


MONOGRAFIA



**IOŚ-PIB**  
Instytut Ochrony Środowiska  
Państwowy Instytut Badawczy

# Kierunki rozwoju komunalnych oczyszczalni ścieków – innowacyjne rozwiązania w obliczu gospodarki cyrkularnej





**Kierunki rozwoju  
komunalnych oczyszczalni ścieków**  
– innowacyjne rozwiązania  
w obliczu gospodarki cyrkularnej

MONOGRAFIA

Redakcja naukowa: Łukasz Krawczyk

Wrocław 2022

Praca zbiorowa pod redakcją naukową mgr. inż. Łukasza Krawczyka

**Autorzy:**

mgr inż. Łukasz Krawczyk  
dr inż. Krzysztof Iskra  
mgr inż. Paula Przygoda-Kuś  
mgr inż. Patryk Józefiak

**Afiliacja autorów:**

Zakład Technologii Ścieków, Instytut Ochrony Środowiska – Państwowy Instytut Badawczy

**Kontakt:**

[lukasz.krawczyk@ios.edu.pl](mailto:lukasz.krawczyk@ios.edu.pl)

**Recenzja naukowa:**

prof. dr hab. inż. Małgorzata Kabsch-Korbutowicz, Politechnika Wrocławska  
dr hab. inż. Jakub Drewnowski, prof. PG, Politechnika Gdańska

**Wydawca:**

Instytut Ochrony Środowiska – Państwowy Instytut Badawczy  
00-548 Warszawa, ul. Krucza 5/11D  
tel. 22 37 50 558  
[www.ios.edu.pl](http://www.ios.edu.pl)  
e-mail: [wydawnictwa@ios.edu.pl](mailto:wydawnictwa@ios.edu.pl)

ISBN 978-83-60312-99-5

Wydanie I

Publikacja dostępna na licencji: [CC BY-NC-ND 3.0 PL](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/3.0/pl/)

**Projekt graficzny, skład i korekta:**

Heroldart Paweł Maszerowski

## Spis treści

- 1. Wprowadzenie / 11**
- 2. Kluczowe regulacje prawne i zawarte w nich wymagania na poziomie Unii Europejskiej, Polski, regionu / 13**
  - 2.1. Regulacje prawne stanu wód / 13
  - 2.2. Regulacje prawne dotyczące jakości ścieków / 15
  - 2.3. Regulacje prawne dotyczące jakości osadów ściekowych / 18
- 3. Kierunki rozwoju w technologii oczyszczania ścieków i zagospodarowaniu osadów ściekowych / 22**
  - 3.1. Historia i rozwój technologii oczyszczania ścieków na świecie / 22
  - 3.2. Stan gospodarki ściekowo-osadowej w Polsce i wyzwania na przyszłość / 24
  - 3.3. Gospodarka o obiegu zamkniętym jako siła napędowa rozwoju gospodarki wodno-ściekowej / 30
  - 3.4. Oczyszczalnia ścieków w przyszłości wobec wyzwań gospodarki o obiegu zamkniętym / 35
  - 3.5. Podsumowanie / 36
- 4. Odzysk fosforu / 39**
  - 4.1. Wprowadzenie / 39
  - 4.2. Opis przykładowych technologii odzysku związków fosforu / 42
  - 4.3. Wybrane obiekty / 47
    - 4.3.1. Instalacja do odzysku fosforu w Cielczy (Polska) / 47
    - 4.3.2. Instalacja do odzysku fosforu w Amersfoort (Holandia) / 48
    - 4.3.3. Instalacja do odzysku fosforu w oczyszczalni ścieków w Waßmannsdorf (Niemcy) / 48
    - 4.3.4. Instalacja do odzysku fosforu w oczyszczalni ścieków w Mönchengladbach (Niemcy) / 49
    - 4.3.5. Instalacja do odzysku fosforu w oczyszczalni ścieków w Gifhorn (Niemcy) / 49
    - 4.3.6. Instalacja do odzysku fosforu w Leuven (Belgia) / 50
    - 4.3.7. Oczyszczalnia ścieków w Geestmerambacht (Holandia) / 51
  - 4.4. Podsumowanie / 52

## **5. Granulowany osad czynny / 56**

5.1. Wprowadzenie / 56

5.2. Wybrane obiekty / 63

5.2.1. Oczyszczalnia ścieków w miejscowości Ryki (Polska) / 63

5.2.2. Oczyszczalnia ścieków w miejscowości Fleury (Francja) / 64

5.2.3. Oczyszczalnia ścieków w miejscowości Oissery (Francja) / 64

5.2.4. Oczyszczalnia ścieków w miejscowości Dinxperlo (Holandia) / 64

5.2.5. Oczyszczalnia ścieków w miejscowości Dodewaard (Holandia) / 65

5.2.6. Oczyszczalnia ścieków w miejscowości Vroomshoop (Holandia) / 66

5.3. Podsumowanie / 66

## **6. Bioreaktory membranowe / 69**

6.1. Wprowadzenie / 69

6.2. Wybrane obiekty / 72

6.2.1. Oczyszczalnia ścieków w miejscowości Rowy (Polska) / 72

6.2.2. Oczyszczalnia ścieków w miejscowości Głogów Małopolski (Polska) / 73

6.2.3. Oczyszczalnia ścieków w miejscowości Muszyna (Polska) / 74

6.2.4. Oczyszczalnia ścieków w miejscowości Kunów (Polska) / 75

6.3. Podsumowanie / 76

## **7. Nowe metody usuwania azotu ze ścieków / 79**

7.1. Wprowadzenie / 79

7.2. Technologie wykorzystujące proces Anammox i pokrewne techniki / 82

7.3. Wyzwania na przyszłość / 87

7.4. Wybrane obiekty / 88

7.4.1. Oczyszczalnia ścieków w miejscowości Rotterdam (Holandia) / 91

7.4.2. Oczyszczalnia ścieków w miejscowości Seaford, Virginia (USA) / 91

7.4.3. Oczyszczalnia ścieków w miejscowości Denver, Kolorado (USA) / 92

7.4.4. Oczyszczalnia ścieków w miejscowości Strass im Zillertal (Austria) / 92

7.4.5. Oczyszczalnia ścieków w Krakowie (Polska) / 93

7.4.6. Oczyszczalnia ścieków w miejscowości Malmö (Szwecja) / 94

7.4.7. Oczyszczalnia ścieków w Bielsku-Białej (Polska) / 94

7.5. Podsumowanie / 95

## **8. Odzysk substancji pochodzenia biologicznego / 100**

- 8.1. Wprowadzenie / 100
- 8.2. Projekt pilotażowy PHARIO / 103
- 8.3. Kaamera Nereda / 103
- 8.4. Wybrany obiekt – oczyszczalnia ścieków w Zupthen (Holandia) / 105
- 8.5. Podsumowanie / 106

## **9. Odzysk i ponowne wykorzystanie wody ze ścieków / 109**

- 9.1. Wprowadzenie / 109
- 9.2. Możliwości wtórnego wykorzystania wody odnowionej ze ścieków / 110
- 9.3. Przykłady wykorzystania odnowionej wody ze ścieków / 111
  - 9.3.1. Oczyszczalnia ścieków „Dąbrówka Mała” i elektrociepłownia w Katowicach / 111
  - 9.3.2. Oczyszczalnia ścieków „Maszewo” i PKN Orlen / 112
  - 9.3.3. Oczyszczalnia ścieków Tychy-Urbanowice i Park Wodny / 113
  - 9.3.4. Produkcja wody przeznaczonej do spożycia bezpośrednio ze ścieków w Namibii / 116
  - 9.3.5. Produkcja wody przeznaczonej do spożycia bezpośrednio ze ścieków w Singapurze / 117
  - 9.3.6. Produkcja wodoru i pary wodnej przeznaczonych do odsiarczania oleju napędowego w Edmonton (Kanada) / 118
  - 9.3.7. System ponownego wykorzystania wody w mieście Santa Rosa (USA) / 119
  - 9.3.8. System ponownego wykorzystania wody w Centrum Odnowy Wód w Vernon (Kanada) / 120
- 9.4. Podsumowanie / 121

## **10. Zakończenie / 125**



# Spis rysunków

- Rysunek 3-1.** Schemat przeróbki osadów w oczyszczalni ścieków oraz procesów przetwarzania komunalnych osadów ściekowych jako odpadów (opracowanie własne na podstawie [Strategia... 2018]) / 27
- Rysunek 3-2.** Struktura zagospodarowania komunalnych osadów ściekowych w wybranych latach (opracowanie własne na podstawie [bdl.stat.gov.pl]) / 28
- Rysunek 3-3.** Struktura zagospodarowania komunalnych osadów ściekowych w roku 2020 (opracowanie własne na podstawie [Rocznik... 2021]) / 29
- Rysunek 3-4.** Schemat koncepcyjny liniowego systemu ekonomicznego (opracowanie własne) / 30
- Rysunek 3-5.** Schemat koncepcyjny gospodarki o obiegu zamkniętym [COM (2014) 398] / 32
- Rysunek 3-6.** Porównanie starego i nowego paradygmatu oczyszczania ścieków (opracowanie własne) / 34
- Rysunek 3-7.** Oczyszczalnia ścieków jako źródło surowców (opracowanie własne) / 34
- Rysunek 4-1.** a) Struwit w przewodach technologicznych [Forstner 2015],  
b) Struwit w układzie pompowym [Nieminen 2010] / 39
- Rysunek 4-2.** Możliwe miejsca odzysku fosforu w komunalnych oczyszczalniach ścieków (opracowanie własne na podstawie [Egle i in. 2015]) / 40
- Rysunek 4-3.** Schemat gospodarki cyrkulacyjnej w zakresie odzysku fosforu jako nawozu (opracowanie własne na podstawie [Mąkinia 2017]) / 42
- Rysunek 4-4.** Umieszczenie modułów Ostara PEARL i Wasstrip w klasycznym układzie technologicznym oczyszczalni ścieków (opracowanie własne na podstawie [ostara.com]) / 44
- Rysunek 4-5.** Nawóz wyprodukowany z cieczy osadowych z wykorzystaniem technologii Ostara Pearl-Wasstrip [ostara.com] / 45
- Rysunek 4-6.** Schemat technologii AirPrex (opracowanie własne na podstawie [Stitt i in. 2017]) / 45
- Rysunek 4-7.** Nawóz wyprodukowany z osadów ściekowych z użyciem technologii AirPrex [Mąkinia 2017] / 46
- Rysunek 4-8.** Schemat technologii BioCon (opracowanie własne na podstawie [Nieminen 2010, Levlin 2001]) / 46
- Rysunek 4-9.** Instalacja reaktora do odzysku fosforu w oczyszczalni ścieków w Cielczy (Polska) [pwikjarcin.pl] / 47
- Rysunek 4-10.** Reaktor do odzysku fosforu w oczyszczalni ścieków w Amersfoort (Holandia) [Kox i in. 2016] / 48
- Rysunek 4-11.** Reaktor do odzysku fosforu w oczyszczalni ścieków w Waßmannsdorf (Niemcy) [Nieminen 2010] / 48
- Rysunek 4-12.** Reaktor do odzysku fosforu w oczyszczalni ścieków w Mönchengladbach (Niemcy) [Langereis i in. 2015] / 49
- Rysunek 4-13.** Instalacja do odzysku fosforu w oczyszczalni ścieków w Gifhorn (Niemcy) [Nieminen 2010, Müller 2011] / 50
- Rysunek 4-14.** Schemat technologiczny instalacji do odzysku fosforu w oczyszczalni ścieków w Leuven (Belgia) (opracowanie własne na podstawie [Geerts 2015]) / 51
- Rysunek 4-15.** Reaktory do odzysku fosforu w oczyszczalni ścieków w Geestmerambacht (Holandia) [Nieminen 2010] / 51
- Rysunek 5-1.** Granulowany osad czynny [www.royalhaskoningdhv.com] / 57
- Rysunek 5-2.** Porównanie zdolności sedymentacyjnych osadu granulowanego i klasycznego osadu czynnego po 5 minutach sedymentacji [Olivier i in. 2016] / 57

- Rysunek 5-3.** Porównanie struktury osadu kłaczkującego (A) i granulowanego (B) (opracowanie własne na podstawie [Kerstens 2017]) / 58
- Rysunek 5-4.** Widok na oczyszczalnię ścieków „Fregata” w Rykach oraz reaktor biologiczny pracujący w technologii Nereda [royalhaskoningdhv.com] / 63
- Rysunek 5-5.** Widok na oczyszczalnię ścieków w miejscowości Fleury (Francja) [royalhaskoningdhv.com] / 64
- Rysunek 5-6.** Widok na oczyszczalnię ścieków w miejscowości Oissery (Francja) [royalhaskoningdhv.com] / 64
- Rysunek 5-7.** Widok na oczyszczalnię ścieków w miejscowości Dinxperlo (Holandia) [royalhaskoningdhv.com] / 65
- Rysunek 5-8.** Widok na oczyszczalnię ścieków w Dodewaard (Holandia) [royalhaskoningdhv.com] / 65
- Rysunek 5-9.** Oczyszczalnia ścieków w miejscowości Vroomshoop (Holandia). System hybrydowy klasycznego osadu czynnego (po lewej) oraz osadu granulowanego (po prawej) [royalhaskoningdhv.com] / 66
- Rysunek 6-1.** Schemat działania włókna membranowego stosowanego w technologii MBR (opracowanie własne na podstawie [Piaskowski i in. 2017]) / 70
- Rysunek 6-2.** Porównanie konwencjonalnego osadu czynnego i technologii MBR (opracowanie własne na podstawie [Piaskowski i in. 2017]) / 70
- Rysunek 6-3.** Włókna kapilarne tworzące moduły membranowe w oczyszczalni ścieków w Rowach [Piaskowski i in. 2017] / 73
- Rysunek 6-4.** Moduł membranowy w oczyszczalni ścieków w Głogowie Małopolskim [Piaskowski i in. 2017] / 74
- Rysunek 6-5.** Widok na oczyszczalnię ścieków w miejscowości Muszyna (Polska) [schwander.pl] / 74
- Rysunek 6-6.** Wygląd ścieku oczyszczonego w oczyszczalni MBR w Muszynie [schwander.pl] / 75
- Rysunek 6-7.** a) Widok na oczyszczalnię ścieków w miejscowości Kunów [ostrowiecka.pl],  
b) Robot pracujący w solarnej suszarni osadów ściekowych [naostro.info] / 75
- Rysunek 7-1.** Schemat koncepcyjny usuwania azotu z wykorzystaniem skróconej nityfikacji (opracowanie własne na podstawie [Barbusiński 2016]) / 80
- Rysunek 7-2.** Porównanie drogi przemiany azotu w procesach konwencjonalnych oraz częściowej nityfikacji i Anammox (opracowanie własne na podstawie [Sadecka 2010]) / 81
- Rysunek 7-3.** Umiejscowienie i efektywność procesu deamonifikacji w oczyszczaniu wód osadowych (opracowanie własne na podstawie [Leoniak i in. 2018]) / 82
- Rysunek 7-4.** Zasada działania reaktora w procesie SHARON (opracowanie własne) / 83
- Rysunek 7-5.** Zasada działania reaktora CANON (opracowanie własne) / 83
- Rysunek 7-6.** Schemat działania reaktora DEMON (opracowanie własne) / 84
- Rysunek 7-7.** Granule bakterii Anammox (czerwone) i kłaczkosy osadu czynnego (brązowe) w reaktorze DEMON [Bott 2020] / 84
- Rysunek 7-8.** Schemat technologii DEAMOX (opracowanie własne na podstawie [Bagchi i in. 2012]) / 85
- Rysunek 7-9.** Podłoże do rozwoju mikroorganizmów Anammox w technologii ANITAMOX [ensia.com/] / 86
- Rysunek 7-10.** Bakterie Anammox wyhodowane na podłożu ANITAMOX [Piveteau i in. 2013] / 86
- Rysunek 7-11.** Schemat technologii BABE (opracowanie własne na podstawie [Barbusiński 2016, Volcke 2006]) / 87
- Rysunek 7-12.** Schemat konwencjonalnego sposobu biologicznego oczyszczania ścieków oraz jego modyfikacja w przyszłości (opracowanie własne na podstawie [Oleszkiewicz 2014]) / 88
- Rysunek 7-13.** Reaktor Anammox w oczyszczalni ścieków w Rotterdamie (Holandia) [Van der Star i in. 2007] / 91



- Rysunek 7-14.** Reaktor do deamonifikacji na oczyszczalni ścieków York River w stanie Virginia (USA) [aaees.org] / 92
- Rysunek 7-15.** Reaktor do deamonifikacji w oczyszczalni ścieków w miejscowości Strass im Zillertal (Austria) [Wett i in. 2007] / 93
- Rysunek 7-16.** Instalacja do deamonifikacji w krakowskiej oczyszczalni ścieków „Kujawy” (Polska) [Biedrzycka 2016] / 93
- Rysunek 7-17.** Instalacja do deamonifikacji w oczyszczalni ścieków w miejscowości Malmö (Szwecja) [veoliawatertechnologies.pl] / 94
- Rysunek 7-18.** Instalacja do deamonifikacji w oczyszczalni ścieków „Komorowice” w Bielsku-Białej (Polska) [materiały pozyskane od Aqua S.A.] / 95
- Rysunek 7-19.** Granule bakterii Anammox w oczyszczalni ścieków „Komorowice” w Bielsku-Białej [materiały pozyskane od Aqua S.A.] / 95
- Rysunek 8-1.** Granule PHB (należące do grupy PHA) zmagazynowane w komórce bakteryjnej [dos Santos i in. 2017] / 100
- Rysunek 8-2.** Wyekstrahowane z osadów ściekowych substancje PHA [Bengtsson i in. 2017] / 103
- Rysunek 8-3.** Wizytownik wyprodukowany z PHA [Bengtsson i in. 2017] / 103
- Rysunek 8-4.** Wyekstrahowany biopolimer z granulowanego osadu czynnego – Kaumera Nereda Gum [Lavender i in. 2021] / 104
- Rysunek 8-5.** Zastosowanie biopolimeru Kaumera w celach nawozowych [dutchwatersector.com] / 104
- Rysunek 8-6.** Test palności materiału z dodatkiem biopolimeru Kaumera Nereda Gum [Bahgat 2021] / 104
- Rysunek 8-7.** Widok na oczyszczalnię ścieków w Zutphen (Holandia) [Lavender i in. 2021] / 105
- Rysunek 8-8.** Reaktory Nereda w oczyszczalni ścieków w Zutphen (Holandia) [Lavender i in. 2021] / 106
- Rysunek 9-1.** Możliwości wykorzystania odzyskanej wody ze ścieków (opracowanie własne) / 111
- Rysunek 9-2.** Ponowne wykorzystanie wody ze ścieków – przykład symbiozy sektora komunalnego i przemysłowego w Katowicach (opracowanie własne na podstawie [mapy Google]) / 112
- Rysunek 9-3.** Ponowne wykorzystanie wody ze ścieków – przykład symbiozy sektora komunalnego i przemysłowego w Płocku (opracowanie własne na podstawie [mapy Google]) / 113
- Rysunek 9-4.** Biogazownia funkcjonująca w oczyszczalni ścieków w Tychach [egospodarka.pl] / 114
- Rysunek 9-5.** Samowystarczalność energetyczna oczyszczalni ścieków w Tychach [Karlo i in. 2019, Gieleciak 2021] / 115
- Rysunek 9-6.** Park Wodny Tychy [etychy.org] / 116
- Rysunek 9-7.** Zakład odnowy wody ze ścieków miejskich w Windhoek (Namibia) [wingoc.com.na/] / 117
- Rysunek 9-8.** Woda butelkowana wyprodukowana bezpośrednio ze ścieków [Mąkinia 2017] / 118
- Rysunek 9-9.** Ponowne wykorzystanie wody ze ścieków – przykład symbiozy sektora komunalnego i przemysłowego w Edmonton (Kanada) (opracowanie własne na podstawie [mapy Google]) / 119
- Rysunek 9-10.** Ponowne wykorzystanie wody ze ścieków – przykład symbiozy sektora komunalnego i energetycznego w Santa Rosa (USA) [geysers.com] / 120
- Rysunek 9-11.** Centrum Odnowy Wód w Vernon (Kanada) [maple.ca] / 121

# Spis tabel

**Tabela 3-1.** Instalacje termicznej utylizacji osadów ściekowych / 29

**Tabela 4-1.** Wybrane metody odzysku fosforu / 43

**Tabela 5-1.** Oczyszczalnie ścieków działające w technologii granulowanego osadu / 60

**Tabela 7-1.** Zidentyfikowane instalacje Anammox działające w pełnej skali technicznej / 89

## Wykaz skrótów

**aKPOŚK** – aktualizacja Krajowego Programu Oczyszczania Ścieków Komunalnych

**AOB** – bakterie utleniające azot amonowy

**BZT<sub>5</sub>** – biochemiczne zapotrzebowanie na tlen

**ChZT** – chemiczne zapotrzebowanie na tlen

**GOŚ** – grupowa oczyszczalnia ścieków

**GOZ** – gospodarka o obiegu zamkniętym

**GUS** – Główny Urząd Statystyczny

**jcwp** – jednolita część wód powierzchniowych

**KOCz** – komora osadu czynnego

**KOŚ** – komunalne osady ściekowe

**KPOŚK** – Krajowy Program Oczyszczania Ścieków Komunalnych

**MBBR** – reaktor biologiczny ze złożem ruchomym

**MBR** – membranowy reaktor biologiczny

**MSG** – glutaminian sodu

**NEW** – Nutrients-Energy-Water

**OSN** – obszary szczególnie narażone

**OŚ** – oczyszczalnia ścieków

**OZE** – odnawialne źródła energii

**PAO** – mikroorganizmy akumulujące fosforany

**PGW** – Państwowe Gospodarstwo Wodne

**PHA** – polihydroksyalkaniany

**PHB** – polihydroksymaśłany

**PKN** – Polski Koncern Naftowy

**RDW** – Ramowa Dyrektywa Wodna

**RLM** – równoważna liczba mieszkańców

**SBR** – biologiczny reaktor sekwencyjny

**SM** – sucha masa

**UE** – Unia Europejska

**WHO** – Światowa Organizacja Zdrowia

**WKF** – wydzielona (zamknięta) komora fermentacyjna

# 1. Wprowadzenie

Według danych GUS pod koniec roku 2020 w Polsce pracowało blisko 2460 biologicznych oczyszczalni ścieków komunalnych, z czego ok. 820 realizowało procesy oczyszczania z podwyższonym usuwaniem związków biogennych. Odpowiadało to ok. 1 344 215 500 m<sup>3</sup> oczyszczanych ścieków, generując przy tym prawie 570 tys. ton suchej masy osadów ściekowych [bdl.stat.gov.pl]. Dane te pokazują skalę problemu, z którym borykają się przedsiębiorstwa wodno-kanalizacyjne. Z drugiej strony ścieki i powstające odpady mogą stanowić potencjał wdrożenia wszelkich działań zmierzających w kierunku gospodarki cyrkularnej<sup>1</sup>.

W pracy zaprezentowano aktualne tendencje rozwoju gospodarki ściekowej w Polsce oraz innowacyjne rozwiązania wdrażane w krajowych i zagranicznych obiektach w zakresie odzysku surowców, usprawnienia procesów oczyszczania i poprawy wydajności energetycznej. Praca zawiera przegląd, omówienie oraz przykłady zastosowania wybranych innowacyjnych technologii i rozwiązań w dziedzinie oczyszczania ścieków, przeróbki osadów ściekowych (umożliwiających odzyskanie zasobów i surowców), poprawy jakości środowiska oraz zmniejszenia kosztów eksploatacyjnych oczyszczalni ścieków.

Istniejące oczyszczalnie, niezależnie od obsługiwanego ładunku równoważnej liczby mieszkańców (RLM), w ogromnej części opierają się na znanym z początków XX wieku systemie jednorazowego zużycia wody i są elementem tzw. gospodarki liniowej. Zużyta woda na cele bytowo-gospodarcze traktowana jest jako nieprzydatny i niebezpieczny ściek, z którego należy usunąć zanieczyszczenia w postaci związków organicznych, różnych form azotu i fosforu, aby zgodnie z obowiązującymi przepisami prawnymi odprowadzić je do środowiska. Zapomina się jednak, że dopływające do oczyszczalni ścieki charakteryzują się znaczącym potencjałem energetycznym i są rezerwuarem nieodnawialnych surowców naturalnych. Można je z powodzeniem odzyskiwać, co nie jest powszechnie praktykowane. Sens odzysku, przetwarzania i zagospodarowania surowców *in situ* nabiera znaczenia wraz z wprowadzaniem w ostatnich latach nowej idei gospodarki cyrkularnej (o obiegu zamkniętym) w polityce wodno-ściekowej oraz tzw. paradygmatu NEW (Nutrients-Energy-Water) [Kacprzak i in. 2021, Gromiec 2016]. Oprócz tradycyjnej funkcji systemów unieszkodliwiania, nową rolą staje się produkcja zasobów, tj. wody, wodoru, azotu, fosforu, tworzyw sztucznych, biomasy oraz energii ze ścieków i osadów ściekowych. W przyszłości więc oczyszczalnie ścieków mogą stać się bioenergetycznymi zakładami odzysku surowców i odnowy wody, jednocześnie intensywnie przyczyniając się do realizacji fundamentalnej zasady ochrony środowiska – zrównoważonego rozwoju. Podejście to już dzisiaj jest niezwykle istotne. Intensywny rozwój cywilizacyjny i antropopresja sięgają w niektórych aspektach granic pojemności środowiska, tj. bezpiecznego dla ludzkości zakresu wykorzystania zasobów w znaczeniu stabilności ekosystemów lokalnych i globalnych. Będąc coraz bliżej tych granic, o czym mogą świadczyć przykłady, takie jak postępujące zanieczyszczenie, eutrofizacja wód, rosnące zapotrzebowanie na wodę przy malejącej ilości jej dyspozycyjnych zasobów, wydaje się, że należy zmienić podejście do miejskiego systemu wodno-ściekowego i adaptować go do standardów gospodarki cyrkulacyjnej.

---

<sup>1</sup> Termin gospodarka cyrkularna jest zamiennie stosowany z terminem gospodarka cyrkulacyjna.

## Literatura:

bdl.stat.gov.pl Kategoria: stan i ochrona środowiska za 2020 r. <<https://bdl.stat.gov.pl/bdl/dane/podgrup/temat>>.

Gromiec M. 2016. Nowy paradygmat Nutriety-Energia-Woda dla przedsiębiorstw wodociągowo-kanalizacyjnych. Zaopatrzenie w wodę, jakość i ochrona wód. red. Dymaczewski Z., Walkowiak J., Urbaniak A. Wyd. PZITS Poznań, s. 69–80.

Kacprzak M.J., Kupich I. 2021. The specificities of the circular economy (CE) in the municipal wastewater and sewage sludge sector – local circumstances in Poland. Clean Techn Environ Policy.

## 2. Kluczowe regulacje prawne i zawarte w nich wymagania na poziomie Unii Europejskiej, Polski, regionu

### 2.1. Regulacje prawne stanu wód

Z punktu widzenia regulacji polityki wodno-ściekowej naszego kraju jako państwa członkowskiego Unii Europejskiej, kluczowe znaczenie mają unijne dyrektywy, w tym przede wszystkim **Ramowa Dyrektywa Wodna (RDW)** [dyrektywa 2000/60/WE] oraz **Dyrektywa dotycząca oczyszczania ścieków komunalnych**, tzw. dyrektywa ściekowa [dyrektywa 91/271/EWG]. Fakt ustanowienia RDW jest przez wielu ekspertów traktowany jako kamień milowy historii polityki wodnej w Europie. Traktuje ona kompleksowo o zagadnieniach ochrony zasobów wodnych, z uwzględnieniem ochrony ekosystemów wodnych, lądowych i bagiennych oraz społeczno-gospodarczych efektów susz i powodzi. Ustalenia tej dyrektywy zostały w Polsce ujęte głównie w takich ustawach jak:

- Ustawa z 20 lipca 2017 r. Prawo wodne,
- Ustawa z 27 kwietnia 2001 r. Prawo ochrony środowiska,
- Ustawa z 14 grudnia 2012 r. o odpadach,
- Ustawa z 7 czerwca 2001 r. o zbiorowym zaopatrzeniu w wodę i zbiorowym odprowadzeniu ścieków,

wraz z rozporządzeniami wykonawczymi do tych ustaw.

Ramowa Dyrektywa Wodna ustanawia innowacyjne podejście do gospodarowania wodami opierające się na dorzeczach, naturalnych jednostkach geograficznych i hydrologicznych oraz określa nieprzekraczalne terminy, w których państwa członkowskie powinny zrealizować wyznaczone cele w zakresie ochrony środowiska ekosystemów wodnych. RDW „zobowiązuje wszystkie państwa członkowskie do podjęcia działań na rzecz ochrony śródlądowych wód powierzchniowych, wód przejściowych, wód przybrzeżnych oraz wód podziemnych.” Jej celem było „osiągnięcie do 2015 r., a w uzasadnionych przypadkach do 2021 lub 2027 r., dobrego stanu wód i ekosystemów od nich zależnych” [apgw.gov.pl].

RDW obliguje państwa członkowskie do opracowania planów gospodarowania wodami dla każdego obszaru dorzecza wyznaczonego w danym kraju [gov.pl]. Plany gospodarowania wodami w obszarze dorzecza są dokumentami skonkretyzowanymi, a ich zasięg obejmuje praktycznie cały kraj (9 dorzeczy), jednakże dorzecza tylko dwóch największych rzek zajmują ok. 94% powierzchni kraju – łącznie ok. 303 tys. km<sup>2</sup> [Projekt II aPGW dorzecza Odry 2021, Projekt II aPGW dorzecza Wisły 2021]. Plany gospodarowania wodami są aktualizowane co 6 lat [Dz. U. 2017 poz. 1566]. Plany opublikowane

w formie rozporządzeń w 2016 r. obowiązują do 22 grudnia 2022 r. Aktualnie trwa opracowanie rozporządzeń wprowadzających drugą aktualizację planów gospodarowania wodami na obszarach dorzeczy (II aPGW), które docelowo zastąpią obowiązujące dokumenty.

Z kolei **Dyrektywa Parlamentu Europejskiego i Rady z dnia 12 sierpnia 2013 r. zmieniająca dyrektywy 2000/60/WE i 2008/105/WE w zakresie substancji priorytetowych w dziedzinie polityki wodnej** [dyrektywa 2013/39/UE], obok wartości dopuszczalnych dla substancji priorytetowych i zanieczyszczających, tj. standardów emisyjnych, określa normy jakości środowiska w dziedzinie polityki wodnej w zależności od typu wód oraz ustanawia dopuszczalne stężenia średnioroczne i maksymalne. Normy te mają swoje odzwierciedlenie w **Rozporządzeniu Ministra Infrastruktury z dnia 25 czerwca 2021 r. w sprawie klasyfikacji stanu ekologicznego, potencjału ekologicznego i stanu chemicznego oraz sposobu klasyfikacji stanu jednolitych części wód powierzchniowych, a także środowiskowych norm jakości dla substancji priorytetowych** [Dz. U. 2021 poz. 1475]. Aby wdrażanie europejskich przepisów dotyczących poprawy stanu wód było skuteczne, należy dążyć do tego, aby stan wód odznaczał się co najmniej drugą klasą jakości (stan dobry). W tym kontekście podstawę do ustalenia celu środowiskowego dla jednolitych części wód powierzchniowych (jcw) powinny stanowić przepisy rozporządzenia klasyfikacyjnego dla jcw, zwłaszcza te określające wartości graniczne. Sprecyzowane zostały też wskaźniki jakości wód w zakresie elementów biologicznych, hydromorfologicznych i fizykochemicznych w zależności od typu jcw, jak również normy środowiskowe dla substancji zanieczyszczających z grupy specyficznych syntetycznych i niesyntetycznych oraz zdefiniowanych jako substancje priorytetowe szczególnie szkodliwe dla środowiska wodnego.

Ochrona stanu wód jest również przedmiotem innej europejskiej dyrektywy – **Dyrektywa Rady z dnia 12 grudnia 1991 r. w sprawie ochrony wód przed zanieczyszczeniami powodowanymi przez azotany pochodzące ze źródeł związanych z rolnictwem** [dyrektywa 91/676/EWG], zwana potocznie dyrektywą azotanową. Stanowi ona integralną część Ramowej Dyrektywy Wodnej i jest jednym z kluczowych instrumentów ochrony wód przed zanieczyszczeniami pochodzenia rolniczego.

Na rzecz realizacji celów dyrektywy azotanowej, państwa członkowskie były zobligowane do dokonywania przeglądu stanu eutrofizacji słodkich wód, ujść rzek i wód przybrzeżnych, a także do podejmowania wielu działań, zwłaszcza:

- wyznaczenia obszarów szczególnie narażonych na zanieczyszczenie azotanami pochodzenia rolniczego (OSN);
- opracowania i wdrożenia planów działań, mających zapewnić ochronę wód powierzchniowych i podziemnych przed zanieczyszczeniem azotanami;
- opracowania kodeksu dobrych praktyk rolniczych do stosowania przez rolników.

Alternatywnym postępowaniem wskazanym w dyrektywie było ustanowienie i wdrożenie programu działań na terenie całego kraju bez konieczności wyznaczania stref wrażliwych.

Polska, z dniem wstąpienia do Unii Europejskiej (1 maja 2004 r.), przyjęła realizację wymogów zawartych w dyrektywie azotanowej, decydując się na wyznaczenie stref zagrożenia, tzw. obszarów szczególnie narażonych (OSN). W 2014 r. Komisja Europejska, oceniając efektywność wdrażania dyrektywy azotanowej przez Polskę stwierdziła, że efekty działań są niewystarczające. W związku z tym wyrokiem, od 24 sierpnia 2017 r. nastąpiła w Polsce zmiana sposobu realizacji przedłożonych

postanowień [Najwyższa Izba Kontroli 2018]. Organy władzy ustawodawczej i wykonawczej zdecydowały wówczas, iż w celu zmniejszenia zanieczyszczenia wód azotanami pochodzącymi ze źródeł rolniczych oraz zapobiegania dalszemu zanieczyszczeniu, zostanie opracowany i wdrożony program działań na obszarze całego kraju.

Nie jest to typowy dokument strategiczny wskazujący kluczowe kierunki inwestycyjne, mające na celu ochronę wód. Stanowi natomiast regulacje dotyczące odległości stosowania nawozów naturalnych i mineralnych od cieków wodnych, terminów ich stosowania i sposobów przechowywania. Jest wynikiem realizacji wymogów stawianych przez Unię Europejską i został wdrożony w ramach realizacji zadań dotyczących ograniczenia odpływu biogenów z terenów rolniczych – zadań wyznaczonych przez Plany gospodarowania wodami. Program został wdrożony na obszarze całego państwa i zobowiązuje wszystkich przedsiębiorców rolnych do przestrzegania zasad w nim wyznaczonych.

## 2.2. Regulacje prawne dotyczące jakości ścieków

**Dyrektywa dotycząca oczyszczania ścieków komunalnych** [dyrektywa 91/271/EWG] określa wymagania wobec zrzutów ścieków na różnych obszarach, ich dopuszczalne wartości dla aglomeracji różnej wielkości, sposoby wyznaczania wielkości ładunku zanieczyszczeń w ściekach oraz obowiązuje państwa członkowskie do wyznaczenia obszarów wrażliwych na zanieczyszczenia pochodzenia komunalnego. Odgrywa ona zasadniczą rolę w gospodarowaniu ściekami komunalnymi oraz ochronie środowiska wodnego, w tym wód powierzchniowych, do których są one odprowadzane.

Dyrektywa ściekowa należy do najkosztowniejszych oraz najtrudniejszych we wdrożeniu aktów prawnych Unii Europejskiej, ponieważ zobowiązuje kraje członkowskie do budowania systemów odbioru i oczyszczania ścieków. Są to przede wszystkim zadania inwestycyjne. Trudności we wdrażaniu tej dyrektywy są spowodowane m.in. terminowością jej implementacji, niedostatecznymi funduszami oraz skomplikowanymi procedurami wydłużającymi czas realizacji. Ponadto procedury unijne związane z pozyskiwaniem dofinansowania są zbyt skomplikowane, nieprzejrzyste i czasochłonne.

Aktualnie transpozycja tej dyrektywy do prawodawstwa polskiego polega na wprowadzeniu podwyższonego usuwania biogenów we wszystkich oczyszczalniach ścieków komunalnych w aglomeracjach powyżej 10 000 RLM. Oznacza to, że w przypadku gdy w aglomeracji powyżej 10 000 RLM znajduje się kilka oczyszczalni różnej wielkości, każda z nich powinna posiadać technologię podwyższonego usuwania biogenów. Punktem wyjścia do przyjęcia sposobu wdrażania przepisów było uznanie całego terenu Polski, położonego w 99,7% w zlewni Morza Bałtyckiego, za obszar wrażliwy, to znaczy wymagający ograniczenia zrzutów związków azotu i fosforu oraz zanieczyszczeń biodegradowalnych do wód.

Odzwierciedleniem dyrektywy dotyczącej oczyszczania ścieków komunalnych w krajowym porządku prawnym jest m.in. **Rozporządzenie Ministra Gospodarki Morskiej i Żeglugi Śródlądowej z dnia 12 lipca 2019 r. w sprawie substancji szczególnie szkodliwych dla środowiska wodnego oraz warunków, jakie należy spełnić przy wprowadzaniu do wód lub do ziemi ścieków, a także przy odprowadzaniu wód opadowych lub roztopowych do wód lub do urządzeń wodnych** [Dz. U. 2019 poz. 1311]. Rozporządzenie określa:



1. Substancje szczególnie szkodliwe dla środowiska wodnego, powodujące zanieczyszczenie wód, które powinny być eliminowane (wykaz I w załączniku nr 1 do rozporządzenia) lub ograniczane (wykaz II w załączniku nr 1 do rozporządzenia);
2. Warunki, jakie należy spełnić przy wprowadzaniu ścieków do wód lub do ziemi, w tym najwyższe dopuszczalne wartości stężeń zanieczyszczeń, oraz warunki, jakie należy spełnić w celu rolniczego wykorzystania ścieków;
3. Miejsce i minimalną częstotliwość pobierania próbek ścieków, metodyki referencyjne analizy i sposób oceny, czy ścieki odpowiadają wymaganym warunkom.

W celu efektywnego wprowadzenia w życie zawartych w rozporządzeniu postanowień utworzono **Krajowy Program Oczyszczania Ścieków Komunalnych (KPOŚK)** [aKPOŚK 2022]. KPOŚK jest podstawowym instrumentem realizowania postanowień i stanowi wykaz aglomeracji, które muszą zostać wyposażone w systemy kanalizacji zbiorczej i oczyszczalnie ścieków w terminach określonych w programie. Zgodnie z postanowieniami, koniecznymi do spełnienia przez aglomeracje, wyznaczone w ramach KPOŚK są następujące wymogi:

1. Wyposażenia aglomeracji w system zbierania ścieków komunalnych gwarantujący przy najmniej 98% poziom obsługi, przy czym pozostałe 2% niezbranego siecią kanalizacyjną ładunku nie może być większe niż 2 000 RLM. Ładunek zanieczyszczeń niezbrany siecią musi być oczyszczany w innych systemach oczyszczania ścieków (pojedyncze systemy lub inne właściwe systemy), zapewniających ten sam poziom ochrony środowiska jak dla całej aglomeracji (art. 3 dyrektywy 91/271/EWG).
2. Wydajności oczyszczalni – dostosowanej do odbioru 100% ładunku zanieczyszczeń powstających w aglomeracji (art. 10 dyrektywy 91/271/EWG).
3. Standardów oczyszczania ścieków przez oczyszczalnie – zastosowanie odpowiednich technologii oczyszczania ścieków gwarantujących osiągnięcie wymaganych standardów oczyszczania ścieków, w tym podwyższone usuwanie biogenów w aglomeracjach powyżej 10 000 RLM (art. 4 lub 5 dyrektywy 91/271/EWG).

Celem programu, przez realizację ujętych w nim inwestycji, jest ograniczenie zrzutów niedostatecznie oczyszczanych ścieków, a co za tym idzie – ochrona środowiska wodnego przed ich niekorzystnymi skutkami. KPOŚK jest dokumentem strategicznym, w którym oszacowano potrzeby i określono działania na rzecz wyposażenia aglomeracji o RLM  $\geq$  2 000 w systemy kanalizacyjne i oczyszczalnie ścieków komunalnych. Zgodnie z art. 96 ustawy Prawo wodne, KPOŚK podlega aktualizacji przynajmniej raz na cztery lata. Do tej pory wdrożonych zostało 6 aktualizacji KPOŚK: 2005, 2009, 2010, 2015, 2017 i 2022.

W Dzienniku Urzędowym Unii Europejskiej całkiem niedawno pojawiło się nowe **Rozporządzenie Parlamentu Europejskiego i Rady (UE) z dnia 25 maja 2020 r. w sprawie minimalnych wymogów dotyczących ponownego wykorzystania wody** [Rozporządzenie 2020/741]. Wymóg stosowania rozporządzenia zacznie obowiązywać od 26 czerwca 2023 r. Dotyczy ono wyłącznie wody odzyskanej ze ścieków komunalnych, zebranych i oczyszczonych zgodnie z dyrektywą 91/271/EWG, a także określa zasady jej ponownego wykorzystania do nawodnień w rolnictwie. Rozporządzenie to stanowi pierwszą próbę zdefiniowania minimalnych wymagań na poziomie europejskim, które powinny spełniać oczyszczone ścieki, by mogły zostać wykorzystane do nawadniania roślin przeznaczonych do bezpośredniego spożycia, by nie zagrażały zdrowiu i życiu ludzi oraz nie wpływały negatywnie na środowisko.

Maksymalizacja wykorzystania wody z odzysku zgodna jest z ideą gospodarki o obiegu zamkniętym (GOZ), która zakłada utrzymywanie wartości produktów, materiałów i zasobów w gospodarce tak długo, jak to możliwe, przy jednoczesnym ograniczeniu wytwarzania odpadów do minimum [COM (2020) 98 final]. Ponowne wykorzystanie wody do nawodnień w rolnictwie przyczynić się może do rozwoju technologii odzysku składników odżywczych ze ścieków i wykorzystaniu ich w uprawach z użyciem technik fertygacji<sup>2</sup>. W ten sposób powtórne wykorzystanie odzyskanych substancji może potencjalnie prowadzić do zmniejszenia konieczności użycia nawozów mineralnych i zapewnienia dodatkowej ilości wody – zwłaszcza podczas długotrwałych okresów bezopadowych, minimalizując ryzyko obumierania upraw i zbyt małych zbiorów [Chmielowski 2020]. Optymalizacja zużycia wody w rolnictwie jest niezwykle istotnym kierunkiem, ponieważ jest to jedna z najbardziej wodochłonnych gałęzi gospodarki. Jak można przeczytać w uzasadnieniu rozporządzenia:

„Szacuje się, że dzięki proponowanym środkom ponowne wykorzystanie wody do celów nawadniania w rolnictwie mogłoby osiągnąć poziom 6,6 mld m<sup>3</sup> rocznie w porównaniu z 1,7 mld m<sup>3</sup> rocznie, jeżeli nie zastosuje się żadnych unijnych ram prawnych w tej dziedzinie. Ponowne wykorzystanie ponad 50% całkowitej objętości wody pochodzącej z oczyszczalni ścieków w Europie i teoretycznie dostępnej do nawadniania pozwoliłoby uniknąć ponad 5% bezpośredniego poboru z wód powierzchniowych i podziemnych, a tym samym o ponad 5% zredukować ogólny deficyt wody.”

Dla Polski idea ta jest bardzo ważnym zagadnieniem, ponieważ zajmujemy jedno z ostatnich miejsc w Europie pod względem dostępności odnawialnych zasobów wody słodkiej przypadających na jednego mieszkańca [raportsdg.stat.gov.pl]. Oprócz tego w dalszym ciągu borykamy się z poważnym problemem zanieczyszczenia wód powierzchniowych, co grozi niewypełnieniem do 2027 r. zobowiązań wynikających z Ramowej Dyrektywy Wodnej.

Wejście w życie przedmiotowego rozporządzenia może skutkować koniecznością wprowadzenia zmian m.in. w Prawie wodnym. Modyfikacji może ulec także rozporządzenie w sprawie substancji szczególnie szkodliwych dla środowiska wodnego oraz warunków, jakie należy spełnić przy wprowadzaniu ścieków do wód lub do ziemi, a także przy odprowadzaniu wód opadowych lub roztopowych do wód lub do urządzeń wodnych. Będzie zależało to od przyjętego w Polsce modelu postępowania z wodą odzyskaną ze ścieków komunalnych. Ze względu na fakt, że warunki geograficzne i klimatyczne państw członkowskich Unii Europejskiej znacznie się różnią, każde państwo może zdecydować, czy użycie odzyskanej wody do nawodnień rolnych na części lub na całym jego terytorium jest odpowiednim rozwiązaniem. Nie bez znaczenia pozostają również koszty uzyskiwania odzyskanej (odnowionej) wody (inwestycyjne i eksploatacyjne).

Wymagania jakościowe przedstawione w rozporządzeniu są zbliżone do tych, które musi spełniać woda przeznaczona do spożycia przez ludzi. W praktyce oznacza to, że woda wykorzystywana w rolnictwie musiałaby pochodzić z oczyszczalni rozbudowanej o dodatkowy stopień, tzw. stopień odnowy wody, polegający na zastosowaniu wysokoefektywnych metod oczyszczania, np. separacji membranowej i dezynfekcji. Praktyczne doświadczenia z dezynfekcją ścieków są w Polsce małe. Do niedawna nie było ani jednej komunalnej oczyszczalni ścieków, w której stosowano dezynfekcję odpływu. Proces dezynfekcji jest dobrze rozpoznany w technologii oczyszczania i odnowy wody, natomiast w odniesieniu do ścieków wciąż istnieje nie tylko wiele niewiadomych, lecz także zagrożeń.

---

2 Metoda nawożenia polegająca na wymieszaniu nawozów z wodą i podawaniu ich podczas podlewania roślin.

Wynikają one głównie ze skutków ubocznych reakcji stosowanych reagentów chemicznych z bardzo złożonym układem jakim są (nawet) oczyszczone ścieki komunalne [Quant i in. 2014]. W przypadku procesów membranowych, minusem jest chemiczna i mechaniczna wrażliwość membran oraz konieczność ich częstego czyszczenia. Obecnie układy do dezynfekcji wykorzystywane są w pojedynczych obiektach, np. w rejonach nadmorskich (OŚ w Jastrzębiej Górze) [Bączkowska i in. 2021] lub znajdujących się w zasięgu obszarów chronionych (OŚ Józefów) [Chodak i in. 2018]. Wymienić można również obiekty, w których działają instalacje do dezynfekcji w skali półtechnicznej – np. w grupowej oczyszczalni ścieków Dębogórze w Gdyni [Quant i in. 2015].

Wdrażanie wymagań rozporządzenia w sprawie minimalnych wymogów dotyczących ponownego wykorzystania wody w Polsce rodzi wiele obaw ze strony eksploatatorów oczyszczalni. To producent tej wody będzie odpowiadał za jej jakość, a nawet najmniejsze odstępstwo od normy może uczynić go podmiotem naruszającym prawo. W przypadku konwencjonalnego oczyszczania zakłady mają oficjalne prawo do przekraczania parametrów jakości ścieków i część próbek ścieków oczyszczonych w cyklu rocznym nie musi spełniać wymagań prawnych. Woda produkowana ze ścieków, w myśl tego rozporządzenia, musi odznaczać się stabilną jakością. Ważnym aspektem będzie zmotywowanie eksploatatorów do podjęcia wymaganych działań, np. zapewniając ulgi w opłatach za usługi wodne. Implementacja postanowień może więc być przedsięwzięciem długofalowym, a obecny stan gospodarki wodno-ściekowej sugeruje, że rozwiązania pozwalające na odzysk wody, przynajmniej w początkowej fazie, będą stosowane w minimalnym stopniu. Niemniej jednak, biorąc pod uwagę stan jakościowy i ilościowy zasobów wodnych, jest to kierunek konieczny do wdrażania.

### 2.3. Regulacje prawne dotyczące jakości osadów ściekowych

Nierozzerwalnym zagadnieniem dla polityki ściekowej kraju jest problematyka zagospodarowania komunalnych osadów ściekowych (KOŚ). Na poziomie europejskim kwestie te reguluje **Dyrektywa Rady w sprawie ochrony środowiska, w szczególności gleby, w przypadku wykorzystywania osadów ściekowych w rolnictwie** [dyrektywa 86/278/EWG] tzw. dyrektywa osadowa. Zawarte są w niej wymogi dotyczące jakości osadów stosowanych w rolnictwie oraz gleby, na której mają zostać zastosowane, a także ograniczenia w użytkowaniu do niektórych celów i w niektórych okresach. Na poziomie krajowym do niedawna wymagania te implementowało **Rozporządzenie Ministra Środowiska z dnia 6 lutego 2015 r. w sprawie komunalnych osadów ściekowych** [Dz. U. 2015 poz. 257]. Określało ono m.in. dopuszczalną zawartość metali ciężkich, bakterii z rodzaju *Salmonella*, żywych jaj pasożytów jelitowych w osadach oraz dozwolone dawki przeznaczone na grunty rolne.

Po długotrwałych konsultacjach 14 stycznia 2022 r. opublikowano w Dzienniku Ustaw nowe **Rozporządzenie Ministra Klimatu i Środowiska z dnia 31 grudnia 2021 r. zmieniające rozporządzenie w sprawie komunalnych osadów ściekowych** [Dz. U. 2022 poz. 89]. Większość jego zapisów wejdzie w życie po upływie 48 miesięcy od dnia ogłoszenia. Istotą zmian jest m.in. doprecyzowanie przepisów w zakresie oznaczania parametrów jakościowych i warunków stosowania na powierzchni ziemi, tak aby wyeliminować zagrożenie dla ludzi i środowiska wynikające z ich stosowania. Zmiana dotychczasowego rozporządzenia ma na celu przede wszystkim zdefiniowanie kryteriów stabilizacji osadu i jasne wskazanie zakresu ich obowiązywania w taki sposób, by było oczywiste, że dotyczy wyłącznie zagospodarowania osadów stosowanych na powierzchni ziemi. Do niezwykle istotnych zaliczyć można:

- zmiany w zasadach stabilizacji KOŚ; nowe rozporządzenie definiuje 5 procesów ich stabilizacji,
- zmiany w częstotliwości wykonywania badań KOŚ przed ich przekazaniem do stosowania,
- wprowadzenie wymogu wykonywania badań przez laboratoria akredytowane lub te posiadające certyfikat systemu zarządzania jakością, co wzmocni mechanizm kontroli nad warunkami stosowania KOŚ,
- doprecyzowanie czynności, polegających na wprowadzaniu KOŚ do gruntów, co ma zapobiec nieprawidłowościom w ich dawkowaniu,
- wprowadzenie zmian umożliwiających wykorzystanie najnowszych technik badawczych, uszczegółowienie metodyki referencyjnej do oznaczania w KOŚ liczby żywych jaj pasożytów jelitowych.

Oprócz dokumentów typowo legislacyjnych, czyli ustaw i rozporządzeń, istotne znaczenie mają dokumenty strategiczne takie jak **Krajowy Plan Gospodarki Odpadami 2022** [M.P. 2016 poz. 784] i **Strategia postępowania z komunalnymi osadami ściekowymi na lata 2019-2022** [Strategia... 2018].

Pierwszy dokument przewiduje całkowite zaniechanie składowania KOŚ, zwiększenie ilości ich przetwarzania przed wprowadzeniem do środowiska oraz ilości poddawanych termicznemu przekształceniu. W dokumencie wskazano, że istotnym jest dążenie do maksymalizacji stopnia wykorzystania substancji biogennych zawartych w osadach ściekowych, przy jednoczesnym spełnieniu wszystkich wymogów dotyczących bezpieczeństwa sanitarnego, chemicznego i środowiskowego. Cele strategiczne przedstawione w drugim wskazanym dokumencie są bardzo zbliżone i przewidują:

- zapobieganie i zmniejszenie ilości powstających w oczyszczalniach ścieków KOŚ stanowiących odpady, które z uwagi na jakość stwarzają problemy z ich zagospodarowaniem zgodnym z przepisami,
- zwiększenie ilości KOŚ przetwarzanych przed wprowadzeniem do środowiska oraz zwiększenie ilości KOŚ poddanych termicznemu przekształceniu,
- dążenie do maksymalizacji stopnia wykorzystania substancji biogennych zawartych w osadach przy jednoczesnym spełnieniu wszystkich wymogów dotyczących bezpieczeństwa sanitarnego, chemicznego oraz środowiskowego.

