

Potencjalne możliwości recyklingu organicznego w oczyszczalni ścieków, w świetle gospodarki cyrkularnej

Potential Opportunities for Organic Recycling in a Wastewater Treatment Plant in the Assumptions of Circular Economy

Alina Dereszewska, Stanisław Cytawa^{*)}

Słowa kluczowe: *obieg biogenów, oczyszczalnia ścieków, energia z odpadów, nawóz*

Streszczenie

W pracy scharakteryzowano obieg fosforu, azotu i węgla organicznego w biologicznej oczyszczalni ścieków, posiadającej komorę fermentacyjną oraz kompostownię. Oszacowano ilość biogenów jaką można hipotetycznie odzyskać w oczyszczalni ścieków o obciążeniu 70 tys. RLM. Technologie stosowane w oczyszczalni umożliwiają przetwarzanie odpadów organicznych i odzysk cennych dla gleby pierwiastków (fosfor, azot i węgiel organiczny) oraz energii. Wytwarzanie biogazu, przy maksymalnym wykorzystaniu odpadów organicznych generowanych przez mieszkańców, pozwala rocznie na odzysk 1126 Mg węgla organicznego i wygenerowanie ok. 12,6 GWh energii. Najbardziej racjonalną formą recyklingu organicznego odpadów jest wytwarzanie kompostu o parametrach nawozowych. Oszacowano, że produkcja nawozu umożliwi odzysk 30% węgla, 98% fosforu oraz 18% azotu ze strumieni tych pierwiastków wprowadzanych do oczyszczalni. W celu uzyskania kompostu o dobrych parametrach nawozowych niezbędne jest wdrożenie w regionie segregacji odpadów u źródła ich wytwarzania. Bardzo ważna jest również redukcja ilości koagulantów żelazowych, stosowanych w procesie oczyszczania ścieków do strącania związków fosforu, ze względu na to, że wzbogacają kompost w nieprzyswajalne formy fosforu w postaci fosforanu(V) żelaza(III). Z tego względu przedstawiono możliwość częściowego zastąpienia ich odpadową solą magnezu, co prowadzi do strącania dobrze przyswajalnego przez rośliny fosforanu magnezowo amonowego (struwitu). W pracy przedstawiono, w postaci schematu, cykl obiegu węgla, azotu i fosforu w oczyszczalni oraz opracowano arkusz kalkulacyjny, pozwalający na oszacowanie stopnia odzysku biogenów w kompoście, umożliwiającą określenie produkcji wytwarzanej energii przez ilościowy dobór odpadów organicznych do fermentacji. Przedstawiono również zalety prowadzenia w oczyszczalni procesu oczyszczania ścieków, wspólnie z gospodarką odpadami organicznymi.

Keywords: *nutrient cycle, wastewater treatment plant, energy from waste, fertilizer*

Abstract

The paper characterizes the circulation of phosphorus, nitrogen and organic carbon in a biological wastewater treatment plant (WWTP) with a digester and composting facility. The amount of nutrients that can be hypothetically recovered in a WWTP with a load of 70 000 P.E. was estimated. Technologies used in the treatment plant allow to process organic waste and recover valuable elements for the soil (phosphorus, nitrogen and organic carbon) and energy. The production of biogas, with the maximum use of organic waste generated by residents, allows the recovery of 1126 Mg of organic carbon annually and the generation of about 12.6 GWh of energy. The most rational form of organic waste recycling is the production of compost with fertilizer parameters. It has been estimated that the production of fertilizer makes it possible to recover 30% of carbon, 98% of phosphorus, and 18% of nitrogen from the streams of these elements entering the WWTP. In order to obtain compost with good fertilizing parameters, it is necessary to implement waste segregation at the source of its production. It is also very important to reduce the amount of ferric coagulants used in the wastewater treatment process to precipitate phosphorus compounds, due to the fact that they enrich the compost in the form of iron(V) phosphate(III), which is an unavailable form of phosphorus. Therefore, the possibility of their partial replacement by waste magnesium salt is presented, which leads to the precipitation of magnesium ammonium phosphate (struvite) well available by plants. The paper presents, in the form of a diagram, the cycle of the carbon, nitrogen and phosphorus cycles in the WWTP and develops a spreadsheet to estimate the extent of nutrient recovery in the compost, allowing the production of energy to be determined by quantitative selection of organic waste for fermentation. The advantages of running the wastewater treatment process together with organic waste management in the plant are also presented.

1. Wstęp

Gospodarka o obiegu zamkniętym (CE) ma za zadanie przekształcać odpady w zasoby, które można ponownie użytkować lub wprowadzić do procesu produkcyjnego. Rozwiązania z obszaru gospodarki o obiegu zamkniętym prowadzą również do minimalizacji negatywnego wpływu

wytwarzanych produktów na środowisko. Istnieją silne powiązania między celami rozwojowymi sektora gospodarki ściekowej a koncepcją gospodarki o obiegu zamkniętym. Dotyczą one głównie zrównoważonego rozwoju, oszczędzania zasobów i energii, przetwarzania biomasy, a także zapobiegania postępującej eutrofizacji wód. Ścieki można uznać

^{*)} Alina Dereszewska, dr inż., Department of Industrial Products Quality and Chemistry, Faculty of Management and Quality Science, Gdynia Maritime University, Morska Street 87, Gdynia 81-225, Poland, e-mail: a.dereszewska@wzjn.umg.edu.pl, Stanisław Cytawa, dr, Water and Wastewater Company 'Swarzewo', 84 Władysławowska Street, Swarzewo 84-100, Poland, e-mail: scytawa@wp.pl

za cenne zasoby niekonwencjonalne, zawierające składniki odżywcze, takie jak: azot, fosfor i węgiel organiczny. Wdrożenie gospodarki o obiegu zamkniętym w oczyszczalniach ścieków, może doprowadzić do odzyskiwania biogenów i wytwarzania zielonej energii. Odzyskiwanie składników ze ścieków i odpadów, w celu ich ponownego wykorzystania, niesie korzyści zarówno gospodarcze jak i środowiskowe.

