna z najczęściej wprowadzanych w dużych oczyszczalniach w Polsce. Powstający susz ma potencjalnie kilka rynków zbytu – końcowego zagospodarowania, a jednocześnie suszenie osadu jest pierwszym krokiem do przekształcenia termicznego osadów ściekowych, co stwarza stosunkowo szerokie możliwości ich późniejszego unieszkodliwiania zarówno w układach lokalnych, jak i w ramach rozwiązań systemowych.

Wdrożenie instalacji do współspalania osadów ściekowych i innych odpadów, przy jednoczesnym odzysku energii, ma uzasadnienie ekonomiczne, jeśli stanie się rozwiązaniem systemowym i to, w najlepszym układzie, przy

Tabela 12. Szacunkowa parametryzacja technologii zagospodarowania osadów

Technologia	Obsługa	Odory	Skład fizykochemiczny osadów	Ilość osadów tys. Mg/rok	Koszty wdrożeniowe	Koszty eksploatacyjne PLN/Mg osadu	Wymogi lokalizacyjne	Uwodnienie osadu	Opór społeczny	Odpad	Produkt
Witryfikacja	złożona	brak	brak wymogów	5-50	*	*	nie wymaga znacznego obszaru	wymaga odwodnionego osadu	nieznaczny	brak	granulaty szkltowe
Proces Cambi	złożona	brak	brak wymogów	10-150	**	**	nie wymaga znacznego obszaru	nie wymaga odwodnionego osadu	nieznaczny	brak	osad zawierający 30-40% s.m.
Suszenie termiczne	prosta	moga wystąpić	brak wymogów	5-30	1200-1500 PLN/Mg osadu	120-150	wymaga znacznego obszaru	nie wymaga odwodnionego osadu	umiarkowany	brak	susz osadowy (palivo alternatywne)
Spalanie	prosta	brak	brak wymogów	20-150	2500-3000 PLN/Mg osadu	100-120	nie wymaga znacznego obszaru	wymaga odwodnionego osadu	znaczny	popioły	brak
Współspalanie	prosta	brak	brak wymogów	20-200	3000-5000 PLN/Mg osadu	100-120	nie wymaga znacznego obszaru	wymaga odwodnionego osadu	znaczny	popioły	brak
Kompostowanie	złożona	moga wystąpić	wymagana niska zawartość metali	5-80	700-1000 PLN/Mg osadu	130-180	wymaga znacznego obszaru	nie wymaga odwodnionego osadu	umiarkowany	brak	kompost
Zgazowanie	złożona	brak	brak wymogów	10-90	***	***	wymaga znacznego obszaru	wymaga odwodnionego osadu	umiarkowany	koksik pirolityczny	gaz
Piroliza niskotemperaturowa	złożona	brak	brak wymogów	10-90	800-1200 PLN/Mg osadu****	120-150	nie wymaga znacznego obszaru	wymaga odwodnionego osadu	umiarkowany	koksik pirolityczny	gaz, oleje
Grunty antropogeniczne	prosta	moga wystąpić	wskazana niska zawartość metali	10-90	brak, ewentualny zakup środków transportu	50-100	nie wymaga znacznego obszaru	nie wymaga odwodnionego osadu	umiarkowany	brak	grunt rekultywacyjny
Nawozy organiczne	złożona	brak	wskazana niska zawartość metali	10-50	2500-3000 PLN/Mg osadu	100-150	nie wymaga znacznego obszaru	wymaga odwodnionego osadu	umiarkowany	brak	nawóz organiczny - granulaty

* Koszty trudne do oszacowania na tym etapie, technologia wymaga indywidualnego podejścia, ** koszty trudne do oszacowania na tym etapie, technologia wymaga odrębnego projektu i kosztorysu ze względu na WKfY zainstalowane w oczyszczalni, *** koszty trudne do oszacowania, technologia rozpoznawana i testowana w skali laboratoryjnej, **** w zależności od rodzaju docelowego rozwiązania pod uwagę wzięto koszty wdrożenia technologii WSK.

zaangażowaniu jednostki zajmującej się produkcją energii jako koordynatora procesu. Dla regionu śląskiego technologie współspalania osadów stanowią obecnie rekomendowane rozwiązania docelowe, przy czym koszt inwestycyjny instalacji w takim rozwiązaniu systemowym jest bardzo wysoki i może osiągać nawet kilkadziesiąt milionów euro. Ponieważ na obecnym etapie prac nad tym rozwiązaniem niemożliwe jest określenie ram działania systemu w skali regionalnej/subregionalnej, a tym bardziej warunków udziału PWiK Sp. z o.o. w Rybniku w takim przedsięwzięciu, analizie efektywności kosztowej poddano rozwiązanie analogiczne – spalanie, które może być prowadzone w jednym przedsiębiorstwie.

5.3. Podsumowanie

Obiecującym rozwiązaniem umożliwiającym przeróbkę osadów w ilości do 100 tys. Mg/rok jest piroliza niskotemperaturowa prowadząca do przekształcenia osadów w paliwo gazowe, olejowe i koksik pirolityczny. Przeprowadzone analizy i doniesienia naukowe potwierdzają jej wysoką skuteczność i potencjał wdrożeniowy. Przy wdrażaniu technologii termicznych niezbędne jest wysuszenie wsadu do minimum 50% suchej masy, a optymalnie 70%.

Ciekawym rozwiązaniem, niejako kontynuacją obecnego, jest wykorzystywanie osadów do produkcji antropogruntów. Jest to jednak rozwiązanie ryzykowne ze względu na brak rynków zbytu i dużą konkurencję dostawców osadu. Jest ono właściwie bezkosztowe – zachodzi ewentualnie konieczność zakupu taboru samochodowego do przewozu osadów do odbiorcy.

Brak systemowego – krajowego podejścia do tematyki zagospodarowania osadów ściekowych powoduje różną interpretację wyboru technologii końcowej. Należy więc wybrać taki kierunek zagospodarowania osadów ściekowych, aby działania wdrożeniowe realizowane były zgodnie z Krajowym programem gospodarki odpadami.

ASPEKT EKONOMICZNY WPROWADZANIA NOWYCH ROZWIĄZAŃ TECHNOLOGICZNYCH DO GOSPODARKI OSADAMI ŚCIEKOWYMI W PWIK SP. Z O.O. W RYBNIKU

6.1. Wprowadzenie

Jedną z głównych sił napędowych w działalności przedsiębiorstw, niezależnie od sektora, są innowacje. Wdrażanie nowych rozwiązań jest procesem czasochłonnym, obciążonym dużym ryzykiem, a przede wszystkim bardzo kosztownym. Właściwe prowadzenie procesu wdrażania innowacji wiąże się ze stałym monitorowaniem zidentyfikowanych możliwości innowacyjnych, do których zalicza się:

- źródła wewnętrzne – czyli te znajdujące się wewnątrz przedsiębiorstwa lub wewnątrz sektora, na przykład niespodziewane wydarzenia, konkretna potrzeba czy zmiany w strukturze,
- źródła zewnętrzne – obejmujące całokształt zdarzeń występujących poza przedsiębiorstwem lub branżą, na przykład nowe efekty rozwoju naukowego czy kwestie demograficzne.

Problematyka źródeł innowacji ma szczególne znaczenie z punktu widzenia podejścia kompleksowego do organizacji procesu wdrażania nowego rozwiązania mającego swój początek w zainicjowaniu pomysłu, a koniec na etapie wprowadzania na rynek. Źródła podażowe wpływają na powstanie nowego rozwiązania, dla którego następnie próbuje się znaleźć praktyczne zastosowanie. W przypadku źródeł popytowych sytuacja jest odwrotna, co oznacza, że czynniki zewnętrzne determinują powstanie nowego rozwiązania.

W działalności innowacyjnej istotna jest współpraca zarówno z instytucjami, jak i z innymi przedsiębiorstwami, w celu efektywnego wdrożenia nowego rozwiązania. Wśród aktywnych przedsiębiorstw innowacyjnych związanych z usługami odprowadzania i oczyszczania ścieków aż 33,3% deklaruje taką współpracę (dane GUS). Do głównych grup partnerów zaliczani są przede wszystkim dostawcy wyposażenia, materiałów i komponentów, przedsiębiorstwa z tej samej grupy przedsiębiorstw, jak również szkoły wyższe i instytuty badawcze. Oznacza to, że przedsiębiorstwa coraz częściej odchodzą od wdrażania samodzielnego modelu innowacji, skłaniając się do modelu otwartego, który charakteryzują zarówno mniejsze koszty, jak i współdzielenie ryzyka. Interdyscyplinarne podejście do procesu wdrażania nowych rozwiązań technologicznych powoduje, że przedsiębiorstwa coraz chętniej korzystają z zewnętrznych zasobów naukowo-badawczych, dzięki czemu istotnie zwiększa się ich potencjał innowacyjny.

Wiele korzyści przemawiających za poszukiwaniem nowych rozwiązań zarówno w kontekście wymiernym, jak i niewymiernym powoduje, że zwiększa

się liczba przedsiębiorstw wprowadzających do własnej działalności nowe produkty i procesy. Wysoką aktywność przedsiębiorstw w działalności innowacyjnej potwierdzają dane GUS. W roku sprawozdawczym obejmującym lata 2014–2016 odnotowano wzrost udziału przedsiębiorstw przemysłowych aktywnych innowacyjnie o 1,4%, a w przypadku usług wskaźnik ten wzrósł o 3,9%. Wśród przedsiębiorstw odpowiedzialnych za odprowadzanie i oczyszczanie ścieków udział przedsiębiorstw innowacyjnych wyniósł 26,3%, w tym 24,1% przedsiębiorstw wdrażało innowacje procesowe, co jest charakterystyczne dla rozwoju tej branży.

Niezależnie od branży za wdrażaniem nowych rozwiązań przemawiają między innymi korzyści społeczne, środowiskowe i ekonomiczne przedstawione w tabeli 13.

Tabela 13. Korzyści z wdrażania nowych rozwiązań

<p>Korzyści społeczne</p>	<ul style="list-style-type: none"> • poprawa wizerunku firmy • podwyższanie kwalifikacji przez pracowników – powstanie miejsc pracy wymagających wysoko wykwalifikowanej kadry • inspirowanie pracowników • nabywanie i szerzenie wiedzy • poprawa warunków i bezpieczeństwa pracy • większe zadowolenie klientów i silniejsze związki
<p>Korzyści środowiskowe</p>	<ul style="list-style-type: none"> • ograniczenie negatywnego oddziaływania na środowisko (ograniczenie wpływu na środowisko) • zmniejszenie ilości wytwarzanych odpadów • zminimalizowanie zużycia zasobów – w szczególności zużycia energii, materiałów, wody, gruntu • ograniczenie emisji wszelkich zanieczyszczeń (pyłowo-gazowych, odpadów, ścieków i innych) i zwiększenie udziału wykorzystania surowców wtórnych • zwiększenie wartości dodanej produktu – polepszenie funkcjonalności, trwałości i elastyczności produktów, przy mniejszym zużyciu materiałów i energii
<p>Korzyści ekonomiczne</p>	<ul style="list-style-type: none"> • obniżenie kosztów działalności (zmniejszenie nakładów zasobów i energii, przy jednoczesnym doskonaleniu jakości produktu lub usługi) • wzrost potencjału produkcyjnego • usprawnienie działalności marketingowej – wzmocnienie marki • zdobycie nowych rynków • wzrost zysków przedsiębiorstwa • unowocześnienie parku maszynowego przedsiębiorstwa • zagwarantowanie działalności przedsiębiorstwa w przyszłości • korzyści podatkowe • wyższy stopień utrzymania klientów • większy udział w rynku • niższe koszty bezpośrednio i lepsze wykorzystanie aktywów • rozwój możliwości rynkowych i partnerstwo • zewnętrzne finansowanie eko-innowacji

Mimo znacznych różnic między przedsiębiorstwami reprezentującymi różne sektory gospodarki i rodzajami wdrażanych innowacji, głównym celem takich inicjatyw jest lepsze wykorzystanie istniejącego potencjału lub tworzenie nowego potencjału, który umocniłby pozycję przedsiębiorstwa na rynku. Dzięki wprowadzaniu nowych rozwiązań na poziomie operacyjnym zarządzania, możliwe jest zwiększenie efektywności procesów przedsiębiorstwa, co bezpośrednio przekłada się na osiągnięcie przewagi konkurencyjnej.

W praktyce wykorzystuje się wiele analiz ekonomicznych i metod oceny opłacalności projektów inwestycyjnych, w tym innowacyjnych, które mają na celu wyznaczenie wskaźnika ekonomicznego, wśród których wyróżnia się (Kleiber, 2011):

- analizę CBA (ang. *cost-benefit analysis*) – analiza kosztów i korzyści,
- analizę LCC (ang. *life cycle costing*) – analiza kosztów cyklu życia,
- inne metody, które mogą być stosowane do oceny projektów inwestycyjnych, w szczególności technologii, między innymi wartość zaktualizowaną netto (ang. *net present value* – NPV).

W literaturze można odnaleźć propozycje pomiaru efektywności procesów innowacyjnych już wdrożonych rozwiązań, z wykorzystaniem kompleksowych metod opartych na zdefiniowanych wskaźnikach. Wykorzystanie właściwej metody oceny ekonomicznej innowacyjności implementowanego rozwiązania pozwala na bezpośredni pomiar potencjału innowacyjnego przedsiębiorstwa, a tym samym na ciągłe doskonalenie. Wśród stosowanych wskaźników oceny według kryterium marża-zysk wyróżnia się na przykład efektywność ze sprzedaży do kosztów wytworzenia (Nogalski i Niewiadomski, 2014), która pozwala na ocenę, w jaki sposób wdrożenie rozwiązania innowacyjnego przełożyło się na osiągnięty poziom zysku.

Europejską miarą oceny poziomu efektywności innowacji (Lorek, 2015) jest wskaźnik *Summary Innovation Index* (SII), który jest wskaźnikiem złożonym, będącym efektem uśrednienia 27 równych subwskaźników pogrupowanych w następujących kategoriach (MERIT, 2017):

- warunki ramowe (ang. *framework conditions*),
- inwestycje (ang. *investments*),
- działalność innowacyjna (ang. *innovation activities*),
- wpływ (ang. *impacts*).

Należy zauważyć, że są to wskaźniki stosowane do oceny poziomu innowacyjności poszczególnych krajów, ale z uwagi na swój uniwersalny charakter, mogą być również zastosowane do oceny przedsiębiorstw. W tym przypadku mogą zostać wykorzystane wskaźniki określające wpływ na sprzedaż, na przykład sprzedaż innowacji produktowych na poziomie rynku i firmy (ang. *sales of new-to-market and new-to-firm product innovations*).

Do uzupełnienia informacji na temat potencjału innowacyjnego przedsiębiorstwa, z uwagi na aspekt ekonomiczny, wykorzystuje się również informacje

na temat poziomu nakładów przeznaczonych na działalność B+R, wdrożeniową i innowacyjną, przy czym uwzględnia się całokształt kosztów związanych między innymi z zakupem wiedzy niematerialnej i prawnej, jak również z pracami badawczymi czy szkoleniami pracowników.

Należy jednak zauważyć, że pomiar innowacyjności jest procesem złożonym, a literatura przedmiotu wskazuje, że „(...) innowacyjność rozumiana jako cecha przedsiębiorstwa innowacyjnego nie posiada syntetycznego miernika” (Wodecka-Hyjek, 2013, s. 70). Ważnym wnioskiem z podejmowanych prób określenia uniwersalnego wskaźnika oceny innowacyjności jest konieczność doboru właściwych wskaźników zależnie od wielkości przedsiębiorstwa, celów strategicznych czy uwzględnianie aktualnej sytuacji na rynku. Należy podkreślić, że przedsiębiorstwa prowadzące pomiar swojej aktywności innowacyjnej przez niewłaściwie zdefiniowane wskaźniki, często niekorzystnie ustalają priorytety.

Pomiar innowacyjności prowadzony na potrzeby własne jest inaczej przeprowadzany w porównaniu z pomiarem prowadzonym na potrzeby udostępniania informacji wybranym interesariuszom (np. akcjonariuszom). W pierwszym przypadku istotne informacje pochodzą z wykorzystania takich wskaźników, jak zadowolenie klienta, liczba innowacyjnych projektów, nad którymi pracuje firma, nakłady na badania i rozwój jako udział w sprzedaży. W przypadku wskaźników ukierunkowanych na zewnątrz zastosowanie mają takie wskaźniki, jak wzrost przychodów, procent przychodów ze sprzedaży nowych produktów czy usług (Łukasik, 2017).

Stała kontrola efektów procesów innowacyjnych realizowanych w przedsiębiorstwie pozwala na uwzględnienie wskaźników nakładów na innowacje, co w praktyce ustala punkt odniesienia podczas podejmowania kolejnych decyzji inwestycyjnych.

6.2. Efektywność inwestycyjna w sektorze wodociągowo-kanalizacyjnym

Rozwój technologii środowiskowych jest jednym z kluczowych elementów zasad zrównoważonego rozwoju w skali kraju (rys. 7). Oznacza to, że obszar technologiczny, który obejmuje gospodarkę wodno-ściekową, ma istotne znaczenie dla rozwoju infrastruktury technicznej Polski, a tym samym bezpośrednio wpływa na warunki życia mieszkańców i determinuje wzrost gospodarczy.

Z uwagi na rodzaj świadczonych usług (dostarczanie wody, odbiór i oczyszczanie ścieków), przedsiębiorstwa wodno-kanalizacyjne muszą zapewniać:

- dostępność, niezawodność i stałość świadczenia usług,
- akceptowalną społecznie cenę za świadczone usługi.

W związku z powyższym wdrożenie nowoczesnych technologii stanowi nie tylko kluczową determinantę rozwoju, ale daje także możliwość elastycznego działania, poprawę dotychczasowej efektywności czy dywersyfikację prowadzonej działalności, przy zmniejszeniu negatywnego jej wpływu na środowisko.



Rysunek 7. Elementy zrównoważonego rozwoju

Źródło: oprac. na podstawie prezentacji A. Markowskiej, Analiza kosztów i korzyści w kontekście ochrony lasów, Seminarium Polforex, 11 marca 2011 r.

Specyfika branży wodno-kanalizacyjnej powoduje, że w kwestii nowoczesnych rozwiązań technologicznych często mówi się o ekoinnovacjach rozumianych jako działania zmierzające do podniesienia jakości usług i zmniejszenia uciążliwości dla środowiska. Z tego też względu analiza opłacalności inwestycji proekologicznych jest pojęciem wielowymiarowym, gdyż, oprócz wartości pieniężnej, zachodzi potrzeba uwzględnienia zakładanego efektu ekologicznego (Małecki, 2011).

Mimo intensywnych prac i widocznych inwestycji w obszarze budowy infrastruktury komunalnej dla zapewnienia efektywnego procesu oczyszczania ścieków, nadal istnieją duże potrzeby związane z wypełnianiem zobowiązań wynikających z *Dyrektywy 91/271/WE z dnia 21 maja 1991 r. w sprawie oczyszczania ścieków komunalnych*. Głównym instrumentem jej wdrażania jest Krajowy program oczyszczania ścieków komunalnych (KPOŚK), w którym określono zakres rzeczowy i finansowy inwestycji i zamieszczono wykaz aglomeracji, niezbędny do wdrożenia Dyrektywy.

Wiele aktów prawnych zarówno unijnych, jak i krajowych wymusza właściwą regulację gospodarki wodno-ściekowej i realizowanie działań inwestycyjnych zmierzających do spełnienia narzuconych wymagań. Analiza obowiązujących przepisów prawnych (szerzej omówiona w rozdz. 1) pozwala na zidentyfikowanie obszarów problemowych związanych z komunalnymi osadami ściekowymi, które determinują wprowadzanie nowych regulacji i planów realizacji inwestycji. Należy przy tym zaznaczyć, że podstawowe założenia dla regulacji gospodarki wodno-ściekowej wynikają z ogólnych zapisów aktów prawnych obejmujących takie aspekty działalności, jak (Strategia, 2018):

- gospodarka odpadami,
- odnawialne źródła energii,
- nawozy i nawożenie.