**Analiza dwóch przedstawionych dokumentów strategicznych pozwala stwierdzić, że w dziedzinie przetwarzania i zagospodarowania komunalnych osadów ściekowych istnieje wyraźny nacisk na implementację założeń gospodarki o obiegu zamkniętym, co jest bardzo istotnym kierunkiem rozwoju branży wodno-ściekowej w Polsce.**

## Literatura:

apgw.gov.pl. Plany gospodarowania wodami (PGW). Informacje ogólne. <<https://apgw.gov.pl/pl/l-cykl-informacje-ogolne>> [dostęp: 15.03.2022].

Bączkowska E., Jankowska K. 2021. Ocena skuteczności metody UV do dezynfekcji ścieków na przykładzie oczyszczalni ścieków w Jastrzębiej Górze. Książka streszczeń. VI Interdyscyplinarna Akademicka Konferencja Ochrony Środowiska. Gdańsk.

Chmielowski K. 2020. Wykorzystanie wody z oczyszczonych ścieków. Przegląd Komunalny, 12 (351).

Chodak B., Zdanowicz S. 2019. Oczyszczalnia ścieków w Józefowie – konieczność czy zachcianka? Forum Eksploatatora, 3, s. 16–20.

COM (2020) 98 final. Komunikat Komisji do Parlamentu Europejskiego, Rady, Europejskiego Komitetu Ekonomiczno-Społecznego i Komitetu Regionów. Nowy plan działań UE dotyczący gospodarki o obiegu zamkniętym na rzecz czystszej i bardziej konkurencyjnej Europy. Bruksela, dnia 11.03.2020 r.

Dyrektywa 2013/39/UE. Dyrektywa Parlamentu Europejskiego i Rady z dnia 12 sierpnia 2013 r. zmieniająca dyrektywy 2000/60/WE i 2008/105/WE w zakresie substancji priorytetowych w dziedzinie polityki wodnej (Dz. Urz. UE L226/1 z 24.08.2013).

Dyrektywa 91/676/EWG. Dyrektywa Rady z dnia 12 grudnia 1991 r. dotycząca ochrony wód przed zanieczyszczeniami powodowanymi przez azotany pochodzenia rolniczego (Dz. U. L 375 z 31.12.1991).

Dyrektywa 2000/60/WE. Dyrektywa Rady z dnia 23 października 2000 r. ustanawiająca ramy wspólnego działania w dziedzinie polityki wodnej (Dz. U. L 327 z 22.12.2000).

Dyrektywa 91/271/EWG. Dyrektywa z dnia 21 maja 1991 r. dotycząca oczyszczania ścieków komunalnych (Dz. U. L 135 z 30.05.1991).

Dyrektywa 86/278/EWG. Dyrektywa Rady z dnia 12 czerwca 1986 r. w sprawie ochrony środowiska, w szczególności gleby, w przypadku wykorzystywania osadów ściekowych w rolnictwie (Dz. U. WE. L181/6 z 4.07.1986).

Dz. U. 2017 poz. 1566. Ustawa z dnia 20 lipca 2017 r. Prawo Wodne.

Dz. U. 2015 poz. 257. Rozporządzenie Ministra Środowiska z dnia 6 lutego 2015 r. w sprawie komunalnych osadów ściekowych.

Dz. U. 2022 poz. 89. Rozporządzenie Ministra Klimatu i Środowiska z dnia 31 grudnia 2021 r. zmieniające rozporządzenie w sprawie komunalnych osadów ściekowych.

Dz. U. 2021 poz. 1475. Rozporządzenie Ministra Infrastruktury z dnia 25 czerwca 2021 r. w sprawie klasyfikacji stanu ekologicznego, potencjału ekologicznego i stanu chemicznego oraz sposobu klasyfikacji stanu jednolitych części wód powierzchniowych, a także środowiskowych norm jakości dla substancji priorytetowych.

Dz. U. 2019 poz. 1311. Rozporządzenie Ministra Gospodarki Morskiej i Żeglugi Śródlądowej z dnia 12 lipca 2019 r. w sprawie w sprawie substancji szczególnie szkodliwych dla środowiska wodnego oraz warunków, jakie należy spełnić przy wprowadzaniu do wód lub do ziemi ścieków, a także przy odprowadzaniu wód opadowych lub roztopowych do wód lub do urządzeń wodnych.

gov.pl. Susza – Plany gospodarowania wodami na obszarach dorzeczy (PGW). <<https://www.gov.pl/web/susza/plany-gospodarowania-wodami-na-obszarach-dorzeczy-pgw>> [dostęp 17.03.2022].

GUS 2020. Polska na drodze zrównoważonego rozwoju Raport 2020, Główny Urząd Statystyczny, stat.gov.pl. <<https://raportsdg.stat.gov.pl/2020/>> [dostęp 07.02.2022].

aKPOŚK 2022. VI aktualizacja Krajowego Programu Oczyszczalnia Ścieków Komunalnych. wody.gov.pl. <<https://www.gov.pl/attachment/a7096f8e-5961-4719-8c03-4b36cf61f56a>> [dostęp 19.05.2022].

M.P. 2016 poz. 784. Krajowy Plan Gospodarki Odpadami 2022. Uchwała nr 88 Rady Ministrów z dnia 1 lipca 2016 r. w sprawie Krajowego Planu gospodarki odpadami 2022.

Najwyższa Izba Kontroli 2018. Informacja o wynikach kontroli: Zapobieganie zanieczyszczeniu wód związkami azotu ze źródeł rolniczych. KSI.410.006.00.2017, Nr ewid. 22/2018/P/17/051/KSI.

Projekt IIaPGW dorzecza Odry 2021. Projekt drugiej aktualizacji planu gospodarowania wodami na obszarze dorzecza Odry. <[https://apgw.gov.pl/static/cms/doc/2021/Odra/Projekt\\_IIaPGW\\_OD\\_ODRA.pdf](https://apgw.gov.pl/static/cms/doc/2021/Odra/Projekt_IIaPGW_OD_ODRA.pdf)> [dostęp 19.05.2022].

Projekt II aPGW dorzecza Wisły 2021. Projekt drugiej aktualizacji planu gospodarowania wodami na obszarze dorzecza Wisły. <[https://apgw.gov.pl/static/cms/doc/2021/Wisla/Projekt\\_IIaPGW\\_OD\\_Wis%C5%82a.pdf](https://apgw.gov.pl/static/cms/doc/2021/Wisla/Projekt_IIaPGW_OD_Wis%C5%82a.pdf)> [dostęp 19.05.2022].

Rozporządzenie 2020/741. Rozporządzenie Parlamentu Europejskiego i Rady (UE) z dnia 25 maja 2020 r. w sprawie minimalnych wymogów dotyczących ponownego wykorzystania wody (Dz. U. UE L177/32 z 5.06.2020).

Strategia... 2018. Strategia postępowania z komunalnymi osadami ściekowymi na lata 2019-2022. Ministerstwo Środowiska, Warszawa 2018.

Quant B., Olańczuk-Neyman K., Czerwionka K., Jankowska K., Kulbat E., Łuczkiwicz A., Sokołowska A., Fitobór K., Karolewski S., Kowal P., Tarasewicz K. 2015. Ocena możliwości dezynfekcji biologicznie oczyszczonych ścieków na przykładzie Grupowej Oczyszczalni Ścieków Dębogórze w Gdyni. Gaz, Woda i Technika Sanitarna, 12, s. 443–448.

Quant B., Olańczuk-Neyman K., Czerwionka K., Jankowska K., Kulbat E., Łuczkiwicz A., Sokołowska A., Fitobór K., Karolewski S., Kowal P., Tarasewicz K. 2014. Możliwości dezynfekcji biologicznie oczyszczonych ścieków na przykładzie oczyszczalni ścieków Wschód w Gdańsku. Inżynieria Morska i Geotechnika, 5, s. 397–406.

# 3. Kierunki rozwoju w technologii oczyszczania ścieków i zagospodarowaniu osadów ściekowych

## 3.1. Historia i rozwój technologii oczyszczania ścieków na świecie

Na przestrzeni dziejów rozwój miast powodował zwiększenie koncentracji zanieczyszczeń na stosunkowo niewielkim obszarze i dlatego od najdawniejszych czasów ludzie prowadzili działania zmierzające do ich usunięcia. Począwszy od starożytności, poprzez kolejne stulecia oczyszczanie ścieków sprowadzało się jedynie do usuwania zanieczyszczeń w procesach mechanicznych – cedzenie i filtrację np. przez grunt. Wtedy jeszcze nie zdawano sobie sprawy, jak złożony jest to proces pod względem fizykochemicznym i biologicznym. Jak można się domyślać, sposoby te nie były wykorzystywane na szeroką skalę, co bardzo często powodowało pojawianie się licznych chorób i rozprzestrzenianie się śmiertelnych epidemii. W Europie od IV do VII w.n.e. systematycznie zanikała troska o higienę. Ścieki w miastach wylewano bezpośrednio na ulicę lub do przydrożnych rowów biegnących wzdłuż ulic [Mańczak, Klaczyński 2011].

Dopiero na początku XVII wieku ludzkość zaczęła zdawać sobie sprawę z istotności czystej wody, a eksperymenty z oczyszczaniem ścieków stały się coraz bardziej powszechne. W tamtych latach, po odkryciu mikroorganizmów przez Roberta Hooke'a i Antoniego van Leeuwenhoeka w 1676 r., pojawiły się również pierwsze przypuszczenia, że mogą okazać się pomocne w oczyszczaniu ścieków [aqua-equip.com, Gest 2004]. Mimo ogólnego zaniedbania spraw higienicznych w miastach średniowiecznych, chlubnym przykładem poszczycić się mógł Bolesławiec na Dolnym Śląsku (ówczesny Bunzlau). W mieście tym, najprawdopodobniej najwcześniej w Europie, bo już w roku 1531 zaczęto oczyszczać ścieki na polach irygowanych, które funkcjonowały do początku XX w., czyli ponad 450 lat [Mańczak, Trojanowska-Olichwer 2016, Kutera 1978]. Pola irygowane to specjalnie przygotowane działki gruntu, przeznaczone na oczyszczanie ścieków, z równoczesnym wykorzystaniem do celów uprawnych. Zastosowanie ścieków do nawadniania stanowi najstarszy, znany od czasów starożytnych sposób biologicznego oczyszczania. W drugiej połowie XIX wieku liczne miasta Anglii, a następnie Niemiec oczyszczały ścieki na polach irygowanych [Kutera 1978]. Idea ta przyczyniła się do wynalezienia w Anglii periodycznych pól filtracyjnych ze złożem piasku o odpowiedniej granulacji. Kolejne działania koncentrowano na zmniejszeniu powierzchni tych „urządzeń” i jednoczesnym zwiększeniu obciążenia hydraulicznego. Ich dalsza ewolucja doprowadziła więc do wynalezienia powolnych filtrów piaskowych i złoż biologicznych. Filtry piaskowe wykorzystywano w oczyszczaniu wody, a złoża biologiczne w oczyszczaniu ścieków. Pierwsze złoża biologiczne uruchomione zostały w Anglii w 1893 r., a przez kolejne lata były podstawowymi urządzeniami do biologicznego oczyszczania ścieków [Mańczak].



Wielka Brytania uznawana jest za kolebkę technologii oczyszczania ścieków [Graczyk 1988]. To właśnie wybitni uczeni pochodzący z tego kraju po raz pierwszy w historii technologii oczyszczania ścieków określili znaczenie tlenu w wodach powierzchniowych w procesach samooczyszczania oraz rozkładu zanieczyszczeń organicznych zawartych w ściekach [Mańczak, Graczyk 1988]. Wzrost populacji, industrializacja i rozwój rolnictwa na początku XX wieku przyniosły nowe wyzwania. Dotychczas stosowane metody nie były już odpowiednie do oczyszczania rosnących ładunków zanieczyszczeń organicznych czy mineralnych, np. azotu amonowego, dlatego skupiono się na rozwoju i intensyfikacji metod oczyszczania biologicznego. W 1906 r. niemiecki uczyony Karl Imhoff skonstruował osadnik, służący do dnia dzisiejszego jako jeden z podstawowych elementów oczyszczalni ścieków [McLean 2009]. Wynaleziony kilka lat później (w latach 1913–1914) proces osadu czynnego do dzisiaj jest fundamentalną podstawą funkcjonowania wszystkich oczyszczalni ścieków komunalnych na całym świecie. Istotną rolę w badaniach nad osadem czynnym przypisuje się naukowcom prowadzącym badania w Lawrence Experimental Station of Massachusetts State Board of Health [Liwarska-Bizukojć 2014, Gromiec 2019, Gromiec 2021, iwa100as.org]. Podczas tych eksperymentów, prowadzonych w szklanych, napowietrzanych naczyniach zaobserwowano wzrost mikroorganizmów na ściankach (głównie glonów) oraz gromadzenie się cząstek stałych na dnie. Postanowiono nie usuwać tych cząstek stałych z dna naczynia, ale wprowadzić do niego następną porcję ścieków i poddawać napowietrzaniu, po uprzednim odprowadzeniu poprzedniej porcji ścieków z reaktorów. Eksperymenty te nie przynosiły zadowalających rezultatów, jednak stały się punktem wyjścia do kontynuacji badań, tym razem prowadzonych w Manchester University i The Rivers Committee of the Manchester Corporation przez Edwarda Ardena i W.T. Locketta [elmhurst.org, Liwarska-Bizukojć 2014, iwa100as.org]. Wykorzystano doświadczenia uzyskane w Lawrence Experimental Station i postanowiono nie tylko nie usuwać z reaktorów tworzącej się zawiesiny, ale również nie opróżniać ich w całości przed wprowadzeniem do nich nowej partii ścieków nieoczyszczonych. Reaktory badawcze zostały dodatkowo odizolowane od światła słonecznego, w celu zapobieżenia rozwojowi glonów. Gdy wypracowano odpowiednie proporcje pomiędzy ilością dekantowanych ścieków oczyszczonych a dodawanych surowych, zaobserwowano intensyfikację powstawania cząstek stałych w reaktorze. Przyrastający osad nazwano osadem czynnym aktywnym, a stosowaną metodę – metodą osadu czynnego o działaniu okresowym. Metoda ta bardzo szybko została wdrożona w pełnej skali w oczyszczalniach w Salford (1914), Davyhulme (1915), Worcester (1916), Sheffield (1916), Stamford (1917), Tunstall (1920), Sheffield (1920), Davyhulme, (1921) oraz w Bury (1921) [elmhurst.org]. Kolejnym wyzwaniem było przekształcenie okresowo działających komór osadu czynnego w układy o działaniu przepływowym, ciągłym. Pierwsza taka oczyszczalnia została uruchomiona w Worcester w 1916 r. [iwa100as.org, Alleman i in. 1983]. Równoległe obserwowano również intensywne wdrażanie technologii osadu czynnego w oczyszczalniach ścieków w Stanach Zjednoczonych. W latach 1916–1927 wybudowano tam dziesięć dużych komunalnych oczyszczalni. W Polsce natomiast pierwsza oczyszczalnia oparta na takiej metodzie została uruchomiona w 1937 r. w Kielcach [Gromiec 2021]. Kolejne lata rozwoju technologii osadu czynnego koncentrowały się na intensyfikacji jego wydajności. Rozpoczęto stosowanie systemów kaskadowych, czyli kilku komór osadu czynnego ustawionych szeregowo. Zaobserwowano wtedy zmieniające się warunki oksydo-redukcyjne w poszczególnych komorach i stwierdzono, że można nie tylko uzyskać usunięcie związków węgla i nityfikację azotu amonowego, lecz także redukcję powstających utlenionych form azotu w procesie denityfikacji [Liwarska-Bizukojć 2014]. Nie ograniczało to jednak postępującej eutrofizacji wód, zagrażającej również systemom zaopatrzenia w wodę przeznaczoną do spożycia przez ludzi. Kolejne prace miały na celu opracowanie takich sposobów biologicznego oczyszczania ścieków, by możliwe było równoległe usunięcie związków węgla, azotu i fosforu [Liwarska-Bizukojć

2014, Alleman i in. 1983]. Początkowo substancje fosforowe usuwane były na drodze chemicznej przy pomocy koagulantów glinowych i żelazowych. Działania te uwiarydowiły bardzo istotny problem, z którym oczyszczalnie ścieków borykają się do dzisiaj – zwiększenie ilości powstających osadów ściekowych i konieczność ich zagospodarowania. W latach 1965–1970 osiągnięto kolejny krok milowy w dziedzinie oczyszczania ścieków. Została opracowana technologia PhoStrip, która łączyła strącanie chemiczne fosforu z jego usuwaniem biologicznym [Salehi i in. 2018, Switzenbaum 2018]. Od tego czasu główny nacisk położono na rozwój wielofazowych reaktorów biologicznych, umożliwiających wzmożone usuwanie fosforu równolegle z usuwaniem związków azotu i węgla. Doprowadziło to do opracowania takich układów technologicznych jak Bardenpho, A<sub>2</sub>O, UCT, MUCT, JHB, które są powszechnie wykorzystywane po dziś dzień [Esfahani i in. 2019, Jenkins i in. 2014]. Ciągły rozwój gospodarczy, industrializacja powodują wzrost ładunków zanieczyszczeń i obciążeń istniejących oczyszczalni ścieków, co wciąż wymusza powstawanie nowych metod i technologii oczyszczania ścieków. Obecny rozwój koncentruje się w głównej mierze nad intensyfikacją procesów usuwania azotu ze ścieków. Znane są już od kilkunastu lat takie technologie jak Anammox, DeAmmon, AnitaMox, TerraMox, Demon, Sharon, Oland lub Canon, które bazują na skróceniu ścieżki przemian azotu, zastosowaniu skróconej nityfikacji czy deamonifikacji [Błaszczuk 2019]. Opracowano również technologie granulowanego osadu czynnego [Podedworna i in. 2017], a także łączące zalety oczyszczania biologicznego i separacji membranowej [Hermanowicz 2011].

### 3.2. Stan gospodarki ściekowo-osadowej w Polsce i wyzwania na przyszłość

Ostatnich kilkanaście lat było dla branży wodno-ściekowej okresem bardzo intensywnym. W tym czasie przeprowadzono szereg inwestycji, których efektem są nowoczesne oczyszczalnie ścieków czy tysiące kilometrów nowych sieci kanalizacyjnych. Jak już wcześniej wspomniano, Polska jako kraj członkowski Unii Europejskiej zobowiązana jest do realizacji przepisów dyrektywy 91/271/EWG, dlatego rozwój sektora wodno-ściekowego obecnie i w ciągu kilku najbliższych lat ukierunkowany będzie na realizację tych inwestycji, które pozwolą na spełnienie przepisów dyrektywy i postanowień traktatu akcesyjnego Polski do UE. Ten kierunek inwestycyjny realizowany jest poprzez Krajowy Program Oczyszczania Ścieków Komunalnych, w ramach którego w latach 2003–2020 zakończono budowę 462 nowych oczyszczalni ścieków i przeprowadzono 1869 inwestycji w zakresie modernizacji, rozbudowy lub modernizacji wraz z rozbudową oczyszczalni [aKPOŚK 2022].

W wyniku realizacji KPOŚK wybudowano 95 916 km sieci kanalizacyjnej. W latach 2003–2020 na realizację zadań ujętych w KPOŚK wydano blisko 80,1 mld zł, z czego ok. 54,3 mld zł przeznaczono na zbiorcze systemy kanalizacyjne. Z planów inwestycyjnych przedstawionych przez aglomeracje wyznaczone w aKPOŚK 2022 wynika, że zamierzono budowę kolejnych 60 nowych oczyszczalni oraz przeprowadzenie innych inwestycji w 978 oczyszczalniach. Do roku 2027 przewiduje się:

- budowę 8022 km nowej sieci kanalizacyjnej,
- modernizację 3173 km istniejącej sieci kanalizacyjnej,
- budowę 60 nowych oczyszczalni ścieków komunalnych,
- modernizację 265 oczyszczalni,
- rozbudowę 73 oczyszczalni,

- rozbudowę i modernizację 380 oczyszczalni,
- modernizację części osadowej w 225 oczyszczalniach,
- likwidację 35 oczyszczalni.

Całkowity koszt inwestycji zaplanowanych przez aglomeracje i zgłoszonych do aKPOŚK 2022 wynosi 28,7 mld zł, w tym na:

- budowę i modernizację sieci kanalizacyjnej – 15,368 mld zł,
- inwestycje związane z oczyszczalniami ścieków – 13,375 mld zł,
- indywidualne systemy oczyszczania – 24,385 mln zł.

Pomimo dynamicznego rozwoju i stale realizowanych zadań, stan inwestycji wynikających z poprzednich aktualizacji Krajowego Programu Oczyszczania Ścieków Komunalnych jest niezadowolający i nie pozwolił na osiągnięcie celów określonych w traktacie akcesyjnym. W 2021 r. wszystkie zobowiązania spełniło 849 aglomeracji (55,71% aglomeracji) o łącznym RLM wynoszącym 18 670 170, co stanowi 50,33% całego generowanego przez aglomeracje ładunku [aKPOŚK 2022]. Komisja Europejska, będąca organem kontrolującym postęp wdrażania postanowień dyrektywy ściekowej, kilkakrotnie w ostatnich latach zwracała uwagę na nieprawidłowości. W 2018 r. Komisja przedstawiła Polsce wezwanie do usunięcia wykrytych uchybień. W przypadku gdy strona polska nie podejmie środków zapewniających ich usunięcie lub środki w uznaniu Komisji będą niewystarczające, Komisja skieruje do Trybunału Sprawiedliwości kolejną sprawę, wnosząc o nałożenie na państwo kar finansowych.

Jak przedstawiono w VI aKPOŚK 2022 dotychczasowe tempo wykonywania inwestycji nie zapewniło osiągnięcia celów pośrednich określonych w traktacie akcesyjnym. Przyczyną takiego stanu rzeczy są m.in.:

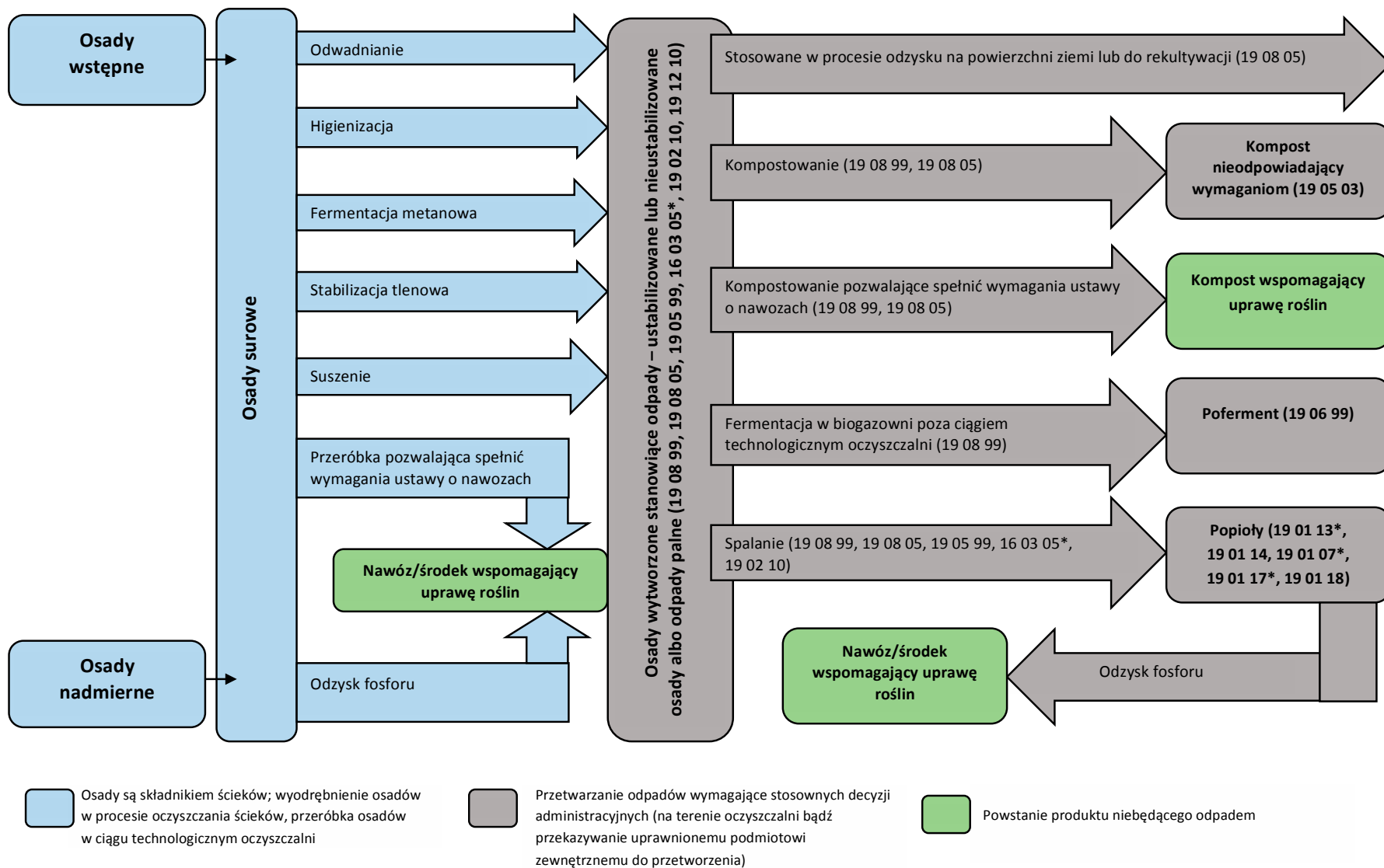
- niewłaściwe wyznaczenie obszarów i granic aglomeracji, poprzez ujęcie terenów o zbyt niskim poziomie zaludnienia,
- niewłaściwe zaplanowanie inwestycji, które nie przyniosły efektów związanych z wypełnieniem wymagań dyrektywy 91/271/EWG,
- niewłaściwe zaplanowanie długości sieci kanalizacyjnych, wynikające ze złego wyznaczenia granic aglomeracji,
- brak weryfikacji aglomeracji, w tym RLM aglomeracji,
- akty prawa miejscowego nie gwarantują zgodności z RLM aglomeracji,
- brak wystarczających działań ze strony samorządów w zakresie podłączenia odbiorców do nowo wybudowanej sieci kanalizacyjnej.

Mając na uwadze dotychczasowe tempo realizacji inwestycji, wydaje się, że założonych w traktacie akcesyjnym warunków najprawdopodobniej nie uda się dotrzymać w roku 2027, co z dużą pewnością będzie związane z kolejnymi sankcjami nakładanymi na Polskę przez Komisję Europejską. Należy zauważyć, że realizacja KPOŚK wiąże się z ideą gospodarki o obiegu zamkniętym. W nowych bądź modernizowanych obiektach powinny być wdrażane nowoczesne technologie oczyszczania ścieków i przeróbki osadów ściekowych. Niestety stan przeprowadzenia inwestycji w tym zakresie jest wyraźnie niski, ponieważ innowacyjne rozwiązania i technologie stosowane są tylko w nielicznych krajowych obiektach.

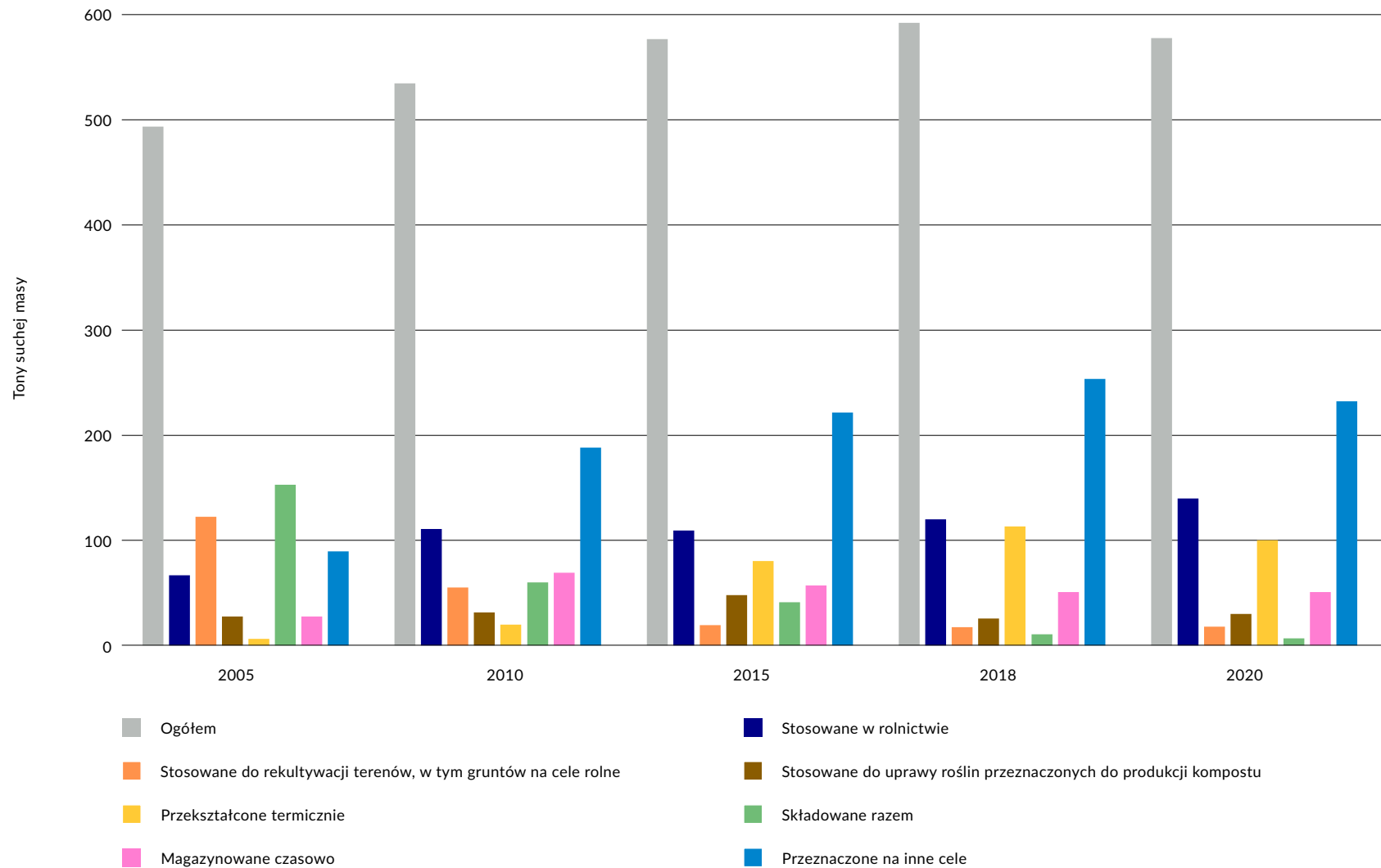
Ważnym aspektem jest również fakt, że od wielu lat obserwuje się wzrost ilości osadów ściekowych powstających w oczyszczalniach, co właśnie związane jest między innymi z realizacją KPOŚK oraz wzrostem ilości ścieków wynikającym z rozwoju cywilizacyjnego. Od roku 2000 do 2020 ilość osadów ściekowych wytworzonych w komunalnych oczyszczalniach ścieków wzrosła o ok. 58% [Rocznik Statystyczny... 2021]. Dyskusja nad właściwym unieszkodliwianiem osadów ściekowych trwa w zasadzie nieprzerwanie od wielu lat i nasila się wraz z rozwojem technologii oczyszczania ścieków i wymagań dotyczących metod ich ostatecznego zagospodarowania. Pomimo iż powstają coraz nowocześniejsze technologie i urządzenia przeróbki osadów, eksploatacyjni wciąż borykają się z jednym podstawowym pytaniem: co zrobić z osadami i czy są one odpadem, czy surowcem?

Ilość generowanych osadów wynosi jedynie ok. 1–3% objętości przepływających ścieków, lecz mimo to mogą one stanowić potencjalne zagrożenie dla środowiska w przypadku niewłaściwego ich zagospodarowania, zawierają bowiem m.in. metale ciężkie i organizmy chorobotwórcze. Z drugiej strony osady ściekowe mogą mieć praktyczne zastosowanie, gdyż stanowią bogate źródło substancji organicznej oraz pierwiastków biogennych. Osady ściekowe zawierają znaczne ilości nutrietów: fosforu 0,8–2,8% suchej masy, azotu 1,5–5% suchej masy, i z tego względu po ich ustabilizowaniu najczęściej wykorzystywane są do: celów rolniczych, nawożenia gleb i roślin jako cenne źródło azotu i fosforu, produkcji kompostu, a także do rekultywacji terenów zdegradowanych [Neczaj 2018]. Jak można zauważyć ich rolnicze czy przyrodnicze zagospodarowanie to element gospodarki cyrkularnej. Celem odzyskiwania komunalnych osadów ściekowych na powierzchni ziemi jest wykorzystanie cennych właściwości agronomicznych oraz potencjału nawozowego, tj. zawartej w nich materii organicznej oraz składników pokarmowych dla roślin, takich jak azot, fosfor oraz mikroelementy. Rolnicze wykorzystanie osadów ściekowych uregulowane jest szeregiem przepisów. Takie osady nie mogą być np. stosowane do uprawy roślin przeznaczonych do spożycia przez ludzi (np. warzyw, roślin jagodowych czy sadowniczych) [Dz. U. 2013 poz. 21]. Możliwe konfiguracje procesów przeróbki osadów w oczyszczalni ścieków oraz przetwarzania komunalnych osadów ściekowych jako odpadów przedstawiono na **rysunku 3-1**. Strukturę zagospodarowania osadów ściekowych w Polsce przedstawiono na **rysunkach 3-2** oraz **3-3**.

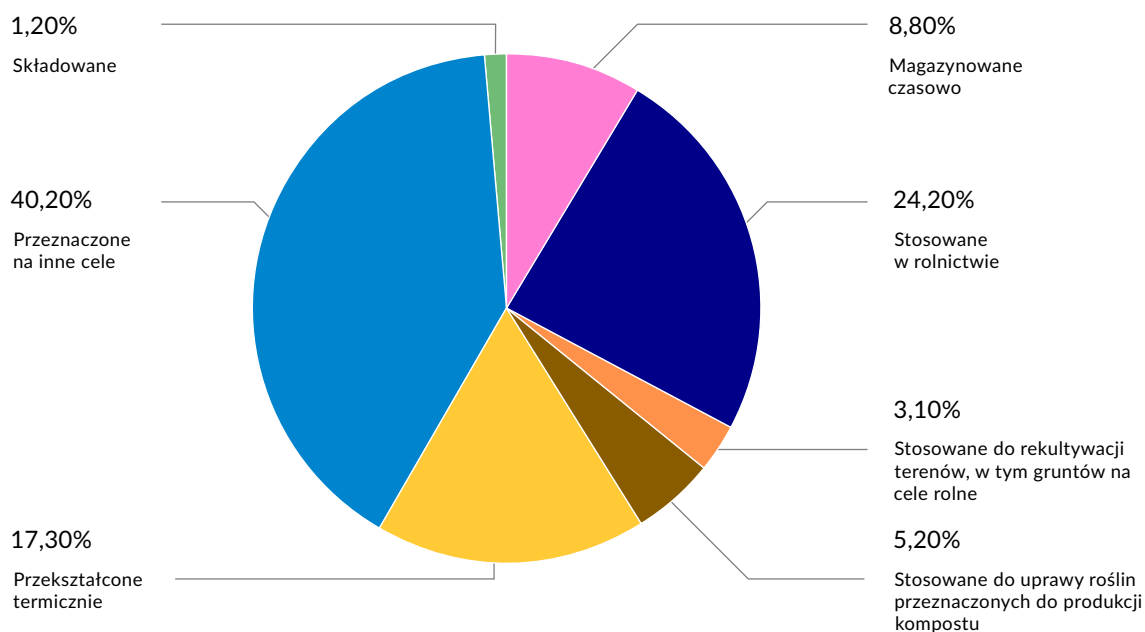
Ilość osadów ściekowych wytworzonych w 2020 r. w oczyszczalniach komunalnych wyniosła 568,8 tys. ton suchej masy i stanowiła 58% całkowitej masy osadów wytworzonych w danym roku [Rocznik Statystyczny... 2021]. Wzrost ten związany jest z rozbudową infrastruktury w zakresie odprowadzania i oczyszczania ścieków komunalnych realizowanej w ramach KPOŚK. Taka ilość osadów może stwarzać poważne problemy w ich racjonalnym zagospodarowaniu, tym bardziej, że składowanie nieprzetworzonych osadów ściekowych, które jeszcze do niedawna było popularną metodą ich zagospodarowania, od 1 stycznia 2016 roku jest zakazane. Na przestrzeni lat można zaobserwować wzrost udziału termicznych metod w zagospodarowaniu osadów ściekowych, co jest zgodne z założonymi kierunkami dla unieszkodliwiania osadów przyjętych w Strategii postępowania z komunalnymi osadami ściekowymi na lata 2019–2022 [Strategia... 2018]. W roku 2020 było to ok. 17,3% (98,6 tys. ton suchej masy) całkowitej ilości komunalnych osadów ściekowych. W świetle ograniczeń prawnych dla rolniczych i przyrodniczych metod zagospodarowania osadów ściekowych, metody termiczne powinny być traktowane priorytetowo. Zwłaszcza, że w tym zakresie Polska jest daleko w tyle za europejskimi osiągnięciami. Jak wskazano wcześniej, w naszym kraju co roku wytwarzane jest niemal 600 tys. ton suchej masy osadów, jednak funkcjonujące instalacje termicznego przekształcania osadów ściekowych dysponują przepustowością, która pozwala zagospodarować jedynie jedną czwartą masy powstających osadów. W **tabeli 3-1** przedstawiono krajowe instalacje przeznaczone do spalania osadów ściekowych [Strategia... 2018].



Rysunek 3-1. Schemat przeróbki osadów w oczyszczalni ścieków oraz procesów przetwarzania komunalnych osadów ściekowych jako odpadów (opracowanie własne na podstawie [Strategia... 2018])



Rysunek 3-2. Struktura zagospodarowania komunalnych osadów ściekowych w wybranych latach (opracowanie własne na podstawie [bdl.stat.gov.pl])



Rysunek 3-3. Struktura zagospodarowania komunalnych osadów ściekowych w roku 2020 (opracowanie własne na podstawie [Rocznik... 2021])

Tabela 3-1. Instalacje termicznej utylizacji osadów ściekowych

Lp.	Miasto i nazwa oczyszczalni	Wydajność [ton SM/rok]	Ogólna charakterystyka instalacji
1	Warszawa „Czajka”	62 200	Veolia Water, technologia fluidalna, 2 linie, podsuszanie (suszarka dyskowa)
2	Kraków „Płaszów”	23 000	Veolia Water, technologia fluidalna, 1 linia, podsuszanie (suszarka dyskowa)
3	Łódź „GOŚ ŁAM”	21 000	Veolia Water, technologia fluidalna, 2 linie, podsuszanie (suszarka dyskowa)
4	Gdańsk „Wschód”	14 000	Degremont, technologia fluidalna, podsuszanie (suszarka dyskowa)
5	Gdynia „Dębogórze”	9 000	Technologia fluidalna krajowej konstrukcji, suszarka bębnowa
6	Bydgoszcz „Fordon”	7 800	Hansol (Korea) technologia fluidalna, podsuszanie, suszarka dyskowa
7	Szczecin „Pomorzany”	6 000	Veolia Water (Biocom) technologia rusztowa, suszenie całkowite, suszarka taśmowa
8	Zielona Góra „Łącza”	6 400	VOMM, technologia rusztowa, suszenie całkowite, suszarka cienkowarstwowa
9	Kielce „Sitkówka”	6 200	Degremont, technologia fluidalna, podsuszanie, suszarka cienkowarstwowa
10	Olsztyn „Łyna”	3 200	VOMM, technologia rusztowa, suszenie całkowite (suszarka cienkowarstwowa)
11	Łomża	1 500	Huber, technologia rusztowa, suszenie całkowite (suszarka taśmowa)
	Razem:	160 300	

Opracowanie własne na podstawie [Strategia... 2018, Wielgosiński 2021]



Dla porównania, w innych krajach Unii Europejskiej termiczne procesy przekształcania osadów ściekowych mają dużo większy udział. Przykładowo tymi metodami przekształcanych jest niemal 90% osadów powstających w Belgii, 63% w Niemczech, 34% w Danii, 50% w Austrii czy ponad 90% w Holandii [Pietrzyk 2018, Pająk i in. 2020]. Ważnym aspektem jest również podkreślenie, że w świecie gospodarki o obiegu zamkniętym osady ściekowe powinny być jedynym substratem w procesie spalania, czyli powinny być poddawane monospalaniu. W praktyce jest to bowiem jedyna metoda spalania, która pozwala na dalszym etapie przeprowadzić odzysk fosforu z popiołów. Jest szczególnie efektywną metodą recyklingu osadów ściekowych i powinna być traktowana priorytetowo. Inną możliwością dalszego zagospodarowania pozostałości po spalaniu jest wykorzystanie w produkcji materiałów budowlanych jako np. składnik spoiwa w betonie [Smol i in. 2015].

Zanim osady ulegną ostatecznemu zagospodarowaniu muszą zostać poddane obróbce w celu ich unieszkodliwienia. Wydaje się, że podstawową opcją powinno być wykorzystanie ich potencjału energetycznego w procesie fermentacji metanowej realizowanej w zamkniętych komorach fermentacyjnych. Jednak wciąż w bardzo wielu krajowych obiektach prowadzona jest fermentacja psychrofilna w otwartych komorach fermentacyjnych, które po pierwsze stanowią źródło emisji gazów cieplarnianych i odorów do atmosfery, a po drugie nie wykorzystują możliwości odzysku energii [Gromiec 2016].

### 3.3. Gospodarka o obiegu zamkniętym jako siła napędowa rozwoju gospodarki wodno-ściekowej

Jak można zauważyć, rozwój sektora wodno-ściekowego kreowany jest niewątpliwie przez konieczność realizacji zobowiązań Polski wobec Unii Europejskiej. Drugim istotnym czynnikiem są aktualizacje prawodawstwa europejskiego i krajowego, a co za tym idzie konieczność dostosowania się do jego wymogów. W ostatnich latach pojawiają się również nowe idee dotyczące działalności szeroko pojętego sektora komunalnego i przemysłowego. Głoszą one, iż funkcjonowanie różnych gałęzi gospodarki narodowej ma się rozwijać w kierunku wykorzystania surowców i produktów w obiegu zamkniętym, minimalizując przy tym powstawanie odpadów. Konieczność realizacji założeń gospodarki cyrkulacyjnej wynika przede wszystkim z intensywnego rozwoju współczesnego świata. Stale rosnący konsumpcjonizm przy spadku dostępności cennych zasobów naturalnych powoduje postępującą degradację środowiska naturalnego. Na przestrzeni ostatnich lat forum europejskie zdało sobie sprawę, że intensywny rozwój gospodarczy, aby był zgodny z fundamentalną zasadą zrównoważonego rozwoju, nie może opierać się wyłącznie na rabunkowym wykorzystywaniu istniejących zasobów naturalnych. Obecnie na świecie podmioty gospodarek narodowych wciąż jeszcze w większości funkcjonują i rozwijają się na podstawie znanego od czasów rewolucji przemysłowej liniowego modelu ekonomicznego (**rysunek 3-4**) [Kulczycka i in. 2017, COM (2014) 398]. Model ten



Rysunek 3-4. Schemat koncepcyjny liniowego systemu ekonomicznego (opracowanie własne)

oparty jest na założeniu, że zasoby występują obficie, są dostępne, łatwo pozyskiwane i można je eksploatować niewielkim kosztem. Taki model można w języku potocznym opisać jako „weź jakiś substrat, wyprodukuj jakąś rzecz, użyj i potem wyrzuć, jeżeli ulegnie zużyciu lub zepsuciu”.

Głoszone w ostatnich latach idee gospodarki o obiegu zamkniętym kreują zupełnie odwrotną wizję rozwoju współczesnych gospodarek. W tej koncepcji podmioty gospodarcze mają realizować taki model produkcji i konsumpcji, który polega na możliwie jak najdłuższym zachowaniu wartości dodanej produktów i ograniczeniu powstawania odpadów do minimum. W przypadku gdy cykl życia produktu dobiegnie końca, poddawany jest on recyklingowi i odzyskowi, co pozwala na jego ponowne (czasami wielokrotne) wykorzystanie w sposób produktywny, dzięki czemu powstaje kolejna wartość dodana [COM (2014) 398]. Taki model ekonomiczny potocznie można opisać jako „weź jakiś substrat, podziel się nim, wyprodukuj jakąś rzecz, pożycz ją, odnow, ponownie użyj, gdy ulegnie zużyciu, odzyskaj z niej cenne surowce i rozpocznij ponownie cykl życia produktu. Działania te powtarzaj tak długo, jak to jest tylko możliwe”.

Kolejne nowelizacje prawa będą implementowały założenia gospodarki obiegu zamkniętego, czyniąc je obligatoryjnymi. W tej sytuacji nieuchronne wydaje się nadejście kolejnej rewolucji w sektorze komunalnym, która naświetli kierunek przyszłych działań inwestycyjnych. Można zaryzykować twierdzenie, że taka rewolucja już się rozpoczęła, a jej motorem napędowym są wspomniane powyżej idee gospodarki o obiegu zamkniętym. Na przestrzeni ostatnich lat można wyróżnić kilka takich wydarzeń, które podejmowane były na forum Unii Europejskiej. Omówiono je poniżej.

#### 1) Komunikat nr 390, 2014 rok – Ku gospodarce o obiegu zamkniętym: program „zero odpadów dla Europy” [COM (2014) 398 final]

Koncepcja gospodarki cyrkularnej (rysunek 3-5) została przedstawiona w roku 2014 przez Komisję Europejską w komunikacie pt. Ku gospodarce o obiegu zamkniętym: program „zero odpadów” dla Europy do Parlamentu Europejskiego, Rady, Europejskiego Komitetu Społeczno-Gospodarczego i Komitetu Regionów. Wskazano konieczność modernizacji polityki dotyczącej odpadów w kierunku wykorzystania ich w charakterze surowców, dzięki czemu możliwe będzie stopniowe przechodzenie z liniowego systemu ekonomicznego do systemu cyrkularnego. Podkreślono, że efektywne wdrożenie GOZ musi zaczynać się już na etapie wydobycia surowców i opierać się na takim projektowaniu procesów produkcji, produktów oraz usług, by możliwe było wydłużenie okresu ich użytkowania, zapewniając możliwość naprawy, modernizacji, przerobienia oraz ostatecznie recyklingu, zamiast ich wyrzucania.

Argumenty przemawiające za wprowadzeniem gospodarki cyrkulacyjnej to: ograniczona dostępność niektórych surowców, uzależnienie gospodarki europejskiej od importu surowców (wysokie ceny, zmienność rynku, niepewna sytuacja w wybranych państwach), malejąca konkurencyjność gospodarki europejskiej w stosunku do gospodarki światowej.

W dokumencie przedstawiono wykres koncepcyjny omawianej gospodarki. W modelu tym wyróżniono poszczególne etapy życia surowców, produktów i odpadów. Każdy z nich stwarza możliwości zmniejszenia kosztów i uzależnienia od zasobów naturalnych, stymulując tym samym wzrost gospodarczy i ograniczając ilość powstających odpadów oraz szkodliwe emisje do środowiska naturalnego. Wszystkie etapy przedstawione w modelu są ze sobą wzajemnie powiązane, co oznacza że dany

surowiec może być wykorzystywany w systemie kaskadowym. Wskazano, że sektory przemysłu mogą wymieniać się produktami ubocznymi, które następnie przerabiają, odnawiają i ponownie wykorzystują do własnych potrzeb. Ma to zminimalizować „wyciek” zasobów z obiegu, zapewniając optymalne funkcjonowanie systemu. Wskazano również, że siłą napędową gospodarki o obiegu zamkniętym będzie wdrażanie i promowanie innowacji technologicznych.

## 2) Komunikat nr 614, 2015 rok – Plan działań Unii Europejskiej dotyczący gospodarki o obiegu zamkniętym [COM (2015) 614 final]

Drugi istotny dokument – Plan działań Unii Europejskiej dotyczący gospodarki o obiegu zamkniętym został przedstawiony 2 grudnia 2015 roku. W treści wskazano konkretne działania wspierające przejście na gospodarkę o obiegu zamkniętym. Podkreślono, iż realizacja tych zadań uwarunkowana jest stałym i dogłębnym zaangażowaniem państw członkowskich (na każdym szczeblu administracji regionów i miast), przedsiębiorstw, obywateli i wszystkich zainteresowanych stron. Istotne jest utrzymanie wartości produktów, materiałów i zasobów tak długo, jak tylko możliwe, a wytwarzanie odpadów ograniczone do minimum stanowi istotny wkład w wysiłki UE zmierzające do stworzenia zrównoważonej, niskoemisyjnej, zasobooszczędnej i konkurencyjnej na tle światowym gospodarki europejskiej. Wskazano obszary priorytetowe, w których należy dokonać zmian. Zaliczono do nich przemysł tworzyw sztucznych, odpadów spożywczych, surowców krytycznych, odpadów budowlanych, biomasy i bioproduktów. Poruszono również tematykę zużytej wody i odpadów organicznych, wskazując na recykling składników pokarmowych w nich zawartych i wykorzystanie ich w celach rolniczych, co ograniczy stosowanie nawozów mineralnych wobec ograniczonych zasobów fosforów.



Rysunek 3-5. Schemat koncepcyjny gospodarki o obiegu zamkniętym [COM (2014) 398]

### 3) Komunikat nr 640, 2019 rok – Europejski Zielony Ład [COM (2019)/640 final]

Prawdziwym przełomem w obszarze GOZ było jednak pojawienie się w 2019 r. dokumentu Europejski Zielony Ład. Stanowi on podsumowanie założeń, wytycznych i kierunków głoszonych we wcześniejszych komunikatach, a zarazem podstawę kolejnych uregulowań i rozwiązań zaplanowanych do wdrożenia do roku 2023. Zapisano w nim, że do 2050 roku unijna gospodarka będzie zasobooszczędna i konkurencyjna, przy jednoczesnej zerowej emisyjności gazów cieplarnianych. Obszary, nad którymi skoncentrowany jest Europejski Zielony Ład to:

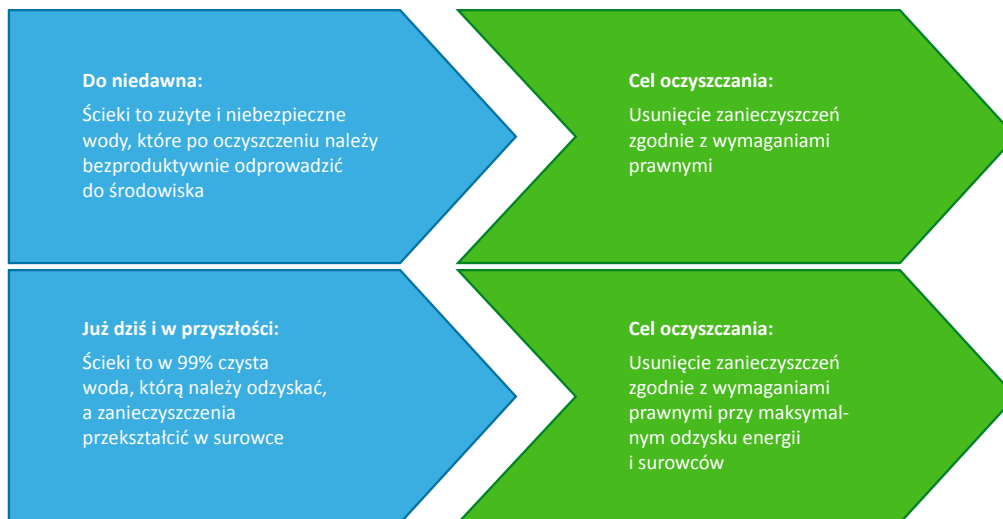
- dostarczenie czystej, przystępnej cenowo i bezpiecznej energii;
- zmobilizowanie sektora przemysłu do działań na rzecz czystej gospodarki o obiegu zamkniętym;
- budowanie i remontowanie w sposób oszczędzający energię oraz zasoby;
- ochrona wraz z odbudową ekosystemów i bioróżnorodności;
- sprawiedliwy, zdrowy i przyjazny środowisku system żywnościowy;
- przyspieszenie przejścia na zrównoważoną i inteligentną mobilność;
- wspieranie badań naukowych i pobudzanie innowacji.