W opracowaniu Ellen MacArthur Foundation przedstawiono, w graficznej prezentacji, koncepcję gospodarki o obiegu zamkniętym, w której rozróżnia się zasoby techniczne, które można poddać recyklingowi w zamkniętych pętlach oraz zasoby biologiczne, które można poddać recyklingowi w biosferze (Ellen MacArthur Foundation, 2015). Cykl biologiczny koncentruje się m.in. na zawracaniu składników odżywczych do biosfery poprzez kompostowanie lub fermentację beztlenową, prowadzącą do wytwarzania biogazu. Bardzo ważną rolę w tym cyklu odgrywa prawidłowy obieg składników odżywczych. W przeciwnym razie, w pobliżu źródła biomasy mogą powstać niedobory, a nadwyżki składników odżywczych mogą wystąpić w ekosystemach, w których biomasa jest wykorzystywana lub konsumowana. Niedobory składników odżywczych zmniejszają żyzność gleby i utrudniają zdrowy wzrost roślin, natomiast nadwyżki składników pokarmowych powodują problemy środowiskowe w wyniku emisji do atmosfery lub uwalniania do wód gruntowych i powierzchniowych (np. proces eutrofizacji). Brak cykliczności obiegu fosforu jest związany z ograniczonymi zasobami skał fosforanowych. Ten surowiec uznany został przez Komisję Europejską za krytyczny, ze względu na duże znaczenie gospodarcze i wysokie ryzyko zaopatrzenia (COM, 2017). Równie ważny jest prawidłowy obieg azotu i zrównoważona gospodarka, oparta o zredukowanie wysokoenergetycznych procesów w jego obiegu. Obecnie gospodarka azotem nie jest racjonalna pod względem energetycznym. Biologiczna mineralizacja związków amonowych w oczyszczalni ścieków wpisuje się w cykl obiegu azotu, którego finalnym produktem jest emisja gazowego azotu do atmosfery. Towarzyszy temu znaczny nakład energii, podobnie jak w syntezie nawozów azotowych, do której niezbędny jest odwrotny proces – poboru azotu z atmosfery. Poszukując dróg odzysku azotu ze ścieków i odcieków pofermentacyjnych można ograniczyć zużycie energii ze znaczną korzyścią dla środowiska. Ponadto, uwalnianie reaktywnego azotu do środowiska wpływa na pogorszenie jakości wody i powietrza oraz niekorzystny bilans gazów cieplarnianych (Sutton i in., 2011). Tym samym wpływa niekorzystnie na ekosystemy i różnorodność biologiczną oraz jakość gleby. Najpowszechniej występujący pierwiastek biogeniczny – węgiel, charakteryzuje znaczna dostępność w związkach organicznych. Należy jednak zwrócić uwagę, że bardzo ważne jest aby związki węgla organicznego powracały do gleby w formie, która ją wzbogaca i poprawia strukturę (Kuś, 2015).

Materia organiczna, która potencjalnie może zostać przetwarzana w oczyszczalni ścieków, a w świetle gospodarki cyrkularnej powinna podlegać recyklingowi organicznemu, jest przetwarzana w trzech głównych strumieniach odpadowych:

- a) materia organiczna stanowiąca pierwotnie pokarm, a po procesie trawienia trafiająca do ścieków,
- b) odpady kuchenne (z grupy odpadów komunalnych),
- c) trafiające do śmieci odpady z terenów zielonych; odpady roślinne stanowiące margines produkcji rolniczej.

Wśród nich największe znaczenie, a najsłabiej rozwinięty system segregacji, mają biodegradowalne odpady organiczne, generowane w gospodarstwach domowych. Stanowią one 30-40% wszystkich odpadów komunalnych i tylko w niewielkim stopniu są segregowane 'u źródła' i przetwarzane z odzyskiem materii do gleby. W latach 2017-2021 ilość selektywnie zebranych bioodpadów kuchennych w skali kraju utrzymywała się na bardzo niskim 7-12% poziomie (Ochrona środowiska 2021) Oprócz zmniejszenia ilości odpadów kierowanych na składowisko, sprawnie działająca selektywna zbiórka odpadów przyczynia się również do odzysku surowców wtórnych oraz ograniczenia kosztów transportu.

Strumień odpadów kuchennych, w znacznym stopniu trafiający do odpadów zmieszanych, w połączeniu ze strumieniem ściekowym,

stanowi niewykorzystane źródło materii organicznej. Wzrost stopnia recyklingu organicznych odpadów biodegradowalnych, zwłaszcza odpadów kuchennych, można zapewnić poprzez zrównoważoną regionalną gospodarkę odpadami, wykorzystującą do ich utylizacji zaplecze technologiczne oczyszczalni ścieków komunalnych (OŚK). Technologie stosowane w oczyszczalniach, w tym fermentacja oraz kompostowanie, umożliwiają przetwarzanie odpadów organicznych i odzysk cennych dla gleby pierwiastków (fosfor, azot węgiel organiczny) oraz energii. W Polsce przeważają gleby piaszczyste, mało zasobne w próchnicę (Kuś, 2015). Recykling materii organicznej jest możliwy poprzez produkcję w oczyszczalni ścieków nawozu organicznego, z przekompostowanych mieszanin osadów i odpadów roślinnych. Aplikacja takiego nawozu poprawia strukturę gleby i wzbogaca ją w pierwiastki biogeniczne. Bezwzględny warunkiem recyklingu organicznego jest segregacja odpadów u źródła wytwarzania oraz odpowiedni standard jakościowy osadów. Skuteczne kompostowanie lub fermentacja bioodpadów wymaga oddzielnego ich zbierania, w celu wyeliminowania obecności w nich tworzyw sztucznych lub innych zanieczyszczeń, które mogłyby wpłynąć na jakość i bezpieczeństwo powstałego kompostu lub osadu pofermentacyjnego. Należy mieć również na uwadze, możliwość zanieczyszczenia przetwarzanego w OŚK osadu substancjami toksycznymi (np. farmaceutykami lub metalami ciężkimi). Dużą rolę w utrzymaniu odpowiednich standardów odgrywa stałe edukowanie mieszkańców, w celu promocji zachowań proekologicznych. Natomiast w oczyszczalni ścieków każda porcja odpadów dowożonych do kompostowni lub do komór fermentacyjnych powinna być badana pod względem jednorodności i czystości. W wypadku braku dostatecznej czystości segregacji stałych odpadów organicznych, pochodzących od mieszkańców, oczyszczalnia musi zrezygnować z przetwarzania strumienia kuchennych odpadów ulegających biodegradacji. Powoduje to spadek osiągniętych wskaźników redukcji materii organicznej w regionie.

Przy realizacji celów gospodarki cyrkularnej bardzo ważną rolę odgrywa prawidłowy obieg pierwiastków biogenicznych. W OŚK coraz częściej wdrażane są technologie umożliwiające odzysk fosforu. Jedną z metod, która pozwala odzyskać zarówno fosfor jak i azot, jest strącanie fosforanu(V) amonowo – magnezowego (struwitu) z odcieków pofermentacyjnych (Egle i in., 2016). Ze względu na zawartość dwóch składników biogenicznych oraz powolne uwalnianie do gleby, wytrącone kryształy mają bardzo pożądane właściwości nawozowe. Ponadto, obecność magnezu sprawia, że struwit jest bardzo użyteczny dla wielu roślin uprawnych (Rahman i in., 2014).