Oznacza to, że w celu zapewnienia właściwego postępowania z komunalnymi osadami ściekowymi niezbędne są inwestycje związane z wdrażaniem technolo-

gii ich przetwarzania i odzysku. Z uwagi na ciągle zmieniające się uwarunkowania funkcjonowania branży istotne jest zatem regularne przeznaczanie środków na rozwój przedsiębiorstwa, przede wszystkim w celu unowocześnienia procesów, które pozwolą na zmniejszenie ilości powstających w oczyszczalniach osadów ściekowych, stanowiących odpady, a tym samym na stworzenie możliwości ich efektywnego zagospodarowania przy optymalizacji kosztów.

Zaangażowanie przedsiębiorstw w działalność rozwojową i wdrażanie innowacyjnych technologii i nowoczesnych rozwiązań stwarza wiele dodatkowych możliwości i ma na celu przede wszystkim:

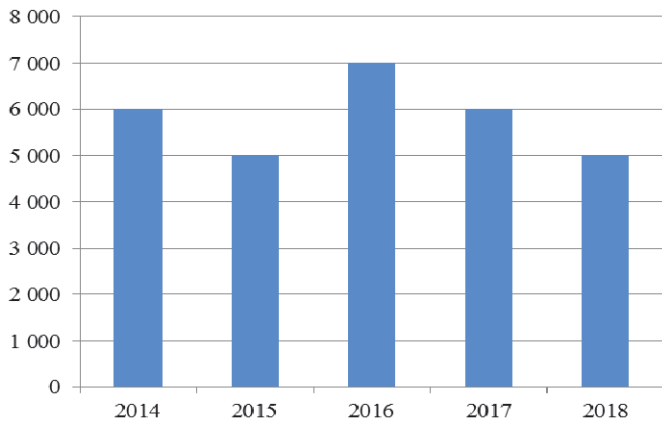
- poprawę efektywności pracy systemu dystrybucji wody, biorąc pod uwagę jej zużycie i straty,
- zapewnienie efektywnego i skutecznego uzdatniania wody,
- usprawnienie zarządzania siecią wodociągowo-kanalizacyjną,
- zapewnienie efektywnego i skutecznego oczyszczania ścieków,
- optymalizację kosztów działalności przedsiębiorstwa,
- spełnienie wymogów formalnych i prawnych,
- ograniczenie wpływu działalności na środowisko, ze szczególnym uwzględnieniem ograniczenia zanieczyszczania wód i gruntów.

Usprawnienie pracy operacyjnej zakładów wodociągowo-kanalizacyjnych jest przedmiotem zainteresowania wszystkich eksploatatorów; są to przede wszystkim działania mające na celu zapewnienie bezawaryjnego i efektywnego funkcjonowania oczyszczalni. W związku z powyższym nacisk na działania inwestycyjne w praktyce w większości przypadków oznacza wdrażanie innowacyjnych rozwiązań jako elementu strategii przedsiębiorstwa nastawionego na długotrwały rozwój.

Branża wodociągowo-kanalizacyjna obecnie boryka się z problemem zagospodarowania osadów ściekowych, który jest ważnym problemem technicznym, jak również społecznym i ekologicznym. W świetle nowych trendów związanych z gospodarką obiegu zamkniętego coraz częściej poddaje się pod dyskusję temat surowcowego i energetycznego wykorzystywania osadów. Oznacza to, że przedsiębiorstwa, poza podstawową działalnością, są w stanie dostosować obiekty do nowej roli – produkcji energii lub produktów nawozowych.

6.3. Działalność inwestycyjna i potencjał rozwojowy PWIK Sp. z o. o. w Rybniku

Podstawę działalności PWiK Sp. z o.o. w Rybniku stanowi świadczenie usług zaopatrzenia w wodę oraz usług odbioru i oczyszczania ścieków. Odprowadzanie ścieków prowadzi eksploatowana przez Spółkę oczyszczalnia ścieków w Rybniku-Orzepowicach, gdzie ścieki poddawane są procesom oczyszczania na drodze mechanicznej i biologicznej. Pozostałością ww. procesu są osady ściekowe (rys. 8).



Rysunek 8. Ilość zagospodarowanych osadów ściekowych w OŚ Rybnik-Orzepowice [Mg]

OŚ Rybnik-Orzepowice jest obiektem spełniającym kluczową rolę w systemie przyjmowania i oczyszczania ścieków w aglomeracji, została zaprojektowana do przyjmowania ładunku zanieczyszczeń odpowiadającego: maksymalnie 150 000 RLM, średnio 127 500 RLM. Regularna rozbudowa sieci kanalizacyjnej powoduje, że ilość ścieków dopływających do oczyszczalni, a co za tym idzie również ilość powstających osadów, ciągle rośnie. Konieczność sprostania tym wyzwaniom powoduje, że niezbędne są inwestycje w nowoczesne i proekologiczne rozwiązania technologiczne.

W ostatnich latach PWiK Sp. z o.o. w Rybniku zrealizowała znaczące inwestycje w zakresie gospodarki wodno-ściekowej, między innymi:

- Rozbudowa i reorganizacja sieci kanalizacyjnej, w wyniku czego zlewnia oczyszczalni OŚ Rybnik-Orzepowice znacząco się powiększyła. W roku 2009 Równoważna Liczba Mieszkańców, jaką obsługiwała oczyszczalnia, wynosiła około 70 000 (wartość średnioroczna). Przekroczenie liczby 100 000 RLM nastąpiło po wybudowaniu systemu kanalizacyjnego na podstawie projektu współfinansowanego z Funduszu ISPA/Spójności. W efekcie OŚ Rybnik-Orzepowice została zaprojektowana do przyjmowania ładunku zanieczyszczeń odpowiadającego: maksymalnie 150 000 RLM, średnio 127 500 RLM.
- W roku 2015 PWiK Sp. z o.o. rozpoczęła prace związane z projektem budowy Stacji Uzdatniania Wody (wykonuje go firma zewnętrzna) wraz z infrastrukturą techniczną dla trzech studni głębinowych, będących źródłem zasilania dla zamierzonej inwestycji, a finalnie dla części dzielnicy Boguszowice.
- Prowadzenie ciągłej rozbudowy systemu monitoringu sieci wodociągowej.
- Prowadzenie systematycznej wymiany wodomierzy pracujących w systemie odczytów radiowych, celem zmniejszenia strat wody (BIP UM Rybnik, 2017).

Projektowanie procesów innowacyjnych, a tym samym realizacja działań inwestycyjnych w sektorze usług, wynika przede wszystkim z potrzeb zgłaszanych przez klientów i wraz z pojawianiem się na rynku nowoczesnych rozwiązań.

Konieczność dostosowania się do zmieniających się warunków otoczenia determinuje także konieczność ciągłego doskonalenia całego systemu zarządzania zasobami przedsiębiorstwa.

W ramach inwestycji organizacyjnych na uwagę zasługuje wdrożenie w roku 2009 Zintegrowanego Systemu Informatycznego Comarch ERP Egeria i integracja tego systemu z aplikacją do zbierania odczytów zużycia wody i fakturowania w terenie z wykorzystaniem kolektorów danych PSION. Było to pierwsze wdrożenie na tak dużą skalę w przedsiębiorstwie wodociągowym (Comarch, 2016). W PWiK Sp. z o.o. w Rybniku został również uruchomiony system nadzoru, kontroli i akwizycji danych (SCADA), który zawiera zbiór aplikacji służących do monitorowania i kontroli systemów rozproszonych, takich jak przepompownie ścieków, hydrofornie oraz studnie wodomierzowe z głównej lokalizacji (dyspozytornia). Inwestycje w systemy wspomagające monitorowanie i zarządzanie siecią wodociągowo-kanalizacyjną są niezwykle istotne z punktu widzenia ograniczenia bieżących strat i kosztów.

Istotnym elementem strategii rozwoju PWiK Sp. z o.o. w Rybniku jest intensywna i długotrwała współpraca nauki i biznesu, co przekłada się na aktywną współpracę z ośrodkami naukowo-badawczymi na Śląsku, jakimi są Politechnika Śląska i Główny Instytut Górnictwa. Efektem prac są ekoinnowacyjne rozwiązania będące odpowiedzią na wyzwania branży, potrzeby inwestycyjne przedsiębiorstwa oraz budowanie przewagi konkurencyjnej na rynku. PWiK Sp. z o.o., realizując projekty B+R i wdrażając nowe rozwiązania, stara się także dostosować do wymogów BAT (ang. *best available technology* – najlepsza dostępna technologia). Konieczność sprostania europejskim wyzwaniom, jakie stoją przed branżą wodociągowo-kanalizacyjną powoduje, że Spółka wykorzystuje dostępne możliwości inwestowania w nowoczesne i proekologiczne rozwiązania technologiczne. W ramach wspomnianej współpracy powstał szereg projektów (IATI, 2018), na przykład:

- System monitorowania i zarządzania eksploatacją sieci wodociągów i kanalizacji miasta Rybnika, 2005–2007, wartość umowy: 734 965 zł, wartość dofinansowania: 244 500 zł, instytucja finansująca: Program operacyjny SPO WKP.
- Zwiększenie redukcji biogenów poprzez optymalizację procesu biologicznego oczyszczania ścieków w oczyszczalni ścieków Rybnik-Orzepowice, 2009–2012, wartość umowy: 1 mln 734 tys. zł, wartość dofinansowania: 540 tys. zł, instytucja finansująca: MNiSW/NCBiR, Konsorcjum PWiK Sp. z o.o. Rybnik – GIG Katowice. Zgłoszenie patentowe nr P.421632 z dnia 19.05.2017 r. pt. „Sposób biologicznego oczyszczania ścieków”, autorstwa PWiK Sp. z o.o. w Rybniku i GIG w Katowicach.
- Innowacyjny sposób zagospodarowania osadów ściekowych celem spełnienia wymagań dyrektyw Unii Europejskiej w zakresie ochrony środowiska i energetyki, 2009–2011, wartość umowy: 1 mln 205 tys. zł, wartość dofinansowania: 487 tys. zł, instytucja finansująca: Program operacyjny POIG.

- Zintegrowany inteligentny system monitorowania i zarządzania eksploatacją sieci wodociągów na terenie działalności PWiK Sp. z o.o. w Rybniku, 2009–2012, wartość umowy: 3 mln 177 tys. zł, wartość dofinansowania: 1 mln 215 tys. zł, instytucja finansująca: Program operacyjny POIG.

We wszystkich pracach inwestycyjnych realizowanych przez Spółkę szczególną rolę odgrywa potencjał innowacyjny i umiejętność efektywnego wykorzystywania dostępnych zasobów przedsiębiorstwa. Dzięki wszystkim realizowanym projektom PWiK Sp. z o.o. w Rybniku ma możliwość poprawy efektywności funkcjonowania sieci wodociągowo-kanalizacyjnej, jak również ograniczenia kosztów związanych z zagospodarowaniem osadów.

Przez realizację działań B+R Spółka wprowadza innowacje do prowadzonego procesu oczyszczania ścieków. Wdrożenie projektów pozwala na zmianę końcowego etapu zagospodarowania osadów ściekowych, a tym samym na obniżenie kosztów zagospodarowania osadów, co również wpływa na obniżenie kosztów oczyszczania jednego metra sześciennego ścieków. Działalność w obszarze prac B+R i wdrożeniowych pozwala Spółce na wypracowanie pozycji na nowym dla niej rynku nowoczesnych rozwiązań systemowych dla ochrony środowiska i energetyki. W praktyce jednak wdrażanie wyników prac naukowo-badawczych, będących efektem współpracy przedsiębiorców i pracowników naukowych, powinno być uwarunkowane ekonomicznie (Heitor, 2004). Akceptowalna wartość dodana nowych technologii i produktów jest podstawą wprowadzania rezultatów projektu do podstawowej działalności przedsiębiorstwa.

6.4. Analiza efektywności ekonomicznej wybranych projektów innowacyjnych

W PWiK Sp. z o.o. w Rybniku podjęto działania zmierzające do wdrożenia wybranych innowacyjnych rozwiązań zagospodarowania osadów ściekowych w ramach współpracy nauki z przemysłem (Politechnika Śląska, Główny Instytut Górnictwa i PWiK). Zostały zrealizowane dwa projekty:

- Innowacyjny sposób zagospodarowania osadów ściekowych celem spełnienia wymagań dyrektyw Unii Europejskiej w zakresie ochrony środowiska i energetyki, 2009–2011.
- Koncepcja wdrożenia technologii przekształcania osadów ściekowych w PWiK Sp. z o.o. w Rybniku z ukierunkowaniem na produkcję granulatów nawozowych z uwzględnieniem aktualnie stosowanych rozwiązań w OŚ Rybnik-Orzepowice, 2017.

Pierwszy z wymienionych wyżej projektów zakończył się sukcesem i wdrożeniem instalacji do produkcji paliwa, a drugi jako alternatywny, posiada przygotowany model technologiczny i biznesowy. Założeniem przyjętym w każdym z rozwiązań jest przekształcenie powstającego odpadu w produkt rynkowy, którego produkcja i sprzedaż pozwolą na zmniejszenie kosztów

ponoszonych przez przedsiębiorstwo. Do przetwarzania rocznie będzie zużywanych 7000 Mg osadów ściekowych powstających w oczyszczalni ścieków w Rybniku-Orzepowicach. Wymienione rozwiązania są dojrzałe technologicznie i stanowią dobrą alternatywę dla stosowanego tradycyjnego sposobu zagospodarowania osadów ściekowych.

W celu zbadania efektywności ekonomicznej nowoczesnych rozwiązań dla gospodarki osadami ściekowymi w PWiK Sp z o.o. w Rybniku przeprowadzono porównawczą analizę ekonomiczną wybranych dwóch rozwiązań. Dla zapewnienia porównywalności pod względem ekonomicznym przyjęto założenie, że badana technologia daje możliwość wdrożenia w skali przemysłowej w warunkach OŚ Rybnik-Orzepowice i w jej efekcie powstaje produkt do końcowego zagospodarowania lub innego zastosowania. Badaniami zostało objętych sześć rozwiązań technologicznych, tj. suszenie termiczne, piroliza niskotemperaturowa, grunty antropogeniczne, nawozy mineralno-organiczne, spalanie i produkcja paliwa do współspalania (biokonwersja).

Dla porównania pod względem finansowym rozważanych rozwiązań technologicznych wykorzystano analizę efektywności kosztowej za pomocą metody DGC (wskaźnik dynamicznego kosztu jednostkowego, ang. *dynamic generation cost*), która umożliwia oszacowanie wskaźnika kosztów jednostkowych funkcjonowania danego systemu/rozwiązania. Metoda wyznaczania tego wskaźnika opiera się na znanych i stosowanych od wielu lat metodach dyskontowych, wprowadza jednak do analizy prognozę efektów realizacji inwestycji w ujęciu rzeczowym i odnosi zdyskontowane koszty inwestycji (w tym koszty realizacji i eksploatacji) do zdyskontowanych efektów rzeczowych (Dyduch, 2013).

Wzór wyrażający wartość dynamicznego kosztu jednostkowego przedstawia się następująco

$$DGC = \frac{\sum_{t=0}^{t=n} \frac{KI_t + KE_t}{(1+i)^t}}{\sum_{t=0}^{t=n} \frac{EE_t}{(1+i)^t}}$$

gdzie:

KI_t – nakłady inwestycyjne poniesione w danym roku,

KE_t – koszty eksploatacyjne poniesione w danym roku,

EE_t – efekt rzeczowy osiągnany w danym roku,

i – stopa dyskontowa,

t – rok; przyjmuje wartości od 0 do n , gdzie 0 jest rokiem, w którym ponoszone są pierwsze nakłady, natomiast n jest ostatnim zakładanym rokiem funkcjonowania inwestycji.

Dynamiczny koszt jednostkowy zdefiniowany powyżej odpowiada cenie, która pozwala na uzyskanie zdyskontowanych przychodów równych zdyskontowanym kosztom. Można również powiedzieć, że wskaźnik DGC pokazuje, jaki jest koszt uzyskania jednostki efektu ekologicznego w zakładanym okresie. Koszt ten

jest wyrażony w wartościach pieniężnych na jednostkę efektu ekologicznego, co w tym przypadku jest: zł/megagram osadu unieszkodliwionego zagospodarowanego. Otrzymany wynik zawiera nakłady inwestycyjne, koszty eksploatacyjne w odniesieniu do ilości osadów i pozwala na porównanie różnych wariantów dla przyjętych warunków inwestycyjnych i eksploatacyjnych.

Metoda DGC jest o tyle adekwatna do przeprowadzania przedmiotowej analizy, że ułatwia wskazanie rozwiązania pozwalającego na uzyskanie oczekiwanego rezultatu, przy najniższym koszcie dla przedsiębiorstwa, a w przypadku przedsiębiorstwa komunalnego – dla społeczeństwa. W związku z tym, jeżeli różne rozwiązania charakteryzują się identyczną miarą rezultatów, to w interesie przedsiębiorstwa (społecznym) jest wskazanie tej inwestycji, która posiada najniższą wartość wskaźnika dynamicznego kosztu jednostkowego (Rączka, 2002).

Przyjęte założenia do badania wskaźnika dynamicznego kosztu jednostkowego są następujące:

- roczna ilość osadów, jaka ma być zagospodarowana, wynosi 7000 Mg,
- stopa dyskontowa została przyjęta na poziomie 6%.
- nakłady inwestycyjne (w tym odtworzeniowe), jak również eksploatacyjne, zostały przyjęte indywidualnie dla każdego rozwiązania technologicznego; wyliczenia tych kosztów zostały oparte na wskaźnikowych cenach jednostkowych w odniesieniu do ilości osadów [Mg], jakie mają być zagospodarowane rocznie,
- nakłady inwestycyjne zostały ujęte w cenach stałych, ze względu na przyjęty stosunkowo krótki okres inwestycyjny,
- koszty eksploatacyjne zostały ujęte w cenach zmiennych (poziom inflacji 2,5% rocznie),
- dwuletni okres realizacji inwestycji,
- 25-letni okres eksploatacji inwestycji,
- nakłady inwestycyjne uwzględniają również koszty przedinwestycyjne i związane z wdrożeniem poszczególnych instalacji, w tym koncepcje, projekty, badania, pozyskanie zgód i decyzji administracyjnych.

Przyjmowane założenia inwestycyjne, eksploatacyjne i odtworzeniowe dla badanych sześciu rozwiązań technologicznych przedstawiają tabele 14–19.

Tabela 14. Nakłady i koszty technologii SUSZENIE TERMICZNE

Lp.	Wyszczególnienie	Jednostka	Wartość
1	Wskaźnik nakładów inwestycyjnych	PLN/Mg osadu	1400
	<i>Łączne nakłady inwestycyjne</i>	<i>PLN</i>	<i>9 800 000</i>
2	Wskaźnik rocznych kosztów eksploatacyjnych	PLN/Mg osadu	150
	<i>Roczne koszty eksploatacyjne</i>	<i>PLN</i>	<i>1 050 000</i>
3	Okres, po którym należy dokonywać odtworzeń	lata	5
4	Poziom odtworzenia majątku	%	20
	<i>Koszt odtworzenia majątku</i>	<i>PLN</i>	<i>1 960 000</i>

Źródło: analiza na podstawie: Analiza ekonomiczna wdrożenia, rynek produktu „Innowacyjny sposób zagospodarowania osadów ściekowych celem spełnienia wymagań dyrektyw Unii Europejskiej w zakresie ochrony środowiska i energetyki” – POIG 01.04.00-24-026. Raport końcowy. PWiK Sp. z o.o. w Rybniku, 2010.

Suszenie termiczne osadów ściekowych jest rozwiązaniem stosunkowo drożym, ale już znanym i sprawdzonym. Technologia pozwala na znaczne zmniejszenie ilości osadów ściekowych, niemniej w dalszym ciągu wymaga końcowego ich zagospodarowania, które będzie niezależne od przedsiębiorstwa. Stwarza to potencjalne ryzyko cenowe i produktowe, które może nie zapewnić warunków prowadzenia trwałej i zrównoważonej gospodarki osadowej. W kraju znane są przypadki, kiedy obiekty mają okresowe trudności ze znalezieniem końcowego odbiorcy dla suszu osadowego, co w konsekwencji prowadzi do wstrzymania eksploatacji suszarni i stosowania rozwiązań biologicznych – wykorzystanie do rekultywacji terenów.