### 4) Komunikat nr 98, 2020 – Nowy plan działań Unii Europejskiej dotyczący gospodarki o obiegu zamkniętym na rzecz czystszej i bardziej konkurencyjnej Europy [COM (2020) 98 final]

Nowy plan działań Unii Europejskiej dotyczący gospodarki o obiegu zamkniętym na rzecz czystszej i bardziej konkurencyjnej Europy został ogłoszony 11 marca 2020 roku. Już w samym wprowadzeniu podano, iż światowa konsumpcja w 2050 roku będzie trzykrotnie przekraczała dostępne zasoby na Ziemi. Do tego czasu nastąpi wzrost wytwarzanych odpadów o ok. 70%. Plan ten stanowi program zrzeszający wszystkie zainteresowane strony, tj. podmioty gospodarcze, konsumentów, obywateli czy organizacje społeczne w celu przyspieszenia zmiany transformacyjnej wymaganej przez Europejski Zielony Ład. Głównym kierunkiem ma być podejmowanie działań w zakresie gospodarki o obiegu zamkniętym, tak aby zapewnić jak najdłuższe wykorzystywanie w unijnej gospodarce raz użytych zasobów.

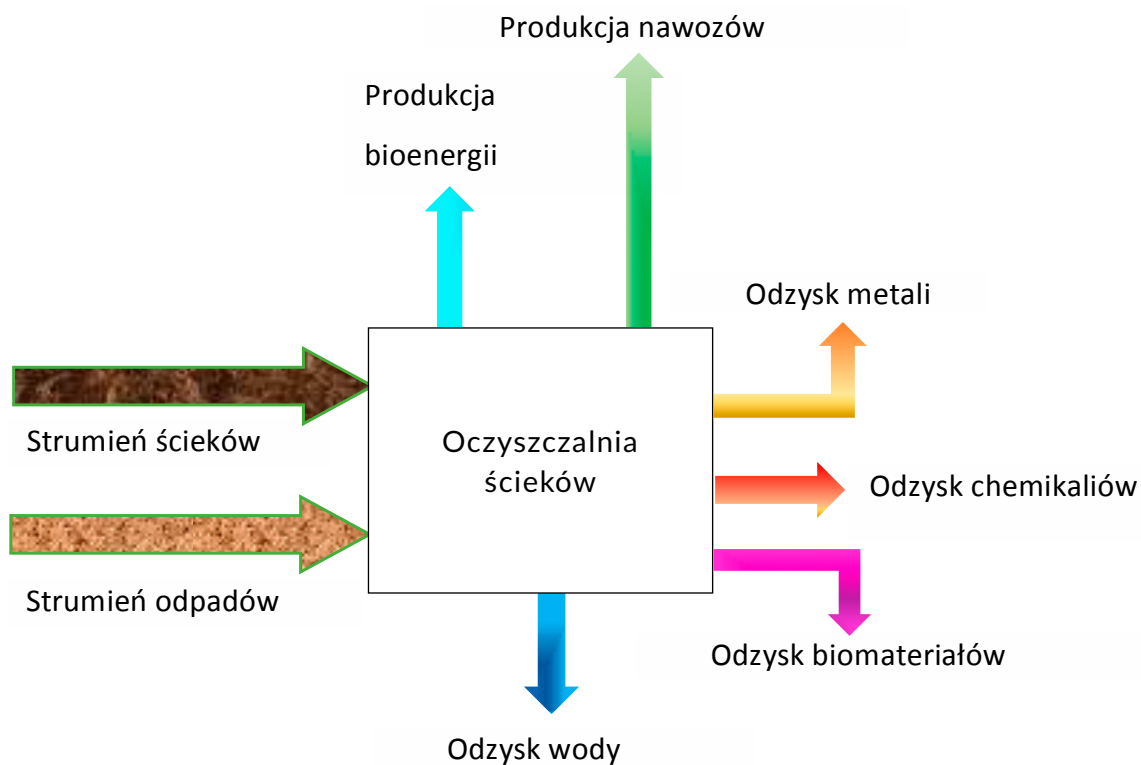
### 5) Paradygmat NEW [Kacprzak i in. 2021, Gromiec 2016]

Analizując założenia gospodarki o obiegu zamkniętym okazuje się, że z powodzeniem mogą być one implementowane w oczyszczalniach ścieków, w których po pierwsze można optymalizować zużycie energii elektrycznej oraz intensyfikować jej produkcję, a po drugie realizować odzysk lub produkcję ze ścieków i osadów ważnych surowców, tj. azotu, fosforu, bioplastiku, wody czy wodoru. Prekursorem tych założeń były Stany Zjednoczone, które w roku 2012 przedstawiły Paradygmat NEW – Nutrients-Energy-Water. Założenia tego dokumentu są zbieżne z planami głoszonymi przez UE, jednak skupiają się tylko i wyłącznie na sektorze wodno-ściekowym. Przestankami jego ogłoszenia były zachodzące zmiany klimatyczne i demograficzne, rosnące zanieczyszczenie wód (powodujące między innymi przyspieszenie procesu eutrofizacji) oraz konieczność zapewnienia zrównoważonego rozwoju. Paradygmat ten wprowadza zupełnie nowe spojrzenie na działalność oczyszczalni ścieków. Powoduje, że oczyszczalnie, działające według tradycyjnego schematu jakim jest oczyszczanie ścieków do poziomu wymaganego przepisami prawa europejskiego, zaczynają przekształcać się w zakłady odzyskujące zasoby, w tym produkujące biowodór, materiały pochodzenia biologicznego,



Rysunek 3-6. Porównanie starego i nowego paradygmatu oczyszczania ścieków (opracowanie własne)

substancje biogenne (azot i fosfor) oraz wodę ze ścieków (rysunek 3-6 i rysunek 3-7). W ten sposób celem ich funkcjonowania staje się nie tylko konieczność dotrzymywania norm prawnych, lecz także ogólnie rozumiana poprawa stanu środowiska naturalnego poprzez odciążenie jego nadmiernej eksploatacji. Zamierzeniem takiej oczyszczalni jest (a w zasadzie będzie) symbioza z sektorem przemysłowym w celu wymiany surowców, produktów czy odpadów i ponownego ich wykorzystania. Osiągnięciem ma być również generowanie zysków, uniezależnienie się od zewnętrznych źródeł energii oraz oczywiście korzyści społeczne.



Rysunek 3-7. Oczyszczalnia ścieków jako źródło surowców (opracowanie własne)

### 3.4. Oczyszczalnia ścieków w przyszłości wobec wyzwań gospodarki o obiegu zamkniętym

Powszechnie przyjęta w gospodarce realizacja zasady zrównoważonego rozwoju oraz ukierunkowanie na cyrkularne wykorzystanie zasobów spowodowały zmianę podejścia do rozwiązań w zakresie oczyszczania ścieków komunalnych. Obecnie obserwuje się zmianę sposobu postrzegania oczyszczalni ścieków, tj. z obiektu, który usuwa zanieczyszczenia ze ścieków na nowoczesny obiekt, który odzyskuje zasoby i surowce, a ścieki nie są traktowane jako strumień odpadów, lecz jako strumień tych zasobów. Ustanawiając zatem cyrkulacyjny ich przepływ, sektor wodno-ściekowy będzie przyczyniał się do realizacji krajowych i europejskich celów zrównoważonego rozwoju [Białozor-Karło i in. 2018, Gromiec 2015].

Transformacja sektora wodno-ściekowego w kierunku GOZ, podobnie jak w przypadku innych sektorów gospodarki narodowej, opiera się na racjonalnym gospodarowaniu surowcami, produktami i zasobami, a także zrównoważonym zastosowaniu odpadów. Założenia te najkrócej można scharakteryzować poprzez anglojęzyczne pojęcie „4R – reduce – reuse – recycle – recovery” [Smol i in. 2021, Vu i in. 2022], czyli minimalizacja, ponowne użycie, recykling oraz odzysk. Oczyszczalnia ścieków jako element składowy sektora wodno-ściekowego posiada bardzo szeroki wachlarz możliwości realizacji powyższych założeń.

Przyszłościowa koncepcja oczyszczalni ścieków zakłada silny nacisk na scentralizowanie obiektu, który stanie się punktem odbioru różnych zasobów – wody, energii, składników odżywczych i innych produktów. Projektowanie oczyszczalni ścieków w taki sposób może przyczynić się do transformacji gospodarki w kierunku obiegu zamkniętego. Obecnie stosowane praktyki są przestarzałe, część z nich oparta jest jeszcze na pomysłach oczyszczania ustanowionych na początku XX wieku, dlatego niezwykle istotne jest oddziaływanie skłaniające do wdrażania nowoczesnych i energooszczędnych technologii, które zapewnią wyższy niż obecnie stopień oczyszczania ścieków, przy równoczesnym obniżeniu kosztów eksploatacyjnych.

Jej priorytetem będzie dalsze usuwanie ze ścieków zanieczyszczeń w celu ochrony zasobów wodnych i środowiska naturalnego. Jednakże wybór procesów technologicznych, przy pomocy których będzie to realizowane, musi być również ukierunkowany na możliwość maksymalizacji odzysku surowców oraz energii. Drugim celem jest kooperacja/symbioza z zewnętrznymi podmiotami gospodarczymi w zakresie dostaw odpadów oraz odbioru wytworzonych surowców. W przyszłości oczyszczalnia ścieków to obiekt, który:

- realizuje założenia gospodarki o obiegu zamkniętym;
- realizuje odzysk energii ze ścieków i osadów ściekowych;
- realizuje odzysk wody ze ścieków, dzięki wykorzystaniu wysokoefektywnych i nowoczesnych metod oczyszczania ścieków;
- realizuje odzysk surowców ze ścieków, tj. odzyskuje związki organiczne, azot i fosfor, przyczyniając się do zmniejszenia ich produkcji z zasobów nieodnawialnych;
- realizuje symbiozę przemysłową, czyli odbiera odpady i przekazuje odzyskane surowce do odbiorców zewnętrznych;
- osiągnął samowystarczalność energetyczną, czyli z odpadów produkuje energię elektryczną i ciepłą, którymi zaspokaja własne potrzeby, a ich nadmiar przekazuje do zewnętrznych odbiorców.

Najważniejsze kierunki rozwoju technologii oczyszczania ścieków koncentrują się na:

- wdrażaniu wysokoefektywnych metod usuwania azotu;
- zastąpieniu klasycznego osadu czynnego osadem granulowanym;
- zastąpieniu konwencjonalnego układu biologicznego typu „KOCz – osadnik wtórny” poprzez reaktor membranowy MBR;
- wprowadzaniu inteligentnych, zawansowanych i automatycznych systemów regulacji oraz sterowania układów technologicznych i procesów w oczyszczalni ścieków.

### 3.5. Podsumowanie

W Polsce rozwój sektora ściekowego kreowany jest głównie poprzez wymogi realizacji zobowiązań wynikających z traktatu akcesyjnego. Aktualny stan jest niezadowolający, co przekłada się na groźbę nałożenia sankcji przez Komisję Europejską. Pożądanym jest, by KPOŚK był realizowany również w zgodzie z ideą gospodarki o obiegu zamkniętym, co z kolei znaczy, by w nowych lub modernizowanych obiektach były wdrażane nowoczesne metody oczyszczania ścieków i przeróbki osadów ściekowych. Powinny one zapewnić wysoki stopień oczyszczania przy obniżeniu kosztów eksploatacyjnych oraz odzysk substancji ze ścieków i osadów ściekowych. Każda taka inwestycja, niezależnie czy będzie dotyczyła fragmentu instalacji, czy całej oczyszczalni, sprawi, że taki obiekt zacznie przyczyniać się do realizacji GOZ i będzie postrzegany bardziej jako zakład odzysku energii i/lub surowców. Przyjmując krytycznie, że stan gospodarki wodno-ściekowej w kraju jest niezadowolający, m.in. z powodu znacznych opóźnień w realizacji KPOŚK, nie należy spodziewać się, by gwałtowna zmiana poglądów w tej kwestii nastąpiła w ciągu najbliższych lat.

## Literatura:

Alleman E. J., Prakasam T.B.S. 1983. Reflections on Seven Decades of Activated Sludge History. *Journal Water Pollution Control Federation*, 55 (5), s. 436–443.

aqua-equip.com. <<https://www.aqua-equip.com/history-of-wastewater-treatment-from-hippocratic-sleeve-to-activated-sludge/>> [dostęp 22.02.2022].

bdl.stat.gov.pl. Kategoria: stan i ochrona środowiska za 2020 r. <<https://bdl.stat.gov.pl/bdl/dane/podgrup/temat>> [dostęp 15.04.2022].

Białozor-Karło A. 2018. Oczyszczania ścieków komunalnych elementem gospodarki obiegu zamkniętego. *Gaz, Woda i Technika Sanitarna*, 5, s. 178–180.

Błaszczyk M. 2019. *Biologiczne aspekty oczyszczania ścieków*. Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa, Wydanie I.

COM (2014) 398 final. Komunikat Komisji do Parlamentu Europejskiego, Rady, Europejskiego Komitetu Ekonomiczno-Społecznego i Komitetu Regionów. Ku gospodarce o obiegu zamkniętym: program „zero odpadów” dla Europy. Bruksela, dnia 2.07.2014.

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

COM (2019) 640 final. Komunikat Komisji do Parlamentu Europejskiego, Rady, Europejskiego Komitetu Ekonomiczno-Społecznego i Komitetu Regionów. Europejski Zielony Ład. Bruksela, dnia 11.12.2019.

COM (2020) 98 final. Komunikat Komisji do Parlamentu Europejskiego, Rady, Europejskiego Komitetu Ekonomiczno-Społecznego i Komitetu Regionów. Nowy plan działań UE dotyczący gospodarki o obiegu zamkniętym na rzecz czystszej i bardziej konkurencyjnej Europy. Bruksela, dnia 11.03.2020 r.

Dz. U. 2013. Poz. 21. Ustawa z dnia 14 grudnia 2012 r. o odpadach.

Ehsan B.E., Asadi F., Mckey G., Bazargan A. 2019. *The modified Bardenpho Process*. Handbook of Environmental Materials Management, Springer, Cham. s. 1–43.

elmhurst.org. The Genesis and evolution of activated sludge technology. <<https://www.elmhurst.org/DocumentCenter/View/301/Activated-Sludge-Evolution?bidId=>> [dostęp 08.02.2022].

Gest H. 2004. The discovery of microorganisms by Robert Hooke and Antoni van Leeuwenhoek, Fellows of The Royal Society. *Notes and Records of the Royal Society*, 58 (2), s. 187–201.

Graczyk M. 1988. Rozwój technologii oczyszczania ścieków. Zamierzenia i rzeczywistość. *Wyższa Szkoła Inżynierska im. J. Gagarina w Zielonej Górze. Zeszyty naukowe*, 84, s. 131–142.

Gromiec M. 2015. Nowa rola systemów wodno-ściekowych: produkcja zasobów i energii. *Kierunek Wod-Kan*, 4, s. 76–81.

Gromiec M. 2016. Nowy paradygmat „Nutriety-Energia-Woda” dla przedsiębiorstw wodociągowo-kanalizacyjnych. Zaopatrzenie w wodę, jakość i ochrona wód. Red. Dymaczewski Z., Walkowiak J., Urbaniak A. Wyd. PZITS Poznań, s. 69–80.

Gromiec M. 2019. Odkrycie i rozwój metody osadu czynnego do oczyszczania ścieków – 105 rocznica. *Technologia wody*, 63, s. 30–34.

Gromiec M. 2021. *Ochrona zasobów wodnych przed zanieczyszczeniem. Wybrane problemy i rozwiązania*. Wydawnictwo Polskiej Akademii Nauk, Monografie 172, Warszawa.

Hermanowicz S.W. 2011. *Membrane Bioreactors: Past, Present and Future?* UC Berkeley: Water Resources Collections and Archives. [escholarship.org. <https://escholarship.org/uc/item/9293s8zw#main>](https://escholarship.org/uc/item/9293s8zw#main) [dostęp 08/02/2022].

iwa100as.org. <<http://www.iwa100as.org/history.php>> [dostęp 25.05.2022].

Jenkins D., Wanner J. 2014. *Activated Sludge – 100 Years and Countig*. IWA Publishing, London.

Jędrzejewski C. 2016. Gospodarka komunalnymi osadami ściekowymi w województwie pomorskim: ogólne rekomendacje oraz dobre praktyki w zakresie metod termicznych. *Seminarium Gospodarka osadami ściekowymi w województwie pomorskim – analiza i proponowane kierunki rozwoju*. Gdańsk, 17 czerwca 2016.

Kacprzak M.J., Kupich I. 2021. The specificities of the circular economy (CE) in the municipal wastewater



- and sewage sludge sector – local circumstances in Poland. *Clean Techn Environ Policy*.
- Klaczyński E. 2011. Projektowanie i eksploatacja oczyszczalni ścieków – historia. *Wodociągi i kanalizacja*, 12 s. 32–35.
- KPOŚK 2022. VI aktualizacja Krajowego Programu Oczyszczalni Ścieków Komunalnych. [wody.gov.pl](http://wody.gov.pl). <<https://www.gov.pl/attachment/a7096f8e-5961-4719-8c03-4b36cf61f56a>> [dostęp 19.05.2022].
- Kulczycka J., Głuc K. 2017. *W kierunku gospodarki o obiegu zamkniętym – Perspektywa miast*. Wydawnictwo MSAP UEK, Kraków.
- Kutera J. 1978. *Wykorzystanie ścieków w rolnictwie*. Państwowe Wydawnictwo Rolnicze i Leśne, Warszawa.
- Liwerska-Bizukojć E. 2014. *Modelowanie procesów oczyszczania ścieków metodą osadu czynnego*. Wydawnictwo Seidel-Przywecki, wydanie I.
- Mańczak M. *Oczyszczanie ścieków. Wykłady dla studentów Wydziału Inżynierii Środowiska Politechniki Wrocławskiej*.
- McLean C.R. 2009. *Honduras Wastewater Treatment: Chemically Enhanced Primary Treatment and Sustainable Secondary Treatment Technologies for Use with Imhoff Tanks*. B.S. Civil Engineering Environmental Engineering Concentration California State Polytechnic University – Pomona.
- Neczaj E. 2018. *Osady ściekowe jako źródło nutrietów, metali ciężkich i innych substancji do odzysku*. ietu.pl. <[https://ietu.pl/wp/content/uploads/2018/06/Prezentacja\\_E\\_Neczaj\\_Osady\\_sciekowe\\_Jako\\_zrodlo\\_nutrientow\\_www.pdf](https://ietu.pl/wp/content/uploads/2018/06/Prezentacja_E_Neczaj_Osady_sciekowe_Jako_zrodlo_nutrientow_www.pdf)> [dostęp 08/02/2022].
- Pająk T., Bień J. 2020. *Rola termicznego przekształcania komunalnych osadów ściekowych w strategii rozwoju gospodarki osadami ściekowymi na przykładzie Niemiec. Monografie nr 166. Ocena gospodarki ściekowo-osadowej w Polsce*. Wydawnictwo Polskiej Akademii Nauk, Lublin.
- Pietrzyk J. 2018. *Analiza możliwości wykorzystania odpadów z termicznego przekształcania komunalnych osadów ściekowych*. Rozprawa doktorska, AGH Kraków. [winntbg.bg.agh.edu.pl](https://winntbg.bg.agh.edu.pl). <<https://winntbg.bg.agh.edu.pl/rozprawy2/11428/full11428.pdf>> [dostęp 08.02.2022].
- Podedworna J., Piechna P. 2017. *Tlenowy granulowany osad czynny. Koncepcje mechanizmów formowania, właściwości i wymagania technologiczne*. Wydawnictwo Seidel-Przywecki, Wydanie I.
- Rocznik Statystyczny 2021. *Rocznik Statystyczny Ochrona Środowiska 2021. Analizy Statystyczne GUS*, Warszawa.
- Salehi, S., Cheng, K. Y., Heitz, A., Ginige, M. P. 2018. Re-visiting the Phostrip process to recover phosphorus from municipal wastewater. *Chemical Engineering Journal*, 343, s. 390–398.
- Smol M., Kulczycka J., Henclik A., Gorazda K., Wzorek Z. 2015. *Możliwości zastosowania odpadów po termicznym przekształceniu osadów ściekowych w materiałach budowlanych*. eko-dok.pl. <<http://www.eko-dok.pl/2015/129.pdf>> [dostęp 08.02.2022].
- Smol M., Szołdrowska D. 2021. *Model gospodarki o obiegu zamkniętym (GOZ) w gospodarce wodno-ściekowej w Polsce. Strategie Wdrażania Zielonego Ładu – Część 1*, s. 6–19.
- Strategia... 2018. *Strategia postępowania z komunalnymi osadami ściekowymi na lata 2019-2022*. Ministerstwo Środowiska, Warszawa 2018.
- Switzenbaum M. 2018. *The Beginning of Biological Phosphorus Removal*. *Water Environment Research*, 91, 4 s. 364.
- Trojanowska-Olichwer A. 2016. *Wstępna ocena ekotoksykologiczna gleb na obszarze pól irygacyjnych we Wrocławiu*. *Przegląd Geologiczny*, 64 nr 9, s. 719–725.
- Wielgosiński G. 2021. *Prace naprawcze w oczyszczalni „Czajka”*. 15. Konferencja Metody zagospodarowania osadów ściekowych, 28–30 września 2021 r., Kołobrzeg.
- Vu T.M., Nguyen N L., Zdarta J., Mohammed A.H.J., Pathak N., Nghiem D.L. 2022. *Wastewater to R3 – resource recovery, recycling, and reuse efficiency in urban wastewater treatment plants*. *Clean Energy and Resource Recovery. Wastewater treatment plants as biorefineries*. Elsevier, Netherlands.

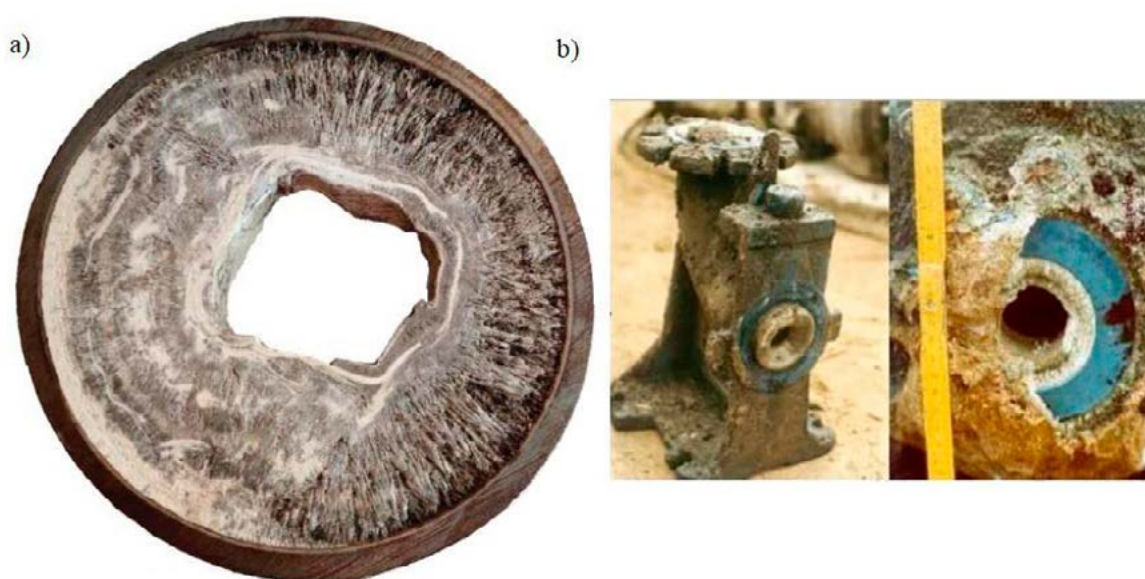
## 4. Odzysk fosforu

### 4.1. Wprowadzenie

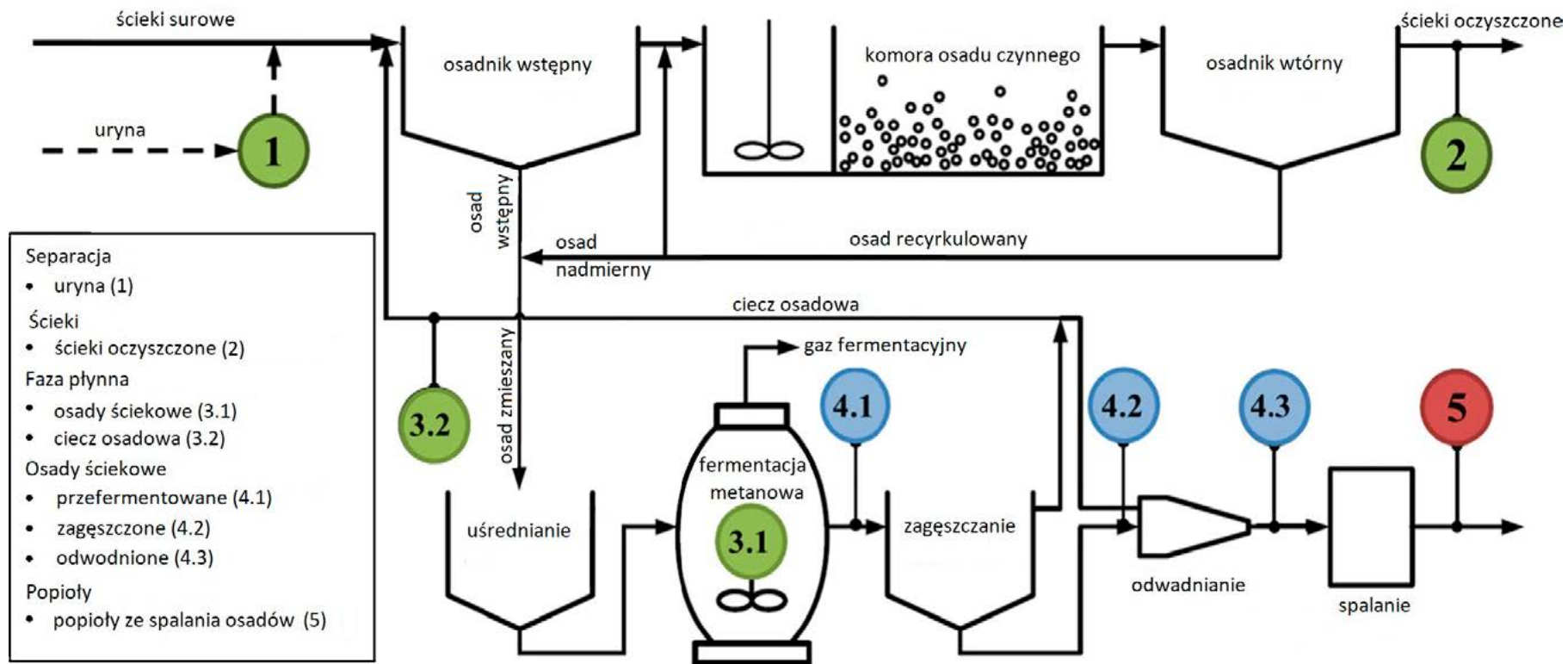
Fosfor w ściekach może mieć różne pochodzenie. Podstawowy ładunek stanowią polifosforany, m.in. z uwagi na ich duże stężenie w proszkach do prania i detergentach. Kolejnym źródłem są oczywiście funkcje fizjologiczne człowieka. Do zwiększenia stężenia fosforu w ściekach komunalnych przyczyniają się również różne gałęzie przemysłu, np. chemicznego czy nawozowego.

Usuwanie fosforu w oczyszczalni ścieków realizuje się na dwa sposoby. Pierwszy z nich, metoda chemiczna, wykorzystuje związki glinowe lub żelazowe, w celu przekształcenia jonów fosforanowych do nierozpuszczonych soli i strącenia ich w formie osadu. Drugi sposób polega na prowadzeniu wzmożonej biologicznej defosfatacji i wbudowaniu rozpuszczonych form fosforu do biomasy osadu czynnego. Strąceniu czy wiązaniu biologicznemu ulega oczywiście jeszcze szereg innych substancji znajdujących się w ściekach, np. związki azotu, magnezu, potasu itd. Powstające osady ściekowe, wstępne, pochodzenia chemicznego czy biologicznego, poddawane są następnie standardowej procedurze ich przeróbki, która najczęściej polega na ich zagęszczeniu, stabilizacji, odwodnieniu i końcowym zagospodarowaniu [Levlin i in. 2002, Dymaczewski 2011].

Powszechnym problemem eksploatacji linii osadowych, który dotyczy zwłaszcza oczyszczalni stosujących beztlenową stabilizację osadów ściekowych, jest ponowne wytrącanie się związków w nich zanieczyszczeń i krystalizacja w układach technologicznych (**rysunek 4-1**).



Rysunek 4-1. a) Struwit w przewodach technologicznych [Forstner 2015], b) Struwit w układzie pompowym [Nieminen 2010]



Rysunek 4-2. Możliwe miejsca odzysku fosforu w komunalnych oczyszczalniach ścieków (opracowanie własne na podstawie [Egle i in. 2015])

Jedną z takich substancji jest fosforan amonowo-magnezowy ( $MgNH_4PO_4 \cdot 6H_2O$ ) zwany powszechnie struwitem. Samoczynne wytrącanie się struwitu stanowi poważny problem dla eksploatorów oczyszczalni ścieków. Osady te pojawiają się w pompach, rurociągach doprowadzających osady ściekowe do procesu odwadniania, prasach, wirówkach odwadniających czy rurociągach odprowadzających wody nadosadowe po tych procesach. Jego twarda i trudna do usunięcia struktura powoduje uszkodzenia mechaniczne urządzeń bądź zmniejszenie przekroju przewodów technologicznych, a w skrajnych przypadkach nawet ich niedrożność lub pęknięcie.

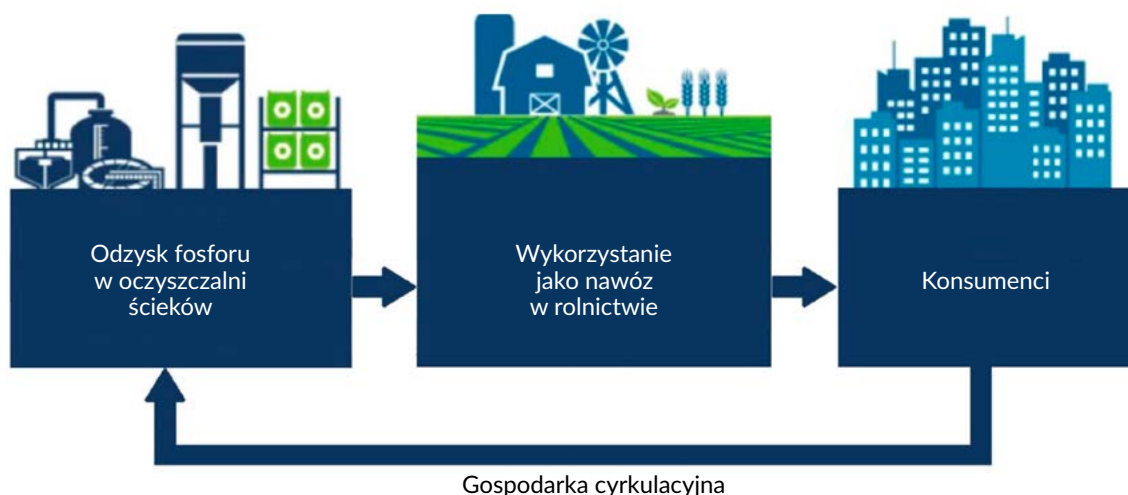
Czynnikami decydującymi o potencjale wytrącania się struwitu są stężenia jonów magnezowych, amonowych i fosforanowych występujące powyżej punktu nasycenia oraz pH roztworu. Ponieważ jest to reakcja chemiczna, może ona być przeprowadzona w sposób zamierzony i kontrolowany w wybranych miejscach procesu technologicznego w oczyszczalni ścieków [Wąs i in. 2019].

Pozyskiwanie fosforu można realizować na różnych etapach procesu technologicznego. W zależności od wybranego wariantu, odmienny jest również potencjał odzysku. Surowiec do odzysku fosforu stanowią nieoczyszczone ścieki, osady ściekowe, ciecze osadowe z odwadniania osadów, ciecze nadosadowe z wydzielonych komór fermentacyjnych czy także popioły powstające w procesie spalania osadów ściekowych [Konieczka i in. 2017]. Według Egle i in. [Egle i in. 2015] największym potencjałem odzysku fosforu odznaczają się popioły pozostałe po monospalaniu osadów oraz osady zagęszczone i odwodnione (do 90% odzysku). Z fazy wodnej osadów i odcieków osiąga się do 30-50% odzysku. Najmniejszą możliwością stwarzają oczyszczone ścieki i te technologie są bardzo rzadko stosowane [Kasprzyk i in. 2017]. Potencjalne miejsca odzysku fosforu w komunalnych oczyszczalniach ścieków zilustrowano na **rysunku 4-2**.

Najprostszy sposób recyklingu fosforu to wykorzystywanie ustabilizowanych i odwodnionych osadów ściekowych jako nawozu na powierzchniach gruntów rolnych. Polska ustawa o odpadach dopuszcza stosowanie komunalnych osadów ściekowych do uprawy roślin przeznaczonych do produkcji kompostu oraz innych nieprzeznaczonych do spożycia oraz do produkcji pasz. Osady te muszą spełniać szereg określonych wymagań pod kątem jakości sanitarnej i zawartości metali ciężkich. Zwykle oznacza to, że należy poddawać je dodatkowej obróbce, lub że w ogóle nie będzie możliwe ich wykorzystanie w wyżej wymienionych celach. Wzrost ilości powstających osadów ściekowych oraz jednoczesne zaostrzenie wymagań prawnych dopuszczających ich rolnicze bądź przyrodnicze wykorzystanie powoduje, że problem gospodarowania nimi staje się coraz pilniejszy i trudniejszy do rozwiązania. Niektóre kraje, takie jak np. Belgia wprowadzają bardzo restrykcyjne limity stężenia metali ciężkich oraz zawartości pasożytów w osadach ściekowych [Czarnota i in. 2016]. W Niemczech z kolei istnieje wymóg odzyskiwania fosforu w oczyszczalniach powyżej 50 000 RLM [Federalny Dziennik Ustaw 65] – do końca 2023 r. eksploatorów zobowiązani są do przedłożenia organom swojej koncepcji takiego działania. Podobne regulacje stosowane są w Szwajcarii, jednak w większości europejskich krajów odzysk fosforu w sektorze oczyszczania ścieków nie jest uregulowany prawnie. Przyszłością w recyklingu fosforu jest zaniechanie rolniczego stosowania osadów ściekowych i skupienie się nad strategiami jego odzysku bezpośrednio na terenie oczyszczalni (**rysunek 4-3**). Sektor wodno-ściekowy może traktować to jako dodatkową usługę komercyjną.

**Pozyskiwanie fosforu w oczyszczalni zamiast z zasobów naturalnych jest niewątpliwie korzystne z punktu widzenia gospodarki o obiegu zamkniętym i zrównoważonego rozwoju. W przyrodzie**

fosfor eksploatowany jest z takich minerałów jak apatyt i fosforyty, a ok. 90% całości wydobywanych zasobów wykorzystywanych jest w przemyśle rolniczym do produkcji nawozów mineralnych i pasz oraz chemicznym, np. w produkcji kwasu fosforowego [Klaczyński 2015]. Zasoby te jednak nie są niewyczerpalne. Według definicji Komisji Europejskiej fosforyty czy czysty fosfor są materiałami obciążonymi wysokim ryzykiem, a jednocześnie są najważniejszymi z punktu widzenia nowoczesnych gospodarek. Już dzisiaj naukowcy na całym świecie zgadzają się co do kwestii, że należy znacznie ograniczyć jego eksploatację i skupić się na maksymalizacji jego odzysku [COM (2020) 474, COM (2013) 517].



Rysunek 4-3. Schemat gospodarki cyrkulacyjnej w zakresie odzysku fosforu jako nawozu (opracowanie własne na podstawie [Mąkonia 2017])

## 4.2. Opis przykładowych technologii odzysku związków fosforu

W ostatnich 20 latach obserwowany jest intensywny rozwój technologii odzysku fosforu. Opracowane rozwiązania umożliwiają jego odzysk zarówno ze ścieków, jak i osadów ściekowych. Może być to prowadzone z wykorzystaniem odwodnionych osadów ściekowych, cieczy osadowych, a także popiołów po termicznym przetworzeniu osadów ściekowych. Istnieją również możliwości bezpośredniego odzysku fosforu ze ścieków w odpływie z oczyszczalni [Konieczka i in. 2017, Kasprzyk i in. 2017]. W zależności od etapu, na którym ma nastąpić odzysk, różny jest również jego potencjał. W ostatnich latach opracowano kilkadziesiąt różnych technologii odzysku fosforu. Wykaz zidentyfikowanych technologii został przedstawiony w tabeli 4-1.

Obecnie najszerzej wdrożonym procesem odzysku fosforu w oczyszczalni ścieków jest jego kontrolowane strącanie w formie struwitu, stanowiącego nawóz o spowolnionym uwalnianiu składników mineralnych. Skutkiem są mniejsze ich straty w procesie wylugowania, co pozwala na stosowanie nawozu z mniejszą częstotliwością. Nawozową jakość struwitu określa się jako średnią lub wysoką w porównaniu z innymi nawozami sztucznymi [Gierlotka 2015]. Odzyskiwanie fosforu w oczyszczalni ścieków można opisać następującymi zaletami [Marchi i in. 2015]:

- obniżenie ładunków substancji biogenych w odciekach z przeróbki osadów ściekowych zawracanych do głównego ciągu technologicznego w celu ich oczyszczenia; zmniejsza to obciążenie ładunkiem części biologicznej oczyszczalni,
- zmniejszenie ilości stosowanych substancji do chemicznego strącania fosforu, co przekłada się na mniejsze zużycie chemikaliów i oszczędności finansowe,
- produkcja ekologicznego nawozu, umożliwiającą jego odzysk i wtórne wykorzystanie, co przyczynia się do ograniczenia eksploatacji złóż naturalnych,
- zmniejszenie zużycia energii elektrycznej wykorzystywanej na potrzeby biologicznego oczyszczania ścieków,
- zapobieganie niekontrolowanemu wytrącaniu się struwitu w przewodach technologicznych, co eliminuje związane z tym koszty konserwacyjne i remontowe,
- usprawnienie odwadniania osadów ściekowych, co zmniejsza koszty eksploatacyjne,
- możliwość sprzedaży produktu i poprawa bilansu ekonomicznego.

W dalszej części rozdziału zaprezentowano opis najczęściej stosowanych komercyjnych technologii.

Tabela 4-1. Wybrane metody odzysku fosforu

Miejsce odzysku fosforu		
Ciecze osadowe	Osady ściekowe	Popioły po spalaniu osadów
<b>Procesy polegające na krystalizacji i/lub adsorpcji na nośniku i sedimentacji:</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Phostrip</li> <li>• DHV Crystalator</li> <li>• Ostara Pearl-Wasstrip</li> <li>• Phosnix</li> <li>• MAP Treviso</li> <li>• CSIR</li> <li>• REPHOS</li> <li>• P-RoC (Prophos)</li> <li>• PRISA</li> <li>• Sydney WaterBoardReactor</li> <li>• Kurita Festbett</li> <li>• NuReSys</li> </ul>	<b>Procesy polegające na krystalizacji:</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>• FIX-PHOS</li> <li>• AirPrex (MagPrex)</li> <li>• PECO</li> <li>• NuReSys</li> </ul>	<b>Procesy polegające na ekstrakcji i wytrącaniu:</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>• SEPHOS proces</li> <li>• SESAL(-Phos)</li> <li>• PASCH proces</li> <li>• PolFerAsh</li> </ul>
	<b>Ługowanie kwasami:</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Stuttgart proces</li> <li>• Seaborne proces</li> <li>• Kemira KEMICOND</li> </ul>	
	<b>Hydroliza termiczna i wytrącanie:</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Cambi proces</li> <li>• Aqua-Reci</li> <li>• Kemira KREPRO</li> <li>• Mephrec</li> </ul>	<b>Procesy polegające na wymianie jonowej:</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>• RemNut</li> <li>• BioCon</li> </ul>
<b>Procesy polegające na wymianie jonowej:</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>• REM NUT</li> <li>• PHOSIEDI</li> </ul>	<b>Utlenianie niskociśnieniowe i separacja membranowa:</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>• PHOXNAN LOPROX procesv</li> </ul>	

Opracowanie własne na podstawie [Makuła 2017, Egle i in. 2016, Klaczyński 2015, Podewils 2014, Kasprzyk i in. 2017, Gorazda 2018, Sartorius 2012]

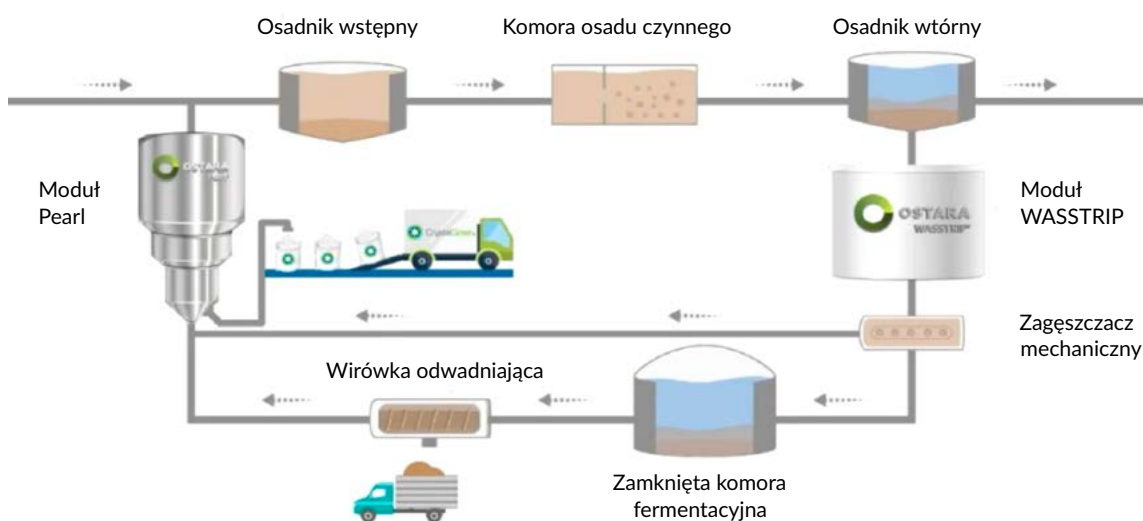


## 1. Ostara Pearl-Wasstrip – odzysk fosforu z ciecży osadowych

Na świecie pracuje ok. 23 instalacji tego typu. Najwięcej z nich jest w Stanach Zjednoczonych. Przykładowe instalacje znajdują się w Edmonton (USA) o wydajności produkcji struwitu  $Q = 2300$  ton/rok, Tigard (USA) o wydajności  $Q = 690$  ton/rok, Hillsboro (USA) o wydajności  $Q = 900$  ton/rok, Reno (USA) o wydajności  $Q = 450$  ton/rok, Chicago (USA) o wydajności  $Q = 6900$  ton/rok. W Europie obecnie funkcjonują 3 instalacje: w Madrycie (Hiszpania) o wydajności 450 ton/rok, Amersfoort (Holandia) o wydajności 450 ton/rok i Slough (Wielka Brytania) o wydajności 120 ton/rok [ostara.com, Makuła 2017]. Czwarta instalacja powstaje w oczyszczalni ścieków w Cielczy, w gminie Jarocin. Jest to pierwsza instalacja odzysku fosforu w historii krajowego oczyszczania ścieków [pwikjarocin.pl].

Istotą technologii Ostara Pearl-Wasstrip jest instalacja w standardowym układzie gospodarki osadowej (typowej oczyszczalni komunalnej z biologicznym usuwaniem fosforu i fermentacją osadu), składająca się z dwóch innowacyjnych elementów procesowych (rysunek 4-4) [Egle i in. 2016, ostara.com]:

- Wasstrip – reaktor, który służy do uwalniania słabo biologicznie związanego fosforu z osadu czynnego nadmiernego i odseparowanie go w cieczy osadowej z mechanicznego zagęszczacza;
- Pearl – służy do produkcji struwitu w chemicznym reaktorze fluidalnym.



Rysunek 4-4. Umieszczenie modułów Ostara PEARL i Wasstrip w klasycznym układzie technologicznym oczyszczalni ścieków (opracowanie własne na podstawie [ostara.com])

Osad czynny nadmierny bezpośrednio po procesie biologicznym zawiera dużo fosforu, ponieważ bakterie pobierają go ze ścieków w ilościach znacznie przewyższających ich metaboliczne potrzeby. Po zagęszczeniu osadu nadmiernego i skierowaniu go do komory fermentacyjnej, w której panują warunki beztlenowe, następuje szybkie uwalnianie się słabo związanego fosforu do ciecży osadowej w WKF. Obecność azotu w postaci amonowej, a także magnezu sprzyja niekontrolowanemu formowaniu się struwitu. Istotą instalacji Wasstrip jest kontrolowane przechwycenie fosforanów z osadu

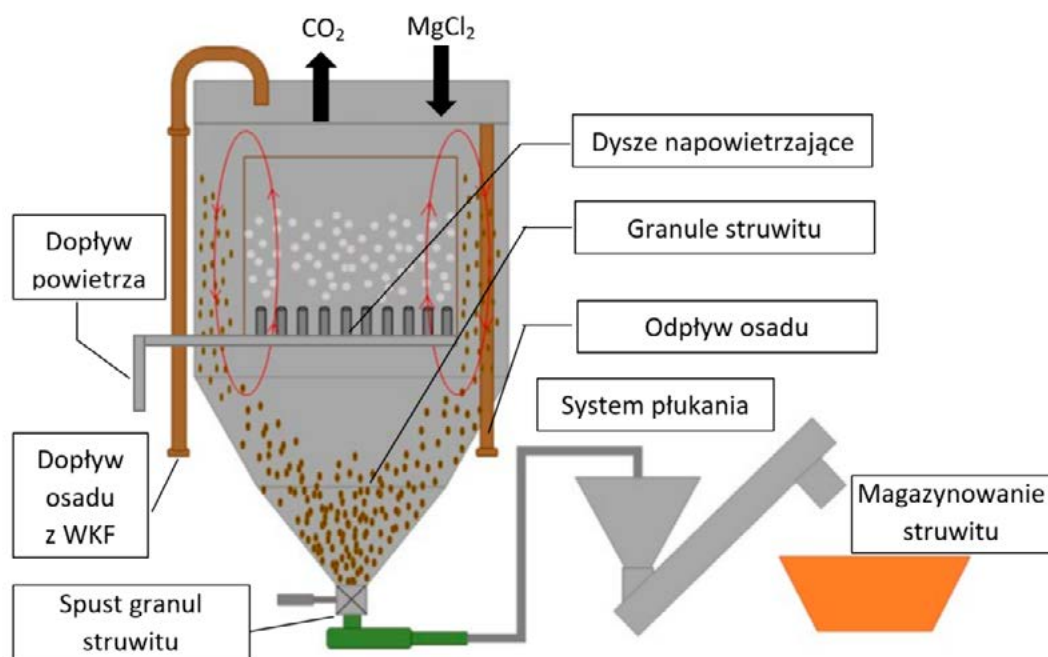


Rysunek 4-5. Nawóz wyprodukowany z cieczy osadowych z wykorzystaniem technologii Ostara Pearl-Wasstrip [ostara.com]

nadmiernego, dzięki czemu do komory fermentacyjnej kierowany jest zagęszczony osad nadmierny wolny od fosforu. Bogata w fosfor ciecz osadowa z reaktora Wasstrip wraz z cieczą z odwadniania osadu po fermentacji (bogata w azot amonowy) kierowana jest do reaktora fluidalnego Pearl, gdzie dawkowany jest chlorek magnezu. W tym węźle, w sposób kontrolowany, produkowany jest kryształiczny struwit, który po separacji, odwodnieniu, osuszeniu i rozdzieleniu na frakcje, traktowany jest jako produkt nawozowy pod handlową nazwą Crystal Green (rysunek 4-5). Efektywność usuwania fosforu z cieczy osadowych wynosi ponad 85%. Dla azotu amonowego jest to ok. 10–15%. Po procesie oczyszczone odcieki odprowadzane są z góry reaktora i zwracane do głównego ciągu oczyszczania w oczyszczalni [Gysin i in. 2018, Kasprzyk i in. 2017].

## 2. AirPrex (MagPrex) – odzysk fosforu z osadów ściekowych

Technologia AirPrex (rysunek 4-6) została opracowana przez berlińską spółkę Berliner Wasserbetriebe i polega na kontrolowanym wytrącaniu struwitu z przefermentowanego osadu nadmiernego. Pierwsza instalacja w pełnej skali technicznej została uruchomiona w 2007 r. w Berlinie. Odzysk fosforu następuje przed skierowaniem osadu do stacji odwadniania, dzięki czemu osiąga się lepszy stopień odwodnienia osadu. Technologia funkcjonuje w kilku oczyszczalniach ścieków w Niemczech oraz Holandii. Przykładowe instalacje znajdują się w Mönchengladbach (Niemcy) o wydajności 600 ton/rok, Berlinie o wydajności 600–1000 ton/rok czy w Amsterdamie o wydajności 1500 ton/rok [Rulseh 2015, centrisys-cnp.com].



Rysunek 4-6. Schemat technologii AirPrex (opracowanie własne na podstawie [Stitt i in. 2017])



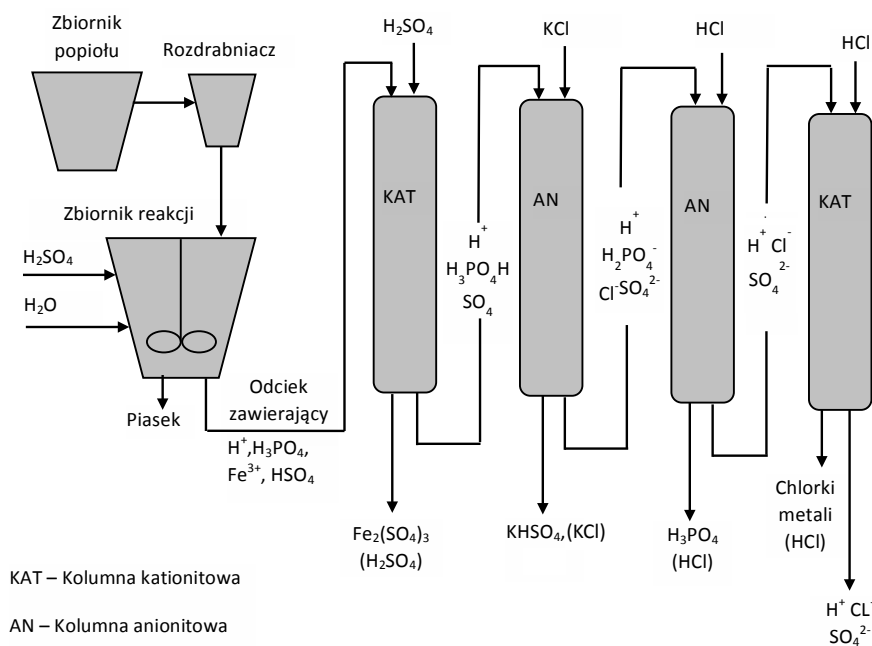
Przefermentowany osad jest doprowadzany do reaktora wewnętrznym cylindrycznym płaszczem, do którego od dołu wprowadza się powietrze jako czynnik mieszający. Doprowadzenie powietrza powoduje ponadto odpędzanie dwutlenku węgla, co pomaga w utrzymaniu optymalnej wartości pH dla procesu. W celu zapewnienia odpowiednich proporcji substancji w wytrącanym struwicie dodaje się magnez w postaci chlorku magnezu. Wytrącane kryształki struwitu, po osiągnięciu odpowiednich rozmiarów, przedostają się do zewnętrznego płaszczka w reaktorze, a następnie gromadzą się w jego dolnej części, skąd usuwane są poza układ. Wyprodukowany struwit ma wartość komercyjną i sprzedawany jest pod marką „Berliner Pflanze” (rysunek 4-7). Pozyskiwany tą metodą nawóz mineralny charakteryzuje się długim czasem uwalniania, zawiera podobne ilości substancji odżywczych jak inne nawozy i jest dobrze przyswajalny przez rośliny [Kasprzyk i in. 2017, Schaum 2018].