Celem pracy jest stworzenie modelu pozwalającego na oszacowanie stopnia odzysku biogenów, w oczyszczalni ścieków prowadzącej kofermentację osadu nadmiernego z odpadami organicznymi oraz kompostowanie. Przedstawiono w postaci schematu cykl obiegu węgla, azotu i fosforu w oczyszczalni. Określono jaką ilość materii organicznej bogatej w biogeny można zawrócić do środowiska w postaci nawozu organicznego. Wykazano w jakim stopniu wykorzystanie w procesie fermentacji odpadów kuchennych, pozyskanych od mieszkańców w systemie segregacji 'u źródła', zwiększy odzysk biogenów i produkcję energii w OŚK. Przedstawiono potencjalne możliwości wzbogacenia wytwarzanego nawozu w dobrze przyswajalne przez rośliny formy azotu i fosforu, poprzez zastosowanie procesu strącania struwitu z odcieków pofermentacyjnych. Zanalizowano korzyści wynikające z częściowego zastąpienia koagulantu żelazowego, stosowanego w biologicznych oczyszczalniach ścieków do strącania fosforu, odpadowym chlorkiem magnezu.

2. Metodyka

Modelowa oczyszczalnia ścieków

Za wzór modelowej oczyszczalni ścieków komunalnych (OŚK) posłużyła technologia stosowana w oczyszczalni 'Swarzewo'. Do oczyszczalni dopływają ścieki, pochodzące z miast Puck i Władysławowo oraz z wiosek położonych w gminie Puck, w ilości 2.500.000

m3/rok. Średnia roczna liczba mieszkańców obsługiwanych przez oczyszczalnię 'Swarzewo' wynosi 68 tys. osób. Liczba ta uwzględnia zarówno stałych mieszkańców jak i osoby przebywające w rejonie w okresach wzmożonej turystyki. Ciąg procesów technologicznych w części oczyszczającej ścieki oraz części związanej z obróbką osadu i odpadów organicznych przedstawia się następująco:

- **część mechaniczna** – ścieki surowe (strumień 1) poddane są oczyszczaniu wstępnemu w części mechanicznej oczyszczalni, z której osad wstępny (strumień 2) przesyłany jest do produkcji biogazu w zamkniętych komorach fermentacyjnych.
- **część biologiczna** – ścieki po podczyszczeniu mechanicznym (strumień 11) wpływają do reaktorów biologicznych typu SBR wzbogaconych w osadniki wtórne, w których następuje rozkład biologiczny związków organicznych z produkcją osadu nadmiernego (strumień 13), który kierowany jest do komory fermentacyjnej. W reaktorach następuje również symultaniczne strącanie związków fosforu koagulantem żelazowym. Z tego względu osad nadmierny opuszczający część biologiczną zawiera trudno rozpuszczalny fosforan(V) żelaza(III).
- **zamknięte komory fermentacyjne (ZKF)** – przyjmują do przetworzenia następujące odpady: osad wstępny (strumień 2), osad nadmierny (strumień 13), osady z innych oczyszczalni ścieków oraz odpady powstałe z podczyszczenia ścieków w lokalnych zakładach przemysłu spożywczego (strumień 3). Wydzielony z komór fermentacyjnych biogaz (strumień 16) spalany jest w agregatach kogeneracyjnych produkujących energię elektryczną (z średnią wydajnością 2,7 kWh/m³ biogazu) i ciepłą (z średnią wydajnością 3 kWh/m³ biogazu)
- **kompostownia** – przyjmuje osad pofermentacyjny pochodzący z zamkniętych komór fermentacyjnych (strumień 5), odwodniony mechanicznie do wartości 20 % suchej masy (strumień 7) oraz organiczne odpady stałe w postaci słomy, gałęzi i liści (strumień 4). Kompostownia produkuje w pryzmach termicznych nawóz organiczny (strumień 9). Odcieki z ZKF (strumień 6), pochodzące bezpośrednio ze stacji odwadniania osadu pofermentacyjnego, oczyszczane są w ciągu głównym części biologicznej oczyszczalni ścieków.

W opracowaniu schematu modelowej oczyszczalni uwzględniono również współczesne rozwiązania, nie występujące w ciągu technologicznym oczyszczalni 'Swarzewo', umożliwiające odzysk z odcieków pofermentacyjnych fosforu i azotu w postaci struwitu (strumień 10). Oszacowano również jak wpłynie na poszczególne strumienie obiegu

biogenów (oraz na ilość wytwarzanego biogazu) wzbogacenie odpadami kuchennymi grupy odpadów organicznych przetwarzanych w procesie fermentacji metanowej (strumień 3).

Obieg pierwiastków biogenicznych w biologicznej oczyszczalni ścieków

Przeprowadzono analizę danych związanych z obiegiem związków biogenicznych (azot, fosfor, węgiel organiczny) w biologicznej oczyszczalni ścieków 'Swarzewo' w latach 2017-2020. Arkusz kalkulacyjny, bilansujący obieg biogenów w oczyszczalni, utworzono na podstawie danych pozyskanych z pomiarów dokonywanych w 13 punktach oczyszczalni, uzupełnionych o dane literaturowe.

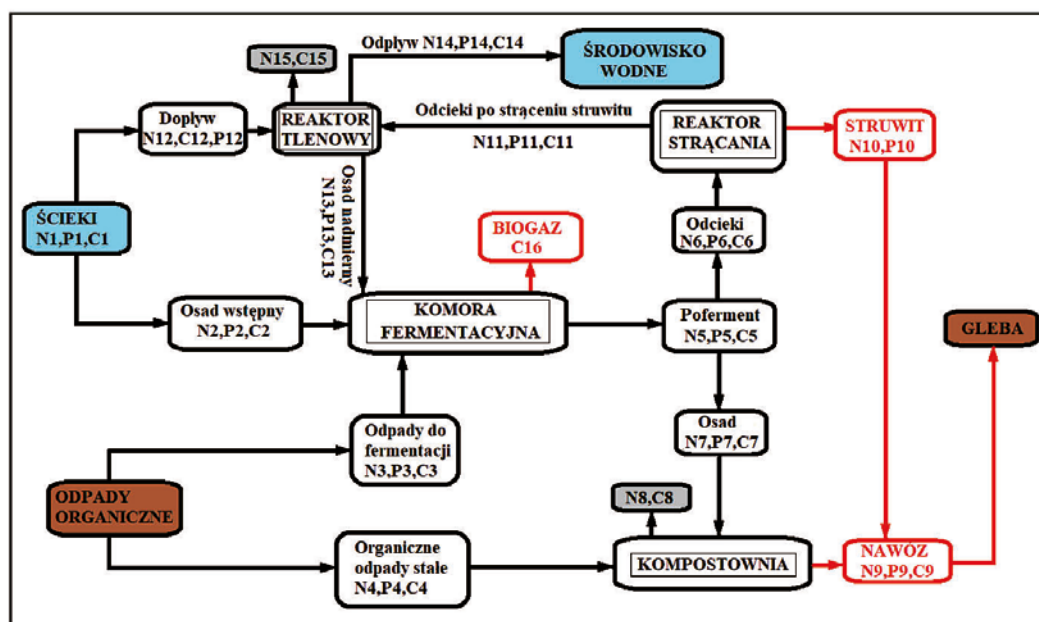
Analiza strumieni masowych występujących w oczyszczalni obejmowała następujące parametry: przepływy ilościowe, sucha masa całkowita (s.m.), lotne substancje organiczne (s.m.o.) sucha masa mineralna (s.m.m.), fosfor ogólny (Pog), azot ogólny (Nog), węgiel organiczny (OWO), zawartość metanu (CH₄) i dwutlenku węgla (CO₂) w biogazie.