Niewiele droższym rozwiązaniem jest piroliza niskotemperaturowa, która nad suszeniem osadów ściekowych ma zasadniczą przewagę – pozwala na końcowe zagospodarowanie osadów ściekowych. Pozostałości poprocesowe (w niewielkich ilościach) stanowią produkt, który jest stosowany w przemyśle petrochemicznym i wykorzystywany przyrodniczo.

Tabela 15. Nakłady i koszty technologii PIROLIZA NISKOTEMPERATUROWA

Lp.	Wyszczególnienie	Jednostka	Wartość
1	Wskaźnik nakładów inwestycyjnych	PLN/Mg osadu	1600
	<i>Łączne nakłady inwestycyjne</i>	<i>PLN</i>	<i>11 200 000</i>
2	Wskaźnik rocznych kosztów eksploatacyjnych	PLN/Mg osadu	165
	<i>Roczne koszty eksploatacyjne</i>	<i>PLN</i>	<i>1 155 000</i>
3	Okres, po którym należy dokonywać odtworzeń	lata	10
4	Poziom odtworzenia majątku	%	20
	<i>Koszt odtworzenia majątku</i>	<i>PLN</i>	<i>2 240 000</i>

Źródło: analiza na podstawie: Analiza ekonomiczna wdrożenia, rynek produktu „Innowacyjny sposób zagospodarowania osadów ściekowych celem spełnienia wymagań dyrektyw Unii Europejskiej w zakresie ochrony środowiska i energetyki” – POIG 01.04.00-24-026. Raport końcowy. PWiK Sp. z o.o. w Rybniku, 2010.

Zagospodarowywanie komunalnych osadów ściekowych na terenach objętych rekultywacją wymaga spełnienia warunków formalnoprawnych związanych z wykorzystywaniem osadów ściekowych w celach rekultywacyjnych (Szewczyk, 2014). Głównym kryterium wykorzystania potencjału glebotwórczego osadów jest zawartość metali ciężkich (Siuta, 2000), chociaż jak podaje literatura przedmiotu, ograniczenia te występują sporadycznie w przypadku ustabilizowanych i higienizowanych osadów ściekowych z komunalnych oczyszczalni ścieków (Sadecka i Myszograj, 2010). W technologiach związanych z rekultywacją mają zastosowanie antropogrunty, które posiadają właściwości glebotwórcze. Warunkiem wdrożenia technologii zagospodarowania osadów w celach związanych z rekultywacją terenów, jest dostosowanie procesu do przepisów prawnych i uwzględnienie analizy ekonomicznej. Stosowanie osadów do rekultywacji terenów, w tym gruntów na cele rolne, każdego roku się zmniejsza, a w roku 2016 wynosiło 3,5% (9,43% w 2012 r.).

Tabela 16. Nakłady i koszty technologii GRUNTY ANTROPOGENICZNE

Lp.	Wyszczególnienie	Jednostka	Wartość
1	Wskaźnik nakładów inwestycyjnych	PLN/Mg osadu	100
	<i>Łączne nakłady inwestycyjne</i>	<i>PLN</i>	<i>700 000</i>
2	Wskaźnik rocznych kosztów eksploatacyjnych	PLN/Mg osadu	100
	<i>Roczne koszty eksploatacyjne</i>	<i>PLN</i>	<i>700 000</i>
3	Okres, po którym należy dokonywać odtworzeń	lata	5
4	Poziom odtworzenia majątku	%	20
	<i>Koszt odtworzenia majątku</i>	<i>PLN</i>	<i>140 000</i>

Źródło: analiza na podstawie: Analiza ekonomiczna wdrożenia, rynek produktu „Innowacyjny sposób zagospodarowania osadów ściekowych celem spełnienia wymagań dyrektyw Unii Europejskiej w zakresie ochrony środowiska i energetyki” – POIG 01.04.00-24-026. Raport końcowy. PWiK Sp. z o.o. w Rybniku, 2010.

Komunalne osady ściekowe coraz częściej znajdują zastosowanie do produkcji nawozów organicznych lub środków wspomagających uprawę roślin. Długotrwały i skomplikowany proces pozyskiwania niezbędnych pozwoleń umożliwiających wprowadzanie nawozu do obrotu handlowego na podstawie właściwych przepisów powoduje, że przedsiębiorstwa sporadycznie decydują się na wdrożenie, mimo optymistycznych prognoz finansowych. Wejście w życie przepisów Rozporządzenia Ministra Gospodarki z 8 stycznia 2013 roku uniemożliwiających składowanie odpadów o kaloryczności powyżej 6 MJ/kg, spowodowało zwiększenie zainteresowania technologią i zagospodarowaniem rolniczym osadów.

Tabela 17. Nakłady i koszty technologii NAWOZY MINERALNO-ORGANICZNE

Lp.	Wyszczególnienie	Jednostka	Wartość
1	Wskaźnik nakładów inwestycyjnych	PLN/Mg osadu	1000
	<i>Łączne nakłady inwestycyjne</i>	<i>PLN</i>	<i>7 000 000</i>
2	Wskaźnik rocznych kosztów eksploatacyjnych	PLN/Mg osadu	150
	<i>Roczne koszty eksploatacyjne</i>	<i>PLN</i>	<i>1 050 000</i>
3	Okres, po którym należy dokonywać odtworzeń	lata	10
4	Poziom odtworzenia majątku	%	20
	<i>Koszt odtworzenia majątku</i>	<i>PLN</i>	<i>1 400 000</i>

Źródło: analiza na podstawie: Analiza ekonomiczna wdrożenia, rynek produktu „Innowacyjny sposób zagospodarowania osadów ściekowych celem spełnienia wymagań dyrektyw Unii Europejskiej w zakresie ochrony środowiska i energetyki” – POIG 01.04.00-24-026. Raport końcowy. PWiK Sp. z o.o. w Rybniku, 2010.

Najdroższe rozwiązanie – spalanie osadów ściekowych, jest z punktu widzenia rozwiązania problemu skuteczne. Za tym, że to rozwiązanie nie jest rozwiązaniem korzystnym dla PWiK Sp. z o.o. w Rybniku przemawia mała skala instalacji. Przewagi ekonomicznej i finansowej spalania osadów (współspalania) nad innymi rozwiązaniami można upatrywać w rozwiązaniach systemowych dla dużych miast, aglomeracji miejskich lub subregionalnych.

Tabela 18. Nakłady i koszty technologii SPALANIE

Lp.	Wyszczególnienie	Jednostka	Wartość
1	Wskaźnik nakładów inwestycyjnych	PLN/Mg osadu	3 200
	<i>Łączne nakłady inwestycyjne</i>	<i>PLN</i>	<i>22 400 000</i>
2	Wskaźnik rocznych kosztów eksploatacyjnych	PLN/Mg osadu	120
	<i>Roczne koszty eksploatacyjne</i>	<i>PLN</i>	<i>840 000</i>
3	Okres, po którym należy dokonywać odtworzeń	lata	10
4	Poziom odtworzenia majątku	%	10
	<i>Koszt odtworzenia majątku</i>	<i>PLN</i>	<i>2 240 000</i>

Źródło: analiza na podstawie: Analiza ekonomiczna wdrożenia, rynek produktu „Innowacyjny sposób zagospodarowania osadów ściekowych celem spełnienia wymagań dyrektyw Unii Europejskiej w zakresie ochrony środowiska i energetyki” – POIG 01.04.00-24-026. Raport końcowy. PWiK Sp. z o.o. w Rybniku, 2010.

Biokonwersja i produkcja nawozów to rozwiązania od strony efektywności ekonomicznej w zasadzie porównywalne i najbardziej opłacalne z tzw. katalogu twardych technologii zapewniających szerszą gamę końcowego zagospodarowania, zgodnym z ogólnokrajowymi i europejskimi tendencjami w gospodarce osadowej. Atrakcyjność tych rozwiązań jest o tyle istotna, że zostały one zweryfikowane w warunkach przedsiębiorstwa i mogą być z powodzeniem stosowane na szerszą skalę w gospodarce osadami ściekowymi w Polsce.

Tabela 19. Nakłady i koszty technologii BOKONWERSJA

Lp.	Wyszczególnienie	Jednostka	Wartość
1	Wskaźnik nakładów inwestycyjnych	PLN/Mg osadu	200
	<i>Łączne nakłady inwestycyjne</i>	<i>PLN</i>	<i>1 400 000</i>
2	Wskaźnik rocznych kosztów eksploatacyjnych	PLN/Mg osadu	200
	<i>Roczne koszty eksploatacyjne</i>	<i>PLN</i>	<i>1 400 000</i>
3	Okres, po którym należy dokonywać odtworzeń	lata	5
4	Poziom odtworzenia majątku	%	20
	<i>Koszt odtworzenia majątku</i>	<i>PLN</i>	<i>280 000</i>

Źródło: analiza na podstawie: Analiza ekonomiczna wdrożenia, rynek produktu „Innowacyjny sposób zagospodarowania osadów ściekowych celem spełnienia wymagań dyrektyw Unii Europejskiej w zakresie ochrony środowiska i energetyki” – POIG 01.04.00-24-026. Raport końcowy. PWiK Sp. z o.o. w Rybniku, 2010.

Ocena efektywności kosztowej analizowanych rozwiązań

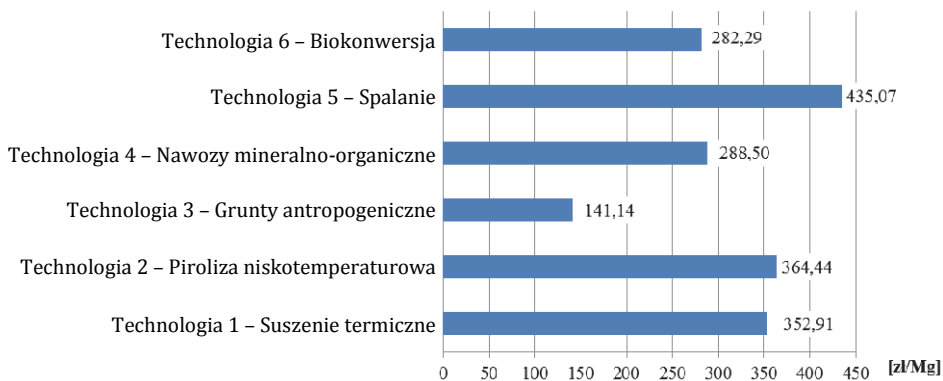
Wynikiem badania efektywności kosztowej jest omówiony wcześniej wskaźnik DGC stanowiący stosunek sumy zdyskontowanych nakładów i kosztów [PLN] do sumy zdyskontowanych ilości osadu [Mg] w całym okresie analizy, tj. dwuletnim okresie inwestycyjnym i 25-letnim okresie eksploatacyjnym.

Zbiorcze zestawienie wyników analizy DGC znajduje się w tabeli 20.

Tabela 20. Zestawienie wyników analizy DGC

Lp.	Wyszczególnienie	Suma zdyskontowanych nakładów i kosztów [PLN]	Suma zdyskontowanych ilości osadów [Mg]	DGC [PLN/Mg]
1	Suszenie termiczne	29 792 208	84 418	352,91
2	Piroliza niskotemperaturowa	30 765 461	84 418	364,44
3	Grunty antropogeniczne	11 915 172	84 418	141,14
4	Nawozy mineralno-organiczne	24 354 416	84 418	288,50
5	Spalanie	36 727 517	84 418	435,07
6	Biokonwersja	23 830 343	84 418	282,29

Analiza powyższych wyników pozwala na wskazanie rozwiązań technologicznych, które przy przyjętych założeniach do analiz porównawczych charakteryzują się relatywnie wysokim parametrem opłacalności ekonomicznej. W odniesieniu do przyjętego zestawu rozwiązań technologicznych najkorzystniejszym rozwiązaniem jest produkcja gruntów antropogenicznych. Wskaźnik dynamicznego kosztu jednostkowego dla tego rozwiązania wynosi 141,15 PLN/Mg i jest dwukrotnie niższy od drugiego wskaźnika dla biokonwersji osadów ściekowych. Wpływa na to bezpośrednio fakt, że technologia ta ma znacznie niższe koszty inwestycyjne i niskie koszty eksploatacyjne.

**Rysunek 9.** Wyniki analizy DGC

Należy jednocześnie zaznaczyć, że technologia produkcji antropogrunty jest w zasadzie tylko niewielką modyfikacją istniejącego sposobu zagospodarowania osadów ściekowych. Koszty inwestycyjne, jakie przyjęto w tym rozwiązaniu, przy założeniu dostępnej instalacji do produkcji antropogrunty, to koszty zakupu niezbędnego taboru do dostawy osadów do punktu przerobczego, a koszty eksploatacyjne to koszty opłat za odbiór osadów do przetwarzania. Mimo atrakcyjnej relacji cenowej technologia ta ma jednak ograniczone szanse na wdrożenie ze względu na trudny rynek produktowy (duża konkurencja materiałów do rekultywacji terenów), niskie zapotrzebowanie na produkty i brak uporządkowanych przepisów prawnych w tym zakresie.

Odnosząc się do wyników przeprowadzonej analizy, drugą wskazaną technologią, jest wdrożona w PWiK Sp. z o.o. w Rybniku technologia biokonwersji osadów ściekowych, polegająca na uzyskiwaniu biomasy energetycznej przez stymulowaną maturację mieszaniny zawierającej osady ściekowe, wysokowęglowodanową biomasę depozytową i zbilansowane ilości reaktywnych komponentów i aktywowanych kultur bakteryjnych. Wynikiem wdrożenia jest nowy produkt w postaci biomasy energetycznej jako kwalifikowane biopaliwo dla sektora energetyki i ciepłownictwa zawodowego oraz jako dodatek w procesie spalania odpadów komunalnych o niskiej wartości opałowej. Eliminuje się koszty związane z zagospodarowaniem osadów ściekowych, a pojawia się zysk związany ze sprzedażą wytworzonej biomasy energetycznej po cenach konkurencyjnych dla biomasy roślinnej. Wdrożenie procesu dodatkowo znacznie redukuje oddziaływanie oczyszczalni ścieków na środowisko przez wyeliminowanie magazynowania i składowania osadów ściekowych, a następnie konieczności ich transportu do odległych instalacji w celu tradycyjnej utylizacji.

Drugą do wskazania optymalnych rozwiązań wdrożeniowych jest kompleksowe podejście do analizy i wizualizacja możliwości zastosowania wybranych rozwiązań technologicznych. W związku ze wspomnianą wcześniej specyfiką branży, wybrane rozwiązanie technologiczne powinno przekładać się również na spełnienie efektów środowiskowych i społecznych. W związku z powyższym zaleca się, aby każde badanie opłacalności inwestycji było powiązane z analizą kosztów oraz korzyści społecznych i ekologicznych. Rezultat takiej dodatkowej analizy dla proponowanych technologii został przedstawiony w tabelach 21 i 22.

Tabela 21. Analiza czynników społecznych

Czynniki społeczne	Proponowane technologie					
	Suszenie termiczne	Współspalanie	Piroliza niskotemperaturowa	Grunty antropogeniczne	Nawozy organiczne	Biokonwersja
Odbiór społeczny przewidziany w związku z wdrożeniem nowej technologii	+/-	-	+/-	-	+/-	bd
Hałas związany z przemieszczaniem się i pracą sprzętu budowlanego w sąsiedztwie miejsca wdrożenia proponowanego rozwiązania technologicznego	+	-	++	+	+/-	bd
Hałas związany z funkcjonowaniem nowo powstałej instalacji	++	-	+	-	+	bd
Uciążliwość zapachowa związana z funkcjonowaniem nowo powstałej instalacji	-	-	+/-	--	-	bd
Wpływ na bezpośrednie zatrudnienie nowych pracowników do obsługi instalacji	+/-	++	+	+	+	bd
Wpływ na pośrednie zatrudnienie nowych pracowników w związku z zawiananiem partnerstwa/współpracy w sektorze gospodarki odpadami i/lub sektorze energetycznym/cementowym	+/-	+	+/-	+/-	+/-	bd
Wpływ na wartość pobliskich nieruchomości wynikający z wdrożenia technologii	+/-	-	+/-	+/-	+/-	bd

Oznaczenie: (++) bardzo pozytywny – korzyści, (+) pozytywny – korzyści, (+/-) neutralny, (-) negatywny – koszty, (- -) bardzo negatywny – koszty, bd – brak danych.

Tabela 22. Analiza czynników środowiskowych

Czynniki środowiskowe	Proponowane technologie					
	Suszenie termiczne	Współspalanie	Piroliza niskotemperaturowa	Grunty antropogeniczne	Nawozy organiczne	Biokonwersja
Wpływ na stan środowiska w otoczeniu instalacji	-	-				bd
Wpływ na zanieczyszczenie powietrza i zapylenie związane z czasowym nasileniem ruchu drogowego w związku z prowadzeniem prac budowlanych	-	-	+/-	-	-	bd
Wpływ na zanieczyszczenie powietrza i wzrost zapylenia związany z funkcjonowaniem nowo powstałej instalacji	+/-	+	+/-	+/-	+/-	bd
Wpływ na zmianę klasyfikacji osadu ściekowego (odpad/produkt)	+	+	++	++	++	bd
Wpływ odpadu po procesie technologicznym na obciążenie środowiska (przesycenie biogenami, skażenie bakteriologiczne itp.)	+/-	+	+	+	+	bd
Wpływ na wykorzystanie źródeł energii (odnawialna, nieodnawialna)	+	+	+	+	+	bd

Oznaczenie: (++) bardzo pozytywny – korzyści, (+) pozytywny – korzyści, (+/-) neutralny, (-) negatywny – koszty, (- -) bardzo negatywny – koszty, bd – brak danych.

Odnosząc się do tabeli kosztów oraz korzyści społecznych i środowiskowych, można stwierdzić, że najkorzystniej wypadają piroliza niskotemperaturowa, produkcja nawozów organicznych i współspalanie. Wszystkie z przeanalizowanych technologii są stosowane w warunkach krajowych, stąd ich wysoki potencjał aplikacyjny.

6.5. Podsumowanie

Na podstawie dokumentu pt. „Ekspertyza, która będzie stanowić materiał bazowy do opracowania strategii postępowania z komunalnymi osadami ściekowymi na lata 2014–2020” (Bień i in., 2014) można stwierdzić, że do dobrych praktyk w zakresie gospodarki komunalnymi osadami ściekowymi zalicza się te sposoby postępowania z osadami ściekowymi, które mają na celu efektywne i skuteczne rozwiązanie problemu przetwarzania i zagospodarowania osadów ściekowych. Jednocześnie rozwiązanie to powinno zapewnić osiągnięcie dobrych efektów procesów oczyszczania ścieków, zgodnie z zasadą zrównoważonego rozwoju w sferze gospodarki odpadami i zgodnie z obowiązującym systemem prawnym. Z tego względu przegląd i analiza możliwości wdrożenia nowoczesnych rozwiązań technologicznych w zakresie zagospodarowania osadów ściekowych, z uwagi na specyfikę branży, powinny zapewnić osiągnięcie następujących efektów:

- społeczny – działając na specyficznym rynku „monopolu naturalnego” przewagę konkurencyjną uzyskuje się przez społeczną akceptowalność cech produktu/usługi,

- ekologiczny – realizacja inwestycji powinna przyczynić się w istotnym stopniu do poprawy warunków ekologicznych związanych z obecnym zagospodarowaniem osadów ściekowych,
- ekonomiczny – wyższa zyskowość inwestycji zapewnia stabilną pozycję na rynku, a także tworzy wysoką wartość dodaną oferowanych usług.

Analiza efektywności ekonomicznej rozwiązań technologicznych wprowadzanych w PWiK Sp. z o.o. w Rybniku pozwoliła na wyodrębnienie tych, które charakteryzują się relatywnie wysokim parametrem opłacalności ekonomicznej. Na podstawie przeprowadzonej analizy DGC, uwzględniającej badany zestaw rozwiązań technologicznych związanych z zagospodarowaniem osadów ściekowych, z uwagi na niski koszt inwestycyjny i eksploatacyjny, najkorzystniejszym rozwiązaniem jest produkcja gruntów antropogenicznych na cele rekultywacyjne. Wskaźnik dynamicznego kosztu jednostkowego dla tego rozwiązania wynosi 141,15 PLN/Mg i jest dwukrotnie niższy od drugiego wskaźnika dla biokonwersji osadów ściekowych. Biorąc jednak pod uwagę bieżące korzyści z produkcji biopaliwa i długofalowe pozytywne skutki w postaci obniżenia kosztów oczyszczania ścieków w oczyszczalni ścieków w Rybniku-Orzepowicach, wdrożenie technologii biokonwersji jest ekonomicznie uzasadnione.