Rysunek 4-7. Nawóz wyprodukowany z osadów ściekowych z użyciem technologii AirPrex [Mąkinia 2017]

### 3. BioCon – odzysk fosforu z popiołów po spalaniu osadów ściekowych

Proces BioCon odzyskuje fosfor w postaci kwasu fosforowego z popiołów powstających w procesie spalania osadów ściekowych. Przebieg odzysku składa się z trzech etapów: suszenia osadu, spalania osadu oraz jednostki odzysku z wymiennikami jonowymi. Ostatnia faza (rysunek 4-8) polega na rozpuszczeniu związków fosforu i metali ciężkich za pomocą kwasu siarkowego ze zmielonego materiału wsadowego, czyli popiołów po spalaniu. Dodanie kwasu i wody w reaktorze z mieszadłem prowadzi do uzyskania pH wynoszącego ok. 1. Roztwór przechodzi przez szereg wymienników jonowych. Pierwszym wymiennikiem jest kationit, który wiąże jony  $Fe^{3+}$ . Jest on regenerowany za pomocą kwasu siarkowego wytwarzając siarczan żelazowy. Druga kolumna to wymiennik anionowy, który wiąże jony siarczanowe, a regenerowany jest chlorkiem potasu wytwarzając wodorosiarczan potasu.



Rysunek 4-8. Schemat technologii BioCon (opracowanie własne na podstawie [Nieminen 2010, Levlin 2001])

Trzecia kolumna to również wymiennik anionowy, który usuwa z roztworu jony fosforanowe – jego regeneracja kwasem solnym wytwarza strumień kwasu fosforowego. Ostatnia kolumna sorpcyjna to wymiennik kationitowy. Jego zadaniem jest związanie pozostających w roztworze metali ciężkich. Regeneracja kwasem solnym powoduje wydzielenie chlorków metali. Po przejściu przez kolumny jonowymienne w roztworze pozostają jony wodorowe, chlorkowe oraz siarczanowe [Stark i in. 2003, Kasprzyk i in. 2017, Levlin 2001].

## 4.3. Wybrane obiekty

### 4.3.1. Instalacja do odzysku fosforu w Cielczy (Polska)

Oczyszczalnia ścieków w Cielczy (gmina Jarocin) została oddana do użytku w latach 1912–1913. Pod koniec XX wieku rozbudowano ją o część biologiczną z chemicznym usuwaniem związków fosforu. Oczyszczalnia obsługuje miasto i gminę Jarocin, a także część gmin Jaraczewo, Kotlin i Nowe Miasto. Przepustowość oczyszczalni wynosi ok. 12 400 m<sup>3</sup>/d. Ostatnia modernizacja obiektu zakończyła się w pierwszym kwartale 2022 r. Głównym jej celem było kompleksowe unowocześnienie i rozbudowanie ciągu przetwarzania osadów ściekowych. Ciąg ten tworzą instalacje do hydrolizy termicznej osadów ściekowych, fermentacji metanowej, odwadniania oraz oczyszczania i zagospodarowania biogazu. Najważniejszym elementem jest instalacja do odzysku fosforu i azotu w technologii Ostara Pearl-Wasstrip (rysunek 4-9) – pierwsza tego typu w Polsce oraz czwarta w Europie. Podobne instalacje znajdują się w oczyszczalniach ścieków w Londynie, Amsterdamie oraz Madrycie.



Rysunek 4-9. Instalacja reaktora do odzysku fosforu w oczyszczalni ścieków w Cielczy (Polska) [pwikjarocin.pl]

Jak podkreślają władze Jarocina, inwestycja spowodowała zmianę postrzegania dotychczasowej oczyszczalni, a wraz z jej definitywnym zakończeniem powstanie ekologiczna i ekonomiczna stacja odzysku surowców ukierunkowana na maksymalizację odzysku składników odżywczych oraz energii. Surowce będą odzyskiwane w postaci granulatu struwitu o wysokiej czystości, który zostanie wykorzystany jako nawóz mineralny do nawożenia i rewitalizacji terenów zielonych w gminie Jarocin. Ze względu na specyfikę składu produktu instalacji, fosfor związany w struwicie nie ulega wymywaniu i charakteryzuje się powolnym uwalnianiem wraz z rozwojem systemu korzeniowego w całym okresie wegetacji roślin. Nowy obiekt obsługiwać będzie ok. 50 000 RLM na terenie gminy Jarocin. Instalacja będzie produkować blisko 120 ton struwitu rocznie [pwikjarocin.pl, Wójtowicz 2021].

#### 4.3.2. Instalacja do odzysku fosforu w Amersfoort (Holandia)

W roku 2013 władze zarządzające oczyszczalnią w Amersfoort (Holandia) podjęły decyzję o przekształceniu jej w regionalne centrum przetwarzania osadów z wykorzystaniem innowacyjnych technologii odzysku energii i składników odżywczych. Decyzja ta była podyktowana podążaniem w kierunku rozwoju europejskiej gospodarki o obiegu zamkniętym. W wyniku modernizacji do istniejących obiektów została dodana technologia odzysku związków biogenych Ostara Pearl-Wasstrip oraz nowoczesny system hydrolyzy termicznej i odzysku ciepła (rysunek 4-10).

Ponadto w oczyszczalni funkcjonuje system usuwania azotu w bocznym ciągu technologicznym z wykorzystaniem technologii DEMON. Oczyszczalnia w wyniku wprowadzonych zmian osiągnęła dodatni bilans energetyczny, a wyprodukowany nadmiar energii sprzedaje do sieci elektrycznej. Zakład obsługuje 315 000 RLM przetwarzając łącznie 12 000 ton suchej masy osadów rocznie, z czego ok. 40% osadów jest importowanych z okolicznych miejscowości. System odzysku fosforu z cieczy osadowych wytwarza 450–900 ton nawozu rocznie [Kox i in. 2016, ostara.com].



Rysunek 4-10. Reaktor do odzysku fosforu w oczyszczalni ścieków w Amersfoort (Holandia) [Kox i in. 2016]

#### 4.3.3. Instalacja do odzysku fosforu w oczyszczalni ścieków w Waßmannsdorf (Niemcy)

Oczyszczalnia ścieków w Waßmannsdorf (Niemcy) oczyszcza ok. 190 000 m<sup>3</sup>/d ścieków, wykorzystując przy tym konwencjonalne procesy oparte na biologicznym i chemicznym oczyszczaniu. Osady wstępne i nadmierne kierowane są do zamkniętych komór fermentacyjnych w ilości ok. 2000 m<sup>3</sup>/d. Przefermentowane osady są kierowane do instalacji odzysku fosforu, a następnie są odwadnianie i suszone. Biogaz wykorzystywany do produkcji energii elektrycznej i ciepłej pokrywa do 60% zapotrzebowania na energię elektryczną zakładu. Podobnie jak w przypadku innych obiektów, również w tym przypadku notowano problemy z niekontrolowanym wytrącaniem się struwitu w przewodach i urządzeniach technologicznych. Instalacje do odzysku fosforu uruchomiono w technologii AirPrex w roku 2010 (rysunek 4-11).

Reaktor mierzy ok. 17 m wysokości, ma 10 m średnicy i 500 m<sup>3</sup> pojemności roboczej. Produkcja struwitu wynosi ok. 2,5 tony



Rysunek 4-11. Reaktor do odzysku fosforu w oczyszczalni ścieków w Waßmannsdorf (Niemcy) [Nieminen 2010]

na dobę, a jego jakość spełnia wartości graniczne definiowane przez niemieckie rozporządzenie o nawozach. W instalacji uzyskuje się ponad 95-procentowy stopień usunięcia fosforu z osadu przefermentowanego, dzięki czemu strumień odpływający z reaktora zawiera niskie stężenia fosforanów – około 5 mg P-PO<sub>4</sub>/l. Struwit jest sprzedawany zewnętrznemu przedsiębiorstwu rolniczo-przemysłowemu, gdzie miesza się go z innym nawozem i wytwarza końcowy produkt [Nieminen 2010, cnp-cycles.de, Forstner 2015].

#### 4.3.4. Instalacja do odzysku fosforu w oczyszczalni ścieków w Mönchengladbach (Niemcy)

Oczyszczalnia ścieków w Mönchengladbach (Niemcy) oczyszcza ścieki pochodzące od około 1,5 miliona mieszkańców okolicznych miejscowości Mönchengladbach, Korschenbroich, Willich, Viersen i Tönisvorst. Proces oczyszczania generuje ok. 1500 m<sup>3</sup>/d osadów ściekowych. Odzysk fosforu został wprowadzony w 2010 r. w technologii AirPrex (**rysunek 4-12**). Do tego czasu zakład borykał się z krystalizowaniem struwitu w ponad 400 metrowym rurociągu łączącym komory fermentacyjne oraz stację odwadniania osadu.

Wydajność produkcji struwitu wynosi ok. 1–1,5 tony na dobę. Dzięki wprowadzeniu technologii osiągnięto usprawnienie procesu odwadniania osadu o 3,5%. Zmniejszyło się również zapotrzebowanie na polielektrolit do odwadniania o ok. 20% oraz wyeliminowano problem wytrącania się struwitu w instalacjach technologicznych. Oszczędności operacyjne po zastosowaniu zmian wynoszą ok. 300 000 euro rocznie. Wyprodukowany nawóz wykorzystywany jest rolniczo w okolicznych miejscowościach [pcs-consult.de, Langereis i in. 2015].



**Rysunek 4-12.** Reaktor do odzysku fosforu w oczyszczalni ścieków w Mönchengladbach (Niemcy) [Langereis i in. 2015]

#### 4.3.5. Instalacja do odzysku fosforu w oczyszczalni ścieków w Gifhorn (Niemcy)

Oczyszczalnia ścieków w Gifhorn posiada przepustowość ok. 6500 m<sup>3</sup>/d, a wielkość mierzona w RLM wynosi 50 000. Układ biologicznego oczyszczania ścieków składa się z 3 bioreaktorów i 3 osadników wtórnych. Część osadowa bazuje na procesie fermentacji beztlenowej realizowanej w dwóch komorach fermentacyjnych po 2000 m<sup>3</sup> każda. Eksploatacja instalacji odzysku fosforu w technologii Seaborne rozpoczęła się w 2005 r., a okres próbny przed ciągłą eksploatacją trwał do 2007 r. (**rysunek 4-13**).



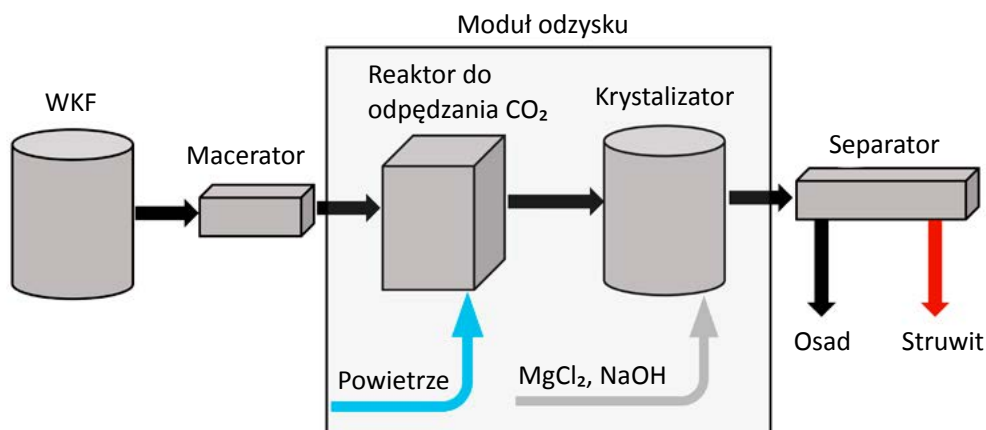


Rysunek 4-13. Instalacja do odzysku fosforu w oczyszczalni ścieków w Gifhorn (Niemcy) [Nieminen 2010, Müller 2011]

Proces składa się z trzech głównych etapów. Najpierw przefermentowany osad poddawany jest działaniu kwasu, dzięki czemu część metali ciężkich, fosforu i substancji organicznych przechodzi do fazy ciekłej. W kolejnym etapie metale ciężkie są wytrącane z powstałego roztworu w postaci siarczków. Z roztworu wolnego od metali ciężkich azot i fosfor są wytrącane jako struwit. Instalacja wyposażona jest również w jednostkę odzyskiwania amoniaku pod postacią siarczanu amonu w kolumnie strippingowej. Cały układ technologiczny został zaprojektowany do pracy przy stężeniach azotu i fosforu wynoszących odpowiednio 1800 mg/l i 1000 mg/l. Etap wytrącania struwitu poprzedzony jest zwiększeniem wartości pH do 8,7–9,0 z wykorzystaniem NaOH i  $Mg(OH)_2$  w celu wywołania strącania. Wodorotlenek magnezu jest przygotowywany *in situ* z MgO (dostarczanego w formie sypkiej) i mieszany z wodą. Dawkę magnezu kontroluje się codziennie, analizując odciek z reaktora strącania. Strumień opuszczający proces zawiera około 5–6 mg/l fosforu i 250 mg/l azotu. Wytrącony produkt jest odwadniany z użyciem wirówek. Utworzony produkt zawiera  $MgNH_4PO_4$ ,  $Mg_3(PO_4)_2$ ,  $Ca_3(PO_4)_2$ ,  $(NH_4)_3PO_4$ ,  $MgHPO_4 \times 3H_2O$   $CaHPO_4 \times nH_2O$  i  $(NH_4)_2HPO_4$  [Nieminen 2010, Müller i in. 2011].

#### 4.3.6. Instalacja do odzysku fosforu w Leuven (Belgia)

Instalacja ma na celu odzysk fosforu z osadu przefermentowanego. Pierwsze testy instalacji rozpoczęto w 2013 r. w skali pilotażowej, 3 lata później uruchomiono reaktor w pełnej skali technicznej. Proces mający na celu wytrącenie struwitu realizowany jest z wykorzystaniem dwuzbiornikowego reaktora. Składa się on ze zbiornika do odpędzania  $CO_2$  i reaktora, mieszanego przez podwójne mieszadło, w którym dozowany jest  $MgCl_2$  (i ewentualnie NaOH do korekty pH). Silos składający się z cyklonu umożliwia częściowe oddzielenie kryształów od osadu. Kryształy zatrzymywane przez cyklon mogą być zawracane do obiegu w reaktorze lub zbierane i sprzedawane firmie specjalizującej się w produkcji nawozów nieorganicznych (rysunek 4-14). Dostawcą technologii jest NuReSys. Zastosowanie tego procesu pozwoliło zmniejszyć stężenie fosforu o 80% w osadach/cieczech osadowych, co przełożyło się na produkcję struwitu w ilości ok. 500 kg tygodniowo [Saerens i in. 2021, Marchi 2015]. Obecnie w Europie pracuje 9 pełnoskalowych instalacji tego typu o wydajności 55–1500 kg/d. Produkt końcowy sprzedawany jest pod marką BIO-Stru [nuresys.be].



Rysunek 4-14. Schemat technologiczny instalacji do odzysku fosforu w oczyszczalni ścieków w Leuven (Belgia) (opracowanie własne na podstawie [Geerts 2015])

#### 4.3.7. Oczyszczalnia ścieków w Geestmerambacht (Holandia)

Oczyszczalnia w Geestmerambacht (Holandia) o RLM 230 tys. jest wyposażona w instalację do odzysku fosforu pracującą w technologii CRYSTALACTOR (rysunek 4-15). Uruchomiona została w 1994 r. i działa na zasadzie krystalizacji związków fosforu jako fosforanu wapnia  $\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$  ze stężonego strumienia cieczy osadowych, zawierającego fosforany o stężeniu 60–80 mg/l. Wydajność odzysku wynosi około 70–80%. Jest to reaktor fluidalny o przepływie materiału zasilającego z dołu do góry o prędkości 40–100 m/h. Krystalizacja fosforu następuje w całej objętości reaktora na powierzchni ziaren piasku o powierzchni właściwej 5000–10000  $\text{m}^2/\text{m}^3$ . Gdy wytrącone granule osiągną odpowiednie rozmiary, opadają na dno reaktora, skąd są usuwane jako gotowy produkt w ilości około 150–300 ton/rok [Piekema, Desmidt i in. 2015]. Na świecie jest ponad 70 takich instalacji, głównie w Europie i Stanach Zjednoczonych [royalhaskoningdhv.com].



Rysunek 4-15. Reaktory do odzysku fosforu w oczyszczalni ścieków w Geestmerambacht (Holandia) [Nieminen 2010]

## 4.4. Podsumowanie

Usuwanie fosforu ze ścieków jest jednym z głównych zadań oczyszczalni ścieków. Generalnie proces ten polega na przeprowadzeniu rozpuszczonych jonów fosforanowych do formy nierozpuszczonej i związanie jej w osadzie chemicznym lub biologicznym. Osady te następnie poddawane są obróbce, mającej na celu ustabilizowanie pod kątem sanitarnym, a później ich zagospodarowanie. Jedną z możliwości jest ich rolnicze wykorzystanie, które jednocześnie stanowi najprostszy sposób na recykling fosforu. Potencjał odzysku w tym zakresie jest jednak najmniejszy w porównaniu z innymi metodami technicznymi. W związku z tym, że jednym z celów racjonalnej gospodarki komunalnymi osadami ściekowymi jest dążenie do maksymalizacji stopnia wykorzystania substancji biogenych zawartych w osadach, pożądane jest wdrażanie technologii jego odzysku w oczyszczalniach ścieków. Przetwarzanie biologicznych i chemicznych osadów ściekowych bogatych w fosfor, zwłaszcza w procesach beztlenowych, powoduje ponowne wytrącenie związków tego pierwiastka z osadu i krystalizację w przewodach technologicznych instalacji na oczyszczalniach. Jedną z takich substancji jest fosforan amonowo-magnezowy ( $MgNH_4PO_4 \cdot 6H_2O$ ) zwany struwitem – cenny nawóz o spowolnionym uwalnianiu składników mineralnych. Samoczynne wytrącanie się go stanowi poważny problem dla eksploatatorów oczyszczalni ścieków, jednak istnieją metody umożliwiające kontrolowanie tego zjawiska. Odzysk struwitu obecnie jest najszerzej wdrożoną technologią odzysku fosforu w oczyszczalniach ścieków – może być prowadzony z osadów ściekowych, cieczy osadowych lub popiołów po termicznym przekształceniu osadów. O ilości zawartego w osadach ściekowych fosforu decyduje m.in. stężenie w ściekach surowych oraz zastosowane metody jego usuwania i przeróbki. Zazwyczaj w osadach ściekowych stanowi 1,5–4% suchej masy, natomiast w popiołach powstających po spalaniu tych osadów wielkość ta wzrasta ponad trzykrotnie i może wynosić aż 13,4% [Ciesielczuk i in. 2016]. Taki stan rzeczy sprawia, że odzysk fosforu z popiołów posiada największy potencjał, a metody je zapewniające charakteryzują się efektywnością dochodzącą nawet do 90%. Monospalanie osadów ściekowych wraz z odzyskiem fosforu powinno być traktowane priorytetowo wśród metod przetwarzania osadów i ich zagospodarowania. Motorem napędowym wdrażania technologii odzysku fosforu są bez wątpienia regulacje prawne. Przykładowo w Niemczech istnieje wymóg odzyskiwania fosforu w oczyszczalniach o wielkości powyżej 50 tys. RLM, a w Belgii czy Szwajcarii obowiązują bardzo restrykcyjne zasady stosowania osadów ściekowych w rolnictwie. To właśnie w Niemczech, Belgii czy też Holandii główną metodą przekształcania osadów są metody termiczne, a co za tym idzie potencjał odzysku fosforu jest największy. W naszym kraju sytuacja nie wygląda już tak dobrze. Funkcjonujące w Polsce monospalarnie osadów ściekowych są w stanie zagospodarować maksymalnie ok. 1/4 całkowitej ilości powstających osadów ściekowych w ciągu roku. Instalacje te nie są wyposażone w moduł odzysku fosforu, ale np. popiół powstający na OŚ Dębogórze w Gdyni oraz OŚ Północ w Gdańsku przekazywany jest do jednego z tamtejszych zakładów azotowych celem odzysku fosforu. W krajach europejskich funkcjonują liczne instalacje do odzysku fosforu, czy to z osadów ściekowych, cieczy osadowych, czy z popiołów. Tymczasem w Polsce dopiero powstała pierwsza taka instalacja w zakładzie w Cielczy.

W obliczu wyczerpujących się zasobów kopalin bogatych w fosfor, których według różnych szacunków wystarczy na 100–360 lat [Klaczyński 2015, Wzorek 2008], poszukuje się nowych, alternatywnych źródeł tego cennego pierwiastka, np. z odpadów powstających w oczyszczalniach ścieków. Takie pozyskanie fosforu ze ścieków zamiast z zasobów nieodnawialnych jest bez wątpienia działaniem korzystnym z punktu widzenia zrównoważonego rozwoju i gospodarki o obiegu zamkniętym. Niestety przedsiębiorstwa wodociągowe, oprócz kierowania się ideami, muszą również kierować się

kryteriami ekonomicznymi. Dzisiaj odzysk fosforu z odpadów w oczyszczalni i produkcja nawozu jako końcowego produktu musi konkurować z nawozami sztucznymi. Powszechnym problemem jest więc aspekt finansowy, a instalacje często nie osiągają korzystnego ekonomicznego modelu funkcjonowania [Ciesielczuk 2016, Kasprzyk 2017, Bień 2019]. Niemniej jednak oczyszczalnia ścieków, która realizuje odzysk fosforu, może być z całą pewnością nazywana bioenergetycznym zakładem odzysku surowców.



## Literatura:

- Bień J. Wykorzystanie osadów ściekowych w Polsce w kontekście gospodarki o obiegu zamkniętym. ekordo.pl <[https://ekordo.pl/wp-content/uploads/2019/10/wykorzystanie\\_osadow.pdf](https://ekordo.pl/wp-content/uploads/2019/10/wykorzystanie_osadow.pdf)> [dostęp 14.02.2022].
- Ciesielczuk T., Dulewska C., Kusza G. 2016. Ekstrakcja fosforu z osadów ściekowych i popiołów ze spalania osadów – analiza problemu. Polish Journal for Sustainable Development, Tom 20, s. 21–28.
- Cnp-cycles.de. <<https://cnp-cycles.de/referenzen/airprexanlagen/berlin-wassmannsdorf>> [dostęp 10.02.2022].
- CRYSTALACTOR™ Zero-Waste Water Treatment | Waste-to-revenues | Sustainable | Multi applicable. royalhaskoningdhv.com. <<https://www.royalhaskoningdhv.com/en/crystalactor>> [dostęp 11.02.2022].
- Czarnota J., Masłoń A. 2016. Aspekty ekologiczne przyrodniczego wykorzystania osadów ściekowych. pogorzedynowskie.pl. <[http://www.pogorzedynowskie.pl/data/referaty/XIIIIS/ref\\_3\\_XIIIIS.pdf](http://www.pogorzedynowskie.pl/data/referaty/XIIIIS/ref_3_XIIIIS.pdf)> [dostęp 10.02.2022].
- Desmidt, E., Ghyselbrecht K., Zhangb Y., Pinoy L., Bruggenb B., Verstrated W., Rabayed K., Boudweijn M. 2015. Global phosphorus scarcity and full-scale P-recovery techniques – a review. Critical Reviews in Environmental Science and Technology, 45 (4) s. 336–384.
- Dymaczewski Z. 2011. Poradnik eksploatatora oczyszczalni ścieków. PZITS Poznań.
- Egle L. Rechberger H., Zessner M. 2015. Overview and description of technologies for recovering phosphorus from municipal wastewater, Resources, Conservation and Recycling, 105, s. 325–346.
- Egle L. Rechberger H., Krampe J., Zessner M. 2016. Phosphorus recovery from municipal wastewater: An integrated comparative technological, Environmental and economic assessment of P recovery technologies, Science of The Total Environment, Volume 571, s. 522–542.
- Federalny Dziennik Ustaw. Voerordnung zur Neuordnung der Klarschlammverwertung Vom 27. September 2017. Bundesgesetzblatt Jahrgang Teil I, nr 65, s. 3465–3512.
- Forstner G. 2015. AirPrex™: Biosolids Treatment Optimization and Phosphorus Removal by MAP Crystallization for BPR plants. CSWEA Conference, 19 maj 2015.
- Geerts S., Marchi A., Weemaes M. 2015. Full-scale phosphorus recovery from digested wastewater sludge in Belgium – part II: economic opportunities and risks. Water Science Technology, 71 (4), s. 495–503.
- Gierlorka K. 2015. Odzysk fosforu z osadów ściekowych – motywacja i przykładowe rozwiązania technologiczne. Gaz Woda i Technika Sanitarna, 10, s. 368–373.
- Gorazda K., Tarko B., Worek Z., Nowak A., Kulczycka K., Smol K., Henclik A. 2018. Polish Fertilizers from Ash (PolFerAsh technology) – assessment of technical and environmental conditions (BAT, BATNEEC, LCA). uest.ntua.gr <[http://uest.ntua.gr/naxos2018/proceedings/pdf/62\\_NAXOS2018\\_Gorazda\\_etal.pdf](http://uest.ntua.gr/naxos2018/proceedings/pdf/62_NAXOS2018_Gorazda_etal.pdf)> [dostęp 11.02.2022].
- Gysin A., Lycke D., Wirtel S. 2018. The Pearl® and WASSTRIP® processes (Canada). Phosphorus: Polluter and Resource of the Future – Removal and Recovery from Wastewater, IWA Publishing.
- Kasprzyk M., Gajewska M., Molendowska S. 2017. Możliwości odzysku fosforu z odcieków, osadów ściekowych i popiołów po termicznym przekształcaniu osadów ściekowych. Inżynieria Ekologiczna, 18 (4), s. 65–78.
- Klaczyński E. 2015. Fosfor w środowisku, jego znaczenie i możliwości odzysku z osadów ściekowych. Forum Eksploatatora, 6 (81), 35–41.
- Kox L., Geraats B. 2016. Energy and nutrient factory at Amerfoort WWTP in the Netherlands. Water e-Journal, Vol 1, No. 2.
- Komunikat Komisji do Parlamentu Europejskiego, Rady, Europejskiego Komitetu Ekonomiczno-Społecznego i Komitetu Regionów. Odporność w zakresie surowców krytycznych: wytyczanie drogi do większego bezpieczeństwa i bardziej zrównoważonego rozwoju. Bruksela, dnia 3.09.2020 r. (COM (2020) 474 final).
- Komunikat Komisji do Parlamentu Europejskiego, Rady, Europejskiego Komitetu Ekonomiczno-Społecznego i Komitetu Regionów. Komunikat konsultacyjny w sprawie zrównoważonego stosowania fosforu. Bruksela, dnia 08.07.2013. COM (2013) 517 Final.
- Konieczka P., Cieślik B. 2017. A review of phosphorus recovery methods at various steps of wastewater

treatment and sewage sludge management. The concept of “no solid waste generation” and analytical methods. *Journal of Cleaner Production*, Vol 142, (4), s. 1728–1740.

Langereis, R., Geraats, B. 2015. Optimisation of anaerobic sludge treatment from enhanced biological phosphate removal by Airprex struvite precipitation system. 18th European Biosolids & Organic Resources Conference.

Levlin, E. 2001. Recovery of phosphate from sewage sludge and separation of metals by ion exchange. *Wastewater Sludge Solid Waste Management*, 9, 81.

Levlin E., Löwén M., Stark K., Hultman B. 2002. Effects of phosphorus recovery requirements on Swedish sludge management. *Water Science & Technology*, 46, (4–5), s. 435–440.

Makuła M. 2017. Technologie odzysku fosforu w oczyszczalniach ścieków. [slidetodoc.com](https://slidetodoc.com/technologie-odzysku-fosforu-w-oczyszczalniach-ciekw-maria-wodarczykmakua/). <<https://slidetodoc.com/technologie-odzysku-fosforu-w-oczyszczalniach-ciekw-maria-wodarczykmakua/>> [dostęp 09.02.2022].

Marchi A., Geerts S., Weemaes M., Wim S., Christine V. 2015. Full-scale phosphorus recovery from digested waste water sludge in Belgium – part I: technical achievements and challenges. *Water Science Technology*, 71 (4), s. 487–495.

Mąkinia J. 2017. Ścieki jako źródło surowców i energii. Nowoczesne polskie rozwiązania w gospodarce wodno-ściekowej, Seminarium NFOŚiGW, Poznań, 16 października 2017.

Müller A.J., Günther L., Dockhorn T., Dichtl N., Phan L., Urban I., Weichgrebe D., Rosenwinkel K., Bayerle N. 2011. Nutrient Recycling from Sewage Sludge using the Seaborne Process, s. 629–633.

Nieminen J. 2010. Phosphorus recovery and recycling from municipal wastewater sludge. [sswm.info](https://sswm.info/sites/default/files/reference_attachments/NIEMINEN%202010%20Phosphorus%20Recovery%20and%20Recycling%20from%20Municipal%20Wastewater%20Sludge.pdf). <[https://sswm.info/sites/default/files/reference\\_attachments/NIEMINEN%202010%20Phosphorus%20Recovery%20and%20Recycling%20from%20Municipal%20Wastewater%20Sludge.pdf](https://sswm.info/sites/default/files/reference_attachments/NIEMINEN%202010%20Phosphorus%20Recovery%20and%20Recycling%20from%20Municipal%20Wastewater%20Sludge.pdf)> [dostęp 04.03.2022].

nuresys.be. <<http://www.nuresys.be/technology.html#>> [dostęp 11.02.2022].

ostara.com <<https://ostara.com/nutrient-management-solutions/>> [dostęp 14.02.2022].

Piekema P., Giesen A. Phosphate recovery by the crystallisation process: experience and developments. [citeseerx.ist.psu.edu](https://citeseerx.ist.psu.edu). <<https://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.611.1618&rep=rep1&type=pdf>> [dostęp 11.02.2022].

pwikjarocin.pl. Pierwsza w Polsce instalacja do odzysku fosforu powstaje w Cielczy. <<https://pwikjarocin.pl/pierwsza-w-polsce-instalacja-do-odzysku-fosforu-powstaje-w-cielczy/>> [dostęp 09.02.2022].

Podewils W. 2014. Aktualny stan spalania osadów ściekowych i odzysku fosforu na terenie Niemiec. VIII Konferencja: Suszenie u termiczne przekształcanie osadów ściekowych. s. 196–222.

POST-DIGESTION P-RECOVERY AIRPREX®- NOW KNOWN AS MAGPREX. [centrisys-cnp.com](https://www.centrisys-cnp.com). <<https://www.centrisys-cnp.com/airprex/>> [dostęp 11.02.2022].

Rulseh J. T. 2015. Struvite Solution. Treatment Plant Operator. [f.hubspotusercontent10.net](https://f.hubspotusercontent10.net). <<https://f.hubspotusercontent10.net/hubfs/4299619/6-1%20Literature/REPRINT%20Struvite%20Solution%20CNP.pdf>> [dostęp 11.02.2022].

Sartorius C., Horn van J., Tettenborn F. 2012. Phosphorus Recovery from Wastewater–State-of-the-Art and Future Potential. *Water Environment Research* 84, no. 4, s 313–332.

Sewage plant in Mönchen-Gladbach. [pcs-consult.de](https://www.pcs-consult.de). <<https://www.pcs-consult.de/en/references/sewage-plant-moenchen-gladbach>> [dostęp 11.02.2022].

Wąs A., Sulewski P., Szymańska M. 2019. Biorafinerie rolnicze jako element trwałej biogospodarki. Wydawnictwo SGGW.

Wójtowicz P. 2021. Jarocin odzyska surowce z osadów ściekowych. [inzynieria.com](https://inzynieria.com). <<https://inzynieria.com/wodkan/wiadomosci/61963.jarocin-odzyskasurowce-z-osadow-sciekowych>> [dostęp 10.02.2022].

Wzorek Z. 2008. Odzysk związków fosforu z termicznie przetworzonych odpadów i ich zastosowanie jako substytutu naturalnych surowców fosforanowych. Seria Inżynieria i Technologia Chemiczna. Monografia 356. Wydawnictwo PK Kraków.

# 5. Granulowany osad czynny

## 5.1. Wprowadzenie

Od czasu odkrycia i wdrożenia technologii osadu czynnego jako podstawowej metody biologicznego oczyszczania ścieków (w 1914 r.) nieustannie poszukiwane są sposoby na intensyfikację tego procesu. Jednym z kierunków badań jest opracowanie procedury zwiększania stężenia biomasy bakteryjnej w reaktorze biologicznym, co może przyczynić się do skrócenia czasu potrzebnego na usunięcie zanieczyszczeń, przy jednoczesnej poprawie zdolności separacyjnych osadu od oczyszczonych ścieków. Klasyczny osad czynny najczęściej eksploatowany jest przy stężeniu w reaktorze od 3 do 5 kg SM/m<sup>3</sup> [Dymaczewski 2011], którego nie można dowolnie zwiększać, ponieważ spowoduje to pogorszenie właściwości sedymentacyjnych osadu w osadniku wtórnym. Dla efektywnej separacji osadu od oczyszczonych ścieków fundamentalne znaczenie ma więc nie tylko stężenie osadu, lecz także jego struktura, kondycja czy wielkość cząstek [Sławiński 2016].

Cechy te w latach 90. XX wieku stały się podstawą do badań zdolności granulacyjnych osadu. Od tego czasu prowadzono eksperymenty w skali laboratoryjnej w sekwencyjnych reaktorach porcjowych, które pozwoliły rozpoznać główne mechanizmy granulacji w warunkach tlenowych, wskazać czynniki determinujące jej przebieg, a także określić uwarunkowania technologiczne przyczyniające się do formowania granul osadu czynnego i utrzymania ich aktywności w pełnej skali technicznej [Kończak 2017, Moustafa 2014]. Obiecujące wyniki badań uzyskano na Uniwersytecie Technologicznym w Delft w ramach holenderskiego programu badawczego przy współpracy z Holenderską Fundacją Badań Wodnych, firmą DHV oraz sześcioma urzędami wodnymi. Proces ten został następnie opracowany inżyniersko do formy użytkowej przez DHV (obecnie Royal Haskoning DHV) pod nazwą Nereda. Opracowana technologia posiada patent nr PCT/NL 2003/000642 pod nazwą „Metoda oczyszczania ścieków z granulowanym osadem czynnym” [Gromiec 2021].

Definicja metody została przedstawiona podczas warsztatów w Monachium w 2004 r. i od tego czasu uważana jest za prawdziwy przełom w dziedzinie biologicznego oczyszczania ścieków [Kończak 2017]. Tlenowy granulowany osad czynny zdefiniowano jako agregaty pochodzenia mikrobiologicznego, które nie koagulują przy zredukowaniu hydrodynamicznych sił ścinających i które opadają znacząco szybciej niż kłaczkos osadu czynnego. Granule są rodzajem zagregowanej struktury mikrobiologicznej mającej sferyczny lub elipsoidalny kształt, którą tworzą te same mikroorganizmy jak w tradycyjnym osadzie kłaczkującym (**rysunek 5-1**).

Innowacyjna technologia z granulowanym osadem czynnym Nereda rozwiązuje problem efektywnego oddzielania zawiesziny osadu od oczyszczonych ścieków, co, jak wspomniano wcześniej, jest często utrudnione z wykorzystaniem konwencjonalnego kłaczkującego osadu czynnego. Dzięki większemu wymiarowi granuli i bardziej zwartej strukturze, mikroorganizmy wykazują bardzo wysoką zdolność do sedymentacji, co znacznie ułatwia utrzymanie dużych wartości stężenia biomasy w reaktorze i tym samym pozwala na skrócenie wymaganego czasu oczyszczania ścieków (**rysunek 5-2**). Ponadto nie jest wymagane stosowanie wielofazowych reaktorów zapewniających zmienne warunki

oksydo-redukcyjne. Przestrzenna struktura granul stwarza doskonałe warunki do symultanicznego oczyszczania ścieków w procesach tlenowych, anoksydacyjnych i beztlenowych w jednym reaktorze biologicznym. Co więcej, osad granulowany wykazuje znacznie wyższą odporność na skokowy wzrost obciążenia ładunkiem zanieczyszczeń, czyli na nierównomierność dopływu oraz składu ścieków [Amorim i in. 2017, Nancharaiah i in. 2018, Nancharaiah i in. 2019].



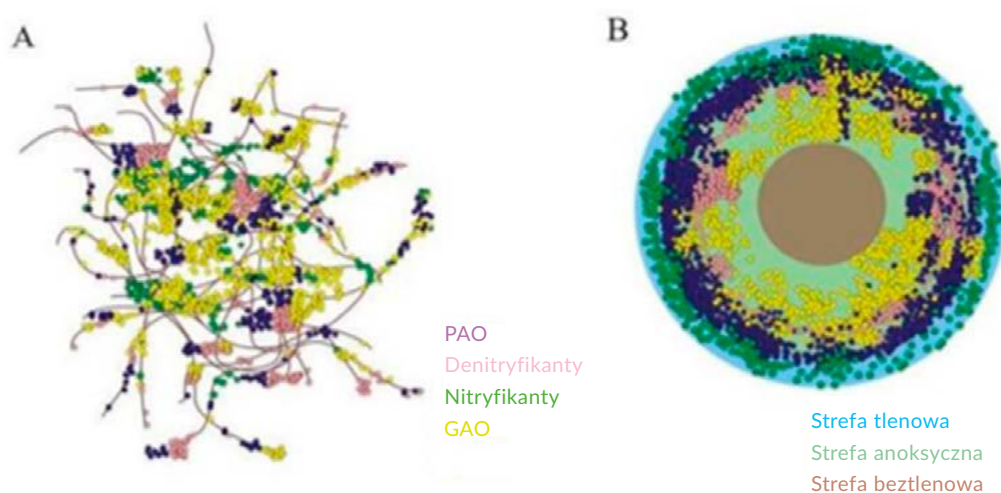
Rysunek 5-1. Granulowany osad czynny [www.royalhaskoningdhv.com]



Rysunek 5-2. Porównanie zdolności sedymentacyjnych osadu granulowanego i klasycznego osadu czynnego po 5 minutach sedymentacji [Olivier i in. 2016]



Jedną z najistotniejszych zalet osadu granulowanego w aspekcie technologicznym jest jego gęstość. Szacuje się, że biomasa bakteryjna w kłaczkach osadu czynnego stanowi od kilku do kilkunastu procent całkowitej suchej masy, podczas gdy w granulach osadu czynnego jej zawartość dochodzić może nawet do 80% [Podedworna i in. 2017]. Cechą granul jest także obecność w ich strukturze kanałów i głębokich porów, przez które dyfundują substraty i metabolity przemian biochemicznych mikroorganizmów. Jak wspomniano wcześniej, przestrzenna struktura granul sprawia, że w jej objętości formują się strefy o różnym stężeniu tlenu. Strefowość umożliwia koegzystencję różnych grup mikroorganizmów, bakterii autotroficznych, heterotroficznych, bezwzględnie tlenowych, fakultatywnych, beztlenowych czy aerofilowych. Najbardziej zewnętrzny obszar granul zasiedlany jest przez bakterie tlenowe. Im dalej w głąb granul, tym dyfuzja tlenu jest utrudniona, stąd w jej wewnętrznych warstwach dominują mikroorganizmy preferujące warunki anoksyczne i beztlenowe [Chmielowski 2019]. Graficzne porównanie struktur granul i kłaczków osadu czynnego przedstawiono na **rysunku 5-3**.



Rysunek 5-3. Porównanie struktury osadu kłaczkującego (A) i granulowanego (B) (opracowanie własne na podstawie [Kerstens 2017])

W obu rodzajach struktur drobnoustroje mają porównywalne funkcjonalności, tak więc bakterie nitryfikacyjne z powodzeniem prowadzą procesy nitryfikacji azotu amonowego do azotanów w warunkach tlenowych. Powstałe azotany są denitryfikowane w warunkach anoksycznych do azotu gazowego. Usuwanie fosforu prowadzone jest przez bakterie PAO, które poddawane są zmiennym warunkom beztlenowo-tlenowym. Aby umożliwić przebieg wspomnianych procesów w konwencjonalnej oczyszczalni ścieków, najczęściej stosuje się recykulację i zawracanie osadów do różnych komór układu biologicznego oczyszczania. Zabieg ten sprawia, iż różne grupy mikroorganizmów okresowo przebywają w nieoptymalnych dla siebie warunkach wzrostu. Cechą charakterystyczną osadu granulowanego jest jednoczesne, symultaniczne usuwanie związków węgla, azotu i fosforu w jednym reaktorze biologicznym. Umożliwia to właśnie różnorodność warunków panujących w strukturze granul [Pronk i in. 2015].

Z powodu swoich unikalnych właściwości technologia Nereda eksploatowana jest w jednym reaktorze pracującym w trybie cyklicznym, czyli popularnym reaktorze sekwencyjnym typu SBR. Działanie reaktora opiera się na trzech fazach każdego cyklu, a nie tak jak ma to miejsce tradycyjnie, na czterech [Pronk i in. 2015]. Fazy te przedstawiono poniżej.

1. Symultaniczne napełnianie i odprowadzanie ścieków oczyszczonych. W tej fazie do reaktora są równocześnie doprowadzane surowe ścieki po oczyszczeniu mechanicznym i odprowadzane ścieki oczyszczone biologicznie. W tym czasie następuje uwalnianie ortofosforanów i pobór związków węgla przez organizmy PAO. Zachodzi również denitryfikacja resztkowych azotanów pozostałych po poprzednim cyklu.
2. Napowietrzanie. W tej fazie przebiega proces nityfikacji. Powstające azotany dyfundują do wewnętrznych struktur granuli, gdzie panują warunki anoksyczne, a zamieszkujące je bakterie heterotroficzne prowadzą denitryfikację z wykorzystaniem związków węgla. Organizmy PAO pobierają wcześniej uwolnione związki fosforu i wbudowują w swoją biomasę w formie polifosforanów.
3. Sedymentacja, czyli oddzielanie granul osadu czynnego od oczyszczonych ścieków. Czas sedymentacji jest bardzo krótki dzięki doskonałym właściwościom sedymentacyjnym granul. Po tej fazie następuje rozpoczęcie kolejnego cyklu oczyszczania.

Podstawowe zalety technologii osadu granulowanego w stosunku do konwencjonalnego osadu czynnego to [Bathe i in. 2007, Olivier i in. 2016, Giesen i in. 2016, Robertson i in. 2016, Nanchariah i in. 2019]:

- możliwość utrzymywania w układzie bardzo wysokiego stężenia biomasy, sięgającego nawet do 15 kg SM/m<sup>3</sup>, dzięki czemu uzyskuje się znaczną poprawę skuteczności procesów oczyszczania ścieków;
- zwarta, niewielka kubatura reaktora i brak konieczności współpracy z osadnikiem wtórnym; kilkukrotnie mniejsze zapotrzebowanie terenu na budowę oczyszczalni przekłada się na oszczędności inwestycyjne oraz eksploatacyjne;
- niezwykle wysoka zdolność sedymentacji granul osadu, dzięki czemu minimalizuje się ryzyko przedostawania się biomasy do ścieków oczyszczonych; to zjawisko jest bardzo często przyczyną złej jakości odpływu z klasycznych układów oczyszczania ścieków;
- odporność na wysoką zmienność obciążenia ładunkiem zanieczyszczeń; w klasycznej oczyszczalni z osadem czynnym nagłe, skokowe zmiany ładunku dopływających zanieczyszczeń często powodują pogorszenie jakości odpływu;
- niższe o ok. 30–45% zużycie energii elektrycznej w porównaniu z klasyczną oczyszczalnią o analogicznej przepustowości; w technologii granulowanego osadu nie jest wymagane stosowanie wielofazowych reaktorów, dzięki czemu eliminuje się konieczność zastosowania towarzyszącej infrastruktury, m.in. pomp recyrkulacji, mieszadeł;
- mniejsze koszty związane z zagęszczaniem i odwadnianiem osadu nadmiernego; granule tlenowe ze względu na koncentrację biomasy charakteryzują się niższym udziałem wody w stosunku do konwencjonalnego osadu czynnego; sprzyja to poprawie zdolności odwadniania osadu i zmniejsza zapotrzebowanie na reagenty chemiczne stosowane podczas odwadniania;
- stabilność i elastyczność – system SBR można dostosować do zmieniającej się jakości dopływu, dzięki czemu osiąga się odporność na przeciążenia hydrauliczne i toksyczne;
- ścieki charakteryzują się bardzo wysokim stopniem oczyszczania, co sprzyja poprawie stanu jakości wód powierzchniowych;
- odporność na pęcznienie i pienienie, czyli typowe problemy eksploatacyjne, które bardzo często dotyczą konwencjonalny osad czynny.

## Obiekty referencyjne

Pierwsza w pełnej skali technicznej oczyszczalnia stosująca proces Nereda została uruchomiona w 2010 r. Reaktory pracują w oczyszczalniach ścieków w Holandii, Australii, Belgii, Francji, Niemczech, Polsce, Republice Południowej Afryki, Wielkiej Brytanii, Irlandii, Brazylii, Chinach, Arabii Saudyjskiej, Hiszpanii, Szwecji, Szwajcarii i USA. Obecnie na całym świecie działa lub jest w budowie około 90 takich instalacji [Kerstens 2017]. W tabeli 5-1 przedstawiono potwierdzone lokalizacje oczyszczalni, które wykorzystują technologię granulowanego osadu czynnego. Jak można zauważyć, większość z tych obiektów to oczyszczalnie komunalne. Wielkość danej oczyszczalni wyrażono poprzez RLM – widać duże zróżnicowanie, a najmniejsze, o wartości kilku tysięcy RLM, oczyszczają kilkaset m<sup>3</sup> ścieków na dobę. Większe obiekty liczą setki tysięcy RLM, natomiast największa oczyszczalnia znajduje się w Irlandii, w Dublinie. Jej wielkość wyznaczono jako 2 400 000 RLM i oczyszcza blisko 600 000 m<sup>3</sup> ścieków w ciągu doby. Najwięcej zakładów wybudowano w Brazylii, Holandii i Wielkiej Brytanii. W pozostałych wymienionych państwach pracują pojedyncze instalacje.

Tabela 5-1. Oczyszczalnie ścieków działające w technologii granulowanego osadu

Lokalizacja	Typ oczyszczalni	Wielkość OŚ (RLM)	Natężenie przepływu		Rok uruchomienia
			Q <sub>dśr</sub> m <sup>3</sup> /d	Q <sub>hmax</sub> m <sup>3</sup> /h	
<b>AUSTRALIA</b>					
Longford	komunalno-przemysłowa	-	2 800	680	2021
Sydney	komunalna	147 200	32 600	5 400	2020
<b>BELGIA</b>					
Lanaken	przemysłowa	212 500	14 000	600	2018
<b>BRAZYLIA</b>					
Araguaína, Tocantis	komunalna	228 000	34 000	2 200	2019
Bangu, Rio de Janeiro	komunalna	144 000	43 000	3 240	2020
Camaragibe, Recife	komunalna	355 550	55 000	3 835	2025
Deodoro, Rio de Janeiro	komunalna	432 000	86 400	6 120	2016
Jaboatão, Recife	komunalna	1 057 460	169 000	10 330	2022
Jardim São Paulo, Recife	komunalna	527 300	84 000	5 800	2020
Palmas, Tocantins	komunalna	250 000	27 200	1 700	2021
Jardim Novo, Rio Claro	komunalna	137 083	24 000	1 800	2017
Santo António, Goiânia	komunalna	466 000	82 000	6 000	2021
São Lourenço da Mata, Recife	komunalna	125 615	25 000	1 670	2021
Tatu, Limeira	komunalna	232 850	58 000	3 540	2019
Tijuco Preto, Sumaré, São Paulo	komunalna	99 500	20 000	1 500	2019

Lokalizacja	Typ oczyszczalni	Wielkość OŚ (RLM)	Natężenie przepływu		Rok uruchomienia
			Q <sub>dśr</sub> m <sup>3</sup> /d	Q <sub>hmax</sub> m <sup>3</sup> /h	
<b>FRANCJA</b>					
Fleury	komunalna	12 700	1554	144	2020
Oissery	komunalna	11 700	2000	282	2020
Chalon-sur-Saône	komunalna	45 000	5789	641	2020
<b>NIEMCY</b>					
Altena	komunalna	16 300	-	1 080	2021
<b>IRLANDIA</b>					
Carrigtwohill	komunalna	30 000	7 000	844	2016
Clonakilty	komunalna	22 000	5 000	630	2015
Cork Lower Harbour	komunalna	65 000	15 000	1 800	2017
Dublin-Ringsend	komunalna	2 400 000	600 000	50 000	2017
<b>FILIPINY</b>					
Quezon City	komunalna	8 000	5 000	315	2019
<b>POLSKA</b>					
Ryki	komunalna	41 000	5300	465	2015
<b>PORTUGALIA</b>					
Faro-Olhão	komunalna	134 130	22000	5050	2018
Frielas, Lisboa	komunalna	40 000	12000	1850	2014
<b>ARABIA SAUDYJSKA</b>					
Jeddah	komunalna	2 250 000	364000	21500	2023
<b>REPUBLIKA POŁUDNIOWEJ AFRYKI</b>					
Overstrand	komunalna	28 182	5000	400	2008
Hartebeesfontein	komunalna	47 000	5000	208	2020
Stellenbosch	komunalna	36 250	5000	600	2015
<b>HISZPANIA</b>					
Muskiz	komunalna	15 350	-	-	2023
<b>SZWECJA</b>					
Strömstad	komunalna	21 000	4000	360	2018
<b>SZWAJCARIA</b>					
Alpnach	komunalna	65 000	14000	1900	2017
Kloten, Opfikon	komunalna	95 000	20000	2880	2020



Lokalizacja	Typ oczyszczalni	Wielkość OŚ (RLM)	Natężenie przepływu		Rok uruchomienia
			$Q_{dśr}$ $m^3/d$	$Q_{hmax}$ $m^3/h$	
<b>HOLANDIA</b>					
Breskens	komunalna	28 167	4 000	1 020	2019
Dinxperlo	komunalna	10 000	3 100	570	2013
Dodewaard	komunalna	69 000	9 528	2 700	2020
Ede	przemysłowa	5 000	250	10	2005
<b>HOLANDIA</b>					
Epe	komunalna	37 167	8 000	1 500	2011
Groningen	komunalna	140 000	30 000	4 200	2014
IJsselstein	przemysłowa	33 000	1 422	59	2015
Oosterwolde	przemysłowa	4 167	500	21	2009
Panheel	komunalna	28 100	6 525	1 088	2020
Rotterdam	przemysłowa	5 000	-	10	2005
Simpelveld	komunalna	9 109	4 000	630	2016
Stein, Limburg	komunalna	24 200	7 120	840	2020
Utrecht	komunalna	308 333	76 000	14 120	2018
Vriezenveen	komunalna	13 500	2 000	1 000	2021
Vroomshoop	komunalna	13 450	1 500	400	2013
Weert	komunalna	52 750	20 127	3 130	2019
Zutphen	przemysłowa	213 383	10 000	422	2018
<b>WIELKA BRYTANIA</b>					
Barston	komunalna	78 000	15 000	1 500	2018
Blackburn	komunalna	430 000	66 000	12 000	2021
Dungannon	komunalna	26 067	8 000	600	2019
Failsworth	komunalna	24 400	5 000	1 620	2020
Great Dunmow, Essex	komunalna	10 958	2 000	240	2018
Highworth,	komunalna	9 100	1 000	198	2017
Inverurie, Scotland	komunalna	40 016	11 000	544	2018
Kendal	komunalna	92 897	19 000	1 850	2018
Morecambe	komunalna	29 100	12 000	2 360	2018
Newham	komunalna	10 676	1 750	260	2020
Radcliffe-on-Trent	komunalna	22 250	5 000	504	2019
Walsall Wood	komunalna	26 250	5 000	646	2019
<b>STANY ZJEDNOCZONE</b>					
Foley, Alabama	komunalna	60 717	14 000	961	2019
Whitefish, Montana	komunalna	34 600	9 245	1 094	2021

Objaśnienia:  $Q_{dśr}$  – przepływ średni dobowy;  $Q_{hmax}$  – przepływ maksymalny godzinowy  
Opracowanie własne na podstawie [Robertson i in. 2016, Giesen i in. 2016, royalhaskoningdhv.com]

## 5.2. Wybrane obiekty

### 5.2.1. Oczyszczalnia ścieków w miejscowości Ryki (Polska)

W Polsce istnieje jedna oczyszczalnia pracująca w technologii Nereda. Jest to oczyszczalnia ścieków „Fregata” w Rykach uruchomiona w roku 2015 (**rysunek 5-4**). Obciążenie oczyszczalni wynosi ok. 41 000 RLM, co przekłada się na średniodobowy przepływ ścieków wynoszący ok. 5300 m<sup>3</sup>/d. Przed rozbudową oczyszczalnia pracowała w technologii zbliżonej do SBR, jednak, ze względu na okresowo występujące wahania jakości dopływu i przeciążenia, nie była w stanie zapewnić wystarczającej eliminacji azotu i fosforu. Dodatkowo oczyszczalnia musiała sobie radzić z niskimi temperaturami ścieków, wynoszącymi ok. 7°C w miesiącach zimowych. Zakład został więc rozbudowany o drugi, równoległe pracujący ciąg w technologii Nereda. Warto wspomnieć, że hodowlę osadu granulowanego rozpoczęto w momencie, gdy temperatura ścieków wynosiła nawet 4°C. Pomimo niskich temperatur, które w praktyce uniemożliwiają biologiczne oczyszczanie ścieków, zakład już w trakcie rozruchu osiągnął pełną wydajność [Olivier i in. 2016, Gromiec 2015a, Gromiec 2021, royalhaskoningdhv.com].