3. Wyniki

Obieg pierwiastków biogenicznych

Na podstawie zebranych danych pomiarowych oraz kolejności procesów przetwarzania ścieków i odpadów w oczyszczalni 'Swarzewo', sporządzono schemat obiegu pierwiastków biogenicznych dla modelowej OŚK. Schemat przedstawiono na rys. 1.

Analiza potencjalnej ilości organicznych odpadów stałych generowanych przez mieszkańców aglomeracji Puck i Władysławowo oraz technologicznych możliwości ich przetwarzania, była podstawą obliczenia ilości biodegradowalnej materii organicznej jaką można utylizować w OŚK 'Swarzewo', z jednoczesnym odzyskiem biogazu i produkcją kompostu. Szacunkowo przyjmuje się, że ilość odpadów biodegradowalnych wytwarzanych przez 1 osobę w ciągu roku wynosi 87 kg/rok, ale skuteczność zbiórki wynosi zaledwie od 35% (dla zbiorowej zabudowy) do 65% (dla zabudowy jednorodzinnej) (den Boer i in., 2022). Założono, że modelowa OŚK obsługuje 70.000 mieszkańców oraz przetwarza dostarczone z zewnątrz odpady organiczne, w tym osady ściekowe innych oczyszczalni, słomę, tłuszcze oraz odpady komunalne, w tym odpady kuchenne, pozyskane w systemie szczegółowej segregacji. Przyjęto, że w oczyszczalni, w procesach kofermentacji z osadem czynnym oraz kompostowania, rocznie może być przetwarzane, ze względu na skuteczność zbiórki 5000 Mg odpadów kuchennych generowanych w regionie.



Rys.1. Schemat obiegu pierwiastków biogenicznych w oczyszczalni ścieków
Fig. 1. Diagram of the circulation of biogenic elements in a wastewater treatment plant

Tabela 1. Parametry ścieków, odpadów organicznych i biogazu na poszczególnych etapach ciągu technologicznego oczyszczalni ścieków.
Table 1. Parameters of wastewater, organic waste and biogas at different stages of the wastewater treatment plant process line.

| Parametr | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 |
|------------------------------------------------|----------------------------------|----------------------------------|----------------------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|----------------------------|-------|
| Jednostka | [mg/dm ³] lub [%] | [mg/dm ³] lub [%] | [mg/dm ³] lub [%] | [mg/dm ³] | [mg/dm ³] | [mg/dm ³] | [Mg] lub [m ³] | [%] |
| 1. ścieki surowe | 113 | 16,7 | 391 | 1172 | 380 | 885,4 | 2500000 | 100,0 |
| 2. osad wstępny | | 1,7 | | | | | 42750 | 98,0 |
| 3. suma dwożonych odpadów do fermentacji | | | | | | | 8345 | |
| osad z innych oczyszczalni - dwożony | 8,6 | 2,1 | 40 | | | | 4864 | 83,0 |
| tluszcz stały [%] | 1 | 0,5 | 60 | | | | 3481 | 60,0 |
| odpady kuchenne i rolnicze do fermentacji | 1,5 | 1,0 | 35 | | | | 0 | 70,0 |
| suma odpadów do fermentacji (2+3+13) | | | | | | | 76229 | 94,5 |
| 4. Odpady do kompostowania (słoma, gałęzie) | 1 | 0,2 | 42 | | | | 1235 | 15,0 |
| 5. Poferment (osad+odcieki) | | | | | | | 74479 | 98,5 |
| poferment wyliczony z ubytku biogazu | | | | | | | 163665 | 98,5 |
| 6. Odcieki z fermentacji | | | | | | | 64191 | 99,5 |
| 7. Osad pofermentacyjny | | | | | | | 10288 | 79,0 |
| osad pofermentacyjny liczony ze stężenia | 8,2 | 3,1 | | | | | | |
| 8. Ubytki do atmosfery z kompostowni | | | | | | | | |
| 9. Nawóz wytworzony | 2,1 | 2,2 | | | | | 5761 | 54,0 |
| kompost surowy (1 przyzma) | | | | | | | 11522 | 72,1 |
| 10. struwit | | | | | | | 0 | |
| 11. odcieki po strącaniu struwitu | | | | | | | | |
| 12. ścieki po osadnikach wstępnych | | | | | | | | |
| 13. osad nadmierny | 8 | 2,3 | 16074 | 48221 | | | 25134 | 95,5 |
| 14. odpływ z oczyszczalni | 10 | 0,5 | 15 | 45 | 10 | | 2500000 | |
| 15. Ubytki do atmosfery z oczyszczania ścieków | | | | | | | | |
| 16. Biogaz | | | | | | | 1503318 | |
| biogaz prognozy | | | | | | | 1503318 | |
| biogaz liczony z liczników | | | | | | | 1501984 | |
| gęstość biogazu g/dm ³ | | | | | | | | |
| SUMA kontrola bilansów | | | | | | | | |

Szczegółowe obliczenia masowe przepływu węgla, fosforu i azotu wykonane na podstawie danych zarejestrowanych w oczyszczalni 'Swarzewo' w roku 2021 przedstawiono w tab.1. W celu określenia zawartości biogenów w ściekach i biomacie na poszczególnych etapach ciągu technologicznego (strumienie N,P,C, 1-16) został opracowany arkusz kalkulacyjny w programie Excel. Kolorami zaznaczono komórki zawierające dane wyjściowe, które pochodzą z: pomiarów prowadzonych w OŚK Swarzewo; standaryzowanego laboratorium do którego Oczyszczalnia wysyła próby 2 razy w miesiącu; dane zaczerpnięte z literatury (np. skład pierwiastkowy odpadów roślinnych) (pozycje literaturowe 2, 8, 10-12, 14, 18, 19, 21). Komórki białe zawierają wartości, które są wynikiem obliczeń matematycznych.