MOŻLIWOŚĆ WDROŻENIA INNOWACYJNYCH TECHNOLOGII W PERSPEKTYWIE ZAPEWNIENIA BEZPIECZEŃSTWA ŚRODOWISKOWEGO PRODUKTÓW WYTWARZANYCH Z OSADÓW ŚCIEKOWYCH PRZEZ PWIK SP. Z O.O. W RYBNIKU

7.1. Wprowadzenie

Warunkiem niezbędnym do bezpiecznego korzystania z zasobów wodnych jest szczegółowa analiza ścieków i osadów ściekowych pod względem chemicznym i biologicznym. Problem wydaje się być tym istotniejszy, że od 10 lat ilość produkowanych osadów ściekowych utrzymuje się na stale wysokim poziomie (dane GUS). Zgodnie z *Ustawą z dnia 14 grudnia 2012 r. o odpadach* przez komunalne osady ściekowe rozumie się pochodzący z oczyszczalni ścieków osady powstały w komorach fermentacyjnych i innych instalacjach do oczyszczania ścieków komunalnych oraz ścieków o składzie zbliżonym do składu ścieków komunalnych. Problemy związane z gospodarką osadową to przede wszystkim konieczność oczyszczania osadów ściekowych z metali ciężkich, utrzymywanie wskaźników sanitarnych zgodnych z normami. Jedynie oczyszczone osady ściekowe zawierające odpowiednią ilość substancji organicznych, azotu, fosforu i potasu mogą być traktowane jako nawozy organiczne, zgodnie z *Ustawą z dnia 10 lipca 2007 r. o nawozach i nawożeniu*. Aby ścieki spełniały określone normy związane z ich wykorzystaniem lub składowaniem, osady ściekowe poddawane są odpowiednim zabiegom technologicznym, takim jak: wapnowanie, kompostowanie, hydrofitowe odwadnianie, mineralizacja i suszenie. Wykrywanie, oznaczanie i badanie związków znajdujących się w poszczególnych komponentach środowiska, szczególnie w tych związanych z ekosystemem wodnym, jest obecnie jednym z priorytetowych obszarów badań. Szczególna uwaga jest skierowana na farmaceutyki i inne mikrozanieczyszczenia.

7.2. Badania jakościowe osadów na zawartość farmaceutyków i skuteczność metody ich usuwania

W ciągu ostatnich lat obserwuje się zwiększone zapotrzebowanie na środki farmakologiczne (GUS, 2009; Lubliner, Redding i Ragsdale, 2010). Polska jest 15 krajem na świecie (Januszewicz, Binkowska-Bury i Fijałek, 2012) pod względem ilości zażywanych lekarstw, w Europie znajduje się na szóstym miejscu pod względem wielkości sprzedaży, a drugim pod względem dynamiki wzrostu sprzedaży (Szymonik i Lach, 2012; Marchlewicz, Guzik i Wojcieszynska, 2015). Farmaceutyki mogą być wydalane z organizmu wraz z kałem i moczem zarówno w postaci macierzystej, po nieznacznym przekształceniu, lub jako produkt procesów detoksykacyjnych zachodzących w organizmie. Należy pamiętać, że w wyniku wyżej wspomnianych procesów detoksykacyjnych może powstać tzw.

metabolit pośredni, którego toksyczność może być większa niż przyjmowanej do organizmu substancji. Ponadto produkty przeznaczone do wydalania z organizmu człowieka posiadają inne właściwości niż produkt wejściowy – często mają właściwości polarne. Wykazują większą rozpuszczalność w wodzie, chociażby ze względu na fakt wydalania ich poza organizm wraz z moczem. Zaobserwowano także, że wydalane metabolity mogą ulegać hydrolizie w środowisku wodnym i powrócić tam do swojej pierwotnej formy, czyli leku. Substancje, które nie są rozpuszczalne w płynach ustrojowych lub nie są wchłaniane do krwioobiegu w przewodzie pokarmowym, wydalane są przez człowieka w postaci niezmienionej. Kumulowanie się takich zanieczyszczeń w wodzie, w szczególności w wodzie spożywczej, ma swoje konsekwencje, ponieważ często substancje te wpływają na gospodarkę hormonalną. Ponadto niektóre leki, na przykład morfina czy barbiturany, wywołują zjawisko tolerancji podczas długotrwałego stosowania. Są również takie leki, których metabolity (substancje powstałe w wyniku biotransformacji leku i usuwane poza organizm) wykazują działanie farmakologiczne, na przykład fenacetyna, czyli paracetamol (Hinson, Pumford i Nelson, 1994). Wydalane z organizmu leki, obok nadwyżki niezutyliзовanych substancji medycznych wyrzucanych do toalety zarówno z gospodarstw domowych, jak i ze szpitali, trafiają do oczyszczalni ścieków (Haller i in., 2002), gdzie mogą zostać zmineralizowane przez mikroorganizmy do CO_2 i H_2O (np. aspiryna), pozostać w oczyszczonym ścieku lub zostać zatrzymane w szlamie, który następnie może być bazą do wytworzenia nawozów. W zależności od charakteru związku zauważono, że farmaceutyki kwasowe, na przykład: kwas acetylosalicylowy, ibuprofen, ketoprofen, diklofenak, naproksen, znajdujące się w środowisku obojętnym w postaci jonowej, w niewielkim stopniu ulegają sorpcji w osadzie ściekowym, pozostają zatem w fazie ciekłej. Związki zasadowe natomiast (np. antybiotyki) ulegają sorpcji w dużo większym stopniu (Fatta i in., 2007). Biodegradacja tych związków, zachodząca pod wpływem działania mikroorganizmów osadu czynnego i podczas fermentacji osadu ściekowego, zależy nie tylko od charakteru chemicznego, ale także od czasu retencji i wieku osadu czynnego, stąd stopień oczyszczenia ścieków może być różny (Felis, Miksch i Sikora, 2005). To złożona budowa chemiczna farmaceutyków powoduje, że związki te nie są w pełni usuwane w procesie oczyszczania ścieków i w postaci niezmienionej lub w postaci metabolitów pośrednich mogą wpływać na zanieczyszczenie wód powierzchniowych i głębinowych (Koszowska, Ebisz i Krzyśko-Łupicka, 2015).

Już pod koniec XX i na początku XXI wieku pojawiały się pierwsze prace przeglądowe, w których omawiano aspekty ekologiczne i analityczne zanieczyszczeń farmakologicznych osadów ściekowych (Halling-Sørensen i in., 1998; de Alda i Barcelo, 2001; Heberer, 2002a, 2002b; de Alda i in., 2003). Obok zanieczyszczenia wód pitnych stwierdzano także występowanie farmaceutyków w wodach powierzchniowych i podziemnych (Heberer, 2002a, 2002b; Reddersen, Heberer i Dünnbier, 2002).

Narastający problem wzrostu zawartości substancji pochodzenia farmaceutycznego w osadach ściekowych związany jest nie tylko z liczbą ludności

obsługiwaną przez oczyszczalnie, ale przede wszystkim z brakiem możliwości technologicznych umożliwiających usuwanie tego typu zanieczyszczeń w konwencjonalnych oczyszczalniach ścieków. Tym bardziej, że związki takie trudno ulegają degradacji (Zwiener, Glauner i Frimmel, 2000). Mogą być zatem łatwo transportowane w już oczyszczonych ściekach, trafiając do wody, gleby czy skompostowanego osadu czynnego. Istnieją również pewne ograniczenia możliwości identyfikacji wszystkich zanieczyszczeń znajdujących się w środowisku wodnym, co uniemożliwia skuteczną ocenę ich jakości i potencjalnego oddziaływania na organizmy. Wyzwanie stanowi zatem nie tylko sposób oczyszczania wód i ścieków, ale także opracowanie nowych technik analitycznych umożliwiających oznaczenie zawartości tych substancji w badanym materiale, często w ilościach śladowych. Każda procedura analityczna składa się z wielu współzależnych operacji, których efekt wpływa na odczyt końcowy. Nowoczesne techniki analityczne umożliwiają oznaczanie złożonych substancji występujących w próbce badawczej w ilościach śladowych lub ultraśladowych (Petrović, Gonzales i Barceló, 2003; Hapeshi i in., 2010). Nadal jednak trwają intensywne prace nad opracowaniem nowych lub usprawnieniem istniejących metod badawczych, które pozwoliłyby na uzyskanie możliwie jak najdokładniejszych informacji o stanie badanego środowiska wodnego (Coille i in., 2002). Powstały problem ma związek ze złożonością próby badawczej składającej się niejednokrotnie z wielu różnych substancji występujących w ilościach śladowych.

Niezwykle istotnym etapem w procesie badania jakości jest faza przygotowania próbek do analizy (Ying, Kookana i Chen, 2002; Klimeš, Sochor i Kříž, 2002). Etap ten związany jest z zapewnieniem stabilności próbki, uzyskaniem homogenności, usunięciem interferentów, chemiczną konserwacją analitów i wymianą matrycy na matrycę właściwą dla urządzenia pomiarowego. Od wielu lat najczęściej stosowanymi metodami wymiany matrycy, często łączonej z operacją podniesienia stężenia analitu w próbce, są:

- ekstrakcja do fazy stałej (SPE),
- mikroekstrakcja do fazy stacjonarnej (SPME),
- ekstrakcja ciec-z-ciecz (LLE),
- ekstrakcja za pomocą płynu w stanie nadkrytycznym (SFE) stosowana do izolacji między innymi diazepam, oksazepam, testosteronu, naproksenu, ketaprofenu (Simmons i Stewart, 1997).

Najczęściej stosowaną metodą zateżenia i oczyszczania próbki z matrycy jest ekstrakcja do fazy stałej (SPE) ze względu na jej efektywność, prostotę i uniwersalność. Metoda ta łączy ze sobą trzy ważne aspekty: izolację analitów z próbki, wzbogacanie i oczyszczanie ekstraktów i usuwanie z nich substancji przeszkadzających (interferentów). Wybór sorbentów do SPE zależy od polarności analitu i matrycy próbki. Najczęściej stosowane są złoża z krzemionki i różnych jej form modyfikowanych, jak również sorbenty na bazie żywic polimerowych (Sosnowska, Styszko i Gołas, 2010).

Końcowe oznaczenia zawartości farmaceutyków w próbkę wymagają wykorzystania bardzo czułych i selektywnych technik oznaczeń (Kolpin i in., 2002). Obecnie stosuje się głównie techniki chromatograficzne, takie jak:

- wysokosprawna chromatografia cieczowa (HPLC),
- chromatografia gazowa (GC).

Istotnym elementem każdego urządzenia analitycznego stosowanego do oznaczeń zawartości farmaceutyków jest detektor umożliwiający oznaczanie aktywnych związków farmaceutycznych na bardzo niskich poziomach detekcji. Urządzeniem najczęściej stosowanym zarówno podczas wysokosprawnej chromatografii cieczowej (HPLC), jak i chromatografii gazowej (GC), jest spektrometr mas (MS), rzadziej detektor płomieniowo-jonizacyjny (FID) w przypadku chromatografii gazowej (GC) oraz spektrofotometr z matrycą diodową (DAD) lub detektor fluorescencyjny (FLD) dla wysokosprawnej chromatografii cieczowej (HPLC).

Na etapie końcowych oznaczeń i identyfikacji analitów często wykorzystywane są techniki łączone: GC-MS (chromatografia gazowa-spektrometr mas) i LC-MS (chromatografia cieczowa-spektrometr mas) różnie zmodyfikowane (Gelpi, 1995; Kim i in., 1995; Meyer i in., 2000; Ariese, Ernst i Sijm, 2001; Jeannot i in., 2002). Techniki GC-MS, które znajdują szerokie zastosowanie w analizie zanieczyszczeń pochodzenia organicznego (McAvoy i in., 2002; Meesters i Schröder, 2002; Murahashi, Sasaki i Nakajima, 2003) stosowane są między innymi do oznaczania zawartości:

- diazepamu,
- diklofenaku,
- hydroksyibuprofenu/ibuprofenu,
- kwasu acetylosalicylowego/salicylowego,
- metoprololu,
- naproksenu,
- prymidonu.

Technika łączona LC-MS wykorzystywana była do wykrywania i oznaczania stężeń (Louden i in., 2000; Muljono i in., 2001; Matsuya i in., 2002):

- naproksenu,
- ibuprofenu,
- diklofenaku,
- diazepamu,
- antybiotyków (penicyliny, tetracykliny, sulfonamidów, antybiotyków makrolidowych),
- norfloksacyny,
- ciprofloksacyny.

Ze względu na złożoność matrycy, w celu podniesienia efektywności oznaczania, wykorzystuje się chromatografię cieczową i gazową z zastosowaniem

podwójnego detektora mas (GC/MS/MS, LC/MS/MS), które umożliwiają zarówno równoczesny rozdział, jak i analizę nawet kilkudziesięciu związków występujących w bardzo niskich stężeniach (granica wykrywalności to poziom kilku nanogramów na decymetr sześcienny). Uważa się, że obecnie najskuteczniejszymi metodami oznaczania farmaceutyków w środowisku wodnym są chromatografia cieczowa sprzężona ze spektrometrią mas (LC-MS) i tandemowa spektrometria mas (LC-MS/MS), dzięki wysokiej czułości tych metod i wysokiej selektywności przy oznaczaniu polarnych zanieczyszczeń znajdujących się w próbce w ilościach śladowych (de Alda i in., 2003).

Problem obecności farmaceutyków w ściekach został dostrzeżony stosunkowo niedawno, o wiele później niż powstały działające dziś oczyszczalnie, stąd technologie w nich stosowane często nie są wystarczające do oczyszczania ścieków z farmaceutyków. Obecnie prowadzone są więc różne badania, które pozwolą na wyłonienie najskuteczniejszej metody oczyszczania ścieków z tych związków. Podstawowymi wytycznymi w tym procesie są: efektywność usuwania zanieczyszczeń, brak efektów ubocznych tego procesu i aspekty ekonomiczne.

Metody stosowane w oczyszczalni można podzielić na konwencjonalne i nowoczesne metody oczyszczania z uwagi na usuwanie farmaceutyków ze ścieków. Różnią się one znacznie stopniem oczyszczenia ścieków z tego typu zanieczyszczeń (tab. 23).

Tabela 23. Stopień oczyszczenia ścieków z farmaceutyków za pomocą różnych metod konwencjonalnych [%]

Grupa leków	Farmaceutyk	Konwencjonalne metody oczyszczania ścieków			
		mechaniczne oczyszczanie ścieków z zastosowaniem osadów wstępnych	biologiczne oczyszczanie ścieków w komorach osadu czynnego	metoda z zastosowaniem reaktorów SBR	koagulacja chemiczna
Niesteroidowe leki przeciwzapalne (NLPZ)	ibuprofen	9-27	65-90	88-100	-
	diklofenak	10-38	15-50	54-75	-
	ketoprofen	19-28	69	80-100	5-36
	kwas mefenamowy	-	-	-	21-36
	naproksen	8-33	45-66	-	-
Leki psychotropowe	karbamazepina	-	0-7	-	-
	diazepam	12-24	-	-	-
B-blokery	atenolol	27-45	-	-	-
Leki hipolipemiczne	kwas kłofibrowy	-	34-51	-	-
Hormony steroidowe i środki antykoncepcyjne	estradiol	36-54	> 95	-	-
Środki kontrastowe	jopamidol	-	-	50-74	-
	jopromid	-	-	45-90	-
Antybiotyki	sulfametoksazol	-	0-90	80-91	-

- Brak danych.

Źródło: Bever, Stein i Teichman, 1997; Petrović i in., 2003; Ternes, 2004; Felis, Miksch i Sikora, 2005; Sanak-Rydlewska, 2011; Ziyilan i Ince, 2011; Czerwiński, Kłonica i Ozonek, 2015; Węgrzyn, Machura i Żabczyński, 2015.

Jak wynika z analizy powyższych danych, najmniej skuteczną metodą oczyszczania ścieków z farmaceutyków jest mechaniczne oczyszczanie ścieków z zastosowaniem osadów wstępnych. Efektywność usuwania tych związków jest zależna w dużej mierze od charakteru fizykochemicznego farmaceutyku i od oddziaływań elektrostatycznych występujących między cząsteczką leku a zawiesiną, w której ten odpad się znajduje. Lipofilowe farmaceutyki częściej są adsorbowane na zawiesinach ściekowych niż te o charakterze lipofobowym (Cywiński i Gdula, 1983; Sanak-Rydlewska, 2011; Czerwiński, Kłonica i Ozonek, 2015).

Interakcje elektrostatyczne i zdolność adsorpcji zanieczyszczeń na osadzie czynnym w przypadku oczyszczania biologicznego ułatwia proces oczyszczania niektórych związków, co widać w większej, niż w przypadku rozwiązań mechanicznych, efektywności (Salgado i in., 2012). Zgodnie z danymi przedstawionymi przez Salgado i innych (2012) diklofenak i hydroksyzyna były adsorbowane w 25–75%. Z analizy danych wynika (tab. 23), że oczyszczanie metodą biologiczną w komorach osadu czynnego pozwala na usuwanie zanieczyszczeń zarówno w wyniku adsorpcji, jak i biodegradacji, z różnym efektem (0–95%). Powodów tego stanu upatruje się nie tylko w charakterze fizykochemicznym usuwanego związku, ale także w wieku osadu czynnego, który powinien mieścić się w granicach 10–15 dób. Najtrudniej za pomocą tej metody usuwa się karbamazepinę.

Interesujących wyników dostarczają badania dotyczące usuwania farmaceutyków ze ścieków metodą z użyciem reaktorów SBR. W tabeli 23 przedstawiono wyniki badań obecności niesteroidowych leków przeciwzapalnych oraz środków kontrastowych i antybiotyków. Stopień oczyszczenia ścieków z tych substancji wynosił 45–100%, co wskazuje na wysoką skuteczność metody. Jednak, zgodnie z danymi zaprezentowanymi przez Felisa, Mikscha i Sikorę (2005), każdy z tych związków najefektywniej ulegał degradacji w innej temperaturze i przy innym wieku osadu czynnego. Dla przykładu, skuteczność usuwania jopamidolu przy zastosowaniu metody SBR była największa (do 74%) przy temperaturze 20°C i wieku osadu czynnego wynoszącym 20 dób. Znacznie niższą skuteczność eliminacji jopamidolu (do 50%) odnotowano przy tej samej temperaturze, ale przy wieku osadu czynnego wynoszącym 10 dób. Z kolei w przypadku sulfametoksazolu największy stopień eliminacji (ponad 90%) obserwowany był przy niższej temperaturze i niższym wieku osadu czynnego. Różnice efektywności tego procesu widoczne były także między okresem letnim a zimowym.

Z analizy danych wynika także, że koagulacja chemiczna, jako metoda usuwania substancji farmaceutycznych ze ścieków, ma niewielkie znaczenie. Według danych literaturowych ketoprofen i kwas mefenamowy udało się wyeliminować ze ścieków maksymalnie do 36% (Ziylan i Ince, 2011).

Farmaceutyki przedostają się do osadów zarówno wstępnych, jak i wtórnych, część źródeł literaturowych podaje więc wyniki dotyczące stopnia degradacji tych związków w procesie fermentacji beztlenowej osadów ściekowych. Z ogólnych danych wynika, że często fermentacja termofitowa (55°C, czas

fermentacji do 20 dób) sprzyja większej eliminacji farmaceutyków w porównaniu z fermentacją mezofilową (37°C, czas fermentacji do 30 dób). Związkami lepiej usuwalnymi w fermentacji termofilowej są: naproksen, jopromid i ibuprofen. Sulfametoksazol należy do substancji eliminowanej w 85–95% zarówno w wyniku fermentacji mezofilowej, jak i termofilowej. Ze względu na małą dokładność w oznaczaniu zawartości leków, takich jak karbamazepina, diklofenak i diazepam, nie można jednoznacznie określić stopnia wyeliminowania tych związków z osadów ściekowych. Szacuje się, że było to 0–60% dla karbamazepiny i diazepamu oraz 25–75% dla diklofenaku.