**Rysunek 5-4.** Widok na oczyszczalnię ścieków „Fregata” w Rykach oraz reaktor biologiczny pracujący w technologii Nereda [royalhaskoningdhv.com]

### 5.2.2. Oczyszczalnia ścieków w miejscowości Fleury (Francja)

Bardzo nietypowy obiekt został uruchomiony w 2020 r. we Francji w miejscowości Fleury (rysunek 5-5). Jest to przykład stosunkowo małej oczyszczalni, obsługującej 12 700 mieszkańców równoważnych, o średniodobowym przepływie ścieków wynoszącym ok. 1550 m<sup>3</sup>/d. Eksploatator miejscowego systemu kanalizacyjnego poszukiwał rozwiązania, które łączy cechy wysokowydajnego oczyszczania ścieków przy jednoczesnej minimalizacji wpływu na środowisko i krajobraz. Układ wyposażony jest w trzy reaktory Nereda.

Harmonijne wkomponowanie oraz ograniczenie wpływu zakładu na wiejski krajobraz osiągnięto poprzez kompaktowe rozmiary i zastosowanie zielonej infrastruktury [royalhaskoningdhv.com].



Rysunek 5-5. Widok na oczyszczalnię ścieków w miejscowości Fleury (Francja) [royalhaskoningdhv.com]

### 5.2.3. Oczyszczalnia ścieków w miejscowości Oissery (Francja)

We Francji, w miejscowości Oissery, znajduje się kolejny efektywny architektonicznie zakład wybudowany w roku 2020 (rysunek 5-6). Ta oczyszczalnia obciążona jest ładunkiem od niemal 12 000 mieszkańców równoważnych, co przekłada się na średniodobowy przepływ wynoszący ok. 2000 m<sup>3</sup>/d. Jest to drugi taki obiekt wybudowany we Francji i tym razem również poszukiwano rozwiązania, które zapewni bardzo wysoki stopień oczyszczania w połączeniu z jak najmniejszą ingerencją w środowisko naturalne. Proces biologiczny w technologii Nereda prowadzony jest w trzech reaktorach. Następnie oczyszczone ścieki poddaje się dodatkowej filtracji w filtrach dyskowych, dzięki czemu możliwe jest uzyskanie wody o wysokiej jakości, do wykorzystania na przyległych terenach rolniczych [royalhaskoningdhv.com].



Rysunek 5-6. Widok na oczyszczalnię ścieków w miejscowości Oissery (Francja) [royalhaskoningdhv.com]

### 5.2.4. Oczyszczalnia ścieków w miejscowości Dinxperlo (Holandia)

Nietuzinkowa realizacja omawianej technologii została przeprowadzona w holenderskim mieście Dinxperlo (rysunek 5-7). Oczyszczalnia ścieków została oddana do eksploatacji w roku 2013 i oczyszcza około 14 000 m<sup>3</sup> ścieków na dobę. Ścieki biologicznie oczyszczone w technologii Nereda nie są bezpośrednio odprowadzane do środowiska, tylko przepływają przez specjalnie zaprojektowany kaskadowy ogród wodny. Dzięki temu uzyskuje się ich dalsze naturalne doczyszczanie. Na całym terenie utworzono ścieżki spacerowe, dzięki czemu osiągnięto harmonię z istniejącym krajobrazem, a sam park wodny jest wykorzystywany do celów rekreacyjnych [royalhaskoningdhv.com, dutchwatersector.com].





Rysunek 5-7. Widok na oczyszczalnię ścieków w miejscowości Dinxperlo (Holandia) [royalhaskoningdhv.com]

#### 5.2.5. Oczyszczalnia ścieków w miejscowości Dodewaard (Holandia)

Inny obiekt stosujący technologię granulowanego osadu czynnego został wzniesiony również w Holandii, w miejscowości Dodewaard (rysunek 5-8). Oczyszczalnia została oddana do użytku w roku 2020 i oczyszcza ścieki pochodzące od 69 000 mieszkańców równoważnych w ilości ok. 95 000 m<sup>3</sup>/d. Zapotrzebowanie energetyczne oczyszczalni jest w pełni zapewniane przez lokalną elektrownię fotowoltaiczną wybudowaną na terenie zakładu. Dzięki takiemu rozwiązaniu oczyszczalnia jest w pełni neutralna klimatycznie [royalhaskoningdhv.com].



Rysunek 5-8. Widok na oczyszczalnię ścieków w Dodewaard (Holandia) [royalhaskoningdhv.com]

### 5.2.6. Oczyszczalnia ścieków w miejscowości Vroomshoop (Holandia)

Na terenie tej oczyszczalni technologia Nereda jest eksploatowana w nieco inny sposób niż zazwyczaj, ponieważ współpracuje z klasycznym osadem czynnym (**rysunek 5-9**). Oba systemy pracują równolegle i oczyszczają po 50% strumienia ścieków dopływających do oczyszczalni. Jest to pierwsza oczyszczalnia hybrydowa, łącząca funkcjonalność klasycznej technologii osadu czynnego z osadem granulowanym. Aby poprawić właściwości sedymentacyjne osadu czynnego, osad nadmierny z reaktora Nereda jest usuwany do reaktora klasycznego. Taki zabieg powoduje zwiększenie zdolności sedymentacyjnych kłaczków osadu czynnego, ponieważ absorbują się one na powierzchni granul. Pozwala to w praktyce utrzymywać relatywnie niski indeks (60–80 ml/g SM) jak dla klasycznego osadu czynnego, dzięki czemu możliwe jest stosowanie podwyższonego stężenia osadu w reaktorze biologicznym i jego większe obciążenie ładunkiem zanieczyszczeń. Zapotrzebowanie energetyczne reaktora Nereda jest o 40% mniejsze niż reaktora klasycznego, stosowanego przy oczyszczaniu tego samego ładunku zanieczyszczeń [Giesen i in. 2016, royalhaskoningdhv.com].



Rysunek 5-9. Oczyszczalnia ścieków w miejscowości Vroomshoop (Holandia). System hybrydowy klasycznego osadu czynnego (po lewej) oraz osadu granulowanego (po prawej) [royalhaskoningdhv.com]

### 5.3. Podsumowanie

Technologia tlenowego granulowanego osadu czynnego staje się powoli standardem w energooszczędnym, niskonakładowym i zrównoważonym oczyszczaniu ścieków. Powinna być uważana za jedną z najbardziej pożądanych technologii biologicznego oczyszczania ścieków w XXI wieku. Jej unikatowe cechy i zalety umożliwiające wysokoefektywne oczyszczanie ścieków połączone z energooszczędnością doskonale wpisują się w działania oczyszczalni ścieków przyszłości. Ta dosyć nowa technologia, licząca zaledwie kilkanaście lat, funkcjonuje już w pełnej skali technicznej w ok. 90 instalacjach na świecie. Jako że oczyszczalnie ścieków mają w przyszłości osiągać samowystarczalność energetyczną, technologia ta doskonale spełnia ten warunek. Jej wdrożenie obniża zapotrzebowanie energetyczne zakładu nawet o kilkadziesiąt procent, przy czym jakość ścieków oczyszczonych jest na równorzędym poziomie jak w przypadku oczyszczania z wykorzystaniem klasycznego systemu z osadem czynnym.



## Literatura:

- Amorim C., Duque A., Loosdecht M. 2017. Chapter: Aerobic Granular Sludge: Treatment of Wastewaters Containing Toxic Compounds. Technologies for the Treatment and Recovery of Nutrients from Industrial Wastewater. s. 231–263.
- Bathe S., Schwarzenbeck N., McSwain B. 2007. Aerobic Granular Sludge, IWA Publishing.
- Chmielowski K. 2019. Tlenowy granulowany osad czynny w oczyszczaniu ścieków. Przegląd Komunalny, 6 (333), s. 44–47.
- Dymaczewski Z. 2011. Poradnik eksploatatora oczyszczalni ścieków. PZITS Poznań.
- dutchwatersector.com. <<https://www.dutchwatersector.com/news/wwtp-dinxperlo-turned-into-public-water-garden-with-latest-nereda-water-treatment-technology>> [dostęp 21.02.2022].
- Giesen A. Loosdrecht M., Pronk M., Robertson A., Thompson A. 2016. Aerobic Granular Biomass Technology: recent performance data, lessons learnt and retrofitting conventional treatment infrastructure. Water Environment Federation (11), s. 1913–1923.
- Gromiec M. 2021. Technologia z tlenowym granulowanym osadem czynnym. Ochrona zasobów wodnych przed zanieczyszczeniem. Wybrane problemy i rozwiązania. Wydawnictwo Polskiej Akademii Nauk. Monografie Komitetu Inżynierii Środowiska, nr 172, s. 146–160.
- Gromiec M. 2011. Nereda – innowacyjna technologia granulowanego osadu czynnego do oczyszczania ścieków przemysłowych i komunalnych. Gaz, Woda i Technika Sanitarna, 5, s. 179–183.
- Gromiec M. 2015. Doświadczenia z eksploatacji komunalnych oczyszczalni ścieków z granulowanym osadem czynnym w technologii Nereda. Forum Eksploatatora, 6 (81), s. 42–44.
- Gromiec M. 2015a. Uruchomienie pierwszej w Polsce oczyszczalni ścieków z technologią Nereda w Rykach. Gaz, Woda i Technika Sanitarna, nr 9, s. 328–330.
- Kersens S. 2017. Introduction on Aerobic Granular Sludge Technology. royalhaskoningdhv.com. <<https://www.royalhaskoningdhv.com/-/media/nereda/files/public/academy/20170530nereda-aerobic-granular-sludge-technology-for-ichemes-water-special-interest-group.pdf?la=en-gb>> [dostęp 22.02.2022].
- Kończak B. 2017. Rozwój technologii tlenowego granulowanego osadu. Gaz Woda i Technika Sanitarna, 12 (91), s. 487–489.
- Moustafa T. 2014. Aerobic Granular Sludge – Study of applications for industrial and domestic wastewater. odr.chalmers.se. <<https://odr.chalmers.se/bitstream/20.500.12380/202942/1/202942.pdf>> [dostęp 15.02.2022].
- Nancharaiah Y. V., Sarvajith M. 2019. Aerobic granular sludge process: A fast growing biological treatment for sustainable wastewater treatment. Current Opinion in Environmental Science & Health, 12, s. 57–65.
- Nancharaiah Y.V., Kiran Kumar Reddy G. 2018. Aerobic granular sludge technology. Mechanisms of granulation and biotechnological applications, Bioresource Technology, Volume 247, s. 1128–1143.
- Olivier B., Thompson A. 2016. Nereda a pathway to sustainable wastewater treatment in the UK. waterprojectsonline.com <[https://waterprojectsonline.com/wp-content/uploads/case\\_studies/2016/Royal\\_Haskoning\\_Nereda\\_2016.pdf](https://waterprojectsonline.com/wp-content/uploads/case_studies/2016/Royal_Haskoning_Nereda_2016.pdf)> [dostęp 15.02.2022].
- Podedworna J., Piechna P. 2017. Tlenowy granulowany osad czynny. Koncepcje mechanizmów formowania, właściwości i wymagania technologiczne. Wydawnictwo Seidel-Przywecki, wydanie I.
- Podedworna J., Augustyniak P., Sytek-Szmeichel K. 2016. Tlenowy osad granulowany – alternatywa dla klasycznego osadu czynnego. Gaz, Woda i Technika Sanitarna, 4, s. 142–148.
- Pronk M., de Kreuk M., de Bruin B., Kamminga P., Kleerebezem R., van Loosdrecht M. 2015. Full scale performance of the aerobic granular sludge process for sewage treatment. Water Research, 84 (1), s. 207–217.

Robertson S., Doutor J, Bentem A. 2016. Delivering sustainable wastewater treatment using aerobic granular sludge – the nereda story. royalhaskoningdhv.com <[https://www.royalhaskoningdhv.com/nereda/-/media/nereda/files/public/abstracts-and-papers/2016\\_wisa\\_delivering-sustainable-wastewater-treatment-using-aerobic-granular-sludge-the-nereda-story.pdf?la=en-gb](https://www.royalhaskoningdhv.com/nereda/-/media/nereda/files/public/abstracts-and-papers/2016_wisa_delivering-sustainable-wastewater-treatment-using-aerobic-granular-sludge-the-nereda-story.pdf?la=en-gb)> [dostęp 15.02.2022].

Sławiński J. 2016. Tlenowy granulowany osad czynny – nowy standard dla energooszczędnego, niskonakładowego i zrównoważonego oczyszczania ścieków. Forum Eksploatatora, 1 (82), s. 32–36.

Matuszczak M. 2015. Innowacyjna oczyszczalnia w Rykach. Wodociągi i Kanalizacja, nr 12.



## 6. Bioreaktory membranowe

### 6.1. Wprowadzenie

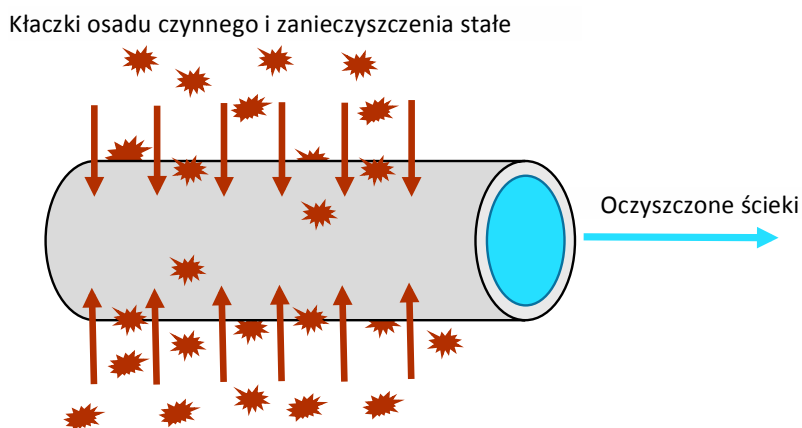
Procesy membranowe to techniki, których rozwój zapoczątkowany został w latach 60. XX wieku [Sutherland 2010]. Techniki te pozwalają na separację zanieczyszczeń od oczyszczanego medium na poziomie cząstkowym (makrocząstki i mikrocząstki), koloidalnym, molekularnym lub nawet jonowym. Z tego względu znalazły powszechne zastosowanie w branży oczyszczania i odnowy wody. Wykorzystuje się je do odsalania wód słonych i słonawych, demineralizacji wody zasilającej kotły parowe bądź do przygotowania wód ultraczystych wymaganych w niektórych branżach przemysłowych, np. przemyśle elektronicznym, farmaceutycznym bądź energetyce jądrowej. Procesy membranowe wykorzystywane są również do uzyskiwania wody przeznaczonej do spożycia przez ludzi [Kowal i in. 1996, Kowal 1997].

Oczyszczanie medium za pomocą membrany odbywa się w większości przypadków na zasadzie filtracji, której siłą napędową jest różnica ciśnień po obu stronach membrany, która wymusza przepływ medium. Membrana to cienka przegroda, która pozwala na selektywny transport masy. Tak więc separacja substancji polega na fizycznym oddzieleniu cząstek znajdujących się w oczyszczanym medium (**rysunek 6-1**). Jej sprawność zależy od rodzaju zastosowanej membrany (w przypadku membran porowatych – wielkość i rozkład porów) oraz od wielkości cząstek zanieczyszczeń w oczyszczanym medium [Kowal i in. 1996, Kowal 1997].

Jak wspomniano wcześniej, procesy membranowe na obecnym etapie rozwoju są stosowane przede wszystkim przy odsalaniu i odnowie wód. Zastosowanie ich w branży oczyszczania ścieków komunalnych jest stosunkowo nowym pomysłem. Pierwsze badania w tym zakresie były prowadzone w Stanach Zjednoczonych już na przełomie lat 60. i 70. XX wieku. Polegały na próbach oddzielenia osadu czynnego od oczyszczonych ścieków w zewnętrznym zbiorniku zlokalizowanym w bocznym ciągu technologicznym. Wykorzystywano wtedy membrany ultrafiltracyjne w modułach płytowo-ramowych. Metoda z zastosowaniem filtracji osadu czynnego na module usytuowanym na zewnątrz komory z biomasą uważana jest za prekursora technologii bioreaktora membranowego MBR (Membrane Biological Reactor). Ówczesna konfiguracja produkowała ścieki o bardzo wysokiej jakości, lecz jej rozpowszechnienie było ograniczone w tamtym czasie ze względu na wysokie koszty związane z szybkim zanieczyszczeniem membran oraz niedostatkiem wiedzy na temat przedłużania ich żywotności i regeneracji. Do niepowodzenia przyczyniły się również wysokie koszty energii pobieranej przez rozbudowane układy działające w bocznym strumieniu ścieków [Al-Asheh i in. 2021, Yang i in. 2006].

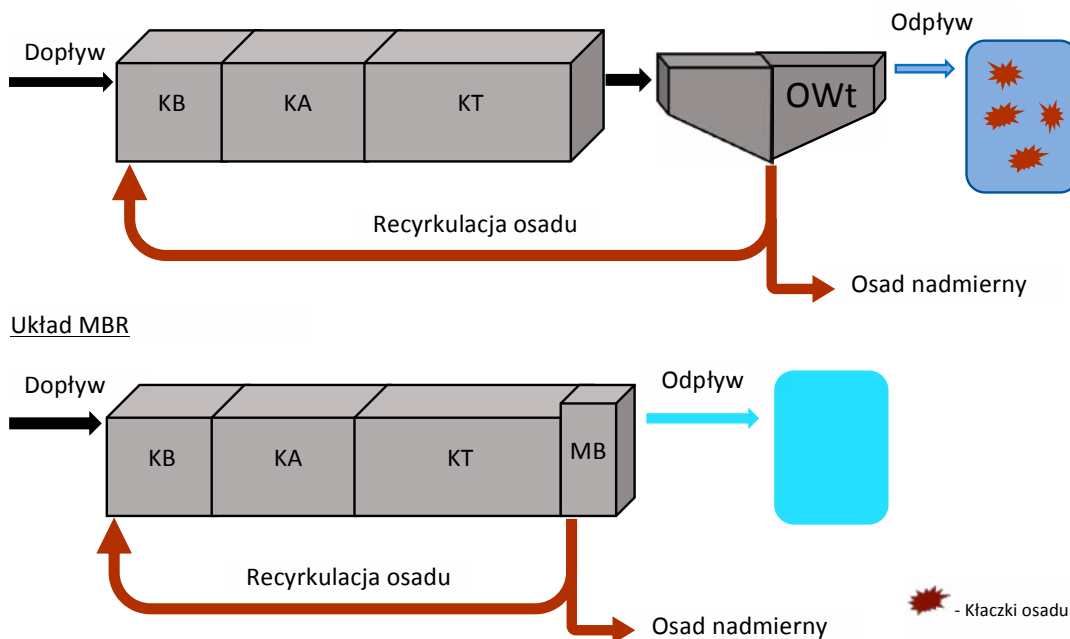
W kolejnych latach opracowano nowocześniejsze moduły membranowe, a jednym z nich są membrany kapilarne z włóknami typu hollow fiber. Moduł taki zawiera bardzo dużą liczbę rurek kapilarnych o średnicach kilkudziesięciu mikrometrów umieszczonych w jednym cylindrze. Po raz pierwszy został umieszczony bezpośrednio w reaktorze osadu czynnego w 1989 r. w Japonii. Układ zużywał o dwa rzędy wielkości mniej energii niż wcześniejsza wersja z wykorzystaniem strumienia bocznego.

Badania przeprowadzone w Japonii doprowadziły do komercjalizacji i opracowania technologii reaktorów biomembranowych MBR [Sutherland 2010].



**Rysunek 6-1.** Schemat działania włókna membranowego stosowanego w technologii MBR (opracowanie własne na podstawie [Piaskowski i in. 2017])

Technologia MBR jest fascynującym połączeniem oczyszczania biologicznego z filtracją membranową. Bioreaktor membranowy eliminuje konieczność budowy osadników wtórnych, czyli urządzeń, w których następuje oddzielenie osadu czynnego od oczyszczonych ścieków. W technologii MBR procesy usuwania zanieczyszczeń, a następnie separacji osadu odbywają się w jednym reaktorze, co powoduje oszczędności zarówno inwestycyjne, jak i eksploatacyjne. Na **rysunku 6-2** przedstawiono porównanie konwencjonalnego systemu osadu czynnego z systemem MBR.



KB – Komora beztlenowa KA – Komora anoksyczna KT – Komora tlenowa OWt – Osadnik wtórny MB – Moduł membranowy

**Rysunek 6-2.** Porównanie konwencjonalnego osadu czynnego i technologii MBR (opracowanie własne na podstawie [Piaskowski i in. 2017])

W rozdziale dotyczącym osadu granulowanego opisano, że sedymentacja osadu w osadniku wtórnym jest często limitującym procesem w oczyszczaniu ścieków. Proces ten w układzie konwencjonalnym jest dość powolny, a jego poprawne funkcjonowanie uwarunkowane jest niskimi stężeniami osadu czynnego w przedziale 3–5 kg SM/m<sup>3</sup>. Przy większych wartościach potęgują się problemy z prawidłowym osiadaniem biomasy, która zostaje wyniesiona wraz z oczyszczonymi ściekami poza układ. Układ MBR może natomiast pracować przy znacznie wyższym stężeniu biomasy, nawet w zakresie 15–20 kg SM/m<sup>3</sup> [Gallagher i in. 2008]. Membrany stanowią fizyczną barierę dla osadu czynnego, dlatego w tym przypadku nie występują problemy z ucieczką biomasy poza układ. Wyższe stężenie umożliwia oczyszczenie tego samego ładunku zanieczyszczeń w krótszym czasie i znacznie mniejszym reaktorze, co sprzyja obniżeniu kosztów eksploatacyjnych w oczyszczalni. Efektywność usuwania zanieczyszczeń jest również wyższa niż w przypadku układów konwencjonalnych. Za pomocą tej technologii możliwe jest uzyskanie stopnia zmniejszenia ChZT powyżej 95%, BZT<sub>5</sub> powyżej 98%, a zawiesiny ogólnej nawet do 99% [Piaskowski 2015]. Sprawia to, że parametry definiujące jakość ścieków oczyszczonych przyjmują o wiele niższe wartości niż te definiowane prawnie. Ma to z kolei istotne znaczenie w kontekście konieczności zmniejszania zanieczyszczenia wód oraz możliwości recyklingu wody, jej odzyskiwania i ponownego wykorzystania.

Warto również wspomnieć o właściwościach dezynfekcyjnych. Układy MBR wykorzystują membrany mikro-, ultra- oraz nanofiltracyjne, dzięki czemu zapewniają również częściowe lub całkowite usunięcie bakterii, pierwotniaków czy wirusów [Purnell i in. 2015]. Pomimo że w klasycznym układzie oczyszczania eliminowane jest ponad 99% mikroorganizmów, to w odpływie ich liczba sięga nawet setek tysięcy w każdym litrze odprowadzonych ścieków. Wśród nich znajdują się bakterie typu kałowego i inne chorobotwórcze, stwarzające zagrożenia dla zdrowia człowieka i stanu środowiska naturalnego [Krawczyk i in. 2020]. Układ MBR eliminuje problem zanieczyszczeń mikrobiologicznych w odprowadzanych ściekach, a więc w zasadzie umożliwia odnowę wody i jej wtórne wykorzystanie jako wody technologicznej, ochrony przeciwpożarowej czy do nawadniania rolniczego. Nie bez powodu technologia MBR uznawana jest za jedną z najlepszych dostępnych technik w oczyszczaniu ścieków (Best Available Techniques – BAT). Podstawowe zalety są następujące [Al-Asheh i in. 2021, Gallagher i in. 2008]:

- eliminacja problemów z sedymentacją w osadnikach wtórnych, co w układach konwencjonalnych przyczynia się do znacznego pogorszenia jakości odpływu;
- mniejsze o 30–50% zapotrzebowanie terenu na budowę urządzeń do oczyszczania ścieków; brak osadnika wtórnego pozwala na budowę bardziej kompaktowych obiektów, zajmujących dużą mniejszą powierzchnię terenu; przekłada się to na oszczędności inwestycyjne oraz eksploatacyjne;
- wyższa efektywność oczyszczania biologicznego dzięki możliwości utrzymywania nawet dwukrotnie wyższego stężenia biomasy w układzie;
- wyższa tolerancja układu na wahania ilości i składu ścieków (w porównaniu z klasycznym systemem);
- największy stopień eliminacji mikroplastików, farmaceutyków, bakterii i wirusów chorobotwórczych spośród wszystkich dostępnych technik;
- możliwość recyklingu wody, jej odzyskania i ponownego wykorzystania, dzięki bardzo wysokiej efektywności procesu w usuwaniu zanieczyszczeń trudno biodegradowalnych, mikrozanieczyszczeń organicznych i mikrobiologicznych.

Niestety technologia ta posiada również ograniczenia, a mianowicie przepustowość hydrauliczna systemów MBR maleje w czasie, co związane jest z odkładaniem się cząstek zawieszonych i rozpuszczonych w ściekach na powierzchni oraz w porach membran. Jest to zjawisko tak zwanego foulingu i scalingu. Fouling jest najpoważniejszym problemem wpływającym na pracę membrany, ponieważ prowadzi do znacznego wzrostu oporów hydraulicznych, a to powoduje zwiększenie ciśnienia transmembranowego (przy pracy systemu ze stałą wydajnością), więc generuje również zwiększenie kosztów pracy układów pompowych – aby zapewnić tę samą wydajność filtracji należy dostarczyć więcej energii. Aby przeciwdziałać temu zjawisku stosowane są różne zabiegi, polegające między innymi na płukaniu membran oczyszczonym strumieniem w kierunku odwrotnym do przepływu ścieków, co powoduje wymywanie zanieczyszczeń z ich powierzchni do reaktora. Innym sposobem jest wprowadzanie sprężonego powietrza. Ponadto stosowane są okresowo również chemiczne metody czyszczenia, które powodują rozpuszczanie zalegających zanieczyszczeń [Yang i in. 2006, Bodzek i in. 1997, Iorhemen i in. 2016].

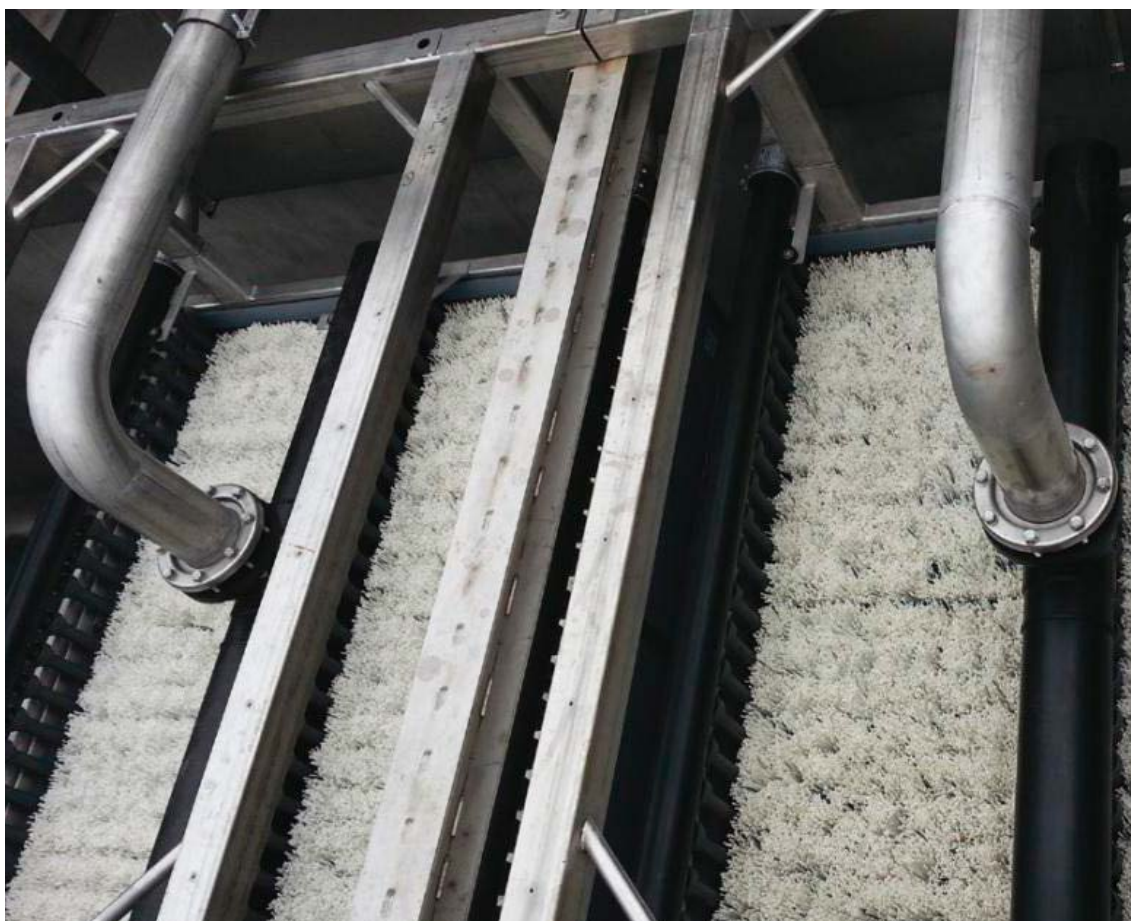
Technologia reaktorów MBR jest jedną z najszybciej rozwijanych i wdrażanych technologii oczyszczania ścieków na całym świecie. Od jej opracowania w roku 1989 została uruchomiona w tysiącach oczyszczalni na całym świecie, zarówno w małych obiektach oczyszczających kilkaset m<sup>3</sup> ścieków na dobę, jak i w dużych, oczyszczających setki tysięcy m<sup>3</sup> ścieków na dobę z największych aglomeracji [Witkowska 2009]. Największe tego typu instalacje, które oczyszczają ponad 100 000 m<sup>3</sup>/d ścieków znajdują się w Chinach (w prowincji Hubei, o średniodobowym przepływie wynoszącym 800 tys. m<sup>3</sup>/d), Szwecji, Francji, USA, Belgii, Włoszech, Singapurze i Francji. Obecnie w fazie budowy znajduje się stacja recyklingu wody w Singapurze. Jej uruchomienie planowane jest w roku 2025. Zastosowana technologia MBR będzie oczyszczała ścieki w ilości 1,2 mln m<sup>3</sup> na dobę [thembrsite.com].

## 6.2. Wybrane obiekty

### 6.2.1. Oczyszczalnia ścieków w miejscowości Rowy (Polska)

Oczyszczalnia ścieków w Rowach jest pierwszym o tak dużej wydajności i wyjątkowej elastyczności obiektem w Polsce. Ze względu na swoje położenie w nadmorskim regionie turystycznym, wzrost natężenia ruchu w sezonie powodował narastające problemy wynikające z przeciążenia hydraulicznego oczyszczalni (letni sezon turystyczny  $Q_{\text{śrd}} = 4835 \text{ m}^3/\text{d}$ ,  $\text{RLM} = 45\ 000$ , a poza sezonem turystycznym  $Q_{\text{śrd}} = 997 \text{ m}^3/\text{d}$ ,  $\text{RLM} = 8\ 000$ ), co wpływało na obniżenie efektywności oczyszczania biologicznego i wypływanie zawiesin z osadnika wtórnego. W roku 2013 zakończyła się modernizacja obiektu w kierunku technologii membranowej. Zastosowany bioreaktor membranowy składa się z 4 komór, w których zainstalowane są po 4 moduły filtracyjne o łącznej powierzchni 12 000 m<sup>2</sup> (rysunek 6-3). Zastosowano moduły membranowe typu hollow fiber z membranami ultrafiltracyjnymi o średnicy porów 0,03 μm. Pojedyncze włókna tworzą wiązki, które przytwierdzone są w dolnej części do kolektora z dyszą napowietrzającą, natomiast górne – zaślepione na końcówkach, swobodnie się poruszają w toni ścieków. Filtracja przebiega od zewnętrznej strony włókna do jego wnętrza przy zastosowaniu podciśnienia wytwarzanego przez pompę filtratu. Średnie wartości parametrów zanieczyszczeń kształtują się następująco:  $\text{BZT}_5 = 3 \text{ mg/l}$ ,  $\text{ChZT} = 36 \text{ mg/l}$ ,

zawiesiny ogólne = 2 mg/l. Są to bardzo niskie wartości, w praktyce nieosiągalne przez konwencjonalne oczyszczalnie ścieków [Piaskowski i in. 2017, Piaskowski 2015, pomorskiednienergii.pl].

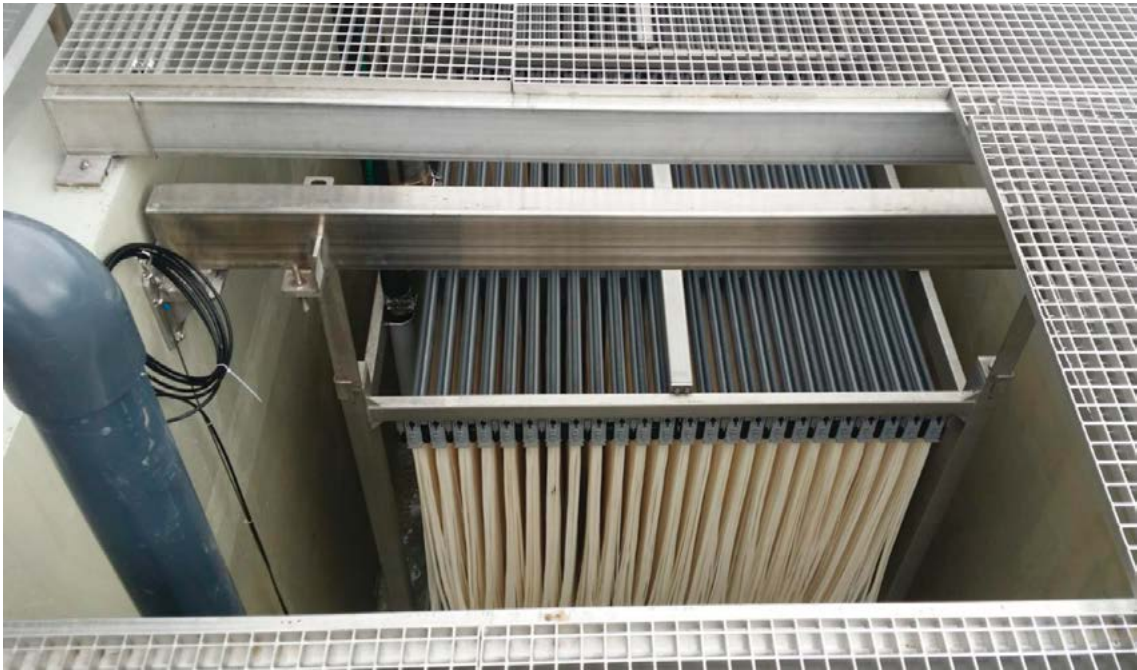


Rysunek 6-3. Włókna kapilarne tworzące moduły membranowe w oczyszczalni ścieków w Rowach [Piaskowski i in. 2017]

### 6.2.2. Oczyszczalnia ścieków w miejscowości Głogów Małopolski (Polska)

Oczyszczalnia o wielkości 25 000 RLM w technologii MBR pracuje od 2015 r. Oczyszczanie biologiczne odbywa się przy użyciu sekwencyjnych reaktorów porcjowych. Oczyszczone ścieki w ilości 5000 m<sup>3</sup>/d, już po procesie biologicznym, kierowane są do wydzielonych komór, w których znajdują się moduły membranowe (rysunek 6-4). Działanie instalacji jest sprzężone z działaniem reaktorów sekwencyjnych, tj. polega ono na automatycznym, cyklicznym występowaniu fazy zasysania i odprowadzania oczyszczonych ścieków na przemian z fazą spoczynku wraz z czyszczeniem membran, w której to oczyszczone ścieki wykorzystywane są do przeciwprądowego ich płukania. Zastosowany system ultrafiltracji umożliwia utrzymywanie wysokiego stężenia osadu powyżej 10 kg SM/m<sup>3</sup>, co znacznie intensyfikuje procesy biologiczne zachodzące w reaktorach SBR. Połączenie systemu SBR i MBR pozwoliło ponad dwukrotnie zwiększyć jej dotychczasową wydajność, jednocześnie obniżając energochłonność. Uzyskany permeat jest wykorzystywany jako woda technologiczna do wszystkich urządzeń na terenie oczyszczalni, które wymagają płukania [ekombr.pl, Piaskowski i in. 2017].





Rysunek 6-4. Moduł membranowy w oczyszczalni ścieków w Głogowie Małopolskim [Piaskowski i in. 2017]

### 6.2.3. Oczyszczalnia ścieków w miejscowości Muszyna (Polska)

Oczyszczalnia ścieków (rysunek 6-5) jest obiektem o przepustowości  $Q_{\text{śr}} = 2\,243 \text{ m}^3/\text{d}$  (RLM = 14 950). W zbiorniku reaktora biologicznego wydzielony jest zbiornik filtracji, w którym zamontowane jest 20 sztuk modułów membranowych z membranami mikrofiltracyjnymi. Reaktor biologiczny jest dosyć nietypowy, ponieważ został przykryty płytami żelbetowymi w celu jego hermetyzacji. Zastosowane membrany pozwalają na separację większości bakterii i wirusów chorobotwórczych, mikroplastiku oraz farmaceutyków, które nie są podatne na biologiczny rozkład. Obecnie jakość ścieku oczyszczonego można obrazowo porównać do pierwszej klasy czystości wód płynących (rysunek 6-6). Takiej efektywności oczyszczania nie zapewniają żadne z konwencjonalnych technologii.



Rysunek 6-5. Widok na oczyszczalnię ścieków w miejscowości Muszyna (Polska) [schwander.pl]

Ścieki oczyszczone (filtrat) są ponownie wykorzystywane jako woda technologiczna do płukania i czyszczenia krat, sita w piaskowniku, wirówki, roztwarzania polimeru, modułów membranych, stacji zlewczej ścieków dowożonych czy ogólnego utrzymania czystości w obiekcie. Powtórne wykorzystanie pozwala oszczędzać wodę użytkową, co ma niebagatelne znaczenie zwłaszcza w sezonie turystycznym, kiedy zwiększa się ryzyko występowania niedoborów wody przeznaczonej do spożycia [pgk-muszyna.pl, schwander.pl].

W przyszłości planowany jest odzysk surowców i energii dzięki procesowi karbonizacji hydrotermalnej, umożliwiającemu utylizację skratek i osadów ściekowych powstałych w procesie oczyszczania. Po dodatkowym zgazowaniu możliwa jest produkcja paliwa przyszłości, czyli wodoru, jak również odzysk odcieku bogatego w związki azotu i fosforu do produkcji nawozów [schwander.pl].



Rysunek 6-6. Wygląd ścieku oczyszczonego w czyszczalni MBR w Muszynie [schwander.pl]

#### 6.2.4. Oczyszczalnia ścieków w miejscowości Kunów (Polska)

W roku 2019 zakończone zostały prace modernizacyjne oczyszczalni i została ona oddana do eksploatacji. Wcześniej obiekt funkcjonował opierając się na technologii z 1997 r., posiadał niewystarczającą przepustowość, a jego elementy technologiczne wykazywały wysoki stan zużycia. Nowy zakład posiada przepustowość około 2100 m<sup>3</sup>/d i oczyszcza ścieki z okolicznych miejscowości gminy Kunów (woj. świętokrzyskie, powiat ostrowiecki). Projektowane obciążenie wynosi 6687 RLM. Nowa oczyszczalnia (rysunek 6-7a) została wykonana w technologii MBR wykorzystującej kapilarne włókna z membranami ultrafiltracyjnymi.



Rysunek 6-7. a) Widok na oczyszczalnię ścieków w miejscowości Kunów [ostrowiecka.pl] b) Robot pracujący w solarnej suszarni osadów ściekowych [naostro.info]

Instalacja została zbudowana przez tego samego wykonawcę jak w przypadku oczyszczalni w Muszynie, stąd bliźniaczo podobny projekt samego reaktora. Reaktor biologiczny przykryty jest płytami żelbetowymi w celu jego hermetyzacji. Dalsza poprawa energetyczna została osiągnięta poprzez



wyposażenie obiektu w instalację fotowoltaiczną o mocy 10 kW, która pokrywa część zapotrzebowania energetycznego oczyszczalni. W ramach modernizacji wykonano również suszarnię słoneczną osadów ściekowych, w której pracuje nowoczesny, samosterowalny robot, którego zadaniem jest równomierne rozprowadzanie, badanie wilgotności oraz mieszanie osadu (**rysunek 6-7b**) [ostro-wiecka.pl, Gołębiowska 2021].

### 6.3. Podsumowanie

Technologia MBR to fizyczno-biologiczny proces hybrydowy, który jest intensywnie rozwijany i wdrażany na całym świecie. Od jej opracowania w roku 1989 została uruchomiona w tysiącach oczyszczalni na całym świecie, zarówno w małych obiektach oczyszczających kilkaset m<sup>3</sup> ścieków na dobę, jak i w dużych, oczyszczających setki tysięcy m<sup>3</sup> ścieków na dobę z największych aglomeracji. Zastosowanie membran nie tylko pozwala na wysokoefektywne oczyszczanie ścieków, ale również na odzysk bezpiecznej pod względem mikrobiologicznym wody. Ma to istotne znaczenie w kontekście konieczności zmniejszania zanieczyszczenia wód oraz możliwości recyklingu wody, jej odzyskiwania i ponownego wykorzystania. Zastosowanie MBR często jest równoznaczne ze zmianą postrzegania danego obiektu – typowa oczyszczalnia ścieków przekształca się w zakład odzysku i odnowy wody. Wobec faktu, iż w przyszłości głównym celem oczyszczalni ścieków będzie maksymalizacja odzysku wody ze ścieków, technologia ta stanie się podstawowym i powszechnie wykorzystywanym elementem stosowanych układów technologicznych oczyszczania ścieków.

## Literatura:

Al-Asheh S., Bagheri M., Aidan A. 2021. Membrane bioreactor for wastewater treatment: A review, Case Studies in Chemical and Environmental Engineering, Volume 4, s. 100–109.

Bodzek M., Bohdziewicz J., Konieczny K. 1997. Techniki Membranowe w ochronie środowiska. Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice.

ekombr.pl. <[http://ekombr.pl/wp-content/uploads/2016/01/ulotka\\_EkoMBR\\_glogow\\_internet.pdf](http://ekombr.pl/wp-content/uploads/2016/01/ulotka_EkoMBR_glogow_internet.pdf)> [dostęp 21.02.2022]

glogow-mlp.pl. <<http://www.glogow-mlp.pl/aktualnosci/107-inwestycje/1707-zakupiono-nowe-membra-ny>> [dostęp 21.02.2022].

Gallagher P., Nguyen A., Zha F. 2008. Wastewater Reuse Via MBR and Tertiary Membrane Filtration-Case Studies. Membrane Technology (1), s. 831-841.

Gołębiowska M. 2021. Kunowska oczyszczalnia ścieków ma już dwa lata! Pracuje w niej robot wart pół miliona złotych. naostro.info. <<https://naostro.info/kunowska-oczyszczalnia-sciekow-ma-juz-dwa-lata-pracuje-w-niej-robot-wart-pol-miliona-zlotych-foto/>> [dostęp 21.02.2022].

Iorhemen O., Hamza R., Tay J. 2016. Membrane Bioreactor (MBR) Technology for Wastewater Treatment and Reclamation: Membrane Fouling, Membranes, 6 (2): 33.

Kowal A. 1997. Odnowa wody. Podstawy teoretyczne procesów. Wydanie II poprawione, Politechnika Wrocławska, Wrocław.

Kowal L., Świdzka-Bróz M. 2007. Oczyszczanie wody. Podstawy teoretyczne i technologiczne, procesy i urządzenia. Wydanie V zmienione, Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa.

Krawczyk Ł., Józefiak P., Iskra K., Miodoński J., Wierzbicka D. 2020. Zagrożenia epidemiologiczne w oczyszczalni ścieków komunalnych. Bezpieczeństwo pracy operatorów oraz wpływ na mikrobiologiczną jakość wód odbiornika ścieków oczyszczonych. Praca niepublikowana IOŚ-PIB, Warszawa.

naostro.info. <<https://naostro.info/kunowska-oczyszczalnia-sciekow-ma-juz-dwa-lata-pracuje-w-niej-robot-wart-pol-miliona-zlotych-foto/>> [dostęp 22.02.2022].

ostrowiecka.pl. <<https://ostrowiecka.pl/2019/12/23/oczyszczalnia-najwieksza-inwestycja-w-kunowie/>> [dostęp 21.02.2022].

pgk-muszyna.pl. <<https://pgk-muszyna.pl/index.php/zwik/oczyszczalnie/oczyszczalnia-w-muszynie>> [dostęp 21.02.2022].

Piaskowski K. Wojciechowski R. 2017. Technologie membranowe jako alternatywa dla klasycznej rozbudowy oczyszczalni gwarantujące maksymalną ochronę środowiska naturalnego. Gaz Woda i Technika Sanitarna, 1 (91), s. 11–17.

Piaskowski K. 2015. Oczyszczanie ścieków komunalnych w bioreaktorach membranowych na przykładzie oczyszczalni ścieków w Rowach. Gaz Woda i Technika Sanitarna, 3, s. 113–118.

pomorskiednienergii.pl <<http://pomorskiednienergii.pl/wp-content/uploads/2015/06/7.-Ustka.pdf>> [dostęp 21.02.2022].

Purnell S., Ebdon J., Buck A., Tupper M., Taylor H. 2015. Bacteriophage removal in a full-scale membrane bioreactor (MBR) – Implications for wastewater reuse. Water Research, Volume 73, s. 109–117.

schwander.pl. <<https://www.schwander.pl/pl/nws/poreba-projekt-i-budowa-oczyszczalni-w-technologii-przyszlosci>> [dostęp 17.02.2022].

schwander.pl <<https://www.schwander.pl/pl/nws/zakonczenie-inwestycji-oczyszczalnia-sciekow-i-pszok-w-muszynie>> [dostęp 21.02.2022].

Sutherland K. 2010. The rise of membrane bioreactors. filtsep.com. <<https://www.filtsep.com/content/features/the-rise-of-membrane-bioreactors>> [dostęp 21.02.2022].

thembrsite.com. <<https://www.thembrsite.com/largest-mbr-plants/largest-membrane-bioreactor-plant-s-worldwide/>> [dostęp 04.03.2022].

Witkowska E. 2009. Biologiczne reaktory membranowe (MBR) – nowa technologia oczyszczania ścieków z wykorzystaniem osadu czynnego. Forum Eksploatatora, nr 3 (42), s. 28-30.

Yang W., Cicek M., Ilg J. 2006. State-of-the-art of membrane bioreactors: Worldwide research and commercial applications in North America. Journal of Membrane Science, 270 (1-2), s. 201-211.

# 7. Nowe metody usuwania azotu ze ścieków

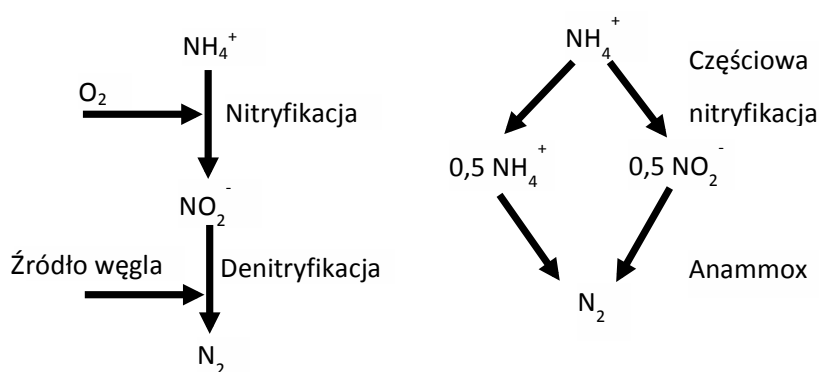
## 7.1. Wprowadzenie

Usuwanie azotu ze ścieków komunalnych poprzez tradycyjne połączenie procesów nityfikacji i denityfikacji jest kluczowym etapem biologicznego oczyszczania ścieków, stosowanym w ciągu minionych dziesięcioleci. Proces nityfikacji prowadzony jest przez dwie grupy bakterii autotroficznych. Pierwsza z nich, czyli bakterie z rodzaju *Nitrosomonas* utleniają jony amonowe i sole amonowe do azotynów, następnie bakterie z rodzaju *Nitrobacter* utleniają powstałe azotyny do azotanów. Procesy te zachodzą w warunkach tlenowych, w związku z czym do ich prawidłowego przebiegu wymagane jest zapewnienie odpowiedniego stężenia tlenu rozpuszczonego w komorze osadu czynnego. Wiąże się to oczywiście z potrzebą ciągłego napowietrzania tych komór, co ma istotny wpływ na bilans ekonomiczny oczyszczalni ścieków. Energia przeznaczona na napowietrzanie może stanowić nawet ponad 50% całkowitego zużycia energii na oczyszczalni, co daje nawet 45–75% udziału w całkowitych kosztach eksploatacji oczyszczalni ścieków [Dymaczewski 2011, Gu i in. 2017, Sean i in. 2020]. Dalszy proces przemiany azotu prowadzony jest już w warunkach deficytu stężenia tlenu, są to tzw. warunki anoksydacyjne, w których liczne grupy bakterii heterotroficznych (zwane bakteriami denityfikacyjnymi) przeprowadzają redukcję powstałych wcześniej azotanów do azotu gazowego. W tym procesie niezbędna dla tych bakterii jest dostępność łatwo biodegradowalnych związków organicznych, które wykorzystują do swoich procesów życiowych. Naturalnie, źródłem tych związków organicznych są dopływające do oczyszczalni ścieki, jednakże często okazuje się, że ich ilość jest niewystarczająca, aby bakterie te mogły „przerobić” cały dopływający ładunek azotu. W takiej sytuacji konieczne jest dawkowanie do komory osadu czynnego zewnętrznego źródła łatwo biodegradowalnego węgla organicznego, np. kwasu octowego czy metanolu, a to powoduje dodatkowe koszty eksploatacyjne.

Wbrew temu, co mogłoby się wydawać, surowe ścieki dopływające do oczyszczalni ścieków nie są wcale istotnym źródłem azotu. Najpoważniejszy problem stanowią odcieki i wody nadosadowe powstające w ciągu przeróbki osadów ściekowych, które kierowane są następnie do głównego ciągu oczyszczania. Odcieki najczęściej charakteryzują się stężeniem azotu ogólnego w przedziale 800–1000 mg N/l, chociaż niekiedy mogą osiągać wartości dochodzące nawet do 2000 mg N/l. Pomimo tego, że jest ich ilościowo stosunkowo niedużo, ponieważ ich strumień stanowi przeciętnie zaledwie 0,5–3% całkowitego natężenia dopływu ścieków do oczyszczalni, to już ładunek jaki niosą może stanowić nawet 30% całkowitego ładunku azotu dopływającego wraz ze ściekami surowymi [Sobotka 2015, Gustavsson 2010]. Gdy ładunek ten trafia do komór nityfikacji, pojawia się potrzeba doprowadzenia powietrza, tak by zapewnić odpowiednie stężenie tlenu dla bakterii nityfikacyjnych. Z tego względu poszukuje się rozwiązań pozwalających na oczyszczanie strumienia wód osadowych w osobnym ciągu technologicznym. Spowoduje to zmniejszenie zapotrzebowania na tlen i obniży znacznie koszty eksploatacji głównego ciągu oczyszczania. Pionierskim wydarzeniem w tym zakresie jest odkrycie bakterii Anammox (ang. Anaerobic Ammonia Oxidation). Bakterie Anammox zostały

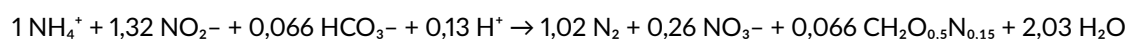
odkryte pod koniec lat 90. XX wieku przez naukowców z Uniwersytetu Technologicznego w Delft w Holandii [Remy i in. 2016]. Naukowcy nazwali organizm Anammox, co oznacza beztlenowe utlenianie amonu. Proces ten w kolejnych latach stał się przedmiotem licznych badań pilotażowych w oczyszczalniach ścieków. W 2014 r. na świecie funkcjonowało około 100 instalacji przeznaczonych do usuwania azotu w tej technologii. Obecnie w literaturze można znaleźć informacje, że takich obiektów funkcjonuje około 70 [Driessen i in. 2021]. Część z tych instalacji wykorzystywana jest do oczyszczania ścieków pochodzących z działalności przemysłowej.