Parametry, których nie można było zmierzyć (np. emisje pierwiastków do atmosfery w części biologicznej i kompostowni) oszacowano z bilansu materiałowego strumieni. Dane dotyczące strącania w postaci struwitu 80-90% fosforu zawartego w odciekach pochodzą z wcześniejszych badań laboratoryjnych i modelowych prowadzonych w OŚK Swarzewo (Dereszewska, Cytawa, 2021) Wyniki te potwierdzone są również licznymi doniesieniami literaturowymi (Egle i in. 2016, Kozik i in. 2014).

Ubytek substancji organicznej odpadów organicznych poddawanych fermentacji (kolumna 18) obliczono z przyrostu biogazu notowanego po wprowadzeniu go do ZKF lub komory modelowej. Wyniki posłużyły do wyliczenia wskaźnika przyrostu biogazu powiązanego z konkretnym odpadem (kolumna 16).

Tabela 1 przedstawia wyniki dla modelowej oczyszczalni ścieków wygenerowane w arkuszu kalkulacyjnym przy założeniu, że nie są ko-fermentowane odpady kuchenne i nie jest strącany struwit. Odzwierciedlają one również dane uzyskane przez oczyszczalnię 'Swarzewo' w roku 2021.

Masy biogenów wychodzące z OŚK (przedstawione na rys. 1 strumieniami o cyfrach 8,9,14,15 i 17) obliczone dla mas wsadowych (strumienie 1,3,4), przy uwzględnieniu różnych ilości pozyskanych do fermentacji odpadów kuchennych, zestawiono w tab. 2.

W tab.2 przedstawiono również, jak duży jest odzysk materii organicznej w obiegu zamkniętym, uzyskiwany przez wytwarzanie certyfikowanego nawozu oraz produkcję biogazu, stanowiącego źródło zielonej energii. Wyniki uzyskane dla parametrów uzyskiwanych w OŚK Swarzewo w roku 2021 zestawiono w części A tab. 2. Nie uwzględniają one ko-fermentacji odpadów kuchennych ani strącania struwitu, gdyż takie procesy nie są obecnie stosowane w linii technologicznej tej oczyszczalni. Potencjał biogazowy odpadów, nie przetwarzanych w Oczyszczalni Swarzewo, sprawdzono w modelu komory fermentacyjnej (Dereszewska i Cytawa, 2019). Wykorzystując arkusz kalkulacyjny, bazujący na wynikach analiz laboratoryjnych i bezpośrednich pomiarach z obiektu (tab.1), obliczono masę biogenów, jaką można uzyskać w poszczególnych strumieniach, zwiększając masę fermentowanych odpadów o 5000 Mg (1500 Mg s.m.) odpadów kuchennych oraz wytrącając solami magnezowymi struwit. Prognozowane masy biogenów dla w/w strumieni przedstawiono w części B tab.2.

Wytwarzanie biogazu, przy maksymalnym wykorzystaniu odpadów organicznych generowanych przez mieszkańców, pozwala rocznie na odzysk ok 1126,7 Mg węgla organicznego. Uzyskane w tym procesie 2.103.182 [m³] biogazu (tab 2B) pozwala na wygenerowanie ok. 12,6 GWh energii (łącznie – ciepłej i elektrycznej). Obecnie, 1.503.182 m³ biogazu wytwarzane w OŚK 'Swarzewo' zapewnia samowystarczalność energetyczną Oczyszczalni oraz pozwala na sprzedaż 665 MWh energii elektrycznej do sieci.

| 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 | 16 | 17 | 18 |
|-------|------|--------|---------|-----------|-----------|-------|----------------------|-------------------|------------|
| N | P | C | s.m. | s.m.o. | s.m.m. | s.m.m | X | Y | Z |
| [Mg] | [Mg] | [Mg] | Mg s.m. | Mg s.m.o. | Mg s.m.m. | [%] | [m ³ /Mg] | [m ³] | [Mg s.m.o] |
| 282,5 | 41,8 | 976,7 | 3164 | 2657 | 506 | 16 | | | |
| 59,9 | 14,5 | 401,9 | 855 | 727 | 128 | 15 | 400 | 342000 | 398 |
| 85,0 | 24,3 | 1166,2 | 2219 | 2063 | 156 | 7 | | | |
| 71,1 | 17,4 | 330,8 | 827 | 678 | 149 | 18 | 230 | 190182 | 221 |
| 13,9 | 7,0 | 835,4 | 1392 | 1385 | 7 | 0,5 | 535 | 744934 | 867 |
| 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0 | 0 | 0 | 10 | 400 | 0 | 0 |
| 235,4 | 64,9 | 1972,0 | 4205 | 3650 | 555 | 13,2 | | | |
| 10,5 | 2,1 | 440,7 | 1049 | 995 | 55 | 5,2 | | | |
| 235 | 65 | 1167,4 | 2455 | 1448 | 555 | | | | |
| | | | 2455 | | | | | | |
| 58,8 | 13,0 | 58,4 | 295 | 23 | 23 | | | | |
| 176,5 | 51,9 | 1108,3 | 2160 | 1426 | 735 | 34,4 | | | |
| 177,2 | 67,0 | 1108,3 | | | | | | | |
| 131,4 | 0,0 | 807,0 | | | | | | | |
| 55,7 | 67,0 | 742,0 | 2650 | 1458 | 1193 | 45 | | | |
| 187,0 | 67,0 | 1549,1 | 3210 | 2017 | 1193 | 37,2 | | | |
| 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | | | | | | |
| 58,8 | 13,0 | 58,4 | | | | | | | |
| 222,7 | 27,2 | 574,8 | 2309 | 1931 | 378 | | | | |
| 90,5 | 26,0 | 404,0 | 1131 | 860 | 271 | 24 | 200 | 226201 | 263 |
| 25,0 | 1,3 | 37,5 | | 25 | | | | | |
| 166,0 | 0,0 | 191,7 | | 189 | | | | | |
| 0,0 | | 805,3 | | | | | | | |
| 0,0 | | 805,3 | | | | | | | 1750 |
| 0,0 | | 804,6 | | | | | | | |
| | | | | | | | | | 1164 |
| 0,0 | 0,0 | 0,0 | | | | | | | |

z literatury

dane z OŚK Swarzewo

laboratorium zewnętrzne

X – prognozowana ilość biogazu;

Y – ilość biogazu rzeczywista;

Z – ubytek związków organicznych
liczony z produkcji biogazu

X – projected amount of biogas;