W świetle przytoczonych badań nowoczesne metody oczyszczania ścieków zdają się być efektywniejsze w usuwaniu środków farmaceutycznych. Wiele z farmaceutyków usuwanych jest przynajmniej w 90% (tab. 24).

Tabela 24. Stopień oczyszczenia ścieków z farmaceutyków za pomocą różnych nowoczesnych metod [%]

Grupa leków	Farmaceutyk	Nowoczesne metody oczyszczania ścieków			
		membranowe reaktory biologiczne	adsorpcja na węglu aktywnym	ozonowanie	fotokataliza
Niesteroidowe leki przeciwzapalne (NLPZ)	ibuprofen	99	–	62	100
	diklofenak	87	98	96	100
	ketoprofen	92	–	93	–
	kwask mefenamowy	75	–	99	90
	naproksen	91	–	99	–
Leki psychotropowe	karbamazepina	brak eliminacji	23	–	–
	diazepam		85	–	–
B-blokery	atenolol	100	–	–	80
Leki hipolipemiczne	kwask klofibrowy	72	–	–	–
Środki kontrastowe	jopamidol		–	84	–
	jopromid	100	–	91	100
Antybiotyki	sulfametoksazol	92	–	–	–

– Brak danych.

Źródło: Bever, Stein i Teichman, 1997; Petrović i in., 2003; Ternes, 2004; Felis, Miksch i Sikora, 2005; Sanak-Rydlewska, 2011; Ziylan i Ince, 2011; Czerwiński, Kłonica i Ozonek, 2015; Węgrzyn, Machura i Żabczyński, 2015.

Wysoką skuteczność usuwania farmaceutyków wykazuje metoda z wykorzystaniem membranowego reaktora biologicznego – eliminuje kwas klofibrowy w 72% i posiada wysoki współczynnik usuwania niesteroidowych leków przeciwzapalnych, w tym także naproksenu. Związkiem, który nie poddaje się eliminacji za pomocą tej metody, jest trudno usuwalna i trudno degradowalna karbamazepina, częsty składnik osadów. Osiąganie wysokiego stopnia oczyszczenia ścieków za pomocą metody z wykorzystaniem membranowych reaktorów

biologicznych może mieć związek z zastosowanym modulem mikrofiltracyjnym (MF) i ultrafiltracyjnym (UF) zamiast, wykorzystywanego w konwencjonalnych metodach oczyszczania ścieków, osadnika wtórnego. Obok zdolności stosowanych membran do zatrzymywania mikrozanieczyszczeń organicznych, z punktu widzenia eliminacji farmaceutyków, ważne jest także wydłużenie czasu pracy reaktora, zwiększenie wieku osadu, zwiększenie stężenia biomasy oraz zdolność adsorbowania się tych zanieczyszczeń na kłaczkach osadu czynnego o dużych rozmiarach (Bodzek, 2013; Szymonik, 2013; Dudziak, 2015). Na efektywność tej metody mają wpływ hydrofobowość i masa cząsteczkowa oraz pH usuwanej substancji. Farmaceutyki kwasowe łatwiej ulegają adsorpcji na powierzchni kłaczków osadu czynnego (Ternes, 2004).

Wyniki oczyszczania osadów z wykorzystaniem metody adsorpcji na węglu aktywnym wskazują na wysoką skuteczność usuwania diklofenaku i diazepam. Metoda ta nie przyniosła efektów w przypadku eliminacji innych farmaceutyków (tab. 24).

Wśród innych zaawansowanych metod oczyszczania ścieków na uwagę zasługuje proces ozonowania i fotokataliza. Technologia wykorzystująca ozon stosowana jest głównie w końcowym etapie oczyszczania. Umożliwia usuwanie niesteroidowych leków przeciwzapalnych, często pozwala także na usunięcie z wysoką skutecznością, środków kontrastowych. Najtrudniejszym do wyeliminowania środkiem kontrastowym, zgodnie z badaniami Węgrzyna, Machury i Żabczyńskiego (2015), jest diatriozad, który tą metodą usuwany jest jedynie w 14% (przy zastosowaniu wysokiej dawki ozonu: 10–15 g O₃/m³), podczas gdy inne farmaceutyki usuwane były prawie całkowicie. Podczas stosowania tej metody ważna jest zatem zastosowana dawka ozonu. Wyższą dawkę ozonu należy także stosować, gdy w ściekach wstępnie oczyszczonych metodami biologicznymi znajduje się RWO (rozpuszczalny węgiel organiczny). Aby uzyskać oczekiwany efekt, wraz ze wzrostem zawartości RWO w ściekach, należy zwiększyć dawkę ozonu. Czynnikiem wpływającym na efektywność tego procesu jest także pH oczyszczanej substancji. Na zjawisko fotokatalizy wpływ ma jakość ścieków, właściwości farmaceutyku, czas naświetlania, długość fali i ilość fotokatalizatora. W metodzie tej wykorzystuje się promieniowanie nadfioletowe UV lub światło słoneczne w obecności półprzewodników, czyli fotokatalizatorów, do jakich należy między innymi TiO₂ (Adamek i in., 2011; Czech, 2012) czy H₂O₂. Skuteczność metody została sprawdzona na ściekach nieoczyszczonych, do których dodano znane ilości kwasu mefenamowego i ibuprofenu oraz TiO₂ jako fotokatalizatora. Przy stworzeniu optymalnego pH dla usuwania każdej z tych substancji, tj. pH = 3,0 dla ibuprofenu i pH = 8,5 dla kwasu mefenamowego i naświetleniu promieniowaniem UVA ($\lambda = 366$ nm) przez 60 min, eliminacja ibuprofenu nastąpiła w 90%, natomiast kwasu mefenamowego w 65% (Adamek i in., 2011). Zastosowanie metody UV/TiO₂ pozwoliło także na eliminację diklofenaku po 100 min, ponad 95% diatrizoatu po 60 min oraz jopromidu po 30 min (Węgrzyn, Machura i Żabczyński, 2015).

7.3. Obecność innych mikrozanieczyszczeń w osadach ściekowych

Osobnym problemem są związki określane jako PCPs (ang. *personal care products*), czyli środki ochrony osobistej, często klasyfikowane wraz z farmaceutykami jako PPCPs (ang. *pharmaceuticals and personal care products*). Obejmują one suplementy, nutraceutyki oraz produkty kosmetyczne, takie jak: kremy, szampony, mydła, filtry UV. Badania przeprowadzone przez Li i innych (2007) wykazały obecność substancji znajdujących się w filtrach UV, w oczyszczonych ściekach, ustalono także dodatnią korelację zawartości tych związków w badanych ściekach z okresem wakacyjnym. Filtry UV zawierają związki organiczne absorbujące promieniowanie UV, albo substancje nieorganiczne odbijające te promienie (Próba, 2013). Badania wykazujące możliwość ponownej aplikacji tych związków do środowiska, wydają się być tym bardziej istotne, jeśli wykazują one zdolność do kumulacji w organizmach żywych (Gackowska, Gaca i Załoga, 2012). Badania obecności substancji promieniochronnych cieszą się zainteresowaniem badaczy na całym świecie. Liczne próby podjęto w Szwajcarii, Niemczech czy Hiszpanii. Badania nad stężeniem substancji promieniochronnych podjęto także poza Europą w Azji oraz Australii i Oceanii, ze względu na potencjalne niebezpieczeństwo dla życia raf koralowych (Poiger i in., 2004; Fent, Zenker i Rapp, 2010; Bachelot i in., 2012; Kaiser i in., 2012; Amine i in., 2012). Przeprowadzono także badania na zwierzętach. Dla przykładu, badania prowadzone na rybach dowiodły, że stałe dawki niektórych substancji promieniochronnych, podawane nawet w niewielkich stężeniach, mogą być genotoksyczne. Powodują zmiany w ekspresji genów biorących udział w przemianach hormonalnych badanych zwierząt (Zucchi, Oggier i Fent, 2011).

Zainteresowaniem naukowców cieszy się także obecność kofeiny w osadach ściekowych, która nie ulega całkowitemu rozkładowi w procesach biotransformacji toksykologicznej w organizmie człowieka. Spożywana jest natomiast w dużych ilościach i odprowadzana wraz ze ściekami do naturalnych zbiorników wodnych. W chwili obecnej jej zawartość w ściekach nie podlega regulacjom prawnym, ponieważ nie stanowi bezpośredniego zagrożenia dla zwierząt i człowieka. Nie wykazano także, jak na organizm człowieka wpływa stała podaż tej substancji w małych ilościach (Glade, 2010).

7.4. Badania biologiczne na obecność genów lekoopornych w osadach ściekowych

Osobnym zagadnieniem związanym z obecnością antybiotyków w ściekach jest zjawisko pojawiania się lekooporności u bakterii. Antybiotykooporność pojawia się zarówno wśród bakterii chorobotwórczych, jak i środowiskowych. Powstaje w wyniku kontaktu bakterii z substancją antybiotyczną. Występowanie antybiotyków w wodach przekłada się na ich obecność w organizmach wodnych i dalej w kolejnych organizmach w łańcuchu pokarmowym. Substancje te często

osiągają stężenia określane jako subinhibicyjne, czyli niższe niż stężenia hamujące wzrost i namnażanie drobnoustrojów, ale wystarczające, aby wpływać na ekspresję wielu genów bakteryjnych. Powodują one zmianę poziomu transkrypcji genów mikroorganizmów i zwiększają prawdopodobieństwo zachodzenia mutacji. Bakterie przekazują informację genetyczną na drodze wertykalnej przez przekazywanie jej klonom potomnym i na drodze horyzontalnego transferu mobilnych elementów genetycznych (plazmidów, integronów, transpozonów), co jest siłą napędową ewolucji. Ten pozachromosomowy mobilny materiał genetyczny może być przekazany w procesie koniugacji (wymiany plazmidów między dwoma komórkami bakterii), transdukcji (przenoszenie przez wirusy bakteryjne – bakteriofagi) oraz transformacji (proces aktywnego pobierania informacji genetycznej z otoczenia). Zjawisko jest groźne, bowiem transfer genów może odbywać się między bakteriami należącymi do różnych gatunków (Ferri i in., 2017). Zatem, w wyniku transformacji, bakterie infekcyjne człowieka mogą nabyć oporność od bakterii środowiskowych. Właściwości te prowadzą do wzrostu bioróżnorodności bakterii, doprowadzając do zmian, które umożliwią adaptację do zaistniałych warunków stresowych, jakim jest obecność substancji antybiotycznych w środowisku ich życia.

Antybiotyki dostają się do środowiska ze ściekami pochodzącymi ze składowisk odpadów, produkcji leków, w wyniku nieprawidłowej utylizacji leków w gospodarstwach domowych i szpitalach, z obornikiem i gnojowicą oraz z pozostałościami pasz zawierających antybiotyki (Szymonik i Lach, 2012). W środowisku zmienionym antropogenicznie, w tym w oczyszczonych ściekach, stwierdza się obecność genów antybiooporności (ang. *antibiotic resistance genes*, ARGs) i bakterii lekoopornych (ang. *antibiotic resistant bacteria*, ARB) na prawie wszystkie znane leki (Kümmerer, 2004). Ze względu na potencjalne ryzyko dla zdrowia ludzi i zwierząt, Komisja Europejska nałożyła w roku 2009 obowiązek monitorowania zużycia antybiotyków oraz rozprzestrzeniania się bakterii opornych na nie w różnych komponentach środowiska. Na uwagę zasługuje fakt, że naukowy świat do tej pory nie dostarczył jednoznacznej odpowiedzi na pytanie, czy istnieje bezpośrednia korelacja między ilością substancji antybiotycznej w próbce, a ilością bakterii lekoopornych. Gao, Munir i Xagorarakis (2012) wskazali na korelację dodatnią między zawartością sulfonamidów, a koncentracją bakterii opornych na te antybiotyki, jednocześnie ci sami autorzy stwierdzili brak takiej zależności w przypadku tetracyklin. Bouki, Venieri i Diamadopoulou (2013) oraz Zheng i inni (2011) potwierdzają istnienie zależności między opornością bakterii, a koncentracją antybiotyków w środowisku, inni autorzy nie wykazali istotnych różnic (Zhu i in., 2013).

W związku z powyższym osady ściekowe są badane z wykorzystaniem różnych metod. Prowadzone są badania mikrobiologiczne i fizykochemiczne, badania stężenia substancji refrakcyjnych i parametrów, które decydują o możliwości wykorzystania osadów ściekowych do produkcji energii odnawialnej czy do utylizacji termicznej, badania parametrów pośrednich i badania molekularne. Do badań tych wykorzystywane są metody hodowlane i, cieszące się coraz większą popularnością, metody molekularne (tab. 25).

Tabela 25. Podział metod badania antybiotykooporności w osadzie ściekowym

Metody hodowlane	Metody molekularne
Krażki dyfuzyjne	Reakcja PCR (PCR-RFLP, RT-PCR)
Metoda rozcieńczeń	Sekwencjonowanie Sangera
System Biolog	Western Blot
E-testy	Mikromacierze

Najczęściej stosowaną hodowlaną metodą testowania lekooporności u bakterii jest metoda dyfuzyjno-krażkowa Kirby-Bauera. W metodzie tej miarą antybiotykooporności jest wielkość strefy zahamowania wzrostu mikroorganizmu wokół krążka nasączonego antybiotykiem. Krążek umieszczony jest na podłożu stałym z zawiesiną bakterii o określonej gęstości. Substancja czynna antybiotyku dyfunduje promieniście, tworząc w ten sposób gradient stężeń. Przy brzegach krążka występuje największa koncentracja tej substancji, która spada wraz z odległością od krążka. Wielkość strefy zahamowania wzrostu bakterii jest wprost proporcjonalna do stopnia wrażliwości bakterii na antybiotyk. Na podstawie przyjętych standardów (rekomendacje) bakterie określa się jako odporne, średniowrażliwe i wrażliwe. Metoda ta jest powtarzalna i relatywnie tania. Najważniejsze ograniczenia w zastosowaniu tej metody są związane z testowaniem wolno rosnących organizmów i bezwzględnych bakterii beztlenowych (Borowska, Jabłoński i Pejsak, 2014). Ponadto niektóre antybiotyki słabo dyfundują w agarze (glikopeptydy i polimyksyna B), co może prowadzić do nieprawidłowego określenia lekooporności na te związki.

Drugą metodą hodowlaną służącą ocenie lekooporności jest metoda rozcieńczeń. Metoda ta należy do bardzo pracochłonnych, wykorzystywanych głównie w badaniach naukowych. Pozwala na określenie minimalnego stężenia antybiotyku (ang. *minimum inhibitory concentration*, MIC), które hamuje wzrost bakterii. Kolejne rozcieńczenia antybiotyku przygotowuje się w podłożu płynnym lub podłożu agarowym, do których następnie dodaje się odpowiednie inoculum (próbka zawierająca mikroorganizmy służące do założenia kultury komórkowej) i inkubuje w odpowiedniej temperaturze. W niektórych gotowych systemach (ręczne, automatyczne) stosowane są metody półilościowe. Ocena hamowania wzrostu bakterii określana jest wtedy na podstawie dwóch lub trzech stężeń krytycznych. Metodę tę stosuje się do drobnoustrojów wolno rosnących na podłożach sztucznych, na przykład prątków grzylicy. Metodą łączącą wyznaczenie wartości minimalnego stężenia antybiotyku (MIC) i identyfikację wieloopornych szczepów bakterii (ang. *multidrug-resistant*, MDR) jest system Biolog.

Metoda E-testu jest natomiast połączeniem metody dyfuzyjno-krażkowej z metodą mikrorozcieńczeń. Paski zawierające gradient stężenia antybiotyku umieszcza się na podłożu agarowym z wysianą zawiesiną bakteryjną o znanej gęstości. Ilościowe określenie MIC możliwe jest dzięki wyznaczeniu miejsca przecięcia strefy zahamowania wzrostu ze skalą umieszczoną po drugiej stronie E-testu (Borowska, Jabłoński i Pejsak, 2014).

Do oceny występowania poszczególnych genów lekooporności służą metody molekularne, na przykład standaryzowana reakcja PCR (policykliczna reakcja polimerazy, ang. *polymerase chain reaction*). Metody te zyskują coraz większą popularność ze względu na szybkość otrzymania wyników i ze względu na możliwość określenia lekooporności również u bakterii, których nie można wyhodować w laboratorium mikrobiologicznym z zastosowaniem metod hodowlanych (stanowią one około 97% całej populacji). Do najpowszechniej stosowanych należy metoda ilościowej reakcji PCR (qPCR), pozwalająca na określenie liczby kopii genów oporności w środowisku. Badania molekularne wymagają znajomości mechanizmu determinującego lekooporność, czyli znajomości sekwencji genów odpowiedzialnych za lekooporność u badanej bakterii. Mechanizmy antybiotykooporności polegają między innymi na modyfikacji ściany komórkowej u bakterii lub enzymatycznej inaktywacji leków. Modyfikacje te często są wynikiem zmian w genach (w ich sekwencji), co można prześledzić dzięki wspomnianym metodom molekularnym.

Metody molekularne umożliwiają wykrycie zmian na poziomie DNA (genów), RNA (roboczej kopii genu) lub z poziomu produktu ekspresji genu (najczęściej białka). Wśród tych metod zastosowanie znajdują przede wszystkim metody oparte na modyfikacji standardowej reakcji PCR, która umożliwia namnożenie całego genomu lub jego części, a następnie jego identyfikację (np. za pomocą elektroforezy), opartą między innymi na długości namnażanego fragmentu informacji genetycznej. Namnożony tymi metodami fragment jest poddawany analizie z wykorzystaniem elektroforezy (rozdział produktów najczęściej w żelu agarozowym). W metodach wykorzystujących reakcje PCR stosuje się tzw. startery flankujące (ARGs) lub sondy hybrydujące do znanych ARGs i wykrywa się je jakościowo lub ilościowo w analizowanym materiale. Często stosowana technika qPCR dostarcza wartościowych danych na temat zmian liczby kopii ARGs na poszczególnych etapach oczyszczania ścieków (Rizzo i in., 2013).

Metodą opartą także na różnicy długości DNA jest sekwencjonowanie Sange-ra. Otrzymane podczas sekwencjonowania DNA fragmenty różnią się jednym nukleotydem (monomer budujący informację genetyczną). Ocena fragmentów dokonywana jest za pomocą automatycznych sekwenatorów, które wyposażone są w detektor fluorescencji (Sundsford i in., 2004).

Techniki Western Blot i mikromacierze identyfikują lekooporność u bakterii na podstawie obecności produktu ekspresji genetycznej (białka). Western Blot polega na rozdziale elektroforetycznym próbki zawierającej mieszaninę białek, które następnie zostają przeniesione na membranę i inkubowane z odpowiednimi przeciwciałami, co w efekcie powoduje detekcję pożądanego białka (Opiela, 2006). Analizę molekularnych sond w postaci 25–60 oligonukleotydowych (ang. *oligo array*) lub jednoniciowych cDNA (ang. *cDNA array*) umożliwiają mikromacierze w postaci szklanych płytek, membran lub szkiełek. Podstawą tej analizy jest hybrydyzacja wyznakowanych fluorochromami analizowanych sekwencji z odpowiednią sondą molekularną umieszczoną na mikroplątce. Metoda ta

umożliwia identyfikację niewielkich, bo jednonukleotyдовых, różnic w DNA lub ocenę obecności, powstałego drogą ekspresji genetycznej, białka.

O ile w metodach hodowlanych problemem jest fakt, że zdolność do wzrostu na podłożach mikrobiologicznych wykazuje tylko 1% mikroorganizmów środowiskowych, o tyle w metodach molekularnych problemów przysparza uzyskiwanie odpowiedniej koncentracji i czystości kwasów nukleinowych. Od kilku lat coraz większym zainteresowaniem cieszy się metoda sekwencjonowania nowej generacji (ang. *next generation sequencing* – NGS). Polega ona na analizie całego metagenomu lub metagenomu plazmidowego, czyli genomu należącego do całej populacji organizmów izolowanych z różnych etapów oczyszczania ścieków i odbiorników ścieków oczyszczonych. W ten sposób można monitorować określone sekwencje flankujące (ARGs) w procesie oczyszczania ścieków i śledzić ich los w środowisku. Ograniczeniem NGS jest uzyskiwanie krótkich odczytów sekwencji, uzależnienie tej metody od PCR, a tym samym wprowadzenie ograniczeń tej metody, łącznie z zagrożeniem związanym ze zwielokrotnionym namnażaniem bardziej popularnych w środowisku sekwencji, konieczności wykrywania tylko znanych genów, a także problemem z przyporządkowaniem genów do organizmów, z których pochodzą (Bengtsson-Palme i in., 2016).