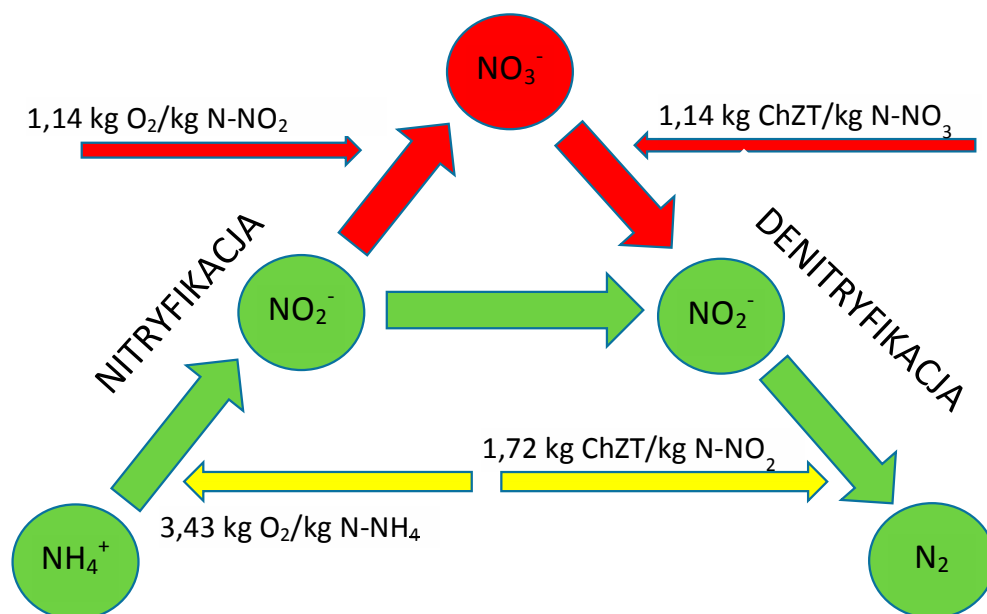
Ideą nowego podejścia do usuwania azotu jest skrócenie procesu nityfikacji (**rysunek 7-1**), co pociąga za sobą zmniejszenie zapotrzebowania na tlen. W procesie pełnej nityfikacji zużywane jest 4,57 kg tlenu na każdy 1 kg azotu amonowego poddawanego utlenianiu. Zatrzymanie procesu nityfikacji na pierwszym etapie (wytworzenie azotynów) powoduje, że zużycie tlenu spada do ok. 3,43 kg O<sub>2</sub>/kg N-NH<sub>4</sub>, co przekłada się na 25-procentową oszczędność w wymaganym napowietrzaniu. Dzięki temu skraca się również proces denityfikacji. Zapotrzebowanie na związki organiczne maleje z ok. 2,86 kg ChZT/kg N-NO<sub>3</sub> do ok. 1,72 kg ChZT/kg N-NO<sub>2</sub> dzięki czemu aż o 40% spada potrzeba udziału związków organicznych w tym procesie i minimalizuje się uzupełnianie niedoborów węgla organicznego poprzez dozowanie jego zewnętrznych źródeł [Bernat i in. 2016, Sadecka 2010, Dymaczewski 2011].



Rysunek 7-1. Schemat koncepcyjny usuwania azotu z wykorzystaniem skróconej nityfikacji (opracowanie własne na podstawie [Barbusiński 2016])

Skrócona nityfikacja polega na takim prowadzeniu procesu, żeby nastąpiło jedynie utlenianie azotu amonowego do azotynów. W tym wypadku w sposób kontrolowany blokowana jest druga faza nityfikacji, czyli utlenianie azotynów do azotanów. Skrócenie czasu nityfikacji uzyskuje się poprzez stosowanie kontroli namnażania bakterii *Nitrobacter* i wykorzystanie ich właściwości – mają dłuższy czas przyrostu niż bakterie pierwszej fazy nityfikacji. Kontrolę prowadzi się za pomocą sterowania wiekiem osadu, temperaturą, stężeniem tlenu rozpuszczonego i strategią napowietrzania. Drugą składową nowego podejścia jest zastąpienie tradycyjnego procesu denityfikacji procesem Anammox, polegającym na konwersji azotu amonowego i azotynów do azotu gazowego. Przeprowadza się go przy udziale bakterii z grupy *Planctomycetaceae*, które używając azotynów jako akceptorów elektronów, w sposób beztlenowy utleniają jony amonowe występujące w ściekach ( $\text{NH}_4^+$ ) bezpośrednio do azotu gazowego ( $\text{N}_2$ ). Dochodzi do tego z pominięciem jonów azotanowych ( $\text{NO}_3^-$ ), zgodnie z równaniem [Sobotka 2015]:



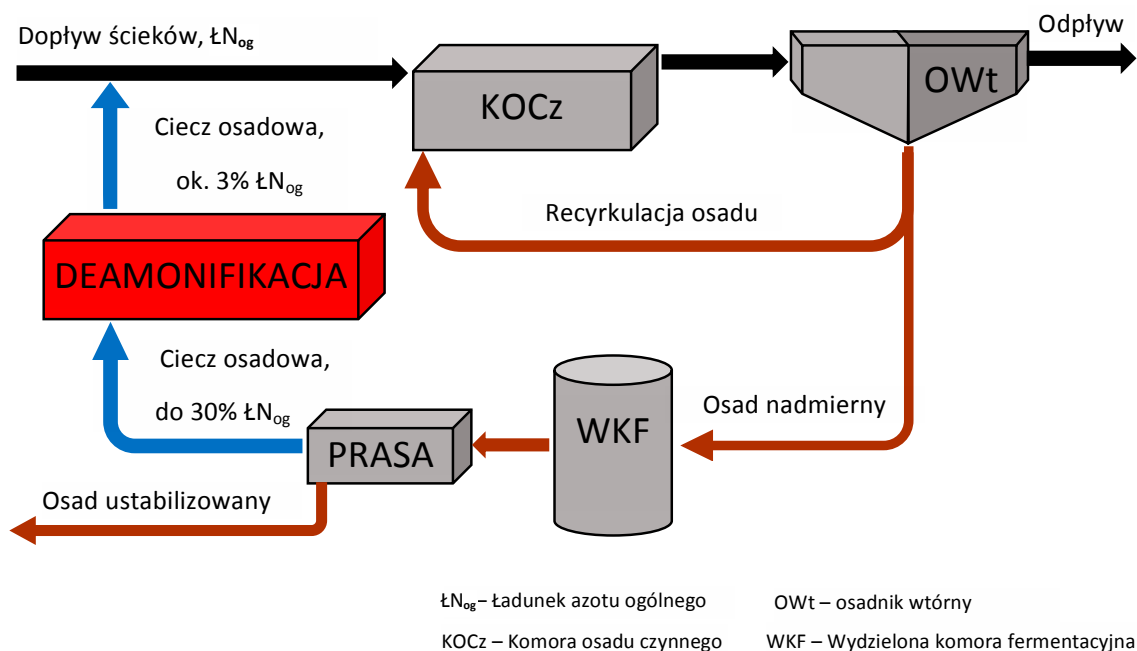


Rysunek 7-2. Porównanie drogi przemiany azotu w procesach konwencjonalnych oraz częściowej nityfikacji i Anammox (opracowanie własne na podstawie [Sadecka 2010])

Graficzne porównanie procesu Anammox z klasycznym układem nityfikacyjno-denitryfikacyjnym przedstawiono na **rysunku 7-2**.

Można zatem zaobserwować, że w nowym podejściu do usuwania azotu w bocznym ciągu technologicznym główną rolę pełnią procesy skróconej nityfikacji oraz Anammox. Wzajemne ich zintegrowanie nazywane jest deamonifikacją. Usuwanie azotu w procesie deamonifikacji pozwala zmniejszyć koszty napowietrzania, a w konsekwencji zużycie energii nawet o kilkadziesiąt procent. Zapotrzebowanie na energię, w zależności od typu i wielkości reaktora deamonifikacji, wynosi od 0,8 do 1,7 kWh na każdy kilogram usuniętego azotu, natomiast w tradycyjnej konfiguracji nityfikacji/denitryfikacji wskaźnik ten waha się w przedziale 2,3-4,0 kWh/kg N [Janiak i in. 2017, Capodaglio i in. 2020, Lackner i in. 2014]. Nie ma też potrzeby zapewnienia węgla organicznego, a dodatkowo zmniejsza się emisję  $\text{CO}_2$  do atmosfery o ok. 90%, co ma duże znaczenie, biorąc pod uwagę fakt, że związek ten jest jednym z głównych gazów cieplarnianych. Cechy te sprawiają, że deamonifikacja jest bardzo pożądaną technologią w oczyszczalniach ścieków w przyszłości. Zalety tego procesu usystematyzowano i przedstawiono poniżej [Sobotka 2015, Osadnik i in. 2013]:

- w porównaniu z klasycznym układem nityfikacja/denitryfikacja proces Anammox zmniejsza zużycie tlenu nawet o 60%, co ma niebagatelne znaczenie w dążeniu do zmniejszenia kosztów napowietrzania;
- wykorzystanie tego procesu do oczyszczania wód nadosadowych w bocznym ciągu technologicznym pozwala zmniejszyć obciążenie głównego ciągu nawet o 30%, co przekłada się na oszczędności eksploatacyjne;
- w znaczący sposób ogranicza zapotrzebowanie na związki organiczne dla procesu denitryfikacji;
- bakterie Anammox charakteryzują się małym przyrostem biomasy, co zmniejsza ilość osadu nadmiernego, który musi zostać poddany odpowiedniej obróbce.



**Rysunek 7-3.** Umieszczenie i efektywność procesu deamonifikacji w oczyszczaniu wód osadowych (opracowanie własne na podstawie [Leoniak i in. 2018])

Typowe umiejscowienie stopnia deamonifikacji i jego efektywność przedstawiono na **rysunku 7-3**.

Jak każdy proces, również i deamonifikacja nie jest wolna od wad. Podstawowym problemem jest kilkukrotnie niższa szybkość przyrostu bakterii Anammox w porównaniu z konwencjonalnymi bakteriami nityfikacyjnymi. Czas podwojenia liczby bakterii Anammox może wynosić nawet 20 dób, zatem tak wolny wzrost wymaga długiego czasu na wpracowanie procesu. Każda nawet najmniejsza ucieczka osadu z reaktora, np. w skutek problemów z sedymentacją osadu, powoduje długotrwałe pogorszenie wydajności. Bakterie te wykazują ponadto bardzo wysoką wrażliwość na zmianę ich optymalnych warunków środowiskowych, np. temperatury, pH czy stężenia substratów. Są to ściśle beztlenowce, co oznacza, że nawet najmniejsze ilości tlenu (rzędu 0,1 mg  $O_2/l$ ) powodują ich inhibicję. Bakterie te rozwijają się optymalnie w warunkach wysokiego stężenia azotu (powyżej 100 mg N/l) oraz w temperaturze powyżej 30°C [Matuszewski 2019, Osadnik i in. 2013]. Procesy skróconej nityfikacji oraz Anammox dostępne są obecnie pod postacią różnych skomercjalizowanych technologii. Przykładowe z nich pokrótce opisano w podrozdziale 7.2.

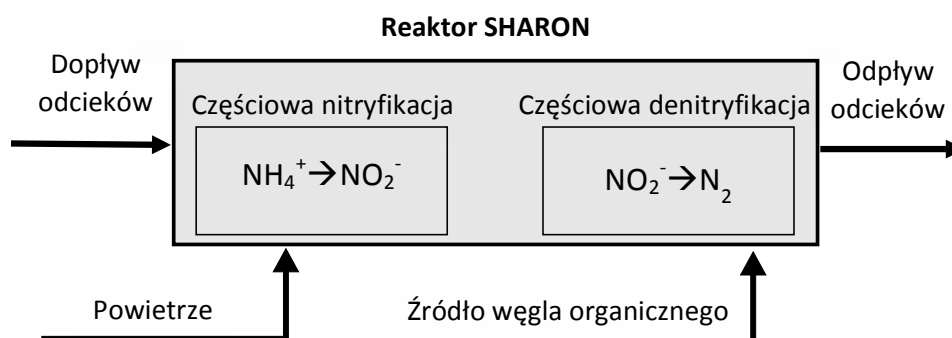
## 7.2. Technologie wykorzystujące proces Anammox i pokrewne techniki

### 1. SHARON

SHARON (Single Reactor System for High Activity Ammonia Removal Over Nitrite Process) to proces, który wykorzystuje modyfikację klasycznej ścieżki nityfikacja-denitryfikacja do oczyszczania odcieków z gospodarki osadowej w bocznym ciągu technologicznym. Prowadzi się go w pojedynczym



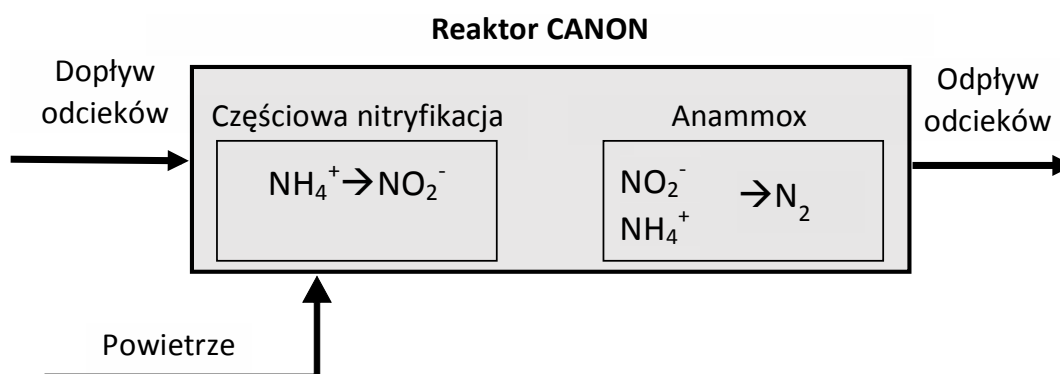
reaktorze z wydzielonymi strefami mieszania i napowietrzania, zapewniając wysoką temperaturę rzędu 35°C. Dodatkowo utrzymuje się krótki wiek osadu, który jest równy hydraulicznemu czasowi przetrzymania. W takich warunkach szybkość wzrostu bakterii pierwszej fazy nitryfikacji jest dwukrotnie wyższa niż bakterii drugiej fazy, co sprawia, że bakterie są wymywane z reaktora. Powstające azotyny w procesie częściowej nitryfikacji, po dodaniu zewnętrznego źródła węgla organicznego, są redukowane do azotu gazowego. Zastosowanie procesu do usuwania azotu, ale z pominięciem produkcji azotanów, pozwala na zmniejszenie zapotrzebowania na tlen o 25% oraz zużycia związków organicznych o 40%. Na **rysunku 7-4** przedstawiono schemat i zasadę działania procesu SHARON [Sadecka 2010, Mazurkiewicz 2010].



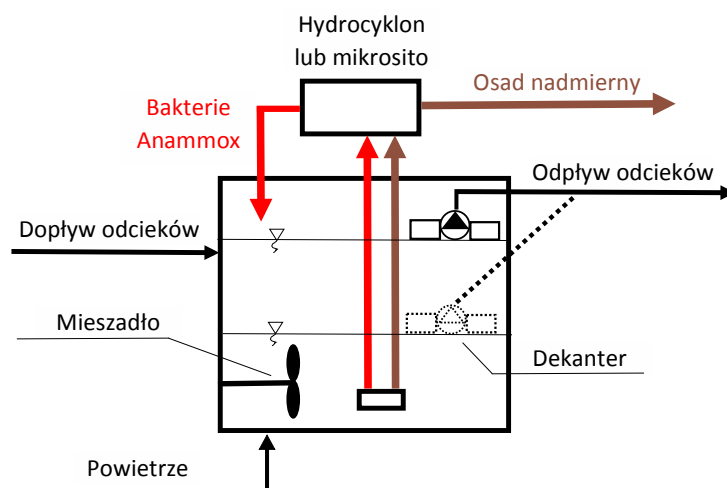
Rysunek 7-4. Zasada działania reaktora w procesie SHARON (opracowanie własne)

## 2. CANON

Proces CANON (ang. **C**ompletely **A**utotrophic **N**itrogen **R**emoval **P**rocess **O**ver **N**itrite) jest tym, w którym nitryfikacja oraz proces Anammox zachodzą symultanicznie. W tym przypadku, w jednym reaktorze współistnieją dwa typy bakterii, odpowiedzialne za Anammox – *Planctomycete* oraz bakterie AOB – *Nitrosomaonas*. Aktywność bakterii AOB jest wyznacznikiem poziomu stężenia tlenu rozpuszczonego w reaktorze. Technologia CANON posiada wiele zalet. Główną z nich jest możliwość zmniejszenia kosztów dostarczania węgla organicznego z zewnątrz. Kolejnym walorem jest zmniejszenie ilości CO<sub>2</sub> uwalnianego do atmosfery. Proces ten umożliwia również obniżenie zapotrzebowania na energię elektryczną nawet do 50%. Działa on w temperaturze od 30 do 35°C. Jego skuteczność natomiast wynosi około 92%, a efektywność około 0,12 kg N/m<sup>3</sup>·d [Mazurkiewicz 2010, Bagchi i in. 2012]. Na **rysunku 7-5** przedstawiono schemat technologii CANON.



Rysunek 7-5. Zasada działania reaktora CANON (opracowanie własne)

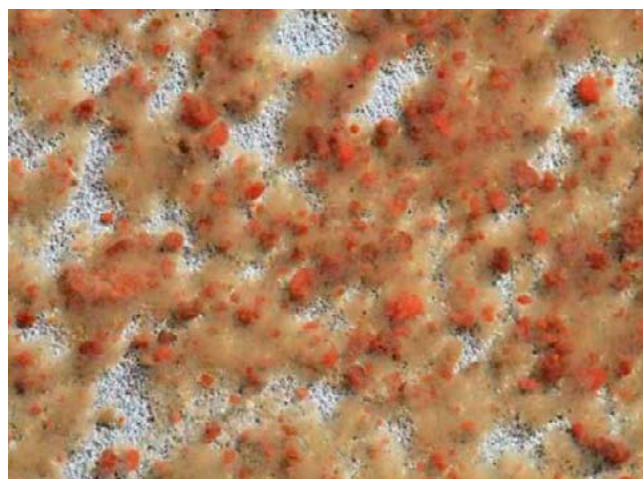


Rysunek 7-6. Schemat działania reaktora DEMON (opracowanie własne)

### 3. DEMON

DEMON (ang. DEamMONnification) jest to proces dwuetapowy, który wykorzystuje zarówno technologię Anammox (bakterie Anammox usuwają część azotu amonowego), jak i proces częściowej nityfikacji  $N-NH_4$  prowadzony przez bakterie AOB. Proces odbywa się w jednym reaktorze typu SBR, którego cykl pracy składa się z faz reakcji (napętnianie, naprzemienne napowietrzanie i mieszanie), sedymentacji oraz dekantacji. Schemat działania reaktora przedstawiono na **rysunku 7-6**.

Gdy zawartość reaktora jest napowietrzana zachodzi proces częściowej nityfikacji. Na tym etapie obserwuje się spadek zasadowości oraz wartości pH, co jest kontrolowane przez specjalny algorytm. W momencie osiągnięcia przez te parametry wartości granicznej dla skutecznej pracy bakterii Anammox, napowietrzanie jest automatycznie wyłączone i rozpoczyna się kolejna część cyklu pracy, czyli faza mieszania. Na tym etapie w reaktorze panują warunki beztlenowe, co umożliwia działanie bakterii Anammox. Wytworzone w poprzedniej fazie azotyny i resztkowy amoniak konwertowane są do azotu gazowego, czemu towarzyszy wzrost wartości pH. Gdy wartość ta zbliża się



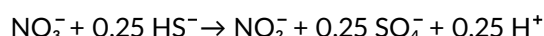
Rysunek 7-7. Granule bakterii Anammox (czerwone) i kłaczkę osadu czynnego (brązowe) w reaktorze DEMON [Bott 2020]

do górnej granicy tolerancji dla bakterii Anammox, algorytm załącza ponownie dmuchawy i faza reakcji rozpoczyna się od nowa. Gdy faza reakcji dobiegnie końca, następuje etap sedymentacji i dekantacji. Aby nie dopuścić do wypłukania bakterii Anammox z układu, stosuje się hydrocyklon lub mikrosito, które oddziela granulki bakterii Anammox od innych bakterii. Tak oddzielone bakterie Anammox zwracane są do reaktora. Pozostała biomasa trafia do ciągu przeróbki osadów jako osad nadmierny. Wykorzystanie hydrocyklonu lub mikrosita pozwala utrzymywać różne wartości wieku osadu dla bakterii Anammox i bakterii nityfikacyjnych. System separacji biomasy za pomocą hydrocyklonu pozwala na zatrzymanie „cięższych” bakterii Anammox (bakterie Anammox mają tendencję

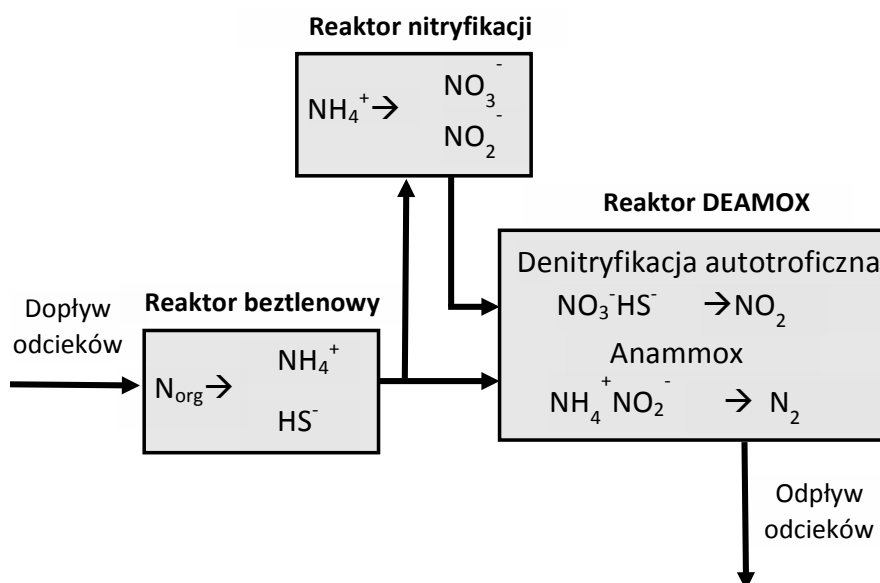
do tworzenia granulacji o wysokim stopniu zmineralizowania, co zwiększa ich ciężar właściwy) oraz usunięcie z układu „lekkich” nityfikantów (nityfikanty trudno tworzą kłaczkę osadu, przez co ich ciężar właściwy jest mały) (rysunek 7-7). W przypadku mikrosita, separacja zachodzi na zasadzie filtracji [Barbusiński 2016, Bagchi i in. 2012].

#### 4. DEAMOX

Technologia DEAMOX (ang. **Denitryfying Ammonia Oxidation**) jest przeznaczona między innymi do ścieków zawierających wysokie stężenia azotu oraz siarkę. Ścieki takie pochodzą np. z przemysłu drożdżowego lub piekarniczego. Proces ten charakteryzuje się zastosowaniem denitryfikacji azotynów poprzez wykorzystanie siarczków jako akceptora elektronów, a jego stechiometria wygląda następująco:



Omawiany ciąg technologiczny składa się z trzech urządzeń (rysunek 7-8). Są to kolejno reaktory: beztlenowy, nityfikacyjny oraz DEAMOX. Działanie tych urządzeń można opisać w następujący sposób – reaktor beztlenowy odpowiada za powstawanie siarczków oraz azotu amonowego, które przekazywane są częściowo do kolejnych dwóch reaktorów. W reaktorze nityfikacyjnym azot amonowy zostaje utleniony do azotynów i azotanów. Natomiast w reaktorze DEAMOX następuje reakcja denitryfikacji azotanów w obecności siarczków, a bakterie Anammox współdziałają tam z bakteriami autotroficznymi odpowiedzialnymi za denitryfikację. Obecnie technologia ta jest w fazie badań laboratoryjnych i nie jest stosowana w pełnowymiarowych systemach [Bagchi i in. 2012, Kalyuzhnyi i in. 2006].



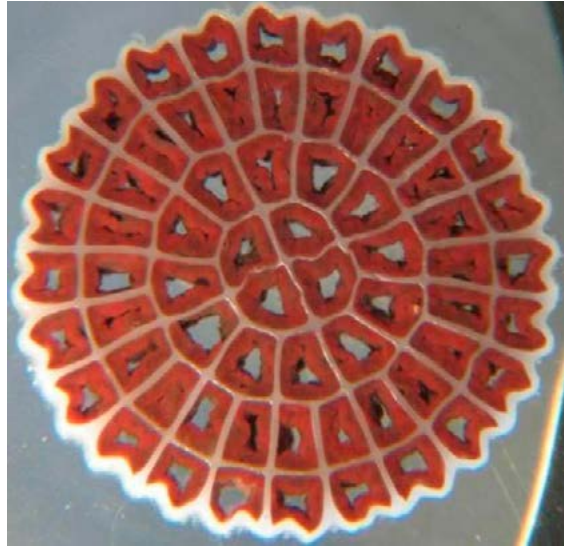
Rysunek 7-8. Schemat technologii DEAMOX (opracowanie własne na podstawie [Bagchi i in. 2012])

#### 5. ANITAMOX

Jest to jednostopniowa technologia skróconej nityfikacji i procesu Anammox, w której mikroorganizmy obu metod rosną na specjalnym syntetycznym wypełnieniu o dużej powierzchni właściwej, wynoszącej 500-1200 m<sup>2</sup>/m<sup>3</sup>, tworząc biofilm bakteryjny (rysunek 7-9 i 7-10).



Rysunek 7-9. Podłoże do rozwoju mikroorganizmów Anammox w technologii ANITAMOX [ensia.com]



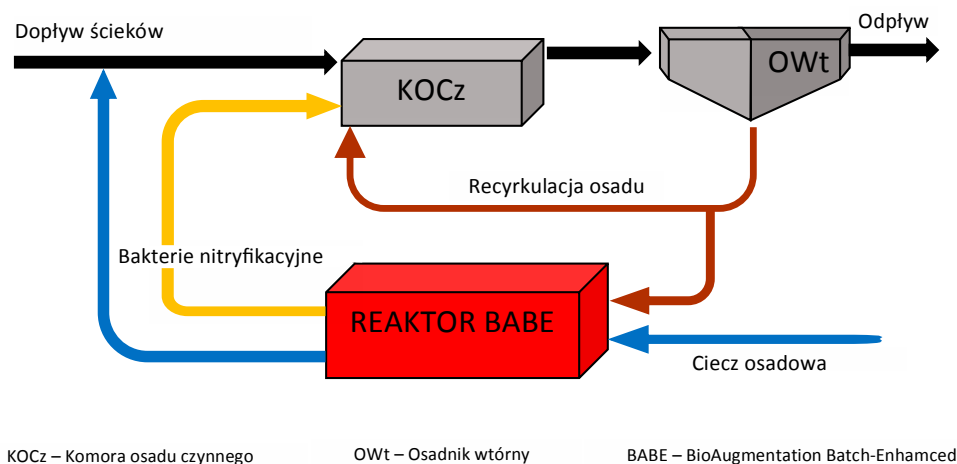
Rysunek 7-10. Bakterie Anammox wyhodowane na podłożu ANITAMOX [Piveteau i in. 2013]

Ten typ reaktora opisuje się jako MBBR (ang. Moving Bed Biofilm Bioreactor) – oprócz oczyszczania odcieków z przeróbki osadów ściekowych wykorzystywany jest również do oczyszczania ścieków przemysłowych i odcieków ze składowisk odpadów. W tej technologii częściowe utlenianie azotu amonowego odbywa się w zewnętrznych warstwach biofilmu, który zasiedlają bakterie pierwszej fazy nitryfikacji. W warstwie wewnętrznej natomiast, niemającej dostępu do tlenu rozpuszczonego, obserwuje się aktywność bakterii Anammox. Proces ANITAMOX został zaimplementowany w pełnej skali technicznej w ok. 30 oczyszczalniach ścieków na całym świecie, między innymi w Stanach Zjednoczonych, Australii, Szwecji, Wielkiej Brytanii i Francji [Lemaire i in. 2021].

## 6. BABE

Proces BABE (**B**io**A**ugmentation **B**atch-**E**nanced) nie jest typowym, w którym wykorzystuje się możliwości procesów skróconej nitryfikacji i Anammox. Proces BABE to system oczyszczania odcieków wytwarzanych w procesie fermentacji, możliwy do zastosowania w bocznym ciągu technologicznym (rysunek 7-11).

W reaktorze przeprowadza się inokulację części strumienia osadu recykulowanego z głównego ciągu technologicznego – w warunkach krótkiego wieku osadu, podwyższonej temperatury i wysokiego stężenia azotu amonowego, wynoszącego nawet 1000 mg N-NH<sub>4</sub>/l. W takim środowisku zachodzi ciągła adaptacja bakterii nitryfikacyjnych do wysokich stężeń substratu, dzięki czemu bakterie te osiągają znacznie wyższą wydajność w usuwaniu azotu niż nitryfikanty znajdujące się w głównym ciągu technologicznym. Hodowla nitryfikantów prowadzona jest przy minimalnym niezbędnym wieku osadu dla bakterii nitryfikacyjnych, co w zestawieniu z wysoką temperaturą i wysokim obciążeniem ładunkiem azotu amonowego prowadzi do uzyskiwania znacznie większego stężenia bakterii nitryfikacyjnych niż w komorze osadu czynnego. Wyhodowaną biomasę wykorzystuje się następnie do zaszczerpienia komór osadu czynnego, dzięki czemu uzyskuje się intensyfikację usuwania azotu w głównym ciągu oraz większą odporność na wahania obciążenia hydraulicznego, ładunku zanieczyszczeń i warunków środowiskowych, np. temperatury czy pH. W efekcie ten sam ładunek azotu utleniany jest w krótszym czasie, a więc zmniejszeniu ulega również czas napowietrzania ścieków i koszty eksploatacyjne z nim związane [Mazurkiewicz 2010, Volcke 2006].



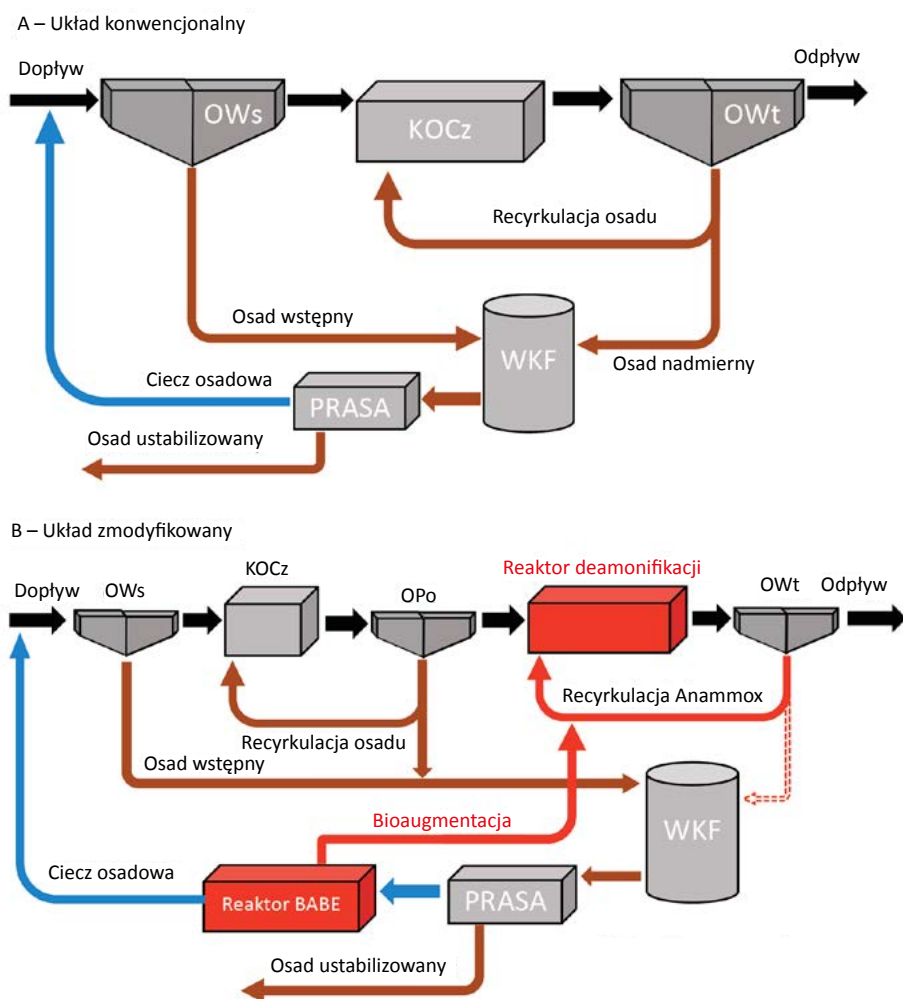
Rysunek 7-11. Schemat technologii BABE (opracowanie własne na podstawie [Barbusiński 2016, Volcke 2006])

### 7.3. Wyzwania na przyszłość

Idea opisanego wcześniej procesu BABE doskonale obrazuje przyszłościowy kierunek rozwoju technologii usuwania azotu w oczyszczalniach ścieków. Polega on na bioaugmentacji biomasy bakteryjnej odpowiedzialnej za proces deamonifikacji do głównego ciągu oczyszczania ścieków. Cały czas trwają prace badawczo-rozwojowe w tym zakresie. Pierwsze próby wdrożenia były podejmowane w oczyszczalniach ścieków w Glarnerland (Szwajcaria) oraz Strass (Austria) [De Clippeleir i in. 2012]. Niestety ze względu na specyfikę procesu Anammox napotykaną są liczne problemy w jego implementacji do głównego ciągu oczyszczania. Trudności wynikają z faktu, iż bakterie Anammox preferują wysoko stężony materiał o podwyższonej temperaturze, jakim są np. odcieki z gospodarki osadowej. Ścieki komunalne natomiast charakteryzują się niższą temperaturą, zwykle nieprzekraczającą 15°C. Niska temperatura powoduje spadek aktywności biomasy Anammox, co przy bardzo małej szybkości ich wzrostu kilkukrotnie wydłuża wymagany czas ich wpracowywania. Kolejną przeszkodą jest niewielkie stężenie substratu, czyli azotu amonowego. W ściekach komunalnych związek ten występuje zwykle w stężeniach nieprzekraczających 40–70 mg N/l [Wang i in. 2022, Thomson i in. 2016]. Na **rysunku 7-12** przedstawiono porównanie obecnie stosowanego sposobu biologicznego oczyszczania ścieków oraz preferowanego w przyszłości.

Aktualnie stosowany układ oparty na konwencjonalnych procesach nityfikacji i denityfikacji jest energochłonny, a koszty napowietrzania stanowią znaczną część kosztów eksploatacyjnych całej oczyszczalni. Układ często wymaga dodatkowego wspomaganie przez dawkowanie zewnętrznych źródeł węgla organicznego i chemikaliów regulujących zasadowość ścieków. Ciecze osadowe powstające w procesach odwadniania osadów dodatkowo obciążają główny układ oczyszczania wysokim ładunkiem substancji biogennych. Natomiast w przypadku układu zmodyfikowanego ciecze osadowe oczyszczane są osobno, w bocznym ciągu technologicznym podczas procesów skróconej nityfikacji i Anammox. Wyhodowana biomasa wykorzystywana jest do zaszczepienia układu w głównym ciągu technologicznym, co pozwala skrócić drogę przemiany azotu znajdującego się w ściekach surowych i tym samym zredukować koszty ich oczyszczania [Oleszkiewicz 2014]. Jak wspomniano wcześniej, idea ta jest na początkowym etapie badań, jej wdrożenie i opanowanie eksploatacji jest jednak wymagającym wyzwaniem, stąd nie należy spodziewać się imponujących sukcesów w najbliższych latach.





KOCz – Komora osadu czynnego    OWs – Osadnik wstępny    Opo – osadnik pośredni    OWt – Osadnik wtórny  
 WKF – Wydzielona komora fermentacyjna    BABE – BioAugmentation Batch Ethamced

**Rysunek 7-12.** Schemat konwencjonalnego sposobu biologicznego oczyszczania ścieków oraz jego modyfikacja w przyszłości (opracowanie własne na podstawie [Oleszkiewicz 2014])

## 7.4. Wybrane obiekty

Od czasu wdrożenia procesu Anammox w 2002 r. obserwowany jest dynamiczny wzrost liczby tego typu instalacji na całym świecie. Większość z nich została wybudowana w Europie. Według danych literaturowych pierwsze wdrożenie procesu deamonifikacji w pełnej skali technicznej miało miejsce w roku 2002 w oczyszczalni ścieków w Rotterdamie w Holandii [Abma i in. 2007, Driessen i in. 2021]. W kolejnych latach instalacje takie powstawały w oczyszczalniach ścieków w Austrii, Australii, Szwajcarii, Niemczech, Hiszpanii, Węgrzech, Serbii, USA oraz w Chinach. Instalacje te są projektowane na obciążenie ładunkiem azotu w granicach 25–11 000 kg N/d, a sumaryczna przepustowość wszystkich funkcjonujących obiektów wynosi około 150 000 kg N/d [Driessen i in. 2021]. Technologia deamonifikacji w ostatnich latach została wdrożona również w Polsce, w krakowskiej oczyszczalni ścieków „Kujawy” oraz w oczyszczalni ścieków „Komorowice” w Bielsku-Białej. W tabeli 7-1 zaprezentowano zidentyfikowane na podstawie literatury instalacje Anammox pracujące w pełnej skali technicznej wraz z ich podstawową charakterystyką technologiczną. W kolejnych podrozdziałach zamieszczono opisy wybranych obiektów.



Tabela 7-1. Zidentyfikowane instalacje Anammox działające w pełnej skali technicznej

Lokalizacja	Rodzaj ścieków	Proces	Objętość reaktora/ów [m <sup>3</sup> ]	Projektowane obciążenie [kg N/d]	Hydrauliczny czas przetrzymania [h]	Stężenie biomasy [g SM/l]	Zużycie energii el. [kWh/kg N]	Zawartość azotu w dopływie [mg N-NH <sub>4</sub> /l]	Wydajność usuwania azotu N-NH <sub>4</sub> [%]	Rok uruchomienia
Amersfoort, Holandia	komunalne	DEMON	780	-	26	4,5	-	>500	~70	-
Apeldoorn, Holandia	komunalne	SHARON-Anammox	2400	-	58	3,5-4	1,10	>1000	~95	-
Balingen, Niemcy	komunalne	DEMON	705	191	94	1,2	0,92	>500	~80	-
Bergen op Zoom, Holandia	z przemysłu ziemniaczanego	NAS	7920 (2370, 1650, 1600, 2300)	-	80	2-7,6	-	<500	~99	-
Bielsko-Biała, Polska	komunalne	DEMON	-	300	-	-	-	-	90	2020
Brisbane, Australia	komunalne	ANITAMOX	1000	975	-	-	-	-	-	2021
Coventry, Wielka Brytania	komunalne	Anammox	1760	4000	-	-	-	-	-	2011
Denver, USA	komunalne	ANITAMOX	-	4000	-	-	-	1200	~85	2017
Guillarei, Hiszpania	komunalne	ELAN	115	67	-	-	-	-	-	2015
Hattingen, Niemcy	komunalne	DEMON	-	119,7	-	-	-	530	80	2003
Heidelberg, Niemcy	komunalne	DEMON	2×570	299	114	1,0-2,5	1,67	800-1000	90-95	2008
Himmerfjärden, Szwecja	komunalne	DEMON	-	482,6	-	-	-	780-1000	80	2007
Ingolstadt, Niemcy	komunalne	SHARON-Anammox	2×560	-	75	2,0-4,0	1,92	1000	85	-
James River, USA	komunalne	ANITAMOX	-	250	-	-	-	900	-	2013
Kraków, Polska	komunalne	DEMON	432	250	-	-	-	-	80-90	2015
Landshut, Niemcy	komunalne	Terrana	288+495	-	25-42	10-12;5-6	-	>1500	~97-99	-
Lichtenvoorde, Holandia	z garbarni	Nitryfikacja-Anammox CIRCOX	150+75	325	8	25	-	500	95	2004

Lokalizacja	Rodzaj ścieków	Proces	Objętość reaktora/ów [m <sup>3</sup> ]	Projektowane obciążenie [kg N/d]	Hydrauliczny czas przetrzymania [h]	Stężenie biomasy [g SM/l]	Zużycie energii el. [kWh/kg N]	Zawartość azotu w dopływie [mg N-NH <sub>4</sub> /l]	Wydajność usuwania azotu N-NH <sub>4</sub> [%]	Rok uruchomienia
Malmö, Szwecja	komunalne	ANITAMOX	4×50	200	24	16	1,45-1,75	800-900	95	2010
Niederglatt, Szwajcaria	komunalne	Anammox	180	60	-	-	-	-	-	2008
Nieuwegein, Holandia	komunalne	SHARON-Anammox DEMON	450	-	42	-	0,8	1000	80	-
Olburgen, Holandia	z przemysłu ziemniaczanego	CANON/Anammox	600	1200	-	25	1,86	<500	~95	2006
Plettenberg, Niemcy	komunalne	DEMON	134	-	40	3	-	>500	~80	-
Prefektura Mie, Japonia	z produkcji półprzewodników	Nitryfikacja-Anammox	50	220	-	-	-	-	-	2006
Rotterdam, Holandia	komunalne	SHARON-Anammox	1800+72	490	36,6	0,27; 7-10	4,17	400-650	90-95	2002
Santa Catarina, Brazylia	z rzeźni	Anammox	-	720	-	-	-	-	-	2013
Seaford, USA	komunalne	DEMON	-	-	8	-	-	-	70-90	2013
Shoxing, Chiny	z gorzelni	Anammox	560	900	-	-	-	-	-	2011
Strass im Zillertal, Austria	komunalne	DEMON	500	200-250	6	-	1,2-3	1600-2000	~97	2004
Taiwan, Chiny	z produkcji MSG i przerobu ziemniaków	Anammox	4300	6090	-	-	-	-	-	2011
Tongliao, Chiny	z produkcji MSG	Anammox	6600	11000	-	-	-	-	-	2009
Toulouse, Francja	komunalne	ANITAMOX	2×6000	1800	-	-	-	1800	-	-
Växjö, Szwecja	komunalne	ANITAMOX	-	430	-	-	-	1400	-	2011
Wrexham, Wielka Brytania	komunalne	ANITAMOX	-	850	-	-	-	2000	80-85	-
Wujiaqu, Chiny	z produkcji MSG	Anammox	5400	10710	-	-	-	-	-	2011
Wuxi, Chiny	z produkcji sódzików	Anammox	1600	2180	-	-	-	-	-	2011
Yichang, Chiny	drożdźownia	Anammox	500	1000	-	-	-	-	-	2009
Zürich, Szwajcaria	komunalne	Nitryfikacja-Anammox	2x1400	-	45	3,5-4,5	1,11	700	~93	-

Opracowanie własne na podstawie [Shou-Qing Ni 2013, Sousa 2016, Drissen i in. 2021, Lamaire i in 2021, Lackner i in. 2014, Vazquez-Padin 2014]

#### 7.4.1. Oczyszczalnia ścieków w miejscowości Rotterdam (Holandia)

Oczyszczalnia ścieków w Rotterdamie została zaprojektowana na obciążenie ładunkiem odpowiadającym 620 000 mieszkańcom równoważnym. Obiekt został wybudowany w latach 80. XX wieku, jednak wobec rosnących wymagań jakości ścieków oczyszczonych zastosowana technologia konwencjonalnej nityfikacji zaczęła stawać się niewystarczająca. Z tego względu poszukiwano rozwiązania, które pozwoli odciążać główny ciąg technologiczny – poprzez oczyszczanie cieczy osadowych po procesie fermentacji i odwadniania w bocznym ciągu technologicznym, a przed skierowaniem ich do głównego ciągu. Początkowo zastosowano reaktor w technologii SHARON, który zmniejszył obciążenie o ok. 15%, jednak równocześnie jego eksploatacja pochłaniała dużo energii oraz spore ilości zewnętrznego źródła węgla. W efekcie nie osiągnięto założonego efektu eksploatacyjnego i ekologicznego, dlatego podjęto decyzję o wybudowaniu reaktora wykorzystującego proces Anammox (**rysunek 7-13**).

Reaktor został uruchomiony w 2002 r. i jest pierwszą tego typu instalacją w Europie [Driessen i in. 2021]. Dzięki jego wykorzystaniu osiągnięto ponad 95-procentową efektywność usuwania azotu amonowego i ponad 85-procentową azotu całkowitego z cieczy osadowych w bocznym ciągu technologicznym. Reaktor ma pojemność 72 m<sup>3</sup> i został zaprojektowany na dobowe obciążenie wynoszące 500 kg N/d, ale stabilne efekty osiągnęto również przy obciążeniu 750 kg N/d. Koszty eksploatacyjne oczyszczalni zostały zredukowane o 125 000 euro rocznie. Ślad węglowy oczyszczalni zmniejszył się o 500 ton w skali roku [Van der Star i in. 2007].



Rysunek 7-13. Reaktor Anammox w oczyszczalni ścieków w Rotterdamie (Holandia) [Van der Star i in. 2007]

#### 7.4.2. Oczyszczalnia ścieków w miejscowości Seaford, Virginia (USA)

Pierwsza pełnowymiarowa instalacja do deamonifikacji wykorzystująca technologię DEMON w Ameryce Północnej została uruchomiona w roku 2013 w oczyszczalni York River w miejscowości Seaford w stanie Virginia (**rysunek 7-14**) [Nifong i in. 2013]. Instalacja oczyszcza strumień odcieków powstający w procesie odwadniania przefermentowanych osadów ściekowych. Technologia została wprowadzona w istniejących zbiornikach retencyjnych, które zmodyfikowano na potrzeby technologii DEMON w kierunku funkcjonalności reaktorów SBR. Tak więc proces deamonifikacji realizowany jest sekwencyjnie, a biomasa bakterii Anammox oddzielana jest od bakterii pierwszej fazy nityfikacji przy pomocy hydrocyklonu. Całkowity czas cyklu pracy reaktora wynosi 8 godzin, więc w ciągu doby realizowane są trzy pełne cykle. Po procesie wpracowania reaktora uzyskiwano stabilne usuwanie azotu amonowego na poziomie 70–90%, przy przepływie wynoszącym ok. 300 m<sup>3</sup>/d. Dzięki oczyszczaniu odcieków w bocznym ciągu technologicznym zanotowano 65-procentowe zmniejszenie zużycia energii

wykorzystywanej na napowietrzanie głównego ciągu technologicznego. Wylimitowano konieczność dawkowania zewnętrznego źródła węgla organicznego. Obniżeniu o 50% uległo również zapotrzebowanie na reagenty podwyższające zasadowość ścieków w celu prowadzenia nitrifikacji w głównym ciągu technologicznym [aaees.org].



Rysunek 7-14. Reaktor do deamonifikacji na oczyszczalni ścieków York River w stanie Virginia (USA) [aaees.org]

#### 7.4.3. Oczyszczalnia ścieków w miejscowości Denver, Kolorado (USA)

Największa instalacja do deamonifikacji w technologii ANITAMOX w Stanach Zjednoczonych funkcjonuje w zakładzie obsługującym miejscowość Denver w stanie Kolorado. Instalacja charakteryzuje się projektowanym przepływem wód osadowych w ilości  $3400 \text{ m}^3/\text{d}$ , co odpowiada dobowemu obciążeniu ładunkiem azotu wynoszącym  $4000 \text{ kg N}$ . Etap wpracowywania reaktorów rozpoczęto w sierpniu 2017 r., a biomasę Anammox pozyskano z instalacji ANITAMOX znajdujących się w Europie. Po około 13 tygodniach osiągnięto pełne projektowane obciążenie. Skuteczność usuwania azotu amonowego wynosi powyżej 85% [Lemaire i in. 2021].

#### 7.4.4. Oczyszczalnia ścieków w miejscowości Strass im Zillertal (Austria)

Oczyszczalnia jest przykładem obiektu, który dzięki przeprowadzeniu szeregu inwestycji poprawiających sprawność energetyczną oraz obejmujących optymalizację procesów, osiągnął samowystarczalność energetyczną. Jedną z takich inwestycji jest instalacja do deamonifikacji odcieków powstających w procesie odwadniania osadów przefermentowanych. Reaktor pracujący w technologii



DEMON został uruchomiony w 2004 r. Reaktor ma pojemność  $500 \text{ m}^3$  i pracuje pod średnim obciążeniem ładunkiem azotu  $200\text{--}250 \text{ kg N/d}$ , dochodzącym do  $400 \text{ kg N/d}$ . Ocieki dopływające do reaktora charakteryzują się stężeniem azotu amonowego w przedziale  $1600\text{--}2000 \text{ mg N-NH}_4/\text{l}$ , zaś stężenie w odpływie z reaktora wynosi  $10\text{--}100 \text{ mg N-NH}_4/\text{l}$ . Reaktor realizuje cztery pełne cykle pracy dziennie. Zastosowanie technologii DEMON pozwoliło obniżyć zapotrzebowanie energetyczne głównego ciągu oczyszczania z blisko  $350 \text{ kWh/d}$  do ok.  $200 \text{ kWh/d}$ . Przed jego wdrożeniem wskaźnik zużycia energii przeznaczanej na usuwanie azotu ze ścieków w głównym ciągu technologicznym wynosił nawet  $6 \text{ kWh/kg N}$  usuniętego. W procesie DEMON wskaźnik ten, w zależności od warunków pracy, wynosi  $1,2\text{--}3,0 \text{ kWh/kg N}$  usuniętego [Wett i in. 2010, Reardon 2014, Dair 2015]. Wygląd reaktora do deamonifikacji przedstawiono na rysunku 7-15.



Rysunek 7-15. Reaktor do deamonifikacji w oczyszczalni ścieków w miejscowości Strass im Zillertal (Austria) [Wett i in. 2007]

#### 7.4.5. Oczyszczalnia ścieków w Krakowie (Polska)

Oczyszczalnia ścieków „Kujawy” to druga pod względem wielkości oczyszczalnia w aglomeracji krakowskiej. Zakład został uruchomiony w 1999 r. i oczyszcza ścieki pochodzące z kombinatu metalurgicznego oraz socjalno-bytowe od blisko 250 tys. mieszkańców Nowej Huty. Wydajność oczyszczalni wynosi  $70 \text{ tys. m}^3/\text{d}$ , a przepływ średniodobowy to ok.  $55 \text{ tys. m}^3$ . Instalacja deamonifikacji została zastosowana w bocznym ciągu technologicznym w celu oczyszczania strumienia odcieków powstającego podczas odwadniania osadów na wirówce (rysunek 7-16). Rozruch technologiczny instalacji zakończono w październiku 2015 r.