Y – actual amount of biogas;

Z – loss of organic compounds
calculated from biogas production.

| Wsad odpadów kuchennych 0 Mg | | | | | | | | | | | |
|---------------------------------|-------|--------|-------|--------|-------|----------|----------------|-------|----------|-----------------------------|--|
| WEJŚCIE | | | | | | WYJŚCIE | | | | | |
| strumień | 1 | 3 | 4 | sum | 8 | 9 | 14 | 15 | 17 | sum | |
| | | | | | | (nawóz) | | | (biogaz) | | |
| N | 282,5 | 85 | 10,5 | 378 | 131,4 | 55,7 | 25 | 166 | 0 | 378 | |
| P | 41,8 | 24,3 | 2,2 | 68,3 | 0 | 67 | 1,3 | 0 | 0 | 68,3 | |
| C | 976,7 | 1166,2 | 440,6 | 2583,5 | 807 | 742 | 37,5 | 191,9 | 805,3 | 2583,5 | |
| Odzysk nawozu rolniczego [Mg] | | | | | | 5779[Mg] | Odzysk biogazu | | | 1.503.182 [m ³] | |
| Wsad odpadów kuchennych 5000 Mg | | | | | | | | | | | |
| WEJŚCIE | | | | | | WYJŚCIE | | | | | |
| strumień | 1 | 3 | 4 | sum | 8 | 9 | 14 | 15 | 17 | sum | |
| | | | | | | (nawóz) | | | (biogaz) | | |
| N | 282,5 | 107,5 | 13,9 | 403,9 | 139,3 | 73,8 | 25 | 165,8 | 0 | 403,9 | |
| P | 41,8 | 39,3 | 2,8 | 83,9 | 0 | 82,6 | 1,3 | 0 | 0 | 83,9 | |
| C | 976,7 | 1691,2 | 584,5 | 3252,4 | 886 | 984,2 | 37,5 | 217,8 | 1126,7 | 3252,4 | |
| Odzysk nawozu rolniczego [Mg] | | | | | | 7640 | Odzysk biogazu | | | 2.103.182 [m ³] | |

Tabela.2. Masy biogenów wprowadzane i wychodzące z oczyszczalni ścieków komunalnych [Mg]

Tabela.2. Nutrient masses entering and leaving municipal wastewater treatment plants [Mg]

4. Dyskusja wyników

Dane w tab.2 wskazują na znaczącą rolę wsadu z odpadów organicznych na wielkość produkcji biogazu. Analizując uzyskane wyniki można wnioskować, że użycie odpadów kuchennych w procesie ko-fermentacji zwiększy roczną produkcję biogazu o około 120 m³ z każdego Mg takich odpadów (400 m³ z 1 Mg suchej masy). W Polsce w 2020 r. wygenerowano 13,1 mln Mg odpadów komunalnych, wśród których ok. 30 % stanowiły odpady kuchenne (Ochrona środowiska 2021, Uchwała nr 88, 2016). Odpady kuchenne stanowią darmowe, bogate w substancje biodegradowalne źródło energii. Selektywne ich wyodrębnienie i poddanie ko-fermentacji pozwala, hipotetycznie, uzyskać 470 mln m³ biogazu, czyli 1270 GWh energii elektrycznej w skali kraju. Ze względu na zakaz składowania odpadów, których kaloryczność przekracza 6 MJ/kg, odpady kuchenne stanowią frakcję, dla której gminy muszą znaleźć alternatywne metody utylizacji. Wykorzystanie do ich utylizacji zaplecza technologicznego oczyszczalni ścieków zwiększyłoby osiągnięty w gminie poziom recyklingu, przy równoczesnym zysku w formie produkcji energii i przydatnego nawozu. Należy jednak mieć na uwadze, że wykorzystanie dużej ilości odpadów organicznych pociąga za sobą konieczność wprowadzenia zmian w linii technologicznej oczyszczalni. Niezbędne jest wstępne przygotowanie odpadów (np. maceracja) oraz wskazane wprowadzenie odrębnej linii do produkcji pulpy organicznej z odpadów. Alternatywą jest budowa biogazowni i kompostowni jako oddzielnych instalacji, niezależnych od oczyszczalni. Umieszczenie ich na terenie OŚK byłoby korzystnym, m. in. ze względu na możliwość wykorzystania wody technologicznej oczyszczalni do rozcieńczenia i wypłukiwania materii organicznej. Z biogazowni do oczyszczalni mogą być również odprowadzane trudne do podczyszczenia odcieki pofermentacyjne. Mogą one zostać skierowane do oczyszczenia w segmencie biologicznym OŚK. W oczyszczalni należałoby wówczas uwzględnić, występujące w odciekach, zwiększone stężenie związków fosforu i azotu, wymagające wzmoczonego napowietrzania ścieków (do utleniania azotu) oraz stosowania większej dawki koagulantu (do strącania fosforu).

Część fosforu uwalnia się do odcieków podczas odwadniania osadów, szczególnie po zastosowaniu procesu fermentacji metanowej. Ponieważ odcieki te zwracane są na początek ciągu technologicznego, do części biologiczno-chemicznej dopływa dodatkowy ładunek fosforu, który może stanowić nawet połowę jego całkowitej ilości doprowadzanej na ten etap oczyszczania ścieków. Przy fermentacji dużego strumienia odpadów, zakładanego dla modelowej OŚK, udział zawartych w nim biogenów może wzrosnąć nawet do 90%. Zwiększa to obciążenie części biologicznej ładunkiem fosforu oraz podnosi koszt użycia reagentów do strącania. Wykorzystanie wytworzonego w komorach fermentacyjnych (z odpadów organicznych i osadów ściekowych) osadu pofermentacyjnego do produkcji kompostu, może znacząco poprawić w gminie bilans redukcji odpadów organicznych. Utrzymanie czystej segregacji 'u źródła' odpadów stwarza szansę na przekształcenie kompostu w nawóz o charakterze produktu, a tym samym zwiększa poziom gospodarki cyrkularnej.