7.5. Podsumowanie

Wzrost zainteresowania środkami farmaceutycznymi i środkami ochrony osobistej i zarazem brak możliwości technologicznych ich usuwania, powodują narastanie problemu występowania tego typu zanieczyszczeń w osadach ściekowych i w produktach z nich wytwarzanych. Problem obecności farmaceutyków w ściekach został dostrzeżony stosunkowo niedawno, o wiele później niż powstały działające dziś oczyszczalnie, stąd technologie w nich zastosowane często są niewystarczające do oczyszczania ścieków z substancji farmaceutycznych i środków ochrony osobistej. Analiza danych dostępnych w literaturze wskazuje, że różne metody oczyszczania ścieków charakteryzują się różną skutecznością, w zależności od rodzaju, budowy i konkretnych właściwości usuwanego związku, przy czym nie ma metody, która wykazywałaby dużą skuteczność dla wszystkich farmaceutyków eliminowanych ze ścieków. Najłatwiej usuwalnymi związkami są niesteroidowe leki przeciwbólowe. Problemy stwarza natomiast eliminacja takich związków, jak: diklofenak czy diatriozad, a bardzo trudna do usunięcia jest karbamazepina (lek psychotropowy).

Wyzwanie stanowi zarówno sposób oczyszczania ścieków, jak i metody analityczne służące do ich wykrywania. Wynika to ze złożoności próby badawczej składającej się niejednokrotnie z wielu różnych substancji występujących w ilościach śladowych. Dlatego trwają intensywne prace nad opracowaniem nowych lub usprawnianiem już istniejących metod analitycznych, pozwalających na uzyskiwanie możliwie dokładnych informacji o stanie badanego środowiska wodnego.

PODSUMOWANIE

Proces zmiany funkcjonowania przedsiębiorstwa w kierunku systemu gospodarki o obiegu zamkniętym wzmacnia konkurencyjność i innowacyjność, stymuluje rozwój nowych modeli biznesowych i nowoczesnych technologii oraz ułatwia wprowadzanie innowacji. Zagospodarowanie osadów ściekowych pochodzących z procesu oczyszczania ścieków, które w zależności od składu mogą stanowić odpad do składowania lub produkt do wykorzystania przyrodniczego, jest obecnie jednym z głównych działań podejmowanych przez przedsiębiorstwa branży wodno-kanalizacyjnej, które wdrażają innowacje i zamierzają domykać obieg materiałów w gospodarce. Osady posiadają wysoką wartość nawozową i mogą być wykorzystywane do nawożenia lub do rekultywacji terenów zdegradowanych, przed wprowadzeniem ich do gleby należy jednak poznać ich charakterystykę, zwłaszcza zawartość substancji szkodliwych, w tym priorytetowych. Brak takich informacji może wywołać skutki odmienne od zamierzonych i przyczynić się do zakłóceń lub trwałych zmian w ekosystemach. Prowadzenie działań związanych z zagospodarowaniem osadów regulują akty prawne zarówno unijne, jak i krajowe. Wprowadzają one ograniczenia w składowaniu osadów ściekowych na składowiskach odpadów. Poszukiwane są więc nowe rozwiązania zagospodarowania osadów ściekowych, zgodne z Ramową Dyrektywą Wodną i Dyrektywą Morską, uwzględniające ochronę wód przed zanieczyszczeniami. Nowe standardy pozytywnie wpływają na rozwój systemu unieszkodliwiania i zagospodarowania komunalnych osadów ściekowych, zwłaszcza w perspektywie działań podejmowanych na rzecz osiągnięcia ekonomicznych korzyści z procesów wykorzystania osadów.

W Polsce istnieje wiele instalacji suszenia i termicznego przekształcania osadów. Postępujący rozwój społeczny, postępująca urbanizacja miast i uprzemysłowienie, mogą powodować jednak, że liczba funkcjonujących obecnie instalacji będzie niewystarczająca do zaspokojenia potrzeb rynku. Tempo przyrostu instalacji zagospodarowania osadów ściekowych w Polsce jest nieporównywalnie mniejsze niż w krajach Europy Zachodniej, co więcej, stosowane dzisiaj u nas technologie osiągnęły już poziom dojrzałości i nie są postrzegane jako innowacyjne. Stąd potrzeba zarówno poszukiwania nowych rozwiązań, jak i skutecznego wdrażania tych, które są dostępne na rynku. Problem wykorzystania osadów ściekowych jest jednak złożony, istnieje wiele luk prawnych, które ograniczają rolnicze wykorzystanie osadów czy odzysk substancji biogennych, szczególnie fosforu, z osadów ściekowych. Niektóre przedsiębiorstwa podejmują się samodzielnie lub przy współpracy z jednostkami naukowymi opracowania nowych rozwiązań, które umożliwią efektywne zagospodarowanie osadów ściekowych. Jednym z takich przedsiębiorstw jest Przedsiębiorstwo Wodociągów i Kanalizacji Sp. z o.o. w Rybniku, które podjęło się opracowania innowacyjnych rozwiązań związanych z przeróbką osadów ściekowych w OŚ Rybnik-Orzepowice. Oczyszczalnia ta przyjmuje ścieki

z mieszanego systemu kanalizacji, który w dużej części ma obecnie charakter ogólnospławny. W układzie przeróbki osadu stosuje się beztlenową stabilizację wstępnie zagęszczonych osadów i końcowe odwadnianie mechaniczne. Po odwodnieniu osad poddawany jest higienizacji wapnem, a następnie przenośnikiem ślimakowym transportowany do przyczep, z których przewożony jest do miejsca tymczasowego gromadzenia na terenie oczyszczalni. Osad z terenu oczyszczalni jest sukcesywnie wywożony. W roku 2011 jako wynik realizacji projektu pn. „Innowacyjny sposób zagospodarowania osadów ściekowych celem spełnienia dyrektywy Unii Europejskiej w zakresie ochrony środowiska i energetyki” opracowano i uruchomiono instalację sekwencyjnej konwersji biomasy dla spełnienia wymagań Unii Europejskiej w zakresie ochrony środowiska i energetyki, do produkcji kompozytowej biomasy o symbolu KBP-01 i określonym składzie. Prace badawcze w OŚ Rybnik-Orzepowice nie ograniczały się jednak wyłącznie do biokonwersji osadów ściekowych, ale zmierzały w kierunku wdrożenia instalacji do przeróbki osadów tak, aby możliwe było otrzymanie w wyniku jej działania produktu, którego właściwości będą spełniały wszystkie wymogi dla nawozu organicznego. Kolejne prace związane z innowacyjnymi rozwiązaniami zagospodarowania osadów ściekowych wiążą się z przeprowadzeniem badań przemysłowych i/lub eksperymentalnych prac wdrożeniowych dla następujących technologii: wityfikacja, proces Cambi, suszenie termiczne, spalanie, współspalanie, kompostowanie, zgazowanie, piroliza niskotemperaturowa, produkcja gruntów antropogenicznych, wykorzystanie jako nawozy organiczne. Zidentyfikowane technologie zagospodarowania osadów zostały poddane wstępnej analizie pod kątem: prostoty obsługi technologii, kosztów wdrożenia, wymogów lokalizacyjnych oraz finalnego produktu poprocesowego. Przyjęto, że realizowane powinny być działania wykazujące możliwość wytwarzania produktu, niski koszt wdrożeniowy i eksploatacyjny, niewielkie wymagania obszarowe pod lokalizację inwestycji oraz wpisujące się w paradygmat gospodarki obiegu zamkniętego. W odniesieniu do warunków aglomeracji Rybnik najkorzystniejszymi technologiami wydają się być: suszenie termiczne, współspalanie, piroliza niskotemperaturowa, produkcja gruntów antropogenicznych, produkcja nawozów organicznych. Analiza efektywności ekonomicznej rozwiązań technologicznych dla PWiK Sp. z o.o. w Rybniku pozwoliła na wyodrębnienie tych, które charakteryzują się relatywnie wysokim parametrem opłacalności ekonomicznej.

Na podstawie przeprowadzonej analizy DGC, uwzględniającej badany zestaw rozwiązań technologicznych zagospodarowania osadów ściekowych, z uwagi na niski koszt inwestycyjny i eksploatacyjny, najkorzystniejszym rozwiązaniem jest produkcja gruntów antropogenicznych na cele rekultywacyjne. Z drugiej strony, biorąc pod uwagę bieżące korzyści z produkcji biopaliwa i długofalowe pozytywne skutki w postaci obniżenia kosztów oczyszczania ścieków w OŚ Rybnik-Orzepowice, ekonomicznie uzasadnione jest wdrożenie technologii biokonwersji.

Tematy prowadzonych prac, jak również omówione rezultaty działalności badawczo-rozwojowej, pokazują nowe kierunki badań zagospodarowania osadów ściekowych, uwzględniające szczególne znaczenie bezpieczeństwa korzystania z zasobów wodnych. Istotne jest także prowadzenie kompleksowej analizy ścieków i osadów ściekowych pod względem chemicznym i biologicznym, a zwłaszcza pod kątem pojawiających się farmaceutyków i innych mikrozanieczyszczeń. Problem bezpieczeństwa środowiskowego zasobów wodnych i produktów wytwarzanych z osadów ściekowych stawia zarówno przed PWiK Sp. z o.o. w Rybniku, jak i przed innymi podmiotami z sektora komunalnego, poważne wyzwanie, którego podjęcie jest konieczne w związku z wymaganiami gospodarki obiegu zamkniętego.

LITERATURA

- Adamek E., Jakubczyk J., Baran W., Makowski A., Lipska I., Ziemiańska J., Sobczak A. (2011): Fotodegradacja wybranych leków przeciwwzapalnych w środowisku wodnym. *Proceedings of EC Opole*, nr 5(1), s. 147-153.
- Amine H., Gomez E., Halwani J., Casellas C., Fenet H. (2012): UV filters, ethylhexyl methoxycinnamate, octocrylene and ethylhexyl dimethyl PABA from untreated wastewater in sediment from eastern Mediterranean river transition and coastal zones. *Marine Pollution Bulletin*, Vol. 64, s. 2435-2442.
- Ariese F., Ernst W.H.O., Sijm D.T.H.M. (2001): Natural and synthetic organic compounds in the environment – a symposium report. *Environmental Toxicology and Pharmacology*, Vol. 10, Issue 3, s. 65-80.
- Bachelot M., Li Z., Munaron D., Gall P.L., Casellas C., Fenet H., Gomez E. (2012): Organic UV filter concentrations in marine mussels from French coastal regions. *Science of the Total Environment*, Vol. 420, s. 273-279.
- Bengtsson-Palme J., Hammarén R., Pal C., Östman M., Björleinius B., Flach C.F., Fick J., Kristiansson E., Tysklind M., Larsson D.G.J. (2016): Elucidating selection processes for antibiotic resistance in sewage treatment plants using metagenomics. *Science Total Environment*, Vol. 572, s. 697-712.
- Bever J., Stein A., Teichmann H. (1997): Zaawansowane metody oczyszczania ścieków. Bydgoszcz, Oficyna Wydawnicza Projprzem-EKO.
- Bieganska J., Ciufa J. (2011): Zintegrowana gospodarka odpadami komunalnymi w Polsce jako element zrównoważonego rozwoju. *Archives of Waste Management and Environmental Protection*, Vol. 13, No 1, s. 51-60.
- Bień J.D. (2007): Osady ściekowe – teoria i praktyka. Wyd. II poprawione i uzupełnione. Częstochowa, Wydawnictwo Politechniki Częstochowskiej.
- Bień J.D., (2012): Zagospodarowanie komunalnych osadów ściekowych. *Inżynieria i Ochrona Środowiska*, T. 15, nr 15, s. 439-449.
- Bień J.D., Szymanek A., Bień B. (2011): Alternatywne dla spalania metody termicznej utylizacji komunalnych osadów ściekowych. *Wydawnictwo Politechniki Częstochowskiej*.
- Bień J., Górski M., Gromiec M., Kacprzak M., Kamizela T., Kowalczyk M., Neczaj E., Pająk T., Wystalska K. (2014): Ekspertyza, która będzie stanowić materiał bazowy do opracowania strategii postępowania z komunalnymi osadami ściekowymi na lata 2014–2020. Częstochowa, Politechnika Częstochowska.
- Bilitewski B., Härdtle G., Marek K. (2003): Podręcznik gospodarki odpadami. Teoria i praktyka. Wydanie pierwsze. Warszawa, Wydawnictwo Seidel-Przywecki. Spółka z o. o.
- Bingham P.A., Hand R.J. (2006): Vitrification of toxic wastes: A brief review. *Advances in Applied Ceramics*, Vol. 105, Issue 1, s. 21-31.
- Bodzek M. (2013): Przegląd możliwości i wykorzystania technik membranowych w usuwaniu mikroorganizmów i zanieczyszczeń organicznych ze środowiska wodnego. *Inżynieria i Ochrona Środowiska*, T. 16, nr 1, s. 5-37.
- Borkowski L. (2012): Piroliza: ekologia-energia-ciepło. Utylizacja odpadów komunalnych, gumowych oraz przerób biomasy w procesie pirolizy nisko- i wysokotemperaturowej. Konferencja: Energetyka we wsiach i rolnictwie, 27-28 marca 2012 r.
- Borowska D., Jabłoński A., Pejsak Z. (2014): Metoda krążkowo-dyfuzyjna w weterynaryjnej diagnostyce bakteriologicznej – praktyczne dane. *Życie Weterynaryjne*, R. 89, nr 2, s. 116-120.

- Bouki C., Venieri D., Diamadopoulos E. (2013): Detection and fate of antibiotic resistant bacteria in wastewater treatment plants: a review. *Ecotoxicology Environmental Safety*, Vol. 91, s. 1-9.
- Budzianowski W.M. (2016): A review of potential innovations for production, conditioning and utilization of biogas with multiple-criteria assessment. *Renewable Sustainable Energy Review*, Vol. 54, s. 1148-1171.
- Coille I., Reder S., Bucher S., Gauglitz G. (2002): Comparison of two fluorescence immunoassay methods for the detection of endocrine disrupting chemicals in water. *Biomolecular Engineering*, Vol. 18, Issue 6, s. 273-280.
- Colombo P., Brusatin G., Bernardo E., Scarinci G. (2003): Inertization and reuse of waste materials by vitrification and fabrication of glass-based products. *Current Opinion in Solid State and Materials Science*, Vol. 7, s. 225-239.
- Cywiński B., Gdula S. (1983): *Oczyszczanie ścieków. Oczyszczanie mechaniczne i chemiczne*. Warszawa, Wydawnictwo Arkady.
- Czech B. (2012): Usuwanie farmaceutyków z wód i ścieków z wykorzystaniem metod adsorpcyjnych i fotokatalitycznych. *Adsorbenty i Katalizatory – Wybrane Technologie a Środowisko*, nr 2, s. 453-466.
- Czerwiński J., Kłonica A., Ozonek J. (2015): Pozostałości farmaceutyków w środowisku wodnym i metody ich usuwania. *Czasopismo Inżynierii Łądowej, Środowiska i Architektury*, z. 62, nr 1, s. 27-42.
- de Alda M.J.L., Barcelo D. (2001): Use of solid-phase extraction in various of its modalities for sample preparation in the determination of estrogens and progestogens in sediment and water. *Journal of Chromatography A*, Vol. 93, Issue 1-2, s. 145-153.
- de Alda M.J.L., Díaz-Cruz S., Petrovic M., Barceló D. (2003): Liquid chromatography-(tandem) mass spectrometry of selected emerging pollutants (steroid sex hormones, drugs and alkylphenolic surfactants) in the aquatic environment. *Journal of Chromatography A*, Vol. 1000(1-2), s. 503-526.
- Dobre praktyki (2012): Dobre praktyki związane z gospodarką osadami ściekowymi – Projekt PURE (Project on Urban Reduction of Eutrophication – Projekt redukcji eutrofizacji z obszarów zurbanizowanych) – Komisja Środowiska Naturalnego Związku Miast Bałtyckich, Vanha Suurtori 7, FIN-20500 Turku, Finlandia.
- Donatello S., Cheeseman C.R. (2013): Recycling and recovery routes for incinerated sewage sludge ash (ISSA): A review. *Waste Management*, No. 33, s. 2328-2340.
- Drągowski A. (1979): Wybrane problemy badawcze zwietrzelin i gruntów antropogenicznych dla posadowienia budowli. *Materiały Konferencyjne „Budownictwo na gruntach słabych, nasypowych i antropogenicznych rejonu Warszawy”*, Warszawa, s. 47-61.
- Dudziak M. (2015): Próba oceny wpływu składu roztworu modelowego na rozkład wybranych ksenobiotyków w procesie utleniania z wykorzystaniem promieni nadfioletowych i nadtlenu wodoru. *Ochrona Środowiska*, T. 37, nr 2, s. 21-25.
- Dyduch J. (2013): Wykorzystanie dynamicznego kosztu jednostkowego w ocenie efektywności projektów ekologicznych. *Prace Naukowe Uniwersytetu Ekonomicznego we Wrocławiu*, nr 289, s. 141-142.
- Fatta D., Achilleos A., Nikolaou A., Meric S. (2007): Analytical methods for tracing pharmaceutical residues in water and wastewater. *TrAC Trends in Analytical Chemistry*, Vol. 26, Issue 6, s. 515-533.
- Felis E., Miksch K., Sikora J. (2005): Występowanie i możliwości usuwania farmaceutyków w Polsce. VII Ogólnopolska Sesja Popularnonaukowa Środowisko a Zdrowie, 2-3 czerwca 2005.

- Fent K., Zenker A., Rapp M. (2010): Widespread occurrence of estrogenic UV-filters in aquatic ecosystems in Switzerland. *Environmental Pollution*, Vol. 158, s. 1817-1824.
- Ferri M., Ranucci E., Romagnoli P., Giaccone V. (2017): Antimicrobial resistance: A global emerging threat to public health systems. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, Vol. 57, No 13, s. 2857-2876.
- Fieducik J., Gawroński A. (2010): Suszenie i spalanie osadów ściekowych jako metoda ich utylizacji na przykładzie spalarni w Olsztynie. *Zeszyty Naukowe Politechniki Rzeszowskiej. Budownictwo i Inżynieria Środowiska*, z. 57, s. 147-154.
- Fonts I., Gea G., Azuara M., Ábrego J., Arauzo J. (2012): Sewage sludge pyrolysis for liquid production: a review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 16, No 5, s. 2781-2805.
- Gackowska A., Gaca J., Załoga J. (2012): Determination of selected UV filters in water samples. *Chemik* 6, p. 618-620.
- Gao P., Munir M., Xagorarakis I. (2012): Correlation of tetracycline and sulfonamide antibiotics with corresponding resistance genes and resistant bacteria in a conventional municipal wastewater treatment plant. *The Science of the Total Environment*, Vol. 421-422, s. 173-183.
- Gelpi E. (1995): Isolation, identification, and biological activities of oxidative metabolites of FK506, a potent immunosuppressive macrolide lactone. *Journal of Chromatography*, Vol. 703, s. 59-80.
- Gil-Lalaguna N., Sanchez J., Murillo M., Atienza-Martínez M., Gea G. (2014): Energetic assessment of air-steam gasification of sewage sludge and of the integration of sewage sludge pyrolysis and air-steam gasification of char. *Energy*, No. 76, s. 652-662.
- Glade M.J. (2010): Caffeine – not just a stimulant. *Nutrition*, Vol. 26, No 10, s. 932-938.
- Gluzińska J. (2009): Komunalne osady ściekowe – surowiec z odpadu. *Chemik*, nr 10, s. 360-363.
- Góralczyk S., Kukielska D. (2009): Kruszywo lekkie z odpadów. *Przegląd Komunalny*, nr 11, s. 52-55.
- Górski M., Zabawa S. (2008): Zarządzanie gospodarką odpadami: techniczno-organizacyjno-prawne aspekty gospodarki odpadami. Poznań, Polskie Zrzeszenie Inżynierów i Techników Sanitarnych.
- Haller M.Y., Müller S.R., McArdell C.S., Alder A.C., Suter M.J.F. (2002): Quantification of veterinary antibiotics (sulfonamides and trimethoprim) in animal manure by liquid chromatography – mass spectrometry. *Journal of Chromatography A*, Vol. 952(1-2), s. 111-120.
- Halling-Sørensen B., Nielsen S.N., Lanzky P.F., Ingerslev F., Lützhøft H.H., Jørgensen S. (1998): Occurrence, fate and effects of pharmaceutical substances in the environment – A review. *Chemosphere*, Vol. 36(2), s. 357-393.
- Hapeshi E., Achilleos A., Vasquez M.I., Michael C., Xekoukoulotakis N.P., Mantzavinos D., Kassinos D. (2010): Drugs degrading photocatalytically: kinetics and mechanisms of ofloxacin and atenolol removal on titania suspensions. *Water Research*, Vol. 44(6), s. 1737-1746.
- He Y., Zhu Y., Chen J., Huang M., Wang G., Zou W., Wang P., Zhou G. (2018): Assessment of land occupation of municipal wastewater treatment plants in China. *Environmental Science: Water Research & Technology*, Issue 12, s. 1988-1996.
- Heberer T. (2002a): Occurrence, fate, and removal of pharmaceutical residues in the aquatic environment: a review of recent research data. *Toxicology Letters*, Vol. 131 (1-2), s. 5-17.