Rysunek 7-16. Instalacja do deamonifikacji w krakowskiej oczyszczalni ścieków „Kujawy” (Polska) [Biedrzycka 2016]

Układ składa się ze zbiornika retencyjnego o pojemności 166 m<sup>3</sup> i właściwego reaktora do deamonifikacji o pojemności 432 m<sup>3</sup>. Projektowe, dobowe obciążenie ładunkiem azotu wynosi 250 kg N/d. System funkcjonuje w technologii DEMON, a zatem zarówno skrócona nityfikacja, jak i proces Anammox zachodzą w jednym reaktorze. Reaktor wyposażony jest w system mieszania, napowietrzania oraz dekantacji, a oczyszczone odcieki odprowadzane są bezpośrednio do części biologicznej w głównym ciągu oczyszczania. Sprawną separację biomasy Anammox zapewnia hydrocyklon. Reaktor w stabilnych warunkach osiąga skuteczność usuwania azotu amonowego na poziomie 80–90% [Biedrzycka 2016, Barbusiński 2016].

#### 7.4.6. Oczyszczalnia ścieków w miejscowości Malmö (Szwecja)

W oczyszczalni ścieków obsługującej miejscowość Malmö funkcjonuje instalacja do deamonifikacji w technologii ANITAMOX (**rysunek 7-17**). Uruchomiono ją w sierpniu 2010 r., a maksymalną zdolność usuwania azotu osiągnęła w styczniu 2011 r. [veoliawatertechnologies.pl]. Było to pierwsze na świecie pełnoskalowe przedsięwzięcie tego typu [Thomson 2013].

Instalacja składa się z czterech reaktorów o łącznej pojemności rzędu 220 m<sup>3</sup>. Odcieki dopływające w ilości ok. 650 m<sup>3</sup>/d do układu charakteryzują się średnim stężeniem azotu amonowego w przedziale 800–900 mg N/l. Projektowane dobowe obciążenie ładunkiem azotu amonowego wynosi 200 kg N-NH<sub>4</sub>/d, a efektywność usuwania sięga 95% dla azotu amonowego i 85% dla azotu ogólnego. Zapotrzebowanie energetyczne kształtuje się w granicach 1,4–1,7 kWh/kg N usuniętego. Instalacja ta ponadto wykorzystywana jest jako biofarma, skąd pobierane są zaszczepione kształtki i prowadzona jest bioagmentacja w nowych obiektach na całym świecie, co pomaga znacząco skrócić ich czas rozruchu. Zaprojektowano ją tak, aby umożliwić i ułatwić testowanie różnych rodzajów mediów, napowietrzania i mieszadeł. Elastyczna konstrukcja zapewnia unikalny system umożliwiający badanie różnych trybów pracy, dalszą optymalizację, jak również wszelkie nowe rozwiązania [Reardon 2014, Lamaire 2015].



**Rysunek 7-17.** Instalacja do deamonifikacji w oczyszczalni ścieków w miejscowości Malmö (Szwecja) [veoliawatertechnologies.pl]

#### 7.4.7. Oczyszczalnia ścieków w Bielsku-Białej (Polska)

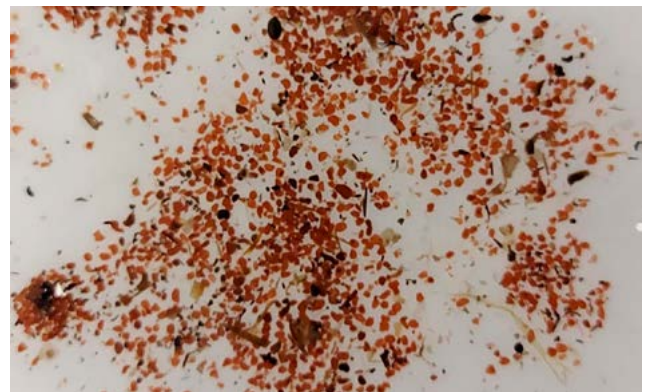
Oczyszczalnia „Komorowice” została wybudowana w latach 70. W okresach 1991-1993, 1997-2000, 2006-2008 i 2019-2020 r. obiekt był poddawany modernizacji i rozbudowie, których celem było zwiększenie przepustowości i uzyskanie poprawy efektów oczyszczania ścieków. Obecnie projektowana przepustowość części biologicznej wynosi ok. 90 tys. m<sup>3</sup>/d, a w okresie intensywnych opadów może zostać zwiększona do niemal 124 tys. m<sup>3</sup>/d. Jedną z ostatnich inwestycji było wybudowanie instalacji do deamonifikacji odcieków z odwadniania przefermentowanych osadów ściekowych w bocznym ciągu technologicznym (**rysunek 7-18**).





Rysunek 7-18. Instalacja do deamonifikacji w oczyszczalni ścieków „Komorowice” w Bielsku-Białej (Polska) [materiały pozyskane od Aqua S.A.]

Eksplorację reaktora, który pracuje w technologii DEMON, a jego przepustowość wynosi  $470 \text{ m}^3/\text{d}$ , rozpoczęto w roku 2020. Średnie obciążenie ładunkiem azotu ogólnego wynosi  $300 \text{ kg N/d}$ , natomiast maksymalne dochodzi do  $400 \text{ kg N/d}$ . W instalacji usuwane jest ok. 75% ładunku azotu ogólnego i nawet 90% azotu amonowego zawartego w dopływających odciekach. Uzyskiwana efektywność przełożyła się na zmniejszenie zapotrzebowania na tlen w głównym ciągu technologicznym i zwiększenie jego przepustowości. Dzięki temu możliwe jest włączenie do systemu kanalizacyjnego nowych dostawców ścieków bez konieczności jego rozbudowy. Operator instalacji szacuje, że uzyskany bufor wydajnościowy wynosi blisko 30 000 RLM. Takie obciążenie osiągają oczyszczalnie ścieków o przepływie kilku tysięcy  $\text{m}^3/\text{d}$ , a więc w tym przypadku widać wyraźnie, jaki imponujący efekt osiągnął eksploatator inwestując w technologię deamonifikacji [informacje pozyskane od Aqua S.A.]. Wygląd bakterii Anammox stosowanych w tym zakładzie przedstawiono na rysunku 7-19.



Rysunek 7-19. Granule bakterii Anammox w oczyszczalni ścieków „Komorowice” w Bielsku-Białej [materiały pozyskane od Aqua S.A.]

## 7.5. Podsumowanie

Zastosowanie wydzielonego oczyszczania cieczy osadowych w procesie deamonifikacji przed wprowadzeniem ich do głównego ciągu oczyszczania ma przede wszystkim za zadanie znaczne obniżenie obciążenia reaktorów osadu czynnego. Istotnym aspektem jest także zmniejszenie kosztów związanych z napowietrzaniem i dawkowaniem zewnętrznego źródła węgla organicznego bądź innych

reagentów. Konsekwencją oczyszczania w wydzielonych układach jest poprawa bilansu energetycznego oczyszczalni. Jako iż głównym celem w przyszłości będzie ukierunkowanie zakładów na minimalizację kosztów eksploatacji i uzyskanie neutralności energetycznej, metoda deamonifikacji może stać się podstawowym i powszechnie wykorzystywanym „elementem” układów technologicznych. Dziś ta technologia znajduje się w nielicznych oczyszczalniach ścieków, w roku 2014 funkcjonowało zaledwie ok. 100 instalacji w pełnej skali technicznej, z czego część była wykorzystywana w sektorze przemysłowym. Aktualnie ich liczba szacowana jest na ok. 70. Proces ten jest bardzo dobrze rozpoznany w oczyszczaniu wód osadowych w bocznym ciągu technologicznym, a uwagę eksploatatorów i badaczy z całego świata skupia wizja wdrożenia go do głównego ciągu oczyszczania. Technologia deamonifikacji kształtuje zatem zmianę obecnego paradygmatu oczyszczania ścieków, a ze względu na korzyści jakie zapewnia, może stać się niezbędnym elementem oczyszczalni w przyszłości.

## Literatura:

- aaees.org. <<https://www.aaees.org/e3scompetition/2013honor-environmentalsustainability.php>> [dostęp 03.02.2022].
- Abma W., Schultz C., Mulder J., Star W., Strous M., Tokutomi T., Loosdrecht M. 2007. Full-scale granular sludge Anammox proces. *Water Science & Technology*, 55, 8–9, s. 27–33.
- Bagchi S., Biswas R., Nandy T. 2012. Autotrophic Ammonia Removal Processes: Ecology to Technology. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, 42 (13), s. 1353–1418.
- Barbusiński K. 2016. Innowacyjne technologie oczyszczania ścieków komunalnych – kierunki rozwoju. *Napędy i Sterowanie*, 1, s. 40-45.
- Barbusiński K. 2016. Innowacyjna technologia oczyszczania odcieków pofermentacyjnych. *Napędy i Sterowanie*, R. 18, nr 1, s. 46-50.
- Bernat K., Kulikowska D., Kordel A. 2016. Usuwanie związków azotu ze ścieków w procesach denitryfikacji i skróconej denitryfikacji z wykorzystaniem melasy jako źródła węgla organicznego. *Ochrona Środowiska*, Vol. 38, nr 2, s. 9–15.
- Biedrzycka A. 2016. Mniej azotu w ściekach z krakowskiej Nowej Huty. *Nowoczesne Budownictwo Inżynieryjne*, nr 2, s. 34–38.
- Bott C. 2020. Update on Technology Developments and Research Needs in Point Source Nutrient Removal. chesapeake.org <[http://www.chesapeake.org/stac/presentations/218\\_STAC%20Meeting%20Bott%20Sept%202013%20Rev%20B.pdf](http://www.chesapeake.org/stac/presentations/218_STAC%20Meeting%20Bott%20Sept%202013%20Rev%20B.pdf)> [dostęp 02.03.2022].
- Capodaglio A.G., Olsson G. 2020. Energy Issues in Sustainable Urban Wastewater Management: Use, Demand Reduction and Recovery in the Urban Water Cycle. *Sustainability*, 12 (1), 266.
- Dair D. 2015. Water Resource Recovery Facility of the Future is Now! chesapeakewea.org. <[https://www.chesapeakewea.org/docs/09\\_-AvN+\\_DEMON\\_Presentation\\_2015.pdf](https://www.chesapeakewea.org/docs/09_-AvN+_DEMON_Presentation_2015.pdf)> [dostęp 02.03.2022].
- De Clippeleir H., Weissenbacher N., Schaubroeck T. 2012. Mainstream partial nitritation/anammox: Balancing overall sustainability with energy savings. *Conference: Proceedings of the Water Environment Federation*, 10, s. 5761–5770.
- Driessen W., Hendrickx T. 2021. Two Decades of Experience with the Granular Sludge-Based ANAMMOX® Process Treating Municipal and Industrial Effluents. *Processes*, 9 (7), 1207.
- Dymaczewski Z. 2011. *Poradnik eksploatatora oczyszczalni ścieków*. PZITS Poznań.
- ensia.com. <<https://ensia.com/features/wastewater-carbon-footprint/>> [dostęp 02.03.2022].
- Gu Y., Li Y., Li X., Luo P., Wang H., Wang X., Wu J., Li F. 2017. Energy self-sufficient wastewater treatment plants: feasibilities and challenges. *Energy Procedia*, 105, 3741–3751.
- Janiak K., Łojek A., Muszyński-Huhajto M. Towards energy neutrality of wastewater treatment plants via deammonification proces. *E3S Web of Conferences* 22, 00070. e3s-conferences.org. <[https://www.e3s-conferences.org/articles/e3sconf/pdf/2017/10/e3sconf\\_asee2017\\_00070.pdf](https://www.e3s-conferences.org/articles/e3sconf/pdf/2017/10/e3sconf_asee2017_00070.pdf)> [dostęp 04.03.2022].
- Kalyuzhnyi S., Gladchenko M., Mulder A., Versprille B. 2006. DEAMOX – New biological nitrogen removal process based on anaerobic ammonia oxidation coupled to sulphide-driven conversion of nitrate into nitrite. *Water Research*, 40 (19), s. 3637–3645.
- Lackner S., Gilbert E., Siegfried E., Vlaeminck E. 2014. Full-scale Partial Nitritation/Anammox Experiences – an Application Survey. *Water Research*, vol. 55, s. 293–303.
- Lemaire R. 2015. Experience from start-up and operation of ANITA™ Mox plants and development of a new Hybas™ ANITA™ Mox proces. *conferences.aquaenviro.co.uk*. <<https://conferences.aquaenviro.co.uk/wp-content/uploads/sites/7/2015/06/Romain-Lemaire-Veolia-Water.pdf>> [dostęp 02.03.2022].
- Leoniak M., Janiak K., Kokurewicz Ł., Huhajto-Muszyński M., Miodoński S., Iliaszewicz P., Szetela R., Balbierz P., Knap M., Konieczny T., Chrobot P., Rucka K. 2018. Optymalizacja usuwania azotu – poprawa efektów oczyszczania i krok na drodze do samowystarczalności energetycznej Wrocławskiej Oczyszczalni Ścieków – podsumowanie projektu. *Forum Eksploatatora*, nr 1 (94), s. 24–31.
- Lemaire R., Christensson M. 2021. Lessons Learned from 10 Years of ANITA Mox for Sidestream Treatment. *Processes*, 9 (5).

- Matuszewski M. 2019. Wspomaganie procesu anammox w niskich temperaturach zredukowanym tlenkiem grafenu. ise.polsl.pl. <[https://ise.polsl.pl/public/uploaded\\_files/doktoraty/tomaszewski/obszerne\\_streszczenie.pdf](https://ise.polsl.pl/public/uploaded_files/doktoraty/tomaszewski/obszerne_streszczenie.pdf)> [dostęp 03.03.2022].
- Mazurkiewicz M. 2010. Nowe systemy usuwania azotu ze ścieków. Zeszyty Naukowe. Inżynieria Środowiska /Uniwersytet Zielonogórski, 140 (20) s. 142–151.
- Nifong A., Nelson A., Johnson C., Bott C. 2013. Performance of a Full-Scale Sidestream DEMON Deammonification Installation. Proceedings of the Water Environment Federation, 13, s. 3686–3709.
- Oleszkiewicz J. 2014. Oczyszczalnia ścieków przyszłości: odzysk surowców i odnowa wody. Forum Eksploatatora, nr 4 (73) s. 21–27.
- Osadnik M., Strachanowska J., Gutwiński P. 2013. Wpływ temperatury i substratów reakcji na proces anammox. Conference: XIX Ogólnopolskim Seminarium Studentów i Doktorantów Biotechnologia Środowiskowa, Wisła-Jarzębata, Volume 5.
- Piveteau S., Christensson M., Bigot B., Lemaire R., Rohold L., Nussbaum B., Ochoa J. 2013. ANITA Mox MBBR Return on Experience from Start-up of Full Scale Systems and New Developments. European Biosolids Conference and Exhibition, 19–20 November 2013.
- Reardon R. 2014. Separate or Combined Sidestream Treatment: That is the Question. Florida Water Resources Journal, 01, s. 52–58.
- Remy M., Hendrickx T., Haarhuis R. 2016. Over a Decade of Experience with the ANAMMOX® Reactor Start-up and Long-Term Performance. Proceedings of the Water Environment Federation, 12, s. 4393–4405.
- Sadecka Z. 2010. Podstawy biologicznego oczyszczania ścieków. Wydawnictwo Seidel-Przywecki Sp. z o.o.
- Sean Y.-W., Chu Y.-Y., Mallu L.L., Chen Y.-G., Liu H.-Y. 2020. Energy consumption analysis in wastewater treatment plants using simulation and SCADA system: Case study in northern Taiwan. Journal of Cleaner Production, Volume 276, 124248.
- Shou-Qing Ni, J. Z. 2013. Anaerobic Ammonium Oxidation: From Laboratory to Full-Scale Application. BioMed Research International, s. 1–10.
- Sousa, A. F. 2016. The SHARON-anammox process for the treatment of ammonium-rich liquid residues produced by the anaerobic digestion of municipal solid wastes: a preliminary evaluation, 1–82.
- Sobotka D. 2015. Zastosowanie procesu Anammox w oczyszczaniu wód poosadowych. Interdyscyplinarne Zagadnienia w Inżynierii i Ochronie środowiska, s. 421–428.
- sswm.info.<[https://sswm.info/sites/default/files/reference\\_attachments/PAQUE%20ny%20Anammox%20case%20study%20STW%20Rotterdam.pdf](https://sswm.info/sites/default/files/reference_attachments/PAQUE%20ny%20Anammox%20case%20study%20STW%20Rotterdam.pdf)> [dostęp 03.03.2022].
- Thomson C., Veuillet F., Lemaire R., Zozor P., Monnier R., Christensson M., Ochoa J., Zhao H. 2016. Mainstream Deammonification Using The ANITA™ Mox Process. Proceedings of the Water Environment Federation (7), s. 5551–5559.
- Thomson C. 2013. MBBR of the Future ANITA Mox: The Latest in Moving Bed Biofilm Reactor Technology. cswea.org. <[http://cswea.org/wp-content/uploads/2017/09/2013-11-12\\_Session12\\_Thomson.pdf](http://cswea.org/wp-content/uploads/2017/09/2013-11-12_Session12_Thomson.pdf)> [dostęp 02.03.2022].
- Wang L. Gu W., Liu Y., Liang P., Zhang X., Huang X. 2022. Challenges, solutions and prospects of mainstream anammox-based process for municipal wastewater treatment. Science of The Total Environment, Volume 820, s. 1153–1167.
- Wett B., Murthy S., Takács I., Hell M., Bowden G., Deur A., O'Shaughnessy M. 2007. Key Parameters for Control of DEMON Deammonification Process. Water Practice, 1 (5).
- Wett B., Hell M., Nyhuis G., Puempel T. Takacs I., Murthy S. 2010. Syntrophy of aerobic and anaerobic ammonia oxidisers. Water Science & Technology, 61 (8), s. 1915–22.
- Van der Star W., Abma W., Blommers D., Mulder J.-W., Tokutomi T., Strous M., van Loosdrecht M. 2007. Startup of reactors for anoxic ammonium oxidation: Experiences from the first full-scale anammox reactor in Rotterdam. Water Research, 41 (18), s. 4149–4163.

veoliawatertechnologies.pl <<https://www.veoliawatertechnologies.pl/technologie/anita-mox>> [dostęp 02.03.2022].

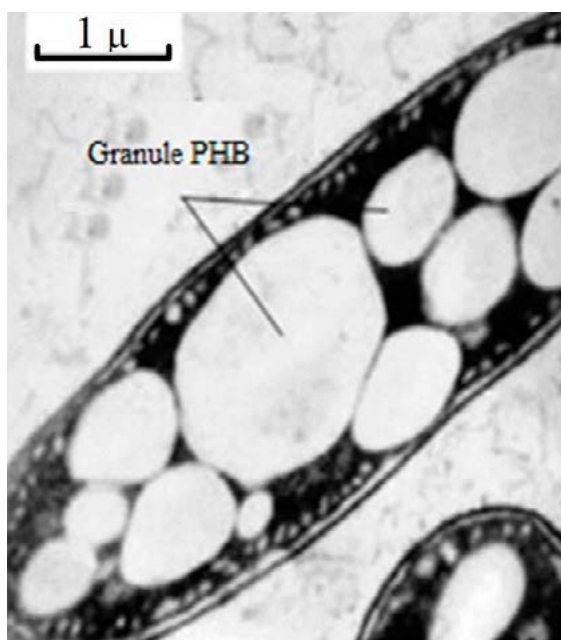
Volcke E. 2006. Modelling, analysis and control of partial nitritation in a SHARON reactor. PhD thesis, Ghent University, Belgium.

# 8. Odzysk substancji pochodzenia biologicznego

## 8.1. Wprowadzenie

Nieodłącznym elementem działalności oczyszczalni ścieków jest wytwarzanie osadów ściekowych. Gospodarka osadowa jest jednym z najbardziej krytycznych zagadnień w eksploatacji zakładu, ponieważ powstający odpad musi zostać odpowiednio przekształcony i końcowo zagospodarowany.

W ciągu ostatnich kilkudziesięciu lat gospodarka osadami ściekowymi przeszła transformację od podejścia polegającego wyłącznie na ich obróbce i unieszkodliwianiu, na rzecz przekształcania ich w produkty o wartości dodanej, takie jak bioenergia lub materiały pochodzenia biologicznego. W tym kontekście fermentacja metanowa jest bardzo użyteczną technologią przeróbki osadów ściekowych, ponieważ pozwala przekształcić biodegradowalny materiał organiczny zawarty w osadzie w biogaz o wysokim udziale metanu. Ostatecznie można go wykorzystać do produkcji skojarzonej energii elektrycznej i ciepłej poprzez jego spalanie. Jest to więc nic innego jak odzysk substancji organicznych zawartych w osadach i przekształcenie ich w użyteczny produkt – biogaz. Rozważane są również inne drogi odzysku substancji zawartych w osadach ściekowych, a jedna z nich dotyczy substancji węglowych w formie polihydroksyalkanianów (PHA). Jest to rodzina naturalnych, biodegradowalnych, izotaktycznych poliestrów. Najlepiej poznanym jej przedstawicielem jest polihydroksymaślan (PHB) [Kurcok i in. 2017]. Wytwarzanie PHA przez bakterie jest szeroko rozpowszechnionym w naturze mechanizmem adaptacyjnym drobnoustrojów do niekorzystnych



Rysunek 8-1. Granule PHB (należące do grupy PHA) zmagazynowane w komórce bakteryjnej [dos Santos i in. 2017]

warunków środowiskowych. Te biopolimery pełnią funkcję zapasowego źródła węgla organicznego i energii dla komórek drobnoustrojów [Khatami i in. 2021, Liu i in. 2019]. Wysoką zawartością PHA charakteryzują się np. bakterie fosforowe, które znajdują się w osadzie czynnym – są powszechnie wykorzystywane do prowadzenia procesu wzmożonej biologicznej defosfatacji w procesach oczyszczania ścieków (rysunek 8-1). W warunkach beztlenowych wykorzystują one łatwo biodegradowalne substancje (np. lotne kwasy tłuszczowe) i wytwarzają właśnie substancje zapasowe w postaci PHA, które magazynują w swoich komórkach, a następnie wykorzystują je aby przeżyć, gdy znajdują się w niekorzystnych dla siebie warunkach środowiskowych – tlenowej strefie reaktora biologicznego.



Jak się okazuje, te organiczne polimery mogą być wyekstrahowane z komórek i wykorzystane do produkcji termoplastycznych tworzyw sztucznych. Takie materiały mają zbliżone właściwości do tradycyjnych tworzyw sztucznych pochodzenia petrochemicznego, np. polietylenu czy polipropylenu [Bugnicourt i in. 2014]. Ropa naftowa to zasób nieodnawialny, co oznacza, że wraz ze stopniowym spadkiem jej nagromadzenia i dostępności obserwowany będzie wzrost cen. W wyniku tej zależności produkcja plastiku z surowców petrochemicznych będzie stawała się coraz droższa i w konsekwencji mniej opłacalna. Wytwarzanie polimerów z materiałów pochodzenia biologicznego jest więc dobrą alternatywą. Takie bioplastiki ponadto mają niewielki wpływ na środowisko, ponieważ są całkowicie biodegradowalne. Obecnie jednak zastąpienie materiałów petrochemicznych przez PHA jest nieopłacalne. Jak podają różne źródła cena rynkowa jednego kilograma PHA wynosi od ok. 2,5 do 5,5 dolara i jest co najmniej trzykrotnie wyższa od polimerów na bazie paliw [Gholami i in. 2016, Crutchik, i in. 2020, Kurcok i in. 2017, Wiśniowska i in. 2020]. Jednak **Dyrektywa Parlamentu Europejskiego i Rady 2019/904 z dnia 5 czerwca 2019 r. w sprawie zmniejszenia wpływu niektórych produktów z tworzyw sztucznych na środowisko** [dyrektywa 2019/904] kładzie nacisk na ograniczenie stosowania konwencjonalnych polimerów i stopniowe zastępowanie ich biopolimerami biodegradowalnymi. Przyczyni się to do ograniczenia eksploatacji zasobów naturalnych oraz znacznego zmniejszenia zanieczyszczenia środowiska tworzywami sztucznymi. Jest to niebagatelny problem środowiskowy – szacuje się, że rocznie do mórz i oceanów trafia od 5 do 13 milionów ton niebiodegradowalnych tworzyw sztucznych, a do roku 2050 w oceanach znajdzie się wagowo więcej plastiku niż ryb [europarl.europa.eu].

Aktualnie najbardziej rozpowszechnioną konfiguracją procesu produkcji i odzysku substancji PHA jest trójstopniowy proces, w którym pierwszym etapem jest wstępna fermentacja strumienia substancji biodegradowalnej. Wymagane jest jednak stosowanie wysokiej jakości substratów i specjalnie selekcyonowanych czystych kultur bakteryjnych, co skutkuje wysokimi kosztami tego procesu [Klimiuk i in. 2008]. Podczas pierwszego etapu bakterie hydrolityczne i fermentacyjne rozkładają złożone substancje organiczne na łatwo biodegradowalne związki, takie jak np. lotne kwasy tłuszczowe. Proces ten osiąga się poprzez odpowiednie sterowanie warunkami środowiskowymi, dzięki czemu inhibituje się dalsze przemiany tych związków podczas kwasogenezy i metanogenezy. Drugim elementem układu jest reaktor do hodowli mikroorganizmów, które wykazują wysoką zdolność magazynowania substancji zapasowych w postaci PHA. Stosując odpowiednią strategię hodowli tych organizmów (polegającą na zapewnieniu naprzemiennych warunków tlenowo-beztlenowych oraz zmiennej dostępności substancji pokarmowych) wcześniej wytworzone lotne kwasy tłuszczowe doprowadza się do reaktora, a biomasa w nim zawarta wykorzystuje je do syntezy PHA wewnątrz komórek. Kiedy komórki osiągną maksymalną zawartość PHA kierowane są do trzeciego etapu, w którym biomasa poddawana jest działaniu serii procesów ekstrakcyjnych mających na celu separację granulek PHA z komórek mikroorganizmów. W zależności od zastosowanej metody powstała forma biopolimeru może przybierać postać proszku lub peletu, który jest gotowym do użycia substratem do produkcji końcowych wyrobów, np. materiałów opakowaniowych czy artykułów jednorazowego użytku [Puyol i in. 2017].

Pomimo że produkcja PHA jest dobrze rozpoznany procesem, to, jak wspomniano wcześniej, obecnie jest to proces nieopłacalny w stosunku do wytwarzania surowców na bazie ropy naftowej. Do wysokich kosztów produkcji w podejściu konwencjonalnym przyczynia się konieczność stosowania czystych wyselekcjonowanych kultur bakterii i sterylizowanych substratów wysokiej jakości [Wiśniowska i in. 2020, Mizielińska i in. 2018]. Alternatywą w tym zakresie jest wykorzystanie kultur mieszanych, np. osadów ściekowych oraz substratów odpadowych, m.in. melasy, odpadów

z papierni czy mleczarni. Zastosowanie strumieni odpadów w połączeniu z mieszanymi kulturami drobnoustrojów uważane jest za skuteczne obniżenie kosztów produkcji biopolimerów PHA. Tak więc integracja produkcji PHA i oczyszczania ścieków może pomóc w obniżeniu cen PHA do zakresu, który mógłby być konkurencyjny w stosunku do tradycyjnych surowców w przemyśle tworzyw sztucznych. Zastosowanie osadów ściekowych jako źródła węgla do produkcji PHA jest w tej chwili przedmiotem licznych prac naukowych. Koncentrują się one również na temacie wykorzystania osadów ściekowych jako źródła bakterii gromadzących PHA – liczne bakterie występujące w tych osadach mają pożądaną zdolność, chociażby wspomniane na początku bakterie fosforowe.

W porównaniu z czystymi kulturami, wytwarzanie PHA z osadu czynnego jest korzystne z uwagi na [Klimiuk i in. 2008, Salehizadeh i in. 2004]:

- możliwość wykorzystania jako surowców produktów ubocznych i odpadów poprodukcyjnych pochodzących z przemysłu rolno-spożywczego,
- łatwość sterowania syntezą PHA poprzez zmianę warunków operacyjnych procesu,
- naturalną selekcję gatunkową mikroorganizmów, dzięki której hodowle wykazują wysoką stabilność, co ułatwia prowadzenie i kontrolę procesu technologicznego,
- brak konieczności utrzymywania sterylnych warunków podczas hodowli.

Integracja procesu produkcji PHA z konwencjonalną oczyszczalnią ścieków w pełnej skali technicznej jest przedsięwzięciem, które wymaga zmian technologicznych i poglądowych, jednak technicznie jest jak najbardziej możliwą do wykonania operacją. Przekierowanie osadów ściekowych z tradycyjnego procesu fermentacji metanowej do linii technologicznej produkcji PHA może wpłynąć na zdolność produkcyjną metanu, ponieważ ogranicza ilość substratu poddawanego fermentacji. Zmiana bilansu związków organicznych w oczyszczalni może skutkować obniżeniem ilości wyprodukowanego biogazu nawet o 50-65% [Wiśniewska i in. 2020]. W konsekwencji zmniejszeniu może ulec ilość energii elektrycznej i cieplnej odzyskiwanej z metanu czy przychody generowane z jego sprzedaży. Z drugiej strony jednak można prowadzić odbiór osadów ściekowych i innych odpadów biodegradowalnych w regionie, w którym będą odzyskiwane substancje PHA, a których sprzedaż może rekompensować te straty. Zastosowanie omawianego procesu w pełnej skali wymaga więc złożonej analizy techniczno-ekonomicznej. Wszelkie analizy można znaleźć w literaturze [Werker i in. 2018, Crutchik i in. 2020], jednakże ze względu na brak kompleksowych wdrożeń, opierają się one na założeniach teoretycznych. Wnioski w nich przedstawiane są rozbieżne co do opłacalności zastosowania odzysku PHA w oczyszczalni ścieków. W kontekście odzyskiwania zasobów z procesów oczyszczania ścieków wdrożenie takiej innowacji w pełnej skali technicznej może istotnie przyczynić się do realizacji założeń gospodarki o obiegu zamkniętym w danym obiekcie i niewątpliwie jest rozwiązaniem perspektywicznym. Widoczna jest wyraźna presja wywierana w celu rozwoju tej technologii, co potwierdzają badania w skali laboratoryjno-półtechnicznej oraz mnogość publikacji naukowych.

Od 2010 r. działa pilotażowa instalacja do wytwarzania PHA w oczyszczalni ścieków Aquiris w Brukseli. Szacuje się, że w przypadku wybudowania aparatury pozwalającej na taką produkcję w pełnej skali technicznej instalacja ta mogłaby produkować ok. 20 tys. ton biotworzyw rocznie [sirris.be]. Obiekt o takiej samej funkcji wybudowano także w Chinach w oczyszczalni ścieków Wuxi [Mosquera-Corral i in. 2017]. Mobilna wersja instalacji pilotażowej została uruchomiona w oczyszczalni ścieków w Lund w Szwecji i jest w stanie wyprodukować ok. 1 kg PHA tygodniowo [Bengtsson i in. 2017]. W podrozdziale 8.2 opisano przykładowe projekty i wdrożenia tej technologii.

## 8.2. Projekt pilotażowy PHARIO

Instalacja pilotażowa o nazwie PHARIO jest pierwszą na świecie, która ma za zadanie pozyskiwać substancje PHA z osadów ściekowych. Umiejscowiono ją w oczyszczalni ścieków w Bath (Holandia) i 22 października 2015 r. ogłoszono, że wyprodukowała pierwszy w historii kilogram substancji PHA z osadu ściekowego (**rysunek 8-2**).

Jak przedstawiają partnerzy projektu, pomysł narodził się w efekcie wdrażania założeń gospodarki o obiegu zamkniętym, które ogłoszono na forum Unii Europejskiej. W roku 2015 zdolność produkcyjna instalacji była niewielka, wynosząca zaledwie kilka kilogramów tygodniowo. Z wyekstrahowanych PHA, w skali pilotażowej, demonstracyjnie wyprodukowany został wizytownik (**rysunek 8-3**). Do jego wykonania wykorzystano materiały, z których 74% stanowiły PHA pozyskane z pilotażowej instalacji PHARIO. Oczekuje się jednak, że bazując na doświadczeniach z eksploatacji aparatury eksperymentalnej, powstanie pierwsza instalacja referencyjna, która będzie miała zdolność produkcyjną na poziomie 2000-5000 ton PHA rocznie. Koncepcja instalacji w pełnej skali technicznej opiera się na założeniu centralizacji zakładu, który będzie punktem zbiorczym dla osadów ściekowych i odpadów organicznych powstających w regionie. Komerjalizacja technologii planowana jest na rok 2025 [Bengtsson i in. 2017, Werker i in. 2018].



**Rysunek 8-2.** Wyekstrahowane z osadów ściekowych substancje PHA [Bengtsson i in. 2017]



**Rysunek 8-3.** Wizytownik wyprodukowany z PHA [Bengtsson i in. 2017]

## 8.3. Kaumera Nereda

Jednym z innowacyjnych przykładów odzysku substancji z osadów ściekowych jest technologia odzysku substancji polimerowych z granulowanego osadu czynnego. Nazwa handlowa tego biopolimeru to Kaumera Nereda Gum – nowy biosurowiec ekstrahowany z granulek osadu, które tworzą się podczas procesu oczyszczania w technologii Nereda. Kaumera to bardzo użyteczny polimer wyodrębniony w formie żelu (**rysunek 8-4**), który ze względu na swoje właściwości może być stosowany na wiele różnych sposobów.



Rysunek 8-4. Wyekstrahowany biopolimer z granulowanego osadu czynnego – Kaumera Nereda Gum [Lavender i in. 2021]

Jego podstawową cechą jest zdolność zarówno do wchłaniania, jak i odpychania wody, dzięki czemu stanowi doskonały materiał powlekający do nawozów o spowolnionym działaniu stosowany w ogrodnictwie i rolnictwie (rysunek 8-5). Może być również wykorzystany jako spoiwo do materiałów proszkowych. Przy produkcji betonu zapobiega jego pękaniu, ponieważ użyty w postaci powłoki ogranicza wysychanie w procesie utwardzania. Przydaje się jako środek zmniejszający palność tkanin i materiałów budowlanych (rysunek 8-6), a także dodatek do barwników [Waldrop 2021, Lavender i in. 2021, Nannoni 2019, kaumera.com].



Rysunek 8-5. Zastosowanie biopolimeru Kaumera w celach nawozowych [dutchwatersector.com]

Pierwsza instalacja na świecie do odzysku tego biopolimeru została uruchomiona w 2019 r. w Zupthen (Holandia). Wydajność instalacji do produkcji biopolimeru Kaumera wynosi 400 ton rocznie. Kolejny zakład uruchomiony został wiosną 2020 r. w Epe, również w Holandii. Jego wydajność to 50 ton rocznie. Odzysk tego surowca może być prowadzony we wszystkich oczyszczalniach ścieków funkcjonujących w technologii granulowanego osadu czynnego Nereda, a więc produkcja Kaumery w przyszłości zostanie rozszerzona na skalę międzynarodową. Rozpoczęcie wytwarzania Kaumera Nereda Gum ze ścieków jest kolejnym krokiem holenderskich regionalnych władz wodnych w dążeniu do zamknięcia obiegu surowców przed 2050 r. [Waldrop 2021, Lavender i in. 2021, Nannoni 2019, kaumera.com].



Rysunek 8-6. Test palności materiału z dodatkiem biopolimeru Kaumera Nereda Gum [Bahgat 2021]



## 8.4. Wybrany obiekt – oczyszczalnia ścieków w Zutphen (Holandia)

Ścieki oczyszczane są w dwóch reaktorach Nereda z granulowanym osadem czynnym. Osad nadmierny zagęszczany jest grawitacyjnie, a następnie pompowany do zbiornika buforowego. Ze zbiornika osad przepływa stale do aparatury ekstrakcji biopolimeru Kaumera. Pierwszym etapem jest proces odwadniania osadu na prasie taśmowej. Następnie osad doprowadzany jest do wymienników ciepła, gdzie w dwustopniowym procesie podgrzewa się go do temperatury 80°C. Ciepło do ogrzania odzyskiwane jest z gorącego osadu. Kiedy osad osiąga docelową temperaturę, doprowadzany jest do reaktora ekstrakcyjnego, gdzie dawkuje się wodorotlenek w celu zwiększenia wartości pH. Osad pozostaje w reaktorze przez kilka godzin i w tym czasie następuje ekstrakcja, czyli uwalnianie wewnątrzkomórkowych biopolimerów do cieczy osadowej. Po procesie osad kierowany jest do wymienników ciepła w celu jego wychłodzenia, a odzyskane ciepło wykorzystuje się do ogrzania kolejnych partii materiału. Strumień osadu i cieczy kierowany jest następnie do wirówki dekantacyjnej, w której resztkowe cząstki osadu są ostatecznie oddzielane od cieczy zawierającej rozpuszczone biopolimery Kaumera. Pozostający osad po procesie jest poddawany dalszej obróbce w celu jego ostatecznego zagospodarowania poza terenem oczyszczalni. Ciecz osadowa kierowana jest do reaktora – tam dawkowane są kwasy w celu obniżenia wartości pH. Powoduje to zmianę struktury rozpuszczonych polimerów, wytrącanie ich i flokulację w formie żelowej. Wytworzone cząstki oddzielane są w separatorze dyskowym. Pozostałą po procesie ciecz nadosadową kieruje się do głównego ciągu oczyszczania Nereda. Instalacja może produkować 400 ton biopolimeru Kaumera rocznie, a jej maksymalna projektowa wydajność jest dwukrotnie wyższa. Cała instalacja umieszczona jest w budynku, który w całości powstał z materiałów pochodzących z recyklingu, a na dachu umieszczono panele fotowoltaiczne [Bahgat 2021, slimygreenstuff.com, Wilfert i in. 2021]. Widok na oczyszczalnię przedstawiono na **rysunku 8-7**, a reaktory Nereda na **rysunku 8-8**.



Rysunek 8-7. Widok na oczyszczalnię ścieków w Zutphen (Holandia) [Lavender i in. 2021]



Rysunek 8-8. Reaktory Nereda w oczyszczalni ścieków w Zutphen (Holandia) [Lavender i in. 2021]

## 8.5. Podsumowanie

Odzysk substancji polimerowych ze ścieków pokazuje, jak gospodarka wodno-ściekowa może przyczynić się do osiągnięcia obiegu zamkniętego. Produkty w postaci biopolimerów ekstrahowane są z osadów ściekowych, które stanowią odpad, więc sprzyja to ich ponownemu wykorzystaniu i jednocześnie minimalizuje masę wymagającą dalszej przeróbki. Przetwarzanie osadu na tej drodze powoduje zmniejszenie ilości osadu koniecznego do ostatecznego zagospodarowania o 20–45%. Ma to również pozytywny wpływ na zużycie energii i emisję CO<sub>2</sub> do atmosfery. Biopolimery odzyskane z osadów ściekowych są alternatywą dla materiałów produkowanych na bazie ropy naftowej – surowca nieodnawialnego. W związku z tym ich wykorzystanie może przyczynić się do ograniczenia eksploatacji zasobów naturalnych oraz do zmniejszenia zanieczyszczenia środowiska przez tworzywa sztuczne wyprodukowane na bazie konwencjonalnych polimerów. Oczyszczalnie ścieków, w których funkcjonują technologie tlenowego granulowanego osadu Nereda, staną się w przyszłości również miejskimi biorafineriami.



## Literatura:

- Bahgat N. 2021. Combined Phosphorus & Kaamera recovery from Aerobic Granular Sludge. wetsus.nl. <<https://www.wetsus.nl/app/uploads/2021/04/phosph-rec-NBahgat.pdf>> [dostęp 22.02.2022].
- Bugnicourt E., Cinelli P., Alvarez V., Lazzeri A. 2014. Polyhydroxyalkanoate (PHA): Review of synthesis, characteristics, processing and potential applications in packaging. eXPRESS Polymer Letters, 8 (11), s. 791-808.
- Bengtsson S., Werker A., Visser C., Korving L. 2017. Phario: Stepping stone to a sustainable value chain for PHA bioplastic using municipal activated sludge. stowa.nl. <<https://www.stowa.nl/sites/default/files/assets/PUBLICATIES/Publicaties%202017/STOWA%202017-15.pdf>> [dostęp 17.02.2022].
- Crutchik, D., Franchi, O., Caminos, L., Jeison, D., Belmonte, M., Pedrouso, A., Campos, J. L. 2020. Polyhydroxyalkanoates (PHAs) Production: A Feasible Economic Option for the Treatment of Sewage Sludge in Municipal Wastewater Treatment Plants? Water, 12 (4), s. 1118.
- dezeen.com. <<https://www.dezeen.com/2019/06/28/nienke-hoogvliet-kaamera-kimono-design/>> [dostęp 17.02.2022].
- dos Santos A., Schulz A., Duarte M. Valentina L. 2017. From Obtaining to Degradation of PHB: Material Properties. Part I. redalyc.org. <<https://www.redalyc.org/journal/835/83554561010/html/>> [dostęp 17.02.2022].
- dutchwatersector.com. <<https://www.dutchwatersector.com/news/second-plant-to-produce-kaamera-nereda-gum-from-sewage-sludge>> [dostęp 22.02.2022].
- Dyrektywa Parlamentu Europejskiego i Rady (UE) 2019/904 z dnia 5 czerwca 2019 r. w sprawie zmniejszenia wpływu niektórych produktów z tworzyw sztucznych na środowisko. Dziennik Urzędowy Unii Europejskiej L 155/1.
- erasmusintern.org. <<https://erasmusintern.org/sites/default/files/traineeship/attachments/Internship-Kaamera%26phosphorus%20recovery.pdf>> [dostęp 17.02.2022].
- Gholami A., Mohkam M., Rasoul-Amini S., Ghasemi Y. 2016. Industrial production of polyhydroxyalkanoates by bacteria Opportunities and challenges. Minerva Biotechnol, 28, s. 59-74.
- kaamera.com. <<https://kaamera.com/english/kaamera/>> [dostęp 22.02.2022].
- Khatami K., Perez-Zabaleta M., Owusu-Agyeman I., Cetecioglu Z. 2021. Waste to bioplastics: How close are we to sustainable polyhydroxyalkanoates production? Waste Management, Volume 119, s. 374-388.
- Klimiuk E., Pokój T. 2008. Produkcja polihydroksykwasów z osadu czynnego. Biotechnologia, 3 (82), s. 9-27.
- Kurcok P., Kawalec M., Sobota M., Michalak M., Kwiecień M., Jurczyk S. 2017. Polihydroksyalkaniany – zastosowanie i recykling. Polimery, 62 (5), s. 364-370.
- Lavender P. Renard V., Oliver B. 2021. Kaamera Nereda Gum – A disruptive technology for high-value product generation from wastewater treatment. waterprojectsonline.com. <[https://waterprojectsonline.com/custom\\_case\\_study/kaamera-nereda-gum-2021/](https://waterprojectsonline.com/custom_case_study/kaamera-nereda-gum-2021/)> [dostęp 17.02.2022].
- Liu F., Li J., Zhang L. 2019. Bioplastic production from wastewater sludge and application. The 5th International Conference on Water Resource and Environment. Earth Environ. Sci. 344 (1):012071.
- materialdistrict.com. <<https://materialdistrict.com/article/kaamera-wastewater-raw-material/>> [dostęp 17.02.2022].
- Mizielińska M., Łopusiewicz Ł., Soból M. 2018. Polihydroksyalkanolany – obiecujące polimery biodegradowalne. Kosmos Problemy nauk biologicznych, 67 (319), s. 299-306.
- Mosquera-Corral A., Carvalho G., Fra- Vázquez A., Ntaikou I., Oleskowicz-Popiel P., Palmeiro-Sánchez T., Reis M., Suárez-Ojeda M.E. 2017. Chapter 18. Recovery of organic added value products from wastewater, in: Le,a J.M., Suarez S. (Eds.), Innovative Wastewater Treatment and Resource Recovery Technologies, IWA Publishing, London.
- Nannoni S. 2019. Kaamera Nereda® Gum – Extracellular polymeric substances from wastewater. besustainablemagazine.com. <<https://www.besustainablemagazine.com/cms2/kaamera-nereda-gum-extracellular-polymeric-substances-from-wastewater/>> [dostęp 22.02.2022].

- Puyol D., Batstone D., Hülsen T., Astals S., Peces M., Krömer J. 2017. Resource Recovery from Wastewater by Biological Technologies: Opportunities, Challenges, and Prospects. *Frontiers in Microbiology*, 7, s. 1-23.
- Salehizadeh F., Loosdrecht van M.C. M. 2004. Production of polyhydroxyalkanoates by mixed culture: recent trends and biotechnological importance *Biotechnol. Adv.*, 22, s. 261-279
- sirris.be. <<https://www.sirris.be/nl/node/47116>> [dostęp 23.02.2022].
- slimygreenstuff.com. <<http://slimygreenstuff.com/2019/10/09/festive-opening-kaamera-installation-zut-phen/>> [dostęp 23.02.2022].
- Waldrop M. 2021. Microbes for better sewage treatment. *PNAS*, Vol. 118, No. 32.
- Werker A., Bengtsson S., Korving L., Hjort M., Anterrieu S., Alexandersson T., Uijterlinde C. 2018. Consistent production of high quality PHA using activated sludge. harvested from full scale municipal wastewater treatment – PHARIO. *Water Science and Technology*, 78 (11), s. 2256-2269.
- Wilfert P., Zlopasa J., Sels V., Xevgenos D., Baghat N., Korving L., Renard V., Oosterhuis M., Del Mar Mico Reche M., De La Torre Garcia T., Martinus A., Barreto S., Vasilev S., Van Lennep R., Van Loosdrecht M. 2021. A biorefinery approach for recovering resources from aerobic granular sludge. 5th IWA Specialized International Conference Ecotechnologies for Wastewater Treatment (EcoSTP).
- Wiśniewska E., Włodarczyk-Makuła M. 2020. Możliwości odzysku polihydroksyalkanianów (PHA) w oczyszczalniach ścieków. *Technologia Wody*, 71 (3-4).

# 9. Odzysk i ponowne wykorzystanie wody ze ścieków

## 9.1. Wprowadzenie

Gdyby rozpatrywać surowe ścieki komunalne pod względem wagowym, okazałyby się, że ponad 99% ich masy stanowi woda, a niecały 1% stanowią zanieczyszczenia w niej zawarte [Kehrein i in. 2020]. Z tego względu ponowne wykorzystanie ścieków uznawane jest za działanie priorytetowe zarówno w Ramowej Dyrektywie Wodnej, jak i w Dyrektywie dotyczącej oczyszczania ścieków komunalnych. Słuszność tego podejścia jest potęgowana, jeżeli weźmiemy pod uwagę obserwowany powiększający się deficyt wody słodkiej. Z tych powodów odzysk wody jest kolejnym ważnym aspektem funkcjonowania oczyszczalni ścieków w przyszłości, zwłaszcza w odniesieniu do założeń gospodarki o obiegu zamkniętym. Poprzez odzysk wody należy rozumieć poddanie ścieków wysokoefektywnym procesom oczyszczania i uzdatniania. Uzyskana woda musi osiągać parametry zbliżone do tych, które cechują wodę przeznaczoną do spożycia przez ludzi lub wykorzystywaną w konkretnych celach gospodarczych. Ma to szczególne znaczenie w świetle zmniejszających się zasobów spowodowanych nadmiernym poborem wody, przede wszystkim na potrzeby nawadniania w rolnictwie, lecz również do użytku przemysłowego i na potrzeby rozwoju obszarów miejskich. Odzyskiwana woda ze ścieków stanowi zatem użyteczną alternatywę dla konwencjonalnych zasobów, a jej wykorzystanie może zmniejszyć problem niedoboru w miastach, poprawić efektywność jej wykorzystywania, zmniejszyć zanieczyszczenie wód gruntowych i powierzchniowych oraz przyczynić się do poprawy jakości ekosystemów wodnych [Angelakis i in. 2008]. Największy potencjał w zakresie ponownego wykorzystania wody odzyskanej ze ścieków mają obecnie takie kraje jak Izrael oraz Singapur. W Izraelu prawie jedną czwartą krajowego zapotrzebowania na wodę zaspokajają oczyszczone ścieki. W Singapurze wskaźnik ten obecnie wynosi aż 40% i oczekuje się, że do roku 2060 wzrośnie do 55–60%. Innym przykładem jest miasto Chennai (Indie), gdzie ponowne wykorzystanie 40% wytworzonych ścieków zaspokaja 15% zapotrzebowania miasta na wodę [Kehrein i in. 2020]. Również w krajach europejskich realizowane są podobne projekty. Przykładem może być Malta, która od 1983 r. wykorzystuje oczyszczone ścieki do nawadniania pól uprawnych, a wskaźnik ponownego wykorzystania ścieków wynosi tam około 60% [Angelakis i in. 2008, Mudgal i in. 2016]. Badania przeprowadzone w 2006 r. przez D. Bixio wskazują, że w Europie w tym czasie funkcjonowało ponad 200 projektów dotyczących ponownego wykorzystania oczyszczonych ścieków [Bixio i in. 2006]. Najwięcej z nich znajdowało się w Portugalii, Francji, Holandii i Wielkiej Brytanii. Z kolei w wyniku przeglądu przeprowadzonego w 2017 r. przez Europejskie Stowarzyszenie Sektora Ponownego Wykorzystania Wody (Water Reuse Europe Association) zarejestrowano 787 programów praktykujących ponowne wykorzystanie wody. W tym czasie w Europie Północnej realizowano 250 programów, z czego najwięcej we Francji (112 zastosowań), Niemczech (36 zastosowań) oraz Holandii (28 zastosowań). W Polsce było to 12 projektów, z czego 2 przypadki dotyczyły ponownego wykorzystania wody w przemyśle, a 10 w celach rekreacyjnych. Z kolei w Europie Południowej zidentyfikowano 537 programów, z czego najwięcej w Hiszpanii (361 zastosowań), we Włoszech (99 zastosowań) oraz w Grecji (44 zastosowania). Można zauważyć, że w krajach położonych w cieplejszych rejonach Europy takie działania

są bardziej powszechna niż w krajach w Europie Północnej. Jest to związane ze zwiększonym ryzykiem występowania deficytów wody słodkiej, nadmiernego poboru wody przez sektor turystyczny, działalność rolniczą oraz przede wszystkim występowanie długotrwałych okresów bezopadowych [water-reuse-europe.org, Lahnsteiner 2019]. W roku 2015 dokonano oszacowania ilości ponownie wykorzystanej wody w Europie. Wskazano, że ilość ta wynosi 1,1 mld m<sup>3</sup> rocznie, co stanowi ok. 2,4% całkowitej ilości zbieranych i oczyszczanych ścieków. Jest to mniej niż 0,5% rocznego poboru wody słodkiej [Mudgal i in. 2016, Lahnsteiner 2019].