W pryzmach kompostowych wytwarzana jest wysoka temperatura, dochodząca do 75°C, w której większość związków organicznych ulega rozkładowi. Białka w procesie amonifikacji rozpadają się na zmineralizowane związki azotu amonowego, które w przypadku braku dostatecznej ilości tlenu ulatniają się do atmosfery. Strata azotu w procesie ulatniania amoniaku do atmosfery (strumień 8 N) może dochodzić do 60% wprowadzonego do oczyszczalni azotu. W celu zatrzymania azotu w produkowanym nawozie oraz w celu zmniejszenia uciążliwości zapachowej, pryzmy muszą być intensywnie napowietrzane dzięki czemu następuje utlenienie związków azotu amonowego do azotanów, a tym samym przerwanie utraty azotu w lotnych związkach. Wysoka temperatura powoduje również higienizację osadu i zmniejsza uwodnienie pryzmy. W krótkim czasie (od 6 do 8 tygodni) pryzma przybiera postać ziemistą, zawartość wody spada z 70% do 45%, natomiast

proces kompostowania ulega zahamowaniu. W trakcie kompostowania następuje ubytek do atmosfery węgla w postaci CO₂ oraz azotu w postaci amoniaku (strumień N8, C8). Ocena się, że strata węgla w tym procesie osiąga 25% całego strumienia (Czyżyk, Rajmund, 2009).

Istotnym zagadnieniem, podczas produkcji nawozu organicznego, jest przyswajalność zawartych w nim biogenów. W przypadku nawozu produkowanego w oczyszczalniach ścieków, szczególne znaczenie ma sposób związania w osadach fosforu. Usuwanie fosforu odbywa się w OŚK, najczęściej na drodze biologicznego wbudowania w biomase osadu, wspomaganego procesem strącania chemicznego. Chemiczne strącanie gwarantuje skuteczne obniżenie stężenia fosforanów, ale równocześnie generuje wytwarzanie mało użytecznego osadu, który jest odprowadzany (w OŚK Swarzewo) razem z osadem nadmiernym (strumień P13 na rys 1). Przy użyciu jako czynnika strącającego związków żelaza, powstający osad wiąże fosfor w formie trudno-dostępnego dla roślin fosforanu (V) żelaza (III). Gdy związek ten trafia wraz z osadem pofermentacyjnym (strumień P7) do kompostu, a następnie przekształcany zostaje w nawóz (P9), przechodzi do gleby powiększając w niej akumulację fosforu trwale związanego [Sapek, 2014]. Trudnorozpuszczalne związki nieorganiczne mogą być obecne w glebie przez wiele lat, nie są jednak dostępne dla roślin i mają bardzo mały wpływ na żyzność gleby. Tym samym obecność w wytworzonym kompoście fosforanu (V) żelaza (III) ogranicza jego użyteczność nawozową. W oczyszczalniach ścieków coraz częściej stosowane jest strącanie fosforu w postaci fosforanu (V) amonowo-magnezowego (struwitu), który jest związkiem o bardzo dobrych właściwościach nawozowych (Egle i in., 2016). Stosowane technologie strącania struwitu pozwalają równocześnie na 90% redukcję fosforu oraz 40% redukcję azotu dzięki czemu wzrasta stopień recyklingu obu tych biogenów. Skuteczne strącanie struwitu wymaga wysokiego stężenia fosforu i azotu w roztworze, jakie zapewnia skład odcieków z osadu pofermentacyjnego (strumieniu N6,P6) (Kozik i in. 2014). W koncepcji oczyszczalni zaproponowanej na rys. 1, zawierającej zarówno komory fermentacyjne jak i kompostownię, można wytrącony struwit zmieszać z kompostem, zwiększając zawartość przyswajalnego przez rośliny fosforu, azotu i magnezu w uzyskanym nawozie (strumień N9, P9). Zastosowanie w technologii OŚK instalacji do wytrącania struwitu oraz ko-fermentacji, 5000 Mg odpadów kuchennych (tab. 2B) zwiększa odzysk pierwiastków biogenicznych w kompoście do wartości odpowiednio: 89,9 Mg N/rok, 82,6 Mg P/rok oraz 1198 Mg C/rok. Stanowi to wzrost o 33% azotu, 23% fosforu oraz 32,7% węgla organicznego, w stosunku do wyników uzyskiwanych w oczyszczalni przed wprowadzeniem zmian (tab. 2A). W oczyszczalni 'Swarzewo' do usuwania fosforu rocznie zużywa się 460 Mg koagulantu w postaci uwodnionego siarczanu (VI) żelaza (II). Roczny koszt zakupu koagulantu wynosi 326 tys. złotych. W przypadku włączenia do procesu fermentacji odpadów kuchennych, liczby te znacząco wzrosną. Do usuwania fosforu w postaci fosforanu (V) amonowo-magnezowego (struwitu) można wykorzystać tani surowiec odpadowy, ograniczając w ten sposób zużycie koagulantu żelazowego, bez zwiększenia obecnych wydatków. Przykładowo – wykorzystać można chlorek magnezu, stanowiący odpad przy wydobyciu soli kuchennej, obecnie w dużej ilości wykorzystywany jako sól drogowa. Jego skuteczność potwierdzono we wcześniejszych badaniach, zarówno laboratoryjnych jak i na skalę pół-techniczną (Dereszewska i Cytawa 2021). Oszacowano, że zastosowanie zamiennika magnezowego zwiększy procentowy udział przyswajalnego fosforu w kompoście z 25% do 42%. Całkowite wyeliminowanie koagulantu żelazowego nie jest wskazane, gdyż stężenie fosforanów w strumieniu oczyszczania głównego (komory napowietrzania) jest zbyt niskie aby stosować związki magnezu. Natomiast oszacowano że zastosowanie ich na odciekach może zredukować zużycie koagulantu żelazowego o 50-80% (w skali całego procesu). Wysoką wydajność strącania struwitu można uzyskać, zwiększając stężenie fosforanów w odciekach, np. poprzez zwiększenie stężenia suchej masy osadu w komorze fermentacyjnej, ograniczenie stopnia

rozcieńczenia fermentowanych odpadów lub zwiększone zagęszczenie osadu nadmiernego i wstępnego. Proces dawkowania magnezu musi być poprzedzony odrębną dla każdej OŚK analizą, gdyż nadmiar magnezu w obiegu ścieków może spowodować krystalizację struwitu w miejscach niepożądanych, (np. w rurach odprowadzających osad pofermentacyjny)