- Heberer T. (2002b): Tracking persistent pharmaceutical residues from municipal sewage to drinking water. *Journal of Hydrology*, Vol. 266(3-4), s. 175-189.
- Heidrich Z., Witkowski A. (2010): Urządzenia do oczyszczania ścieków. Projektowe przykłady obliczeń. Warszawa, Wydawnictwo „Seidel-Przywecki” Sp. z o.o.
- Heitor M.V. (2004): Introduction... in the way of a manifesto: Competence building for innovation [w:] J. Bento, J.P. Duarte, M.V. Heitor, W.J. Mitchell (Eds.), Collaborative design and learning competence building for innovation. London, Praeger.
- Hinson J.A., Pumford N.R., Nelson S.D. (1994): The role of metabolic activation in drug toxicity. *Drug Metabolism Reviews*, Vol. 26(1-2), s. 395-412.
- Janosz-Rajczyk M. (2004): Komunalne osady ściekowe – podział, kierunki zastosowań oraz technologie przetwarzania, odzysku i unieszkodliwiania (wyciąg z pracy zrealizowanej w Instytucie Inżynierii Środowiska pod kierunkiem prof. dr hab. inż. Marty Janosz-Rajczyk, a sfinansowanej ze środków Narodowego Funduszu Ochrony Środowiska i Gospodarki Wodnej na zamówienie Ministra Środowiska). Częstochowa, Politechnika Częstochowska.
- Januszewicz P., Binkowska-Bury M., Fijałek Z.E. (2012): Leki a zdrowie publiczne. Rzeszów, Wydawnictwo Uniwersytetu Rzeszowskiego.
- Jeannot R., Sabik H., Sauvard E., Dagnac T., Dohrendorf K.J. (2002): Determination of endocrine-disrupting compounds in environmental samples using gas and liquid chromatography with mass spectrometry. *Journal of Chromatography A*, Vol. 974, s. 143-159.
- Joo S.H., Monaco F.D., Antmann E., Chorath P. (2015): Sustainable approaches for minimizing biosolids production and maximizing reuse options in sludge management: a review. *Journal of Environmental Management*, Vol. 158, s. 133-145.
- Kaiser D., Sieratowicz A., Zielke H., Oetken M., Hollert H., Oehlmann J. (2012): Ecotoxicological effect characterisation of widely used organic UV filters. *Environmental Pollution*, Vol. 163, s. 84-90.
- Kim Y., Parker W. (2008): A technical and economic evaluation of the pyrolysis of sewage sludge for the production of bio-oil. *Bioresource Technology*, Vol. 99(5), s. 1409-1416.
- Kim Y., Park S., Park J., Lee W. (1995): Detection of benzthiazide by high-performance liquid chromatography-thermospray mass spectrometry. *Journal of Chromatography A*, Vol. 689(1), s. 170-174.
- Kleiber M., red. (2011): *Ekoefektywność technologii*. Warszawa, Wydawnictwo Naukowe Instytutu Technologii Eksploatacji PIB.
- Klein M., Kluska J., Misiuk S., Kardaś D. (2011): Przebieg i produkty procesu pirolizy wybranych tworzyw sztucznych w reaktorze ciśnieniowym. *Inżynieria i Aparatura Chemiczna*, T. 50, nr 5, s. 54-55.
- Klimeš J., Sochor J., Kříž J. (2002). A study of the conditions of the supercritical fluid extraction in the analysis of selected anti-inflammatory drugs in plasma. *Il Farmaco*, Vol. 57(2), s. 117-122.
- Kolpin D.W., Furlong E.T., Meyer M.T., Thurman E.M., Zaugg S.D., Barber L.B., Buxton H.T. (2002): Pharmaceuticals, hormones, and other organic wastewater contaminants in US streams, 1999–2000: A national reconnaissance. *Environmental Science & Technology*, Vol. 36(6), s. 1202-1211.
- Kordylewski W., Zacharczuk W., Kasprzyk K. (2003): Modyfikacja popiołu i żużla metodą nityfikacji. *Ochrona Powietrza i Problemy Odpadów*, T. 37, nr 3, s. 84-88.
- Kosior-Kazberuk M. (2011): Nowe dodatki mineralne do betonu. *Budownictwo i Inżynieria Środowiska*, Vol. 2, nr 1, s. 47-55.

- Koszowska A., Ebisz M., Krzyśko-Lupicka T. (2015): Obecność farmaceutyków i środków kosmetycznych w środowisku wodnym jako nowy problem zdrowia środowiskowego. *Medycyna Środowiskowa – Environmental Medicine*, T. 18, nr 1, s. 62-69.
- Kotowski W., Konopka E. (2008): Elektrociepłownia sprzężona ze zgazowaniem odpadów komunalnych i szlamów pościekowych. Sposób na osady (materiały niepublikowane).
- Kugiel M., Piekło R. (2012): Kierunki zagospodarowania odpadów wydobywczych w Haldex SA. *Górnictwo i Geologia*, nr 7, s. 133-145.
- Kümmerer K. (2004): Resistance in the environment. *Journal of Antimicrobial Chemotherapy*, Vol. 54(2), s. 311-320.
- Kurahashi K., Kimura C., Fujimoto Y., Tokumoto H. (2017): Value-adding conversion and volume reduction of sewage sludge by anaerobic co-digestion with crude glycerol. *Bioresources Technology*, Vol. 232, s. 119-125.
- Li W., Ma Y., Guo C., Hu W., Liu K., Wang Y., Zhu T. (2007): Occurrence and behavior of four of the most used sunscreen UV filters in a wastewater reclamation plant. *Water Research*, Vol. 41(15), s. 3506-3512.
- Lorek P. (2015): Wskaźniki poziomu innowacyjności dla krajów Unii Europejskiej. *Studia Ekonomiczne. Zeszyty Naukowe Uniwersytetu Ekonomicznego w Katowicach*, nr 212.
- Louden D., Handley A., Taylor S., Lenz E., Miller S., Wilson I.D., Sage A. (2000): Reversed-phase high-performance liquid chromatography combined with on-line UV diode array, FT infrared, and 1H nuclear magnetic resonance spectroscopy and time-of-flight mass spectrometry: application to a mixture of nonsteroidal antiinflammatory drugs. *Analytical Chemistry*, Vol. 72(16), s. 3922-3926.
- Lubliner B., Redding M., Ragsdale D. (2010): Pharmaceuticals and personal care products in municipal wastewater and their removal by nutrient treatment technologies. *Washington State Department of Ecology*.
- Łukasik P. (2017): Analiza problemów pomiaru innowacyjności przedsiębiorstwa. *Nierówności Społeczne a Wzrost Gospodarczy*, nr 52 (4/2017), s. 1-8.
- Malej J. (2004): Odpady i osady ściekowe. Charakterystyka, unieszkodliwianie, zagospodarowanie. Koszalin, Wydawnictwo Politechniki Koszalińskiej.
- Małecki P.P. (2011): Efektywność kosztowa jako metoda oceny projektów inwestycyjnych w ochronie środowiska, *Zeszyty Naukowe Uniwersytetu Ekonomicznego w Krakowie*, nr 860.
- Marchlewicz A., Guzik U., Wojcieszynska D. (2015): Właściwości, występowanie i biodegradacja ibuprofenu w środowisku wodnym. *Ochrona Środowiska*, Vol. 37, nr 1, s. 65-70.
- Matsuya T., Hoshino N., Ogasawara M., Harita T., Arao S.A. (2002): Procedure for extraction of estrogens in river water analysis by time-resolved fluorometric HPLC using β -diketonate europium chelate reagent. *Environmental Sciences*, Vol. 9(5), s. 393-404.
- McAvoy D.C., Schatowitz B., Jacob M., Hauk A., Eckhoff W.S. (2002): Measurement of triclosan in wastewater treatment systems. *Environmental Toxicology and Chemistry: An International Journal*, Vol. 21(7), s. 1323-1329.
- Meesters R.J., Schröder H.F. (2002). Simultaneous determination of 4-nonylphenol and bisphenol A in sewage sludge. *Analytical Chemistry*, Vol. 74(14), s. 3566-3574.
- Meng X.Z., Venkatesan A.K., Ni Y.L., Steele J.C., Wu L.L., Bignert A., Bergman A., Halden R.U. (2016): Organic contaminants in Chinese sewage sludge: a metaanalysis of the literature of the past 30 years. *Environmental Science Technology*, Vol. 50, s. 5454-5466.

- Meyer M.T., Bumgarner J.E., Varns J.L., Daughtridge J.V., Thurman E.M., Hostetler K.A. (2000): Use of radioimmunoassay as a screen for antibiotics in confined animal feeding operations and confirmation by liquid chromatography/mass spectrometry. *Science of the Total Environment*, Vol. 248(2-3), s. 181-187.
- Muljono R.A.B., Darsono F.L., Scheffer J.J., Verpoorte R. (2001): Assay of 2, 3-dihydroxybenzoic acid and related compounds in plant materials by high-performance liquid chromatography. *Journal of Chromatography A*, Vol. 927(1-2), s. 39-45.
- Murahashi T., Sasaki S., Nakajima T. (2003): Determination of endocrine disruptors in automobile exhaust particulate matter. *Journal of Health Science*, Vol. 49(1), s. 72-75.
- Niemiec W., Sobolewska P., Jasiński T. (2007): Wybrane możliwości przyrodniczego zagospodarowania osadów ściekowych. *Zeszyty Naukowe Politechniki Rzeszowskiej. Budownictwo i Inżynieria Środowiska*, z.42, 240, s. 63-72.
- Nogalski B., Niewiadomski P. (2014): Koncepcja oceny przedsięwzięć innowacyjnych w elastycznym zakładzie wytwórczym: rekomendacje dla innowacji produktowych. *Studia Ekonomiczne*, nr 183, cz. 2, s. 121-131.
- Ocena możliwości (2004): Ocena możliwości zagospodarowania osadów ściekowych i innych odpadów ulegających biodegradacji w Polsce w świetle propozycji zmian prawa Unii Europejskiej. Częstochowa, Politechnika Częstochowska.
- Opiela J. (2006): Analiza ekspresji genów na poziomie białek przy użyciu techniki Western Blot. *Wiadomości Zootechniczne*, nr 1(44), s. 11-13.
- Pająk T., Wielgosiński G. (2003): Współczesne technologie suszenia i spalania osadów ściekowych – kryteria i uwarunkowania wyboru technologii. Nowe spojrzenie na osady ściekowe. Odnawialne źródła energii. Międzynarodowa Konferencja Naukowo-Techniczna, 3–5 lutego 2003, Częstochowa (s. 491-500).
- Papa M., Foladori P., Guglielmi L., Bertanza G. (2017): How far are we from closing the loop of sewage resource recovery? A real picture of municipal wastewater treatment plants in Italy. *Journal of Environmental Management*, Vol. 198, s. 9-15.
- Petrović M., Barceló D., Diaz A., Ventura F. (2003): Low nanogram per liter determination of halogenated nonylphenols, nonylphenol carboxylates, and their non-halogenated precursors in water and sludge by liquid chromatography electrospray tandem mass spectrometry. *Journal of the American Society for Mass Spectrometry*, Vol. 14(5), s. 516-527.
- Petrović M., Gonzalez S., Barceló D. (2003): Analysis and removal of emerging contaminants in wastewater and drinking water. *TrAC Trends in Analytical Chemistry*, Vol. 22(10), s. 685-696.
- Piechocki J., Sołowiej P., Neugebauer M. (2010): Gazyfikacja biomasy odpadowej z produkcji rolniczej. *Inżynieria Rolnicza*, nr 5(123), s. 219-224.
- Pikoń K., Rejman R. (2009): Bilans pierwiastka węgla w systemie gospodarki odpadami komunalnymi. *Archives of Waste Management and Environmental Protection*, Vol. 11, Issue 3, s. 27-46.
- Poiger T., Buser H.R., Balmer M.E., Bergqvist P.A., Müller M.D. (2004): Occurrence of UV filter compounds from sunscreens in surface waters: regional mass balance in two Swiss lakes. *Chemosphere*, Vol. 55(7), s. 951-963.
- Próba M. (2013): Wybrane antropogeniczne czynniki zanieczyszczenia wód powierzchniowych. Analiza zjawiska. *Inżynieria i Ochrona Środowiska*, T. 16(1), s. 113-124.
- Raport końcowy (2000): Wyniki badań „Innowacyjny sposób zagospodarowania osadów ściekowych celem spełnienia wymagań dyrektyw Unii Europejskiej w zakresie ochrony środowiska i energetyki” – POIG 01.04.00-24-026, POIG 04.01.00-24-026. Raport końcowy, PWiK Sp. z o.o. w Rybniku.

- Raport końcowy (2010): Analiza ekonomiczna wdrożenia, rynek produktu „Innowacyjny sposób zagospodarowania osadów ściekowych celem spełnienia wymagań dyrektywy Unii Europejskiej w zakresie ochrony środowiska i energetyki” – POIG 01.04.00-24-026. Raport końcowy, PWiK Sp. z o.o. w Rybniku.
- Reddersen K., Heberer T., Dünnebier U. (2002): Identification and significance of phenazone drugs and their metabolites in ground-and drinking water. *Chemosphere*, Vol. 49(6), s. 539-544.
- Rizzo L., Manaia C., Merlin C., Schwartz T., Dagot C., Ploy M.C., Fatta-Kassinos D. (2013): Urban wastewater treatment plants as hotspots for antibiotic resistant bacteria and genes spread into the environment: a review. *Science of the Total Environment*, Vol. 447, s. 345-360.
- Sadecka Z., Myszograj S. (2010): Gospodarka ściekowo-osadowa w gminie wiejskiej. *Forum Eksploatatora*, nr 3, s. 56-58.
- Salgado R., Marques R., Noronha J.P., Carvalho G., Oehmen A., Reis M.A.M. (2012): Assessing the removal of pharmaceuticals and personal care products in a full-scale activated sludge plant. *Environmental Science and Pollution Research*, Vol. 19(5), s. 1818-1827.
- Samolada M., Zabaniotou A. (2014): Comparative assessment of municipal sewage sludge incineration, gasification and pyrolysis for a sustainable sludge-to-energy management in Greece. *Waste Management*, No. 34, s. 411-420.
- Sanak-Rytlewska S. (2011): Metody oczyszczania ścieków miejskich. Kraków, Wydawnictwa AGH.
- Simmons B.R., Stewart J.T. (1997): Supercritical fluid extraction of selected pharmaceuticals from water and serum. *Journal of Chromatography B: Biomedical Sciences and Applications*, Vol. 688(2), s. 291-302.
- Siuta J. (2000): Sposoby i obiekty przyrodniczego użytkowania osadów ściekowych. *Przegląd Komunalny. Dodatek branżowy – Kierunki zagospodarowania osadów ściekowych*, nr 1, s. 9-10.
- Siuta J., Sienkiewicz R. (2001): Rekultywacja terenów składowania odpadów posodowych w Janikowie. *Inżynieria Ekologiczna*, nr 3, s. 49-59.
- Siuta J., Wasiak G., Chłopecki K. (1996): Przyrodniczo-techniczne przetwarzanie osadów ściekowych na kompost. Warszawa, Instytut Ochrony Środowiska.
- Skalmowski K. red. (2006): Poradnik gospodarowania odpadami. Podręcznik dla specjalistów i referentów ds. Ochrony Środowiska. Stan prawny na 1 kwietnia 2006. Tom 4. Warszawa, Verlag Dashofer.
- Sobiecka E., Sroczyński W. (2011): Fly ash vitrification as the effective physicochemical waste stabilization method. *Biotechnology and Food Science*, Vol. 75(2), s. 35-38.
- Sosnowska K., Styszko K., Gołaś J. (2010): Wstępne oznaczenie diklofenaku w ściekach oczyszczonych techniką chromatografii gazowej z detektorem mas (GC/MS). Materiały Krakowskiej Konferencji Młodych Uczonych.
- Stamatelatos K., Tsagarakis K.P. (2015): Sewage Treatment Plants: Economic Evaluation of Innovative Technologies for Energy Efficiency. London, IWA Publishing.
- Sundsford A., Simonsen G., Haldorsen B., Haaheim H., Hjelmevoll S., Littauer P., Dahl K. (2004): Genetic methods for detection of antimicrobial resistance. *Acta Pathologica Microbiologica et Immunologica Scandinavica*, Vol. 112, s. 815-837.
- Szczygieł J. (2004): Energia z osadów ściekowych. *Czysta Energia*, nr 11, s. 34-35.
- Szewczyk M. (2014): Osady ściekowe jako substytut w odtwarzaniu gleby w procesie rekultywacji gruntów po górnictwie odkrywkowym wapieni. *Inżynieria i Ochrona Środowiska*, T. 17, nr 2, s. 307-314.

- Szymonik A. (2013): Występowanie farmaceutyków w środowisku wodnym oraz możliwości ich usuwania. *Technologia Wody*, nr 5, s. 20-25.
- Szymonik A., Lach J. (2012): Zagrożenie środowiska wodnego obecnością środków farmaceutycznych. *Inżynieria i Ochrona Środowiska*, T. 15(3), s. 249-263.
- Świsłowski P., Kalinichenko A. (2015): Przegląd współczesnych, światowych technologii (rozwiązań, patentów) produkcji biogazu. Opole, Uniwersytet Opolski.
- Ternes T., project co-ordinator (2004): Assessment of Technologies for the Removal of Pharmaceuticals and Personal Care products in Sewage and Drinking Water Facilities to Improve the Indirect Potable Water Reuse. Project acronym POSEIDON. Energy, Environment and Sustainable Development.
- Uzunow E., Mazela A. (2008): Badanie technologii produkcji kruszyw sztucznych z osadów ściekowych zanieczyszczonych związkami metali ciężkich. *Forum Eksploatatora*, nr 6, s. 64-68.
- Wandrasz J.W., Wandrasz A.J. (2006): *Paliwa Formowane*. Warszawa, Wydawnictwo Seidel-Przywecki.
- Wawrzyniak P. (2011): Suszenie osadów ściekowych – wybór technologii. *Wodociągi – Kanalizacja*, nr 1, s. 29-31.
- Węgrzyn A., Machura M., Zabczyński S. (2015): Możliwości usuwania środków cieniujących ze ścieków. *Ochrona Środowiska*, T. 37, nr 1, s. 55-63.
- Werle S., Wilk R.K. (2010): A review of methods for the thermal utilization of sewage sludge: The Polish perspective. *Renewable Energy*, Vol. 35, s. 1914-1919.
- Wielgoński G., Pajak T. (2003): Unieszkodliwianie osadów ściekowych metodami termicznymi – pułapki i zagrożenia. *Przegląd Komunalny*, nr 12, s. 56-57.
- Wodecka-Hyjek A. (2013): Wybrane narzędzia pomiaru innowacyjności. *Zeszyty Naukowe Uniwersytetu Ekonomicznego w Krakowie*, Vol. 922, s. 63-82.
- Wójtowicz A. (2014): Kierunki rozwoju gospodarki osadowej. *Gaz, Woda i Technika Sanitarna*, nr 4, s. 148-153.
- Wzorek Z. (2008): Odzysk związków fosforu z termicznie przetworzonych odpadów i ich zastosowanie jako substytutu naturalnych surowców fosforowych. Monografia: *Inżynieria i Technologia Chemiczna*. Karków, Politechnika Krakowska.
- Xiao B., Li H., Yan H., Guo X. (2016): Evaluation of the sludge reduction effectiveness of a metabolic uncoupler-tetrakis (hydroxymethyl) phosphonium sulfate in anaerobic/anoxic/oxic process. *Desalination and Water Treatment*, Vol. 57, s. 5772-5780.
- Yan W., Shuting Z., Yufeng Z., Hui X., Na D., Guanyi Ch. (2005): Experimental studies on low-temperature pyrolysis of municipal household garbage – temperature influence on pyrolysis product distribution. *Renewable Energy*, Vol. 30, s. 1133-1142.
- Ying G.G., Kookana R.S., Chen Z. (2002): On-line solid-phase extraction and fluorescence detection of selected endocrine disrupting chemicals in water by high-performance liquid chromatography. *Journal of Environmental Science and Health, Part B*, Vol. 37(3), s. 225-234.
- Zaman A.U. (2013): Life cycle assessment of pyrolysis-gasification as an emerging municipal solid waste treatment technology. *International Journal of Environmental Science and Technology*, Vol. 10, s. 1029-1038.
- Zarzycki R., Wielgoński G. (2003): Osady ściekowe. Najważniejsze problemy zagospodarowania, [w] R. Zarzycki (red.), *Techniczne problemy zarządzania środowiskiem w Łodzi* (s. 139-165). Łódź, Uniwersytet Łódzki.
- Zheng S., Qiu X., Chen B., Yu X., Liu Z., Zhong G., Yu W. (2011): Antibiotics pollution in Jiulong River estuary: source, distribution and bacterial resistance. *Chemosphere*, Vol. 84(11), s. 1677-1685.