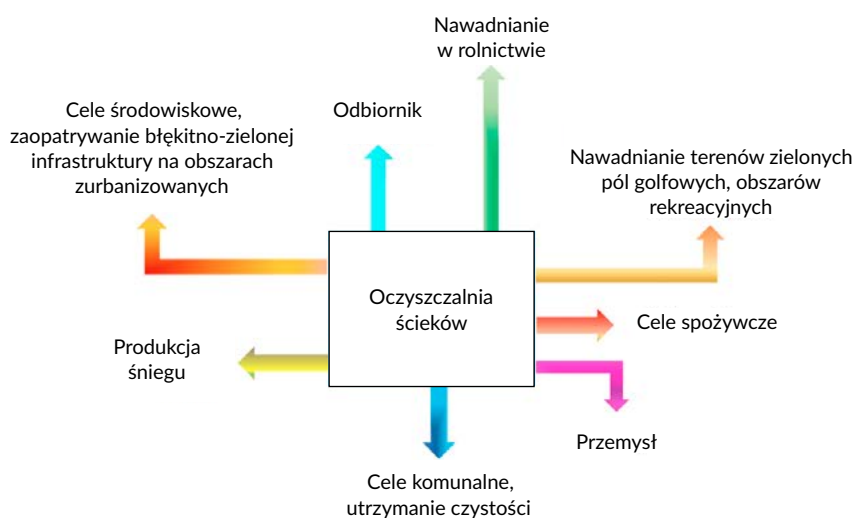
## 9.2. Możliwości wtórnego wykorzystania wody odnowionej ze ścieków

Na podstawie sposobu użycia odnowionej ze ścieków wody można wyróżnić kilka rodzajów jej wtórnego wykorzystania. Omówiono je poniżej [Maryam i in. 2017, Asano i in. 1996, Levine i in. 2004, Gromiec 2016, Bożek i in. 2011, Ahmad i in. 2021]:

- **w przemyśle.** Obecnie dość często zakłady przemysłowe wykorzystują przykładowe oczyszczalnie w celu przygotowania wytwarzanych przez siebie ścieków do wykorzystania ich jako wody technologicznej. Równocześnie, mimo takiego działania, muszą jednak uzupełniać układy technologiczne wodą surową pobieraną ze środowiska naturalnego. W związku z tym największą możliwością wtórnego wykorzystania oczyszczonych ścieków komunalnych należy poszukiwać w wodochłonnych branżach przemysłowych. Przykładem może być np. sektor energetyczny (wykorzystuje bardzo duże ilości wody w procesach chłodniczych i zasilania obiegów grzewczych) czy sektor petrochemiczny (który oczyszczone ścieki komunalne może wykorzystywać do produkcji wody procesowej). Inne możliwości zastosowania odzyskanej wody ze ścieków mogą stanowić m.in. myjnię przemysłowe lub przemysł przetwórstwa ziemniaczano-buraczanego jako wody spławne. Ciekawym kierunkiem ponownego wykorzystania wody ze ścieków jest jej wykorzystanie jako składnika betonu oraz materiałów budowlanych. Prowadzone w tym zakresie badania wskazują, że wykorzystanie wtórnie oczyszczonych ścieków do produkcji betonu może poprawić jego wytrzymałość na naprężenia nawet o kilkanaście procent;
- **do nawodnień rolniczych.** Sposób ten powinien być preferowany w regionach rolniczych, gdzie odnotowuje się niedobory zasobów wodnych. Woda w tym przypadku powinna charakteryzować się jakością zbliżoną do wody przeznaczonej do spożycia przez ludzi. Jakość odnowionej wody precyzuje wydane w 2020 r. rozporządzenie Parlamentu Europejskiego i Rady w sprawie minimalnych wymogów dotyczących ponownego wykorzystania wody [Rozporządzenie 2020/741]. Na mocy nowych przepisów ścieki komunalne, które zostały już poddane określonym procesom oczyszczania (zgodnie z przepisami Dyrektywy dotyczącej oczyszczania ścieków komunalnych), mogą zostać poddane dalszemu procesowi w celu spełnienia nowych, minimalnych parametrów jakościowych – tym samym będą odpowiednie do wykorzystania w rolnictwie. W praktyce oznacza to konieczność rozbudowy lub modernizacji oczyszczalni ścieków o dodatkowy moduł oczyszczania (trzeci stopień), oparty np. na filtracji membranowej i dezynfekcji. Dzisiaj w Polsce ścieki z oczyszczalni miejskich nie nadają się do nawadniania w rolnictwie, ponieważ praktycznie we wszystkich obiektach (poza nielicznymi wyjątkami) takie metody nie są stosowane;

- **do celów komunalnych.** Sposób ten dotyczy głównie nawadniania terenów zielonych, np. pól golfowych, ochrony przeciwpożarowej czy obszarów rekreacyjnych (co interesujące, do produkcji śniegu). Szczególnym rozwiązaniem jest zastosowanie podwójnych systemów wodociągowych – jednej instalacji do wody o przeznaczeniu spożywczym oraz drugiej do wtórnie wykorzystywanych ścieków. W takim rozwiązaniu układu wodociągów bardzo ważne jest zabezpieczenie przed przypadkowym lub awaryjnym połączeniem się strumieni. Ideą przyszłości jest produkcja wody przeznaczonej bezpośrednio do spożycia ze ścieków komunalnych. Jednak największym problemem odnowy wody do celów spożywczych nie jest kwestia techniczna i technologiczna, ponieważ takie metody są dobrze znane, lecz przede wszystkim mentalność i opór społeczeństwa. Bez odpowiedniej edukacji ekologicznej wizja realizacji takiego rozwiązania jest znacznie oddalona w czasie. Inne zastosowania na cele komunalne mogą obejmować przykładowo czyszczenie powierzchni dróg, placów budowy i innych obszarów o dużym natężeniu ruchu;
- **do celów środowiskowych.** Możliwe jest zaopatrywanie sztucznych jezior stanowiących element błękitno-zielonej infrastruktury na obszarach zurbanizowanych lub zasilenie śródładowych warstw wodonośnych, co ma m.in. zapobiegać intruzji wód słonych.

Wymienione rodzaje zastosowań przedstawiono graficznie na **rysunku 9-1**.



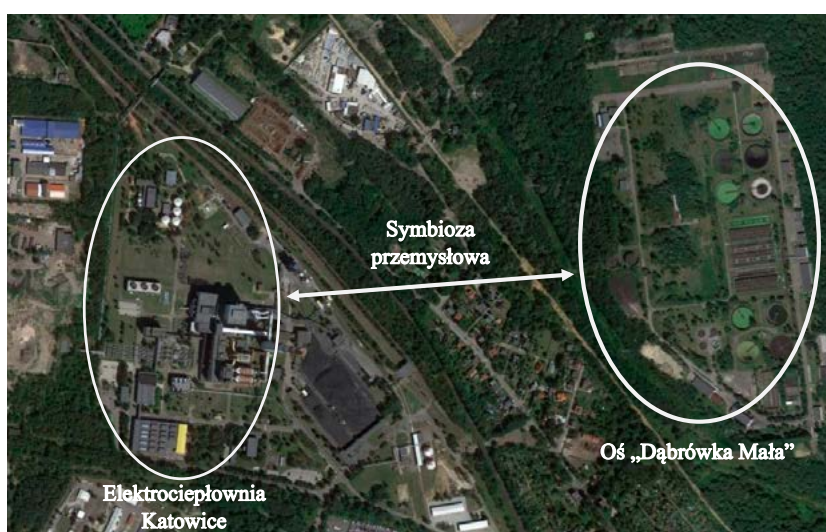
Rysunek 9-1. Możliwości wykorzystania odzyskanej wody ze ścieków (opracowanie własne)

## 9.3. Przykłady wykorzystania odnowionej wody ze ścieków

### 9.3.1. Oczyszczalnia ścieków „Dąbrówka Mała” i elektrociepłownia w Katowicach

Przykładem odzysku i ponownego wykorzystania wody ze ścieków jest wykorzystanie oczyszczonych ścieków pochodzących z OŚ „Dąbrówka Mała” przez elektrociepłownię w Katowicach. Jest to przykład osiągnięcia symbiozy przemysłowej, czyli realizacji jednego z celów działalności oczyszczalni

ścieków w przyszłości (**rysunek 9-2**). W 2018 r. ilość ścieków oczyszczonych wykorzystanych przez elektrociepłownię stanowiła ponad 26% ogólnej ilości poddanej oczyszczeniu. Takie działania pozwalają corocznie na zmniejszenie zużycia ograniczonych zasobów wody przeznaczonej do spożycia przez ludzi o blisko 1 500 tys. m<sup>3</sup>. Jest to równowartość ilości wody, którą rocznie wykorzystuje ok. 100 mniejszych miast w Polsce. Woda odzyskana ze ścieków wykorzystywana jest do chłodzenia bloków energetycznych oraz jako nośnik ciepła w sieci ciepłowniczej. Współpraca ta odbywa się już od niemalże 20 lat. W tym czasie do elektrociepłowni dostarczono 30 mln m<sup>3</sup> wody odzyskanej ze ścieków. Średnie zapotrzebowanie na wodę w Katowicach wynosi około 14 mln m<sup>3</sup> rocznie, więc kooperacja ta pozwoliła zaoszczędzić taką ilość wody, w jaką miasto zaopatruje się przez dwa lata.



**Rysunek 9-2.** Ponowne wykorzystanie wody ze ścieków – przykład symbiozy sektora komunalnego i przemysłowego w Katowicach (opracowanie własne na podstawie [mapy Google])

### 9.3.2. Oczyszczalnia ścieków „Maszewo” i PKN Orlen

Kolejny przykład dotyczy ponownego wykorzystania oczyszczonych ścieków komunalnych w zakładzie produkcyjnym w Płocku. W październiku 2021 r. PKN Orlen oraz Wodociągi Płockie podpisały porozumienie o współpracy w projekcie o nazwie Blue Bridge, którego celem jest wykorzystanie oczyszczonych ścieków komunalnych jako materiału zasilającego do produkcji wody procesowej używanej w zakładzie PKN Orlen. Plan działania rozpoczęto od analizy możliwości wykorzystania ścieków, przeglądu technologii doczyszczania oraz koncepcji prowadzenia tras rurociągu transportującego ścieki z miejskiej oczyszczalni do zakładu produkcyjnego PKN Orlen. Jeden z wariantów zakładał, że oczyszczone ścieki z oczyszczalni w Maszewie mogą być transportowane rurociągiem o długości około 4 km. Obecnie prowadzone są w tym zakresie badania pilotażowe. Przedsięwzięcie umożliwi zmniejszenie poboru wody surowej z Wisły przez PKN Orlen o około 25%. Przewiduje się również, że projekt przyczyni się do poprawy jakości wody w rzece ze względu na ograniczenie ilości odprowadzanych ścieków [teraz-srodowisko.pl, wodociagowiec.pl, inzynieria.com]. Projekt jest przykładem domykania obiegu gospodarki surowcowej, a także symbiozy sektora komunalnego i przemysłowego (**rysunek 9-3**). Taka współpraca jest jednym z głównych aspektów funkcjonowania oczyszczalni ścieków w przyszłości.





Rysunek 9-3. Ponowne wykorzystanie wody ze ścieków – przykład symbiozy sektora komunalnego i przemysłowego w Płocku (opracowanie własne na podstawie [mapy Google])

### 9.3.3. Oczyszczalnia ścieków „Tychy-Urbanowice” i „Park Wodny”

Oczyszczalnia ścieków „Tychy-Urbanowice” plasuje się w ścisłej czołówce najnowocześniejszych obiektów tego typu w Polsce. Jej profil działalności i zastosowane rozwiązania technologiczne powodują, że obecnie wpisuje się ona w definicję oczyszczalni ścieków przyszłości.

Zakład obsługuje aglomerację o wielkości niemal 172 tys. mieszkańców równoważnych. Maksymalna projektowana przepustowość oczyszczalni wynosi 42 tys. m<sup>3</sup>/d, a średniodobowa ilość oczyszczanych ścieków osiąga poziom 33 tys. m<sup>3</sup>. Zastosowana technologia opiera się na tradycyjnym mechanicznym i biologicznym oczyszczaniu ścieków ze wspomaganiami chemicznymi. Powstające osady ściekowe poddawane są kolejno zagęszczaniu, fermentacji metanowej, a następnie odwodnieniu i opcjonalnie higienizacji wapnem [rcgw.pl].

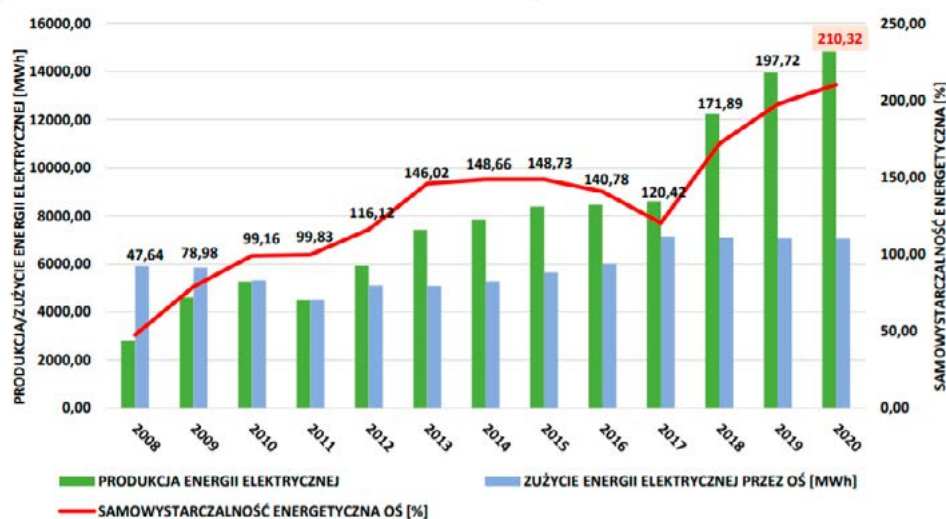
Oczyszczone ścieki znajdują wiele zastosowań już w samym obiekcie, zanim zostaną odprowadzone do środowiska. Są wykorzystywane przede wszystkim do czyszczenia i płukania urządzeń w części oczyszczania mechanicznego oraz stanowią medium chłodzące agregaty kogeneracyjne. Ścieki wykorzystywane są również w stacji uzdatniania biogazu, gdzie pełnią funkcję płuczki wodnej, w której następuje absorpcja dwutlenku węgla z oczyszczanego biogazu. Ponadto ścieki oczyszczone są wykorzystywane w instalacji klimatyzacji i wentylacji budynku administracyjnego jako źródło ciepła potrzebnego do wytworzenia ciepła/chłodu w zależności od pory roku. Od roku 2015 obserwuje się systematyczny wzrost zużycia ścieków oczyszczonych jako wody technologicznej. W roku 2020 wskaźnik zużycia wody technologicznej w stosunku do całkowitego zużycia wody na obiekcie wynosił aż 94,3% [rcgw.pl, Karło i in. 2019, Deklaracja Środowiskowa 2020].

W oczyszczalni prowadzone są również liczne badania pilotażowe. Od 2012 r. funkcjonuje stanowisko badawcze procesu ultrafiltracji, z wykorzystaniem którego sprawdzane są szanse na poprawę jakości oczyszczonych ścieków poprzez zmniejszenie stężenia substancji organicznych, usunięcie jonów metali ciężkich i mikroorganizmów patogennych. Tak oczyszczone ścieki, a w zasadzie już odnowiona woda ze ścieków, mają znaleźć zastosowanie w procesie produkcyjnym silników samochodowych oraz jako medium wzrostowe do hodowli glonów. Uzyskana biomasa glonów ma stanowić następnie kosubstrat w procesie fermentacji metanowej, intensyfikując tym samym produkcję biogazu. Planuje się także, aby odnowiona woda wykorzystywana była do nawadniania plantacji roślin energetycznych, które również mogą stanowić kosubstrat w procesie fermentacji. Od 2019 r. trwają badania nad oczyszczaniem odcieków z gospodarki osadowej w procesie Anammox [Gieleciak 2017, Deklaracja Środowiskowa 2020].



Rysunek 9-4. Biogazownia funkcjonująca w oczyszczalni ścieków w Tychach [egospodarka.pl]

Bardzo ważnym aspektem działalności oczyszczalni jest nowoczesne podejście do produkcji energii elektrycznej i cieplnej z biogazu wytworzonego w procesie kofermentacji metanowej osadów ściekowych oraz odpadów przemysłowych, dostarczanych przez zewnętrzne podmioty przemysłowe. Funkcjonującą w zakładzie biogazownię pokazano na **rysunku 9-4**. Kofermentacja prowadzona jest w dwóch wydzielonych komorach fermentacyjnych o objętości 5500 m<sup>3</sup> każda, a instalację uzupełniają elementy towarzyszące, takie jak zbiorniki magazynowe na przyjmowane odpady, stacja ich pasteryzacji i obróbki wstępnej. W obiekcie zainstalowane są trzy agregaty kogeneracyjne, dwa z nich o mocy elektrycznej 345 kW i mocy cieplnej 541 kW oraz jeden o mocy elektrycznej 400 kW i cieplnej 394 kW. Spalając w nich biogaz oczyszczalnia wytwarza skojarzoną energię elektryczną oraz ciepłą. Energia cieplna wykorzystywana jest do podgrzewania komór fermentacyjnych oraz budynków w oczyszczalni. Wytworzoną energią elektryczną zasilane są urządzenia w obiekcie, a jej nadwyżka sprzedawana jest do zewnętrznej sieci energetycznej. Na energię elektryczną wytworzoną w agregatach prądowórczych wystawiane są tzw. zielone certyfikaty, które następnie sprzedawane są na Towarowej Giełdzie Energii [www.rcgw.pl, Karło i in. 2019].



Rysunek 9-5. Samowystarczalność energetyczna oczyszczalni ścieków w Tychach [Karto i in. 2019, Gieleciak 2021]

Szeroki wachlarz przyjmowanych kosubstratów oraz sukcesywna optymalizacja procesu przyczyniły się do stopniowego wzrostu efektywności produkcji biogazu. Dla przykładu w roku 2009 biogazownia wyprodukowała ok. 2,5 mln m<sup>3</sup> biogazu, natomiast w roku 2018 było to już blisko 6,5 mln m<sup>3</sup>. Wzrost produkcji, a co za tym idzie również energii elektrycznej i ciepłej, w połączeniu z szeregiem innych energooszczędnych inwestycji spowodował, że oczyszczalnia ścieków w roku 2010 osiągnęła samowystarczalność energetyczną. W roku 2020 ilość wyprodukowanej energii ciepłej przekroczyła o ponad 210% całkowite zapotrzebowanie na energię elektryczną [magazynbiomasa.pl]. Wartości te zaprezentowane są na rysunku 9-5. Taki stan rzeczy sprawia, że jest to pierwsza w Polsce w pełni pasywna oczyszczalnia ścieków, a pod względem bilansu energetycznego plasuje się w ścisłej czołówce przedsiębiorstw wodno-kanalizacyjnych w Europie.

Wzrost efektywności energetycznej osiągnięto dzięki sukcesywnie prowadzonym inwestycjom mającym na celu zmniejszenie zapotrzebowania energetycznego urządzeń pracujących w oczyszczalni. Zainwestowano między innymi w nowoczesne energooszczędne systemy napowietrzania, pompy ścieków i recyrkulatów czy odpowiednią optymalizację sterowania procesami technologicznymi. Przykładowe zadania, które wprowadzono w życie to [Gieleciak 2021]:

- modernizacja pompowni głównej ścieków – zmniejszenie energochłonności o 47%, oszczędność w skali roku 241 MWh;
- modernizacja systemu napowietrzania – zmniejszenie energochłonności o 29%, oszczędność w skali roku 1223 MWh;
- modernizacja pompowni recyrkulatu – zmniejszenie energochłonności o 78%, oszczędność w skali roku 512 MWh.

Biogaz powstający w procesie fermentacji metanowej wykorzystywany jest nie tylko na potrzeby własne oczyszczalni, **lecz także przekazywany jest do zewnętrznych odbiorców**. W roku 2018, w odległości około 6 km od oczyszczalni, oddany do użytku został Park Wodny Tychy, który jest zasilany właśnie energią z biogazu produkowanego w zakładzie (rysunek 9-6).





Rysunek 9-6. Park Wodny Tychy [etychy.org]

Możemy tu zaobserwować modelowy przykład symbiozy energetycznej oczyszczalni ścieków z zewnętrznym podmiotem gospodarczym. Biogaz po uzdatnieniu do jakości biometanu transportowany jest z oczyszczalni rurociągiem o długości 6,2 km do bioelektrociepłowni funkcjonującej w Parku Wodnym Tychy, w której wytwarza się energię elektryczną i ciepłą pokrywając 100% jego zapotrzebowania. **Jest to pierwsze tego typu rozwiązanie w Polsce** [rcgw.pl, Karło i in. 2019].

Jak podają przedstawiciele spółki administrującej omawianymi obiektami, od maja do grudnia 2018 r. biogazownia wyprodukowała 20 500 MWh energii. Osiągnięcie takiego wyniku przy użyciu konwencjonalnych źródeł wymagałoby spalania 5400 ton węgla kamiennego, czyli wypełnionych po brzegi 91 wagonów kolejowych. Dzięki wykorzystaniu odnawialnych źródeł energii (OZE) uniknięto emisji 8 355 ton dwutlenku węgla, a do atmosfery nie trafiły także pyły i inne zanieczyszczenia. Roczna produkcja energii w elektrociepłowni biogazowej tyskiej oczyszczalni ścieków i Wodnego Parku Tychy mogłaby pokryć potrzeby energetyczne około 35-tysięcznego miasta.

Przedstawione aspekty działalności oczyszczalni (tj. dążenie do maksymalizacji ponownego wykorzystania wody, samowystarczalność energetyczna, produkcja znacznych nadwyżek energetycznych prowadząca do synergii z podmiotami zewnętrznymi) są innowacyjne w skali krajowej i stanowią godny do naśladowania przykład rozwiązań, będących podstawą działalności oczyszczalni ścieków w przyszłości jako bioenergetycznego zakładu produkcji surowców i energii.

#### 9.3.4. Produkcja wody przeznaczonej do spożycia bezpośrednio ze ścieków w Namibii

Namibia to państwo położone w południowo-zachodniej Afryce, nad Oceanem Atlantyckim i graniczące z Angolą, Botswaną, RPA oraz Zambią. Jest to kraj o jednym z największych deficytów wody na świecie. Stolicą jest miasto Windhoek, które od 1968 r. zaopatruje się w wodę przeznaczoną

do spożycia pochodzącą bezpośrednio ze ścieków miejskich [Haarhoff i in. 1996, Gross 2016]. Widać więc, że pomysł odnowy wody ze ścieków miejskich nie jest tak nowy, jak mógłby się wydawać, ponieważ w tym mieście jako pierwszym na świecie już od ponad 50 lat jest on z powodzeniem realizowany. Od tamtej pory takie rozwiązanie wdrożone zostało również w Singapurze (2003 r.) i kalifornijskim hrabstwie Orange w Stanach Zjednoczonych (1975 r.) [Leslie 2018].

Woda przeznaczona do spożycia w ilości 25 000 m<sup>3</sup>/d produkowana jest w zakładzie odnowy wody Goreangab (**rysunek 9-7**), który obsługuje około 300 000 mieszkańców stolicy.



Rysunek 9-7. Zakład odnowy wody ze ścieków miejskich w Windhoek (Namibia) [wingoc.com.na]

Wykorzystywane są w nim ścieki biologicznie oczyszczone w stawach ściekowych oraz woda ze źródła powierzchniowego. Ścieki stanowią między 25 a 50% całego strumienia uzdatnianej wody. Biologicznie oczyszczone ścieki doczyszczane są w procesach koagulacji, flotacji, filtracji na filtrach piaskowych, ozonowania, adsorpcji na biologicznie aktywnych złożach węglowych, ultrafiltracji oraz dezynfekcji. Odnowiona woda ze ścieków kierowana jest do zbiorników magazynowych wody przeznaczonej do spożycia oraz warstw wodonośnych. Obecnie ok. 26% wody przeznaczonej do spożycia dostarczanej mieszkańcom Windhoek pochodzi z recyklingu ścieków [Moyo 2012, Lahnsteiner i in. 2007, Pisani i in. 2013, Kehrein i in 2020, planet.veolia.com].

### 9.3.5. Produkcja wody przeznaczonej do spożycia bezpośrednio ze ścieków w Singapurze

W Singapurze wskaźnik ponownego wykorzystania wody ze ścieków jest jednym z najwyższych na świecie. Obecnie 40% zapotrzebowania pokrywa się poprzez odzysk wody ze ścieków [Kehrein i in. 2020]. Zakłada się, że w roku 2060 wskaźnik ten osiągnie 55-60%. Ponowne wykorzystanie wody przybiera tam dwie formy. Od 1966 r. ze ścieków produkuje się wodę o jakości

nieprzeznaczonej do spożycia, jako alternatywne źródło do celów przemysłowych, a od roku 2003 rozpoczęto również produkcję wody wysokiej jakości w ramach projektu NEWater. Aktualnie w Singapurze znajduje się pięć takich zakładów. Konwencjonalnie oczyszczone ścieki komunalne poddawane są recyklingowi w 3-etapowym procesie odnowy, obejmującym ultrafiltrację lub mikrofiltrację, odwróconą osmozę oraz dezynfekcję promieniami ultrafioletowymi. W porównaniu z wykorzystaniem wody morskiej, produkcja ze ścieków jest bardziej energooszczędna i opłacalna ze względu na dużo niższe koszty oczyszczania. Woda NEWater jest wykorzystywana w zakładach o wysokim zapotrzebowaniu, np. w przemyśle energetycznym i petrochemicznym, stosuje się ją również w budynkach użyteczności publicznej do celów klimatyzacyjnych. NEWater jest dostarczana do klientów przemysłowych za pośrednictwem specjalnie przeznaczonej sieci rurociągów. Drugim ważnym kierunkiem jej zastosowania jest wykorzystanie jako źródło wody przeznaczonej do spożycia przez ludzi. Produkt ten przewyższa standardy jakości wody zaproponowane przez WHO oraz Amerykańską Agencję Ochrony Środowiska. W okresach suszy i niedoboru wody NEWater służy do uzupełnienia stanu zbiorników retencyjnych wody surowej, z której wytwarzana jest woda spożywcza [Tan 2018, pub.gov.sg, voanews.com]. Jedną z możliwości dystrybucji tej wody jest sprzedaż w formie wody butelkowanej (**rysunek 9-8**).



Rysunek 9-8. Woda butelkowana wyprodukowana bezpośrednio ze ścieków [Mąkinia 2017]

#### 9.3.6. Produkcja wodoru i pary wodnej przeznaczonych do odsiarczania oleju napędowego w Edmonton (Kanada)

W związku ze wzrostem świadomości ekologicznej przed branżą petrochemiczną pojawiły się nowe wyzwania. W 2003 r. firma Petro-Canada rozpoczęła prace nad projektem odsiarczania oleju



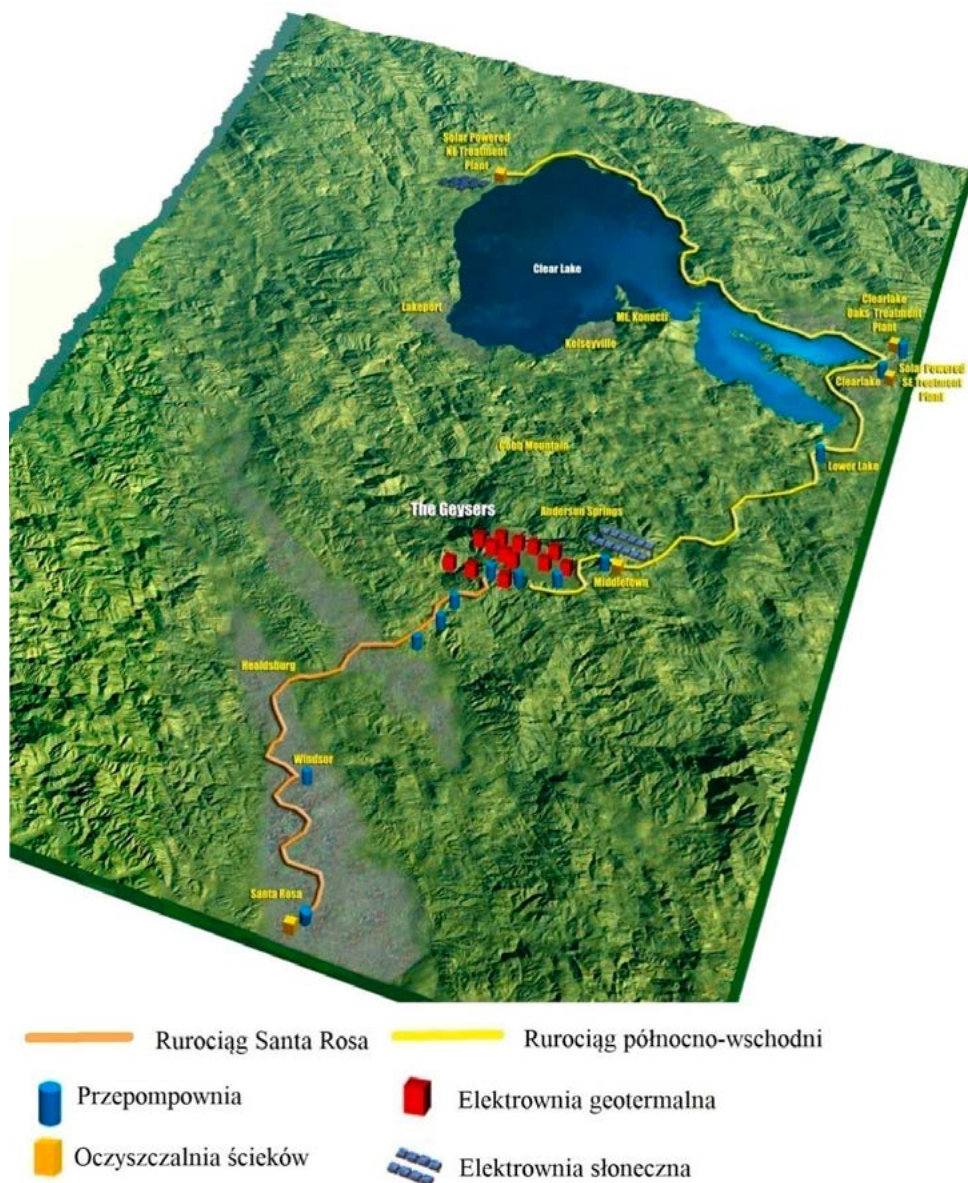
napędowego (EDD) w Edmonton (Kanada). Proces ten wymaga użycia wodoru oraz pary wodnej, których dostarczenie zlecono firmie Air Products. Petro-Canada, która zobowiązała się dostarczyć wodę niezbędną do procesu, rozważyła dwa potencjalne jej źródła. Pierwszym była pobliska rzeka North Saskatchewan, a drugim ścieki oczyszczone z pobliskiej oczyszczalni ścieków Gold Bar. Po analizie dostępnych rozwiązań nastąpiło porozumienie między firmą a miastem Edmonton, w wyniku którego w oczyszczalni ścieków Gold Bar powstała stacja odzysku wody ze ścieków wraz z rurociągiem o długości 5,5 km, transportującym 40 000 m<sup>3</sup>/d odnowionej wody do firmy Air Products [Vagi i in. 2006]. Opisaną symbiozę przemysłową graficznie przedstawiono na **rysunku 9-9**.



**Rysunek 9-9.** Ponowne wykorzystanie wody ze ścieków – przykład symbiozy sektora komunalnego i przemysłowego w Edmonton (Kanada) (opracowanie własne na podstawie [mapy Google])

### 9.3.7. System ponownego wykorzystania wody w mieście Santa Rosa (USA)

Nowatorski system ponownego wykorzystania ścieków zastosowano w mieście Santa Rosa w Stanach Zjednoczonych. Obsługująca to miasto oczyszczalnia ścieków „Laguna” przyjmuje ścieki z domów, firm i zakładów przemysłowych znajdujących się w obrębie „Systemu Ponownego Wykorzystania Wody Santa Rosa” (**rysunek 9-10**). Od 1968 r. obiekt ten zwiększył produkcję wody ze ścieków oczyszczonych z 7 500 do około 80 000 m<sup>3</sup>/d. Po oczyszczeniu odnowiona woda trafia do stawów, które stanowią środowisko życia dla licznych gatunków dzikich zwierząt, w tym ptactwa wodnego. System ponownego wykorzystania wody obejmuje 45 przepompowni, które dostarczają oczyszczoną wodę do podziemnych i naziemnych systemów nawadniających. Odzyskana woda jest wykorzystywana do tworzenia sztucznych mokradeł, stanowiących siedlisko dla wielu gatunków ptaków, płazów i ssaków, a przydatnych także do spełniania potrzeb komunalnych w mieście. Woda ta wykorzystywana jest również w procesach wytwarzania energii elektrycznej przez zakład geotermalny Geysers o mocy 1 000 MW – wytwarza energię elektryczną dla ponad 100 tys. gospodarstw domowych. Elektrownia geotermalna jest połączona z oczyszczalnią rurociągiem o łącznej długości 64 km. Jedną z głównych zalet takiego wykorzystania ścieków oczyszczonych jest stałe zapotrzebowanie na wodę w ciągu całego roku, w przeciwieństwie do ich spożytkowania w nawadnianiu, gdzie intensywność wzrasta w okresie wzrostu roślin i maleje podczas zbiorów [Goyal i in. 2010].



Rysunek 9-10. Ponowne wykorzystanie wody ze ścieków – przykład symbiozy sektora komunalnego i energetycznego w Santa Rosa (USA) [geysers.com]

### 9.3.8. System ponownego wykorzystania wody w Centrum Odnowy Wód w Vernon (Kanada)

Interesujący projekt ponownego wykorzystania wody odnowionej ze ścieków zrealizowano w mieście Vernon w Kanadzie. Oczyszczalnia ścieków obsługująca region Greater Vernon przyjmuje ścieki pochodzące od tamtejszych mieszkańców i podmiotów przemysłowych w ilości około 13 000 m<sup>3</sup>/d. Widok na oczyszczalnię przedstawiono na **rysunku 9-11**. Procesy obejmują usuwanie skratek, piasku, sedymentację wstępną, biologiczne usuwanie substancji organicznych i biogenych, sedymentację wtórną, filtrację i dezynfekcję UV. Osady ściekowe (wstępne i wtórne) są uśredniane, odwadniane i kompostowane, a następnie dystrybuowane do społeczności lokalnej jako nawóz bogaty w składniki odżywcze. Od 1978 r. cały strumień odnowionej wody jest pompowany do oddalonego o 10 km od oczyszczalni zbiornika retencyjnego w celu późniejszego pobrania do nawodnienia obszarów



o łącznej powierzchni 970 ha. Obejmują one pole golfowe, sady owocowe i szkółkę leśną, a także duże powierzchnie gruntów rolnych i pastwisk wykorzystywanych do wypasu zwierząt oraz produkcji słomy.



Rysunek 9-11. Centrum Odnowy Wód w Vernon (Kanada) [maple.ca]

## 9.4. Podsumowanie

Ponowne wykorzystanie ścieków uznawane jest za działanie priorytetowe zarówno w Ramowej Dyrektywie Wodnej, jak i w Dyrektywie dotyczącej oczyszczania ścieków komunalnych. Podkreślanie słuszności tego działania jest istotne, gdy weźmiemy pod uwagę obserwowany powiększający się deficyt wody słodkiej. Z tych względów odzysk wody jest kolejnym ważnym aspektem funkcjonowania oczyszczalni ścieków w przyszłości, zwłaszcza z punktu widzenia gospodarki o obiegu zamkniętym. Woda odzyskiwana ze ścieków stanowi użyteczną alternatywę dla konwencjonalnych zasobów, a jej wykorzystanie może zmniejszyć problem niedoboru w miastach, poprawić efektywność jej wykorzystywania, zmniejszyć eksploatację wód gruntowych i generalnie przyczynić się do poprawy jakości ekosystemów wodnych. Wyróżnić można cztery główne kierunki wykorzystania wtórnej odnowionej wody ze ścieków, tj. w sektorach przemysłowym, komunalnym i rolniczym oraz na tzw. cele środowiskowe. Aktualnie jednak głównym sposobem zagospodarowania ścieków oczyszczonych w komunalnych oczyszczalniach ścieków jest ich odprowadzenie do środowiska wodnego, natomiast inne rozwiązania stanowią pojedyncze przypadki. Oczywiście często zakłady wykorzystują oczyszczone przez siebie ścieki jako wodę technologiczną (do czyszczenia lub obsługi urządzeń), czyli zagospodarowują je lokalnie, jednak główny strumień wciąż odprowadzany jest do środowiska. Wydaje się, że w świetle polityki ekologicznej wymagana jest zmiana podejścia do gospodarowania nimi w kierunku bezpośredniego przekazywania, szczególnie do wodochłonnych branż przemysłowych. Przemysł pobierając wodę surową ze środowiska i tak musi ją oczyścić dla swoich wymagań procesowych, natomiast nawet konwencjonalnie oczyszczone ścieki komunalne nierzadko charakteryzują się lepszą jakością od wód naturalnych. W takim przypadku obie strony odnoszą korzyści z tytułu zmniejszonych opłat za korzystanie ze środowiska i przyczyniają się do ochrony lokalnych

zasobów wodnych. Taka symbioza sektora komunalnego i przemysłowego będzie bardzo istotnym aspektem działania oczyszczalni ścieków w przyszłości. Można uznać, że niedługo zwiększy się udział ponownego wykorzystania wody ze ścieków również w innych sektorach. Dla sektora rolniczego niezwykle ważne jest rozporządzenie w sprawie minimalnych wymagań ponownego wykorzystania wody – kraje członkowskie mają wdrożyć te obostrzenia do roku 2023. Idealną wizją przyszłości jest produkcja wody przeznaczonej do spożycia bezpośrednio ze ścieków. Jak się jednak okazuje, zagadnienie to nie jest wcale tylko ideą przyszłości, bowiem od wielu lat w niektórych krajach, zwłaszcza tych o bardzo uszczuplonych zasobach wodnych, z powodzeniem jest to praktykowane, a wskaźnik ponownego wykorzystania ścieków osiąga nawet kilkadziesiąt procent. W takim przypadku kluczowe znaczenie ma edukacja ekologiczna i akceptacja społeczna.

## Literatura:

- Ahmad, O. A., Ayyad, S. M. 2021. Secondary treated wastewater as a concrete component and its impact on the basic strength properties of the material. *Archives of Civil Engineering*, 67(1).
- Angelakis N., Durham B. 2008. Water recycling and reuse in EUREAU countries: Trends and challenges, *Desalination*, Volume 218, Issues 1–3, s. 3–12.
- Asano T., Levine D.A. 1996. Wastewater reclamation, recycling and reuse: past, present and future. *Water Science and Technology*, 33 (10-11), s. 1–14.
- Bixio D., Thoeye C., Koning D., Joksimovic D., Savic D., Wintgens T., Melin T. 2006. Wastewater reuse in Europe, *Desalination*, Volume 187, Issues 1–3, s. 89–101.
- Bożek A., Strońska M., Szyjkowska U. 2011. Oczyszczone ścieki jako alternatywne źródło wody w świetle zmian klimatu w krajach Unii Europejskiej. *Gaz, Woda i Technika Sanitarna*, nr 10, s. 352–354.
- Deklaracja Środowiskowa Emas za rok 2020 dla oczyszczalni ścieków. rcgw.pl. <[https://rcgw.pl/files/tresc/systemy\\_zarzadzania/deklaracja%20%C5%9Brodowiskowa%202020.pdf](https://rcgw.pl/files/tresc/systemy_zarzadzania/deklaracja%20%C5%9Brodowiskowa%202020.pdf)> [dostęp 26.05.2022].
- etychy.org. <https://www.etychy.org/miejsca/park-wodny-tychy> [dostęp 09.03.2022]
- egospodarka.pl <<https://www.egospodarka.pl/42101,Tychy-oczyszczalnia-sciekow-zmodernizowana,1,78,1.html>> [dostęp 17.02.2022].
- geysers.com <<https://geysers.com/water>> [dostęp 18.02.2022].
- Goyal K.P., Conant T.T. 2010. Performance history of The Geysers steam field, California, USA. *Geothermics*, 39(4), s. 321–328.
- Gieleciak Z. Doświadczenia Regionalnego Centrum Gospodarki Wodno-Ściekowej S.A. w Tychach w zakresie Energetycznego wykorzystania biogazu. <[https://www.pkmtychy.pl/home/pkm\\_tychy/pl/user-files/upload/Aktualno%C5%9Bci/Konferencja/07\\_Doswiadczenia\\_RCGWS\\_S.pdf](https://www.pkmtychy.pl/home/pkm_tychy/pl/user-files/upload/Aktualno%C5%9Bci/Konferencja/07_Doswiadczenia_RCGWS_S.pdf)> [dostęp 25.02.2022].
- Gieleciak Z. 2021. Biogaz jako narzędzie do budowy społeczności energetycznych na przykładzie Gminy Tychy. *forum-rozwoju-lokalnego.pl*. <https://forum-rozwoju-lokalnego.pl/uploads/frl/material/file/311/Z.Gieleciak.pdf>. [dostęp 09.03.2022]
- Gieleciak Z. 2017. Recykling ścieków oczyszczonych jako przykład racjonalnego gospodarowania wodą. *Konferencja Perspektywy i wyzwania gospodarki wodnej w świetle nowego prawa wodnego 28.11.2017r.*, Katowice.
- Gromiec M. 2016. Odnowa wody ze ścieków. *Wodociągi i Kanalizacja*, nr 09 (151), s. 20–24.
- Gross D. 2016. Recycling sewage into drinking water is no big deal. They've been doing it in Namibia for 50 years. *theworld.org*. <<https://theworld.org/stories/2016-12-15/recycling-sewage-drinking-water-no-big-deal-theyve-been-doing-it-namibia-50-years>> [dostęp 17.02.2022].
- Haarhoff J., van der Merwe B. 1996. Twenty-five years of wastewater reclamation in Windhoek Namibia. *Water Science Technology*, 23 (10–11), s. 25–35.
- inzynieria.com. <<https://inzynieria.com/wodkan/projekty/62550,orlen-bedzie-wykorzystywac-scieki-oczyszczone>> [dostęp 25.02.2022].
- Karło A., Gieleciak Z. 2019. Symbioza energetyczna oczyszczalni ścieków komunalnych i Wodnego Parku Tychy jako przykład innowacyjnego podejścia do wykorzystania OZE. *Gaz Woda i Technika Sanitarna*, 1, s. 18–21.
- Kehrein P., Loosdrecht M., Osseweijer P., Garfi M., Dewulf J., Posada J. 2020. A critical review of resource recovery from municipal wastewater treatment plants – market supply potentials, technologies and bottlenecks. *Environmental Science: Water Research & Technology*. Issue 4.
- Lahnsteiner J., Lempert G. 2005. Water Management in Windhoek Namibia. *Water Science & Technology*, 55 (1–2), s. 441–448.
- Lahnsteiner J. 2019. Boosting supply security by water reclamation and reuse. *Danube Water Conference*, 20–21 maj 2019.



Leslie J. 2018. Where Water is Scarce, Communities Turn to Reusing Wastewater. e360.yale.edu. <<https://e360.yale.edu/features/instead-of-more-dams-communities-turn-to-reusing-wastewater>> [dostęp 17.02.2022].

Levine A., Asano T. 2004. Recovering sustainable water from wastewater. Environmental Science & Technology, 38(11), s. 201–208.

magazynbiomasa.pl. <<https://magazynbiomasa.pl/biogazownia-oczyszczalni-sciekow-tychy-urbanowice/>> [dostęp 25.02.2022].

Mąkinia J. 2017. Ścieki jako źródło surowców i energii. Nowoczesne polskie rozwiązania w gospodarce wodno-ściekowej, Seminarium NFOŚiGW, Poznań.

mapy google. <<https://www.google.pl/maps>>.

maple.ca <<https://www.maple.ca/projects/vernon-water-reclamation-centre/>> [dostęp: 25.02.2022].

Maryam B., Büyükgüngör H. 2017. Wastewater reclamation and reuse trends in Turkey: Opportunities and challenges. Journal of Water Process Engineering, Volume 30, s. 1–15.

Moyo L. 2012. Wastewater Production, Treatment and Use in Namibia. ais.unwater.org. <[https://www.ais.unwater.org/ais/pluginfile.php/231/mod\\_page/content/188/wastewater\\_production\\_in\\_namibia\\_2012.pdf](https://www.ais.unwater.org/ais/pluginfile.php/231/mod_page/content/188/wastewater_production_in_namibia_2012.pdf)> [dostęp 17.02.2022].

Mudgal S., Van Long L., Saïdi N., Haines E., McNeil D., Jeffrey P., Smith H., Knox J. 2015. Optimising water reuse in the EU. Final report – Part I. Prepared for the European Commission – DG ENV.

Pisani P., Menge J. 2013. Direct potable reclamation in Windhoek: a critical review of the design philosophy of new Gorengab drinking water reclamation plant. Water Science and Technology: Water Supply, 13 (2), s. 214–226.

planet.veolia.com. <<https://www.planet.veolia.com/en/wastewater-recycling-drinking-water-windhoek-namibia>> [dostęp 25.02.2022].

pub.gov.sg <<https://www.pub.gov.sg/watersupply/fournationaltaps/newater>> [dostęp 25.02.2022].

rcgw.pl. <<https://www.rcgw.pl/proces-technologiczny>> [dostęp 17.02.2022].

rcgw.pl <<https://www.rcgw.pl/odnawialne-zrodla-energii>> [dostęp 17.02.2022].

Rozporządzenie 2020/741. Rozporządzenie Parlamentu Europejskiego i Rady (UE) z dnia 25 maja 2020 r. w sprawie minimalnych wymogów dotyczących ponownego wykorzystania wody. Dz. U. UE L177/32 z 5.06.2020.

Tan T. 2018. NEWater in Singapore. <<https://globalwaterforum.org/2018/01/15/newater-in-singapore/>> [dostęp 25.02.2022].

teraz-srodowisko.pl. <<https://www.teraz-srodowisko.pl/aktualnosci/Plock-Orlen-miejskie-scieki-porozumienie-10937.html>> [dostęp 25.02.2022].

wingoc.com.na <<https://www.wingoc.com.na/>> [dostęp 27.02.2022].

wodociagowiec.pl. <<https://wodociagowiec.pl/szczegoly-artykulu/rusza-projekt-blue-bridge/>> [dostęp 25.02.2022].

water-reuse-europe.org. <<https://www.water-reuse-europe.org/the-state-of-the-sector/#page-content>> [dostęp 20.05.2022].

Vagi F., Wittstock E., Percic J., Grappolini G., Ward C. 2006. Petro-Canada re-uses treated Edmonton wastewater. Conference: Alberta's environment conference. Edmonton, AB (Canada), 2-5 maj 2006.

voanews.com. <[https://www.voanews.com/a/east-asia-pacific\\_singapore-turns-sewage-clean-drinkable-water-meeting-vv40-demand/6209374.html](https://www.voanews.com/a/east-asia-pacific_singapore-turns-sewage-clean-drinkable-water-meeting-vv40-demand/6209374.html)> [dostęp 25.02.2022].

## 10. Zakończenie

W ostatnich latach ludzkość uświadomiła sobie, że intensywny rozwój gospodarczy, który jest oparty na liniowym modelu ekonomicznym, aby był zgodny z fundamentalną zasadą zrównoważonego rozwoju, nie może opierać się wyłącznie na niekontrolowanym wykorzystywaniu istniejących zasobów naturalnych oraz narastającym konsumpcjonizmie. Opracowano więc nową koncepcję systemu gospodarczego o obiegu zamkniętym. Jest to efektywny system ekonomiczny, którego ideą jest racjonalizacja wykorzystywania zasobów naturalnych, wytwarzania produktów i minimalizowanie ilości powstających odpadów, które podobnie jak zasoby oraz produkty, powinny pozostawać w użyciu tak długo jak to tylko możliwe. Takie podejście jest podstawą realizacji fundamentalnej zasady zrównoważonego rozwoju. Obecnie obserwowana jest wysoka dynamika wdrażania GOZ w różnych sektorach gospodarki, w tym w sektorze komunalnym.

Podstawowym celem działalności oczyszczalni jest (i zawsze będzie) oczyszczanie ścieków oraz zapobieganie zanieczyszczeniu wód, a w konsekwencji ochrona zdrowia ich użytkowników. Obiekty te postrzegane są w taki sposób od dziesiątków lat. Aktualnie takie podejście ulega przeobrażeniu, a obiekty te zaczynają być postrzegane jako bioenergetyczne zakłady odnowy wody i odzysku surowców. Zmiana klasycznego paradygmatu oczyszczania ścieków jest efektem przekształcenia liniowego systemu gospodarczego w cyrkularny. Celem zatem staje się nie tylko wysokoefektywne oczyszczanie ścieków, lecz także produkcja zasobów. Ścieki komunalne oraz odpady powstające podczas ich oczyszczania są rezerwuarem wielu cennych substratów, zasobów i nieodnawialnych surowców. Mogą być one wykorzystane bezpośrednio w oczyszczalni ścieków do produkcji energii elektrycznej i cieplnej, wodoru, fosforu, azotu, celulozy, bioplastików czy wody o jakości umożliwiającej spożycie przez ludzi.

Modelowa oczyszczalnia ścieków przyszłości może prezentować się jako scentralizowany zakład stanowiący punkt odbioru różnych odpadów i produktów. Z przyjętych od zewnętrznych kontrahentów łatwo biodegradowalnych odpadów można wytworzyć w procesie fermentacji nadwyżki biogazu, który stanowi podstawowy surowiec energetyczny oczyszczalni. Z kolei wdrażając wstępną hydrolizę tych odpadów można uwolnić ich potencjał biometanowy w pełni, dzięki czemu zwiększa się podaż biogazu, a w konsekwencji i energii elektrycznej. W ten sposób staje się zakładem samowystarczalnym energetycznie, a nadmiar wyprodukowanej energii można przekazać do zewnętrznej sieci energetycznej. W tym miejscu warto podkreślić, że energetyczne wykorzystanie darmowego paliwa, jakim jest biogaz, powinno być obligatoryjne, a ilość potrzebnych dokumentów do uzyskania koncesji na wytwarzanie własnej energii – minimalna. Niestety w rzeczywistości jest wręcz odwrotnie, a bezużyteczne spalanie biogazu w pochodni stanowi czyste marnotrawstwo sprzyjające ociepleniu klimatu. Kontynuując, w takim obiekcie ustabilizowane osady powinny zostać poddane dalszej obróbce, mającej na celu odzysk z nich lub z ich wód osadowych cennego fosforu, który następnie może być spożytkowany do produkcji wysoce przyswajalnego nawozu. Optymalnym rozwiązaniem może jednak okazać się wdrożenie monospalania i wysokoefektywnego odzysk fosforu z popiołów. Półprodukty lub gotowy produkt w postaci nawozu mogą być przekazywane do zewnętrznych odbiorców. Ważną składową w osiągnięciu samowystarczalności energetycznej są stosowane

w takim obiekcie nowoczesne i energooszczędne technologie, które zapewnią ponadprzeciętny stopień oczyszczania i odzysk wody o wysokiej jakości. Woda odzyskana ze ścieków może mieć szerokie zastosowanie zarówno w sektorze komunalnym, rolniczym, jak i przemysłowym. Nie jest zatem bezproduktywnie odprowadzana do odbiornika. Jedną z możliwości jest również produkcja wody przeznaczonej do bezpośredniego spożycia, co w okresach suszy pomoże zminimalizować deficyt wody dla odbiorców końcowych. Odbiór odpadów, produkcja surowców i wody zarysowuje kluczowy aspekt funkcjonowania oczyszczalni, a mianowicie symbiozę przemysłową, z której oba sektory czerpią wymierne korzyści. W samej oczyszczalni, w obrębie technologii może dojść do zastąpienia klasycznego, już ponad 100-letniego procesu osadu czynnego i wprowadzeniu nowych, innowacyjnych rozwiązań, takich jak granulowany osad czynny bądź bioreaktory membranowe. W części osadowej oczyszczalni zaimplementowany będzie reaktor deamonifikacji, dzięki któremu wyeliminuje się w bardzo oszczędny sposób związki azotowe ze strumienia ustabilizowanych i odwodnionych osadów. Jednocześnie wprowadzony będzie proces bioaugmentacji bakterii odpowiedzialnych za ten proces do głównego ciągu oczyszczania, poprawiając w ten sposób efektywność pracy mikrofauny bakteryjnej w głównym ciągu technologicznym. Wysoka efektywność i niska energochłonność tych procesów może być zapewniona dzięki zastosowaniu inteligentnych i zaawansowanych systemów regulacji oraz sterowania poszczególnych węzłów technologicznych.

W niniejszej pracy zaprezentowano podstawy nowoczesnych technologii stosowanych w krajowych i zagranicznych komunalnych oczyszczalniach ścieków, które charakteryzują się cechami odpowiadającymi założeniom gospodarki o obiegu zamkniętym. Wdrażanie omówionych rozwiązań powinno stać się głównym celem branży w najbliższych latach. Przedstawiony zakres tematyczny jest bardzo szeroki, co uniemożliwia opisanie w sposób wyczerpujący wszystkich zagadnień wpisujących się w tematykę pracy. Nie omówiono zagadnień związanych z metodami intensyfikacji produkcji biogazu i wodoru (który uważany jest za paliwo przyszłości), wytwarzaniem energii elektrycznej bezpośrednio ze ścieków, odzyskiem celulozy i metali, stosowaniem niekonwencjonalnych procesów oczyszczania ścieków (takich jak denitryfikacja autotroficzna) bądź zaimplementowaniem inteligentnych i zaawansowanych systemów automatycznych regulacji oraz sterowania procesami technologicznymi. W tym zakresie możliwe jest wydanie kontynuacji niniejszej pracy w kolejnych latach.

Podsumowując, warto również wspomnieć, że w pierwszym kwartale 2021 r. rozpoczęto realizację projektu pod nazwą „Oczyszczalnia Przyszłości” zorganizowanego przez Narodowe Centrum Badań i Rozwoju, którego finalnym produktem ma być obiekt w pełnej skali technicznej o właściwościach, które niejednokrotnie formułowano w tej pracy. Zakończenie projektu może oznaczać przełom i sprawi, że opisywane koncepcje staną się rzeczywistością.



**IOŚ-PIB**  
Instytut Ochrony Środowiska  
Państwowy Instytut Badawczy