- Zhu Y.G., Johnson T.A., Su J.Q., Qiao M., Guo G.X., Stedtfeld R.D., Tiedje J.M. (2013): Diverse and abundant antibiotic resistance genes in Chinese swine farms. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, Vol. 110(9), s. 3435-3440.
- Zhu X., Yuang W., Wang Z., Zhou M., Guan J. (2016): Effect of worm predation on changes in waste activated sludge properties. *Water Environment Resources*, Vol. 88, s. 387-393.
- Ziylan A., Ince N.H. (2011): The occurrence and fate of anti-inflammatory and analgesic pharmaceuticals in sewage and fresh water: treatability by conventional and non-conventional processes. *Journal of Hazardous Materials*, Vol. 187(1-3), s. 24-36.
- Żmuda W., Budzyń S., Tora B. (2006): Badania chromatograficzne produktów pirolizy granulatu ze zużytych opon. *Górnictwo i Geoinżynieria*, z. 3/1, s. 375-386.
- Zucchi S., Oggier D.M., Fent K. (2011): Global gene expression profile induced by the UV-filter 2-ethyl-hexyl-4-trimethoxycinnamate (EHMC) in zebrafish (*Danio rerio*). *Environmental Pollution*, Vol. 159(10), s. 3086-3096.
- Zwiener C., Glauner T., Frimmel F.H. (2000): Biodegradation of pharmaceutical residues investigated by SPE-GC/ITD-MS and on-line derivatization. *Journal of High Resolution Chromatography*, Vol. 23(7-8), s. 474-478.

ŹRÓDŁA INTERNETOWE

- BIP UM Rybnik (2017): Biuletyn Informacji Publicznej Miasta Rybnika. Aneks w zakresie roku 2018 do: Planu rozwoju i modernizacji urządzeń wodociągowych i urządzeń kanalizacyjnych na lata 2016–2018.
- Cambi (2019): www.cambi.com; dostęp 20.03.2019.
- Comarch (2016): Wdrożenie w Przedsiębiorstwie Wodociągów i Kanalizacji w Rybniku Comarch ERP EGERIA. https://www.comarch.pl/files-pl/file_352/Case-study-Comarch-ERP-Egeria-PWiK-Rybnik.pdf, dostęp: 8.01.2019.
- GUS (2000–2010): Stan zdrowia ludności Polski w 2009 r. http://www.stat.gov.pl/cps/rde/xbcr/gus/PUBL_ZO_stan_zdrowia_2009.pdf.
<https://www.epa.gov/sites/production/files/documents/handbook1.pdf>, dostęp: 8.02.2019.
- https://bip.um.rybnik.eu/docs/um/2017/11/07/file_8023487.pdf, dostęp: 8.02.2019.
- IATI (2018): <http://iati.pl/partner/przedsiębiorstwo-wodociagow-i-kanalizacji-sp-z-o-o-w-rybniku/>; dostęp: 8.02.2019.
- IGWP (2019): www.igwp.org.pl; dostęp 20.03.2019.
- MERIT (2017): European Innovation Scoreboard 2017. <https://ec.europa.eu/docsroom/documents/24829>, dostęp: 8.02.2019.
- Rączka J. (2002): Analiza efektywności kosztowej w oparciu o wskaźnik dynamicznego kosztu jednostkowego. http://tekstowa.edukacja.nfosigw.gov.pl/gfx/nfosigw/userfiles/files/srodki_zagraniczne/archiwum/ispa/przygotowanie_przedswiezec/analiza_dgc.doc; dostęp 8.01.2019.
- Strategia (2018): Strategia postępowania z komunalnymi osadami ściekowymi na lata 2019–2022. Ministerstwo Środowiska. https://www.gov.pl/documents/1379842/1381036/Strategia_post%C4%99powania_z_komunalnymi_osadami_%C5%9Bciekowymi_na_lata_2019-2022.pdf/7ce1630d-5dec-e0ef-2083-074e06dc2d16, dostęp: 8.02.2019.

Streszczenie

W pierwszym rozdziale monografii zostały omówione kwestie związane z uwarunkowaniami prawnymi dotyczącymi zagospodarowania osadów ściekowych. Wskazano najważniejsze krajowe i europejskie dokumenty regulujące funkcjonowanie oczyszczalni ścieków. Szczególną uwagę zwrócono na dokumenty strategiczne, które wyznaczają kierunki postępowania z komunalnymi osadami ściekowymi zgodnie z aktualnymi trendami wykorzystywania osadów.

W rozdziale drugim szczegółowo opisano technologie przetwarzania osadów ściekowych, które mają potencjał wdrożeniowy, ze szczególnym uwzględnieniem metod termicznych, podano też przykłady ich zastosowania oraz metod alternatywnych obejmujących wykorzystywanie osadów w celach rolniczych.

W rozdziale trzecim scharakteryzowano proces oczyszczania ścieków realizowany w OŚ Rybnik-Orzepowice. W ramach bilansu ilościowo-jakościowego gospodarki osadowej PWiK Sp. z o.o. w Rybniku zestawiono ilości osadów, jakie zostały wytworzone na terenie oczyszczalni ścieków z wynikami badań ustabilizowanego osadu ściekowego.

Rozdział czwarty poświęcono tematyce prac B+R prowadzonych w OŚ Rybnik-Orzepowice, ukierunkowanych na zagospodarowanie osadów ściekowych w innowacyjny sposób. Omówiono przebieg badania biokonwersji osadów ściekowych z przedstawieniem najważniejszych spostrzeżeń i wniosków. Zaprezentowano również badania, których efektem była koncepcja przedwdrożeniowa dla technologii granulacji osadów ściekowych i produkcji mieszanek nawozowych.

Problematyka związana z uwarunkowaniami wdrażania rozwiązań technologicznych w PWiK Sp. z o.o. została poruszona w rozdziale piątym. Zidentyfikowano zbiór technologii i poddano go krytycznej analizie porównawczej. W efekcie przedstawiono szacunkową parametryzację potencjalnych technologii zagospodarowania osadów i wyodrębniono technologie, które w warunkach aglomeracji Rybnik mają szansę na zastosowanie.

W rozdziale szóstym podjęto tematykę związaną z aspektem ekonomicznym wprowadzania nowych rozwiązań technologicznych gospodarki osadami ściekowymi w PWiK Sp. z o.o. w Rybniku. W celu zbadania ich efektywności ekonomicznej wykorzystano analizę efektywności kosztowej opartą na metodzie DGC, która została uzupełniona o analizę kosztów i korzyści społecznych oraz ekologicznych. Badania pozwoliły na wyodrębnienie tych rozwiązań technologicznych, które charakteryzują się relatywnie wysokim parametrem opłacalności ekonomicznej.

W ostatnim rozdziale poruszono temat bezpieczeństwa środowiskowego produktów wytwarzanych z osadów ściekowych przez PWiK Sp. z o.o. w Rybniku. Szczegółowo omówiono badania jakościowe osadów na zawartość farmaceutyków i skuteczność wybranych metod ich usuwania. Omówiono również problematykę obecności innych mikrozanieczyszczeń w osadach ściekowych.

Słowa kluczowe: innowacyjność, konkurencyjność, działalność badawczo-rozwojowa, badania przemysłowe, prace rozwojowe, optymalizacja oczyszczalni ścieków, biogeny, biokonwersja, związki organiczne, efekt ekologiczny, azot ogólny, fosfor ogólny, oczyszczanie ścieków, innowacyjne technologie, farmaceutyki, efektywność usuwania zanieczyszczeń, metoda DGC, analiza efektywności kosztowej, nawóz organiczny, biomasa, granulowanie.

Abstract

The first chapter of this monograph discusses issues related to the legal conditions for wastewater management. The most important national and European documents regulating the operation and functioning of wastewater treatment plants were indicated. Special attention has been paid to strategic documents which determine the directions of handling municipal wastewater in accordance with current trends in the use of sludge.

The second chapter describes in detail wastewater treatment technologies with implementation potential, with particular emphasis on thermal methods and examples of their use as well as alternative methods involving the use of sludge for agricultural purposes.

The third chapter describes the process of wastewater treatment at the Rybnik-Orzepowice Wastewater Treatment Plant. Within the framework of the quantitative-qualitative balance of wastewater management at PWiK Ltd. in Rybnik, the quantities of sludge produced at the

wastewater treatment plant were compared with the results of studies on stabilized wastewater from this plant.

The chapter four refers to R&D work carried out in the Rybnik-Orzepowice wastewater Treatment Plant aimed at the innovative use of sewage sludge. The course of the study on the bioconversion of wastewater was presented and key observations and conclusions were formulated. The research, which resulted in a pre-implementation concept for the technology of granulation of wastewater and production of fertilizer mixtures, was also discussed.

The issues related to the conditions determining the possibility of implementing technological solutions in PWiK Ltd. are discussed in chapter five. A set of technologies has been identified and subjected to critical comparative analysis. As a result, the estimated parameterization of potential technologies of wastewater management was presented and the technologies that have potential applications in the conditions of the Rybnik agglomeration were identified.

The chapter six concerns the economic aspects of the implementation of new technological solutions for wastewater management in PWiK Ltd. in Rybnik. In order to study the economic effectiveness of modern solutions for wastewater management, a cost effectiveness analysis using the DGC method was used, which was extended by an analysis of social and environmental costs and benefits. The research allowed to identify those technological solutions which are characterized by a relatively high parameter of economic profitability.

The last chapter focuses on the environmental safety of products from sewage sludge produced by PWiK Ltd. in Rybnik. The qualitative tests of wastewater on the content of pharmaceuticals and the effectiveness of selected methods of their removal were discussed in detail. The chapter also discusses the problem of other micro contamination presence in sewage sludge.

Keywords: innovation, competitiveness, research and development, industrial research, development, wastewater treatment plant optimization, biogas, bioconversion, organic compounds, ecological effect, total nitrogen, total phosphorus, wastewater treatment, innovative technologies, pharmaceuticals, pollution removal efficiency, DGC method, cost effectiveness analysis, organic fertilizer, biomass, granulation.

SPIS RYSUNKÓW I FOTOGRAFII

Rysunek 1. Hierarchia działań związanych z zagospodarowaniem odpadów	15
Rysunek 2. Możliwe kierunki przeróbki osadów w oczyszczalni ścieków i procesów przetwarzania komunalnych osadów ściekowych	16
Rysunek 3. Lokalizacja urządzeń procesowych sekwencyjnej metody konwersji biomasy celem spełnienia wymagań Unii Europejskiej w zakresie ochrony środowiska i energetyki.....	38
Rysunek 4. Roczna produkcja osadów ściekowych w OŚ Rybnik-Orzepowice	38
Rysunek 5. Schemat stanowiska do badań procesu biokonwersji osadów ściekowych.....	41
Rysunek 6. Schemat przekształcania osadów ściekowych w OŚ Rybnik-Orzepowice	44
Fotografia 1. Nawóz – frakcja $\phi 1,6-4$ mm	45
Rysunek 7. Elementy zrównoważonego rozwoju	57
Rysunek 8. Ilość zagospodarowanych osadów ściekowych w OŚ Rybnik-Orzepowice [Mg].....	59
Rysunek 9. Wyniki analizy DGC.....	67

SPIS TABEL

Tabela 1. Wybrane dokumenty unijne definiujące osady ściekowe	8
Tabela 2. Wybrane polskie akty prawne regulujące kwestie środowiskowe związane z problematyką osadów ściekowych	11
Tabela 3. Metody zagospodarowania osadów ściekowych.....	22
Tabela 4. Przykładowe instalacje pracujące w wybranych technologiach zagospodarowania odpadów	32
Tabela 5. Dopuszczalna zawartość pierwiastków w nawozach organicznych	34
Tabela 6. Charakterystyka wyrobu gotowego – biomasy kompozytowej.....	37
Tabela 7. Ilość osadów ściekowych wytworzonych w OŚ Rybnik-Orzepowice w latach 2014–2016	38
Tabela 8. Wyniki badań ustabilizowanego osadu ściekowego z OŚ Rybnik-Orzepowice (osad po wapnowaniu) w latach 2013–2016.....	39
Tabela 9. Wyniki ubytków masy wody po procesie biokonwersji dla różnych składów surogatu paliwowego	43
Tabela 10. Zestawienie technologii wybranych dla PWiK Sp. z o.o. w Rybniku	46
Tabela 11. Przykładowe wymagania stawiane paliwom alternatywnym	49
Tabela 12. Szacunkowa parametryzacja technologii zagospodarowania osadów	51
Tabela 13. Korzyści z wdrażania nowych rozwiązań	54
Tabela 14. Nakłady i koszty technologii SUSZENIE TERMICZNE.....	63
Tabela 15. Nakłady i koszty technologii PIROLIZA NISKOTEMPERATUROWA.....	64
Tabela 16. Nakłady i koszty technologii GRUNTY ANTROPOGENICZNE	65
Tabela 17. Nakłady i koszty technologii NAWOZY MINERALNO-ORGANICZNE	65
Tabela 18. Nakłady i koszty technologii SPALANIE.....	66
Tabela 19. Nakłady i koszty technologii BIKONWERSJA	66
Tabela 20. Zestawienie wyników analizy DGC.....	67
Tabela 21. Analiza czynników społecznych.....	68
Tabela 22. Analiza czynników środowiskowych.....	69
Tabela 23. Stopień oczyszczenia ścieków z farmaceutyków za pomocą różnych metod konwencjonalnych [%].....	75
Tabela 24. Stopień oczyszczenia ścieków z farmaceutyków za pomocą różnych nowoczesnych metod [%].....	77
Tabela 25. Podział metod badania antybiotykooporności w osadzie ściekowym.....	81

NOTKI BIOGRAFICZNE AUTORÓW

dr inż. Janusz Karwot – absolwent Wydziału Energetycznego oraz Wydziału Organizacji i Zarządzania Politechniki Śląskiej w Gliwicach. Na Wydziale Organizacji i Zarządzania uzyskał tytuł doktora nauk ekonomicznych. Legitymuje się także certyfikatem ukończenia Mastere Specialize w Ecoles des Mines Nancy. W latach 1993–1996 był zastępcą dyrektora RZWM Huta Silesia w Rybniku. W latach 1996–2001 sprawował funkcję Prokurenta – Dyrektora ds. handlu ZEG SA Tychy. Od 1 lipca 2001 r. pełni nieprzerwanie funkcję Prezesa Zarządu Przedsiębiorstwa Wodociągów i Kanalizacji Sp. z o.o. w Rybniku. Posiada doświadczenie jako niezależny konsultant ekspert/inżynier w oparciu o procedury FIDIC. Uczestniczył także jako ekspert zewnętrzny ds. analiz w Narodowym Programie Foresight Polska 2020 oraz współpracował jako recenzent Programu Operacyjnego Innowacyjna Gospodarka. Obecnie jest ekspertem programów unijnych POiR, RPO WSL oraz członkiem Komisji Energetyki PAN. Od wielu lat zajmuje się problematyką zrównoważonego rozwoju oraz planowaniem i prowadzeniem prac wdrożeniowych z zakresu technologii oczyszczania wód i ścieków. Jest propagatorem idei szerokiej współpracy polskiego przemysłu i polskiej nauki, czego potwierdzeniem jest realizacja, wspólnie z Politechniką Śląską i Głównym Instytutem Górnictwa, kilku innowacyjnych projektów dofinansowanych z Funduszy Europejskich. W 2019 r. przebywał na University of Nevada, Reno jako visiting professor w ramach programu „TOP100 Innowatorzy Gospodarki” dofinansowanego z MNiSW, zakończonego podpisanym porozumieniem o współpracy w zakresie transferu innowacyjnych technologii. Autor i współautor wielu publikacji.

dr inż. Jan Bondaruk – ukończył Wydział Chemiczny na Politechnice Śląskiej ze specjalizacją inżynieria chemiczna i procesowa, a w 2013 r. obronił doktorat w dyscyplinie inżynieria środowiska. Od 2015 r. jest Zastępcą Dyrektora Głównego Instytutu Górnictwa ds. Inżynierii Środowiska. Jest ekspertem w zakresie wdrażania rozwiązań z obszaru inżynierii środowiska oraz programowania ochrony i zarządzania środowiskiem z wykorzystaniem systemów bazodanowych i informacji przestrzennej. Zajmuje się problematyką zrównoważonego rozwoju oraz planowaniem i prowadzeniem prac wdrożeniowych z zakresu technologii oczyszczania wód i ścieków. Specjalista w zakresie monitoringu stanu środowiska oraz poprawy efektywności wykorzystania energii w systemach komunalnych. Jest współautorem kilkudziesięciu raportów o oddziaływaniu realizowanych przedsięwzięć na środowisko oraz studiów wykonalności i wniosków aplikacyjnych dla przedsięwzięć inwestycyjnych, finansowanych ze środków unijnych. Jest także ekspertem Komisji Europejskiej w zakresie oceny projektów w programie Horyzont 2020, norweskich mechanizmów finansowych (EOG) oraz NCBR w zakresie ekoinnowacji, ochrony środowiska i rewitalizacji terenów zdegradowanych, a także ekspertem Śląskiej Rady Innowacji i członkiem zespołu ds. terenów zdegradowanych przy Ministrze Środowiska.

dr Marcin Głodniok – w 2008 r. ukończył studia na Wydziale Biologii i Ochrony Środowiska Uniwersytetu Śląskiego. Doktor nauk technicznych w dyscyplinie inżynieria środowiska. Od 2017 r. pełni funkcję Kierownika Pracowni Technologii Środowiskowych w Głównym Instytucie Górnictwa, w Zakładzie Ochrony Wód. Jego specjalność to ochrona środowiska, biotechnologia środowiskowa, zagospodarowanie osadów ściekowych. Jest członkiem interdyscyplinarnego zespołu zaangażowanego w prace z zakresu gospodarki wodno-ściekowej. Jest autorem kilku innowacyjnych patentów związanych z zagospodarowaniem osadów ściekowych oraz autorem i współautorem artykułów z dziedziny inżynierii środowiska.

JANUSZ KARWIŃSKI, JAN BONDARUK
MARCIN GŁODNIOK

INNOWACYJNE ROZWIĄZANIA I TECHNOLOGIE ZAGOSPODAROWANIA OŚRODKÓW
W PRZEDSIĘBIORSTWIE WODOCIĄGÓW I KANALIZACJI SP. Z O.O. W RYBNIKU

ISBN 978-83-65503-24-4