5. Wnioski

W dobie malejących zasobów surowców naturalnych i wzrastającego zanieczyszczenia środowiska koniecznością staje się wdrażanie czystych technologii o obiegu zamkniętym, uwzględniających odzysk surowców z odpadów. Sporządzenie schematu obiegu pierwiastków biogenicznych w OŚK umożliwia właściwy dobór odpadów do kofermentacji. Oszacowanie zmian stężeń biogenów w odciekach, wynikających z różnorodnego składu wsadu do fermentacji, ułatwia sterowanie procesami oczyszczania powstających odcieków. Przeprowadzone analizy pozwoliły na opracowanie arkusza kalkulacyjnego, umożliwiającego obliczanie i oszacowanie zmian strumieni przepływu biogenów w linii technologicznej oczyszczalni ścieków komunalnych. Arkusz umożliwia ocenę stopnia odzysku biogenów w obiegu zamkniętym, w zależności od: składu ścieków, zastosowanych w kofermentacji odpadów oraz odczynnika (koagulantu) strącającego fosfor. W 2021 r. recykling organiczny w OŚK Swarzewo obejmował 55,7 Mg azotu oraz 67 Mg fosforu, dzięki produkcji pełnowartościowego kompostu o właściwościach nawozowych (tab. 2A). Odzysk węgla organicznego był na poziomie 1708,4 Mg (w postaci biogazu i kompostu łącznie). Objęcie szczegółową segregacją odpadów kuchennych z całej aglomeracji oraz odzysk biogenów w reakcji strącania struwitu umożliwia wzrost tych parametrów do wartości odpowiednio 73,8 Mg azotu, 82,6 Mg fosforu oraz 2110,9 Mg węgla organicznego (tab. 2B). Zaletą usytuowania biogazowni przy oczyszczalni ścieków jest całoroczna dostępność surowca, w postaci osadu wstępnego i osadu nadmiernego z biologicznej części oczyszczania ścieków oraz możliwość oczyszczania wytwarzanych w procesie fermentacji odcieków. Organiczne odpady rolnicze i komunalne mogą być wykorzystywane jako uzupełniające źródło, zwiększające produkcję biogazu. Tym samym kompleks taki stanowi pewien rodzaj bezpiecznego magazynu energii, w którym przez pewien okres czasu można magazynować zarówno odpady jak i biogaz, a produkcję energii dawkować zależnie od potrzeb. Połączenie w.w. technologii pozwala wypracować wspólne rozwiązania dla uciążliwych odpadów, zarówno komunalnych jak i z oczyszczalni. Produkcja kompostu posiadającego certyfikat nawozowy, a tym samym będącego nowym pełnowartościowym produktem, wytworzonym z odpadów, zapewnia recykling organiczny 18% azotu, 98% fosforu i 30% węgla organicznego, zawartych w substratach przetwarzanych w OŚK. Należy jednak uwzględnić, że część fosforu obecna w kompoście związana jest w postaci fosforanu żelaza, nieprzyswajalnego dla roślin. Fosfor pozostaje w przyrodzie w postaci różnych frakcji organicznych i mineralnych. Najwięcej znajduje się w związkach mineralnych ze strącania fosforanów związkami żelaza 75% i w związkach organicznych pochodzących z osadu i roślin 25%, oraz. W modelu docelowym, w którym wykorzystano reakcję strącania fosforanów w postaci struwitu z odcieków z komory fermentacyjnej, zawartość przyswajalnego dla roślin fosforu mineralnego w nawozie organicznym można zwiększyć do 42%, jednocześnie zmniejszając udział praktycznie nierozpuszczalnego fosforanu (V) i żelaza (III).

Wykorzystanie, w skali krajowej, selektywnie segregowanych odpadów kuchennych oraz uwzględnienie w planach gospodarki odpadami kooperacji biogazowni oraz lokalnych oczyszczalni ścieków, może bardzo korzystnie wpłynąć na uzyskiwane poziomy recyklingu organicznego. Kompleksowe zagospodarowanie lokalnych odpadów pozwala również rozwijać zarówno procesy pozyskiwania energii z bioodpadów jak i gospodarkę ukierunkowaną na regenerację zasobów naturalnych, szczególnie gleby. ■

LITERATURA

- [1] Czyżyk Franciszek, Agnieszka Rajmund. 2009. „Straty azotu podczas przemowego kompostowania osadu ściekowego z odpadami roślinnymi”. *Woda-Srodowisko-Obszary Wiejskie* 9, 3 (27): 29-37.
- [2] Den Boer Emilia, Kamil Banaszekiewicz, Jan den Boer, Iwona Pasiecznik. 2022. „Energy recovery from waste – closing the municipal loop”. *Energies* 15, 3 (1246): 1-20.
- [3] Dereszewska Alina, Stanisław Cytawa. 2019. „The evaluation of the biogas potential of lignocellulosic wastes subjected to the enzymatic hydrolysis”. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 214, 012062
- [4] Dereszewska Alina, Stanisław Cytawa. 2021. „A proposal of low-cost technology for nutrient recovery from leachate of anaerobic digester at a biological wastewater treatment plant. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 642, 012011
- [5] Ellen MacArthur Foundation. 2015. „Growth Within: A Circular Economy Vision for a competitive Europe”, dostęp 30.06.2022: <https://unfccc.int/sites/default/files/resource/Circular%20economy%203.pdf>
- [6] Egle Lucas, Helmut Rechberger, Jörg Krampe, Matthias Zessner. 2016. „Phosphorus recovery from municipal wastewater: An integrated comparative technological, environmental and economic assessment of P recovery technologies”. *Science Total Environment* (571): 522–542.
- [7] Goliński Piotr, Wojciech Jokś. 2007. „Właściwości chemiczne i biologiczne traw a produkcja biogazu”. *Łąkarstwo w Polsce* (10) 37-47.
- [8] Komunikat Komisji do Parlamentu Europejskiego, Rady, Europejskiego Komitetu Ekonomiczno-Społecznego i Komitetu Regionów w sprawie wykazu surowców krytycznych dla UE, COM (2017) 490, Komisja Europejska, Bruksela.
- [9] Ochrona środowiska 2021. Główny Urząd Statystyczny, dostęp 30.06.2022: <https://stat.gov.pl/obszary-tematyczne/srodowisko-energia/srodowisko/ochrona-srodowiska-2020,1,21.html>
- [10] Ignatowicz Katarzyna, Łukasz Nowicki, Monika Puchlik. 2011. „Profil zmian stężenia związków węgla, azotu i fosforu w oczyszczalni ścieków komunalnych w Nowej Wsi Elckiej”. *Inżynieria Ekologiczna* (24): 52-63.
- [11] Kozik Anna, Nina Hutnik, Krzysztof Piotrowski, Agata Mazieńczyk, Andrzej Matynia. 2014. „Wytrącanie i krystalizacja struwitu z syntetycznego ścieku przy nadmiarze jonów magnezu”. *Przemysł Chemiczny* 93(5): 756-761.
- [12] Krasuska Ewa. 2013. „Recykling organiczny i odzysk energii z segregowanych u źródeł bioodpadów pochodzenia komunalnego”. Przewodnik przedsięwzięcia, dostęp 30.06.2022: https://www.proakademia.eu/gfx/baza_wiedzy/358/technologiczne_recykling_i_odzysk.pdf.
- [13] Kuś Jan. 2015. „Glebowa materia organiczna – znaczenie, zawartość i bilansowanie”. *Studia i Raporty IUNG-PIB*, 45 (19): 27-53.
- [14] Montusiewicz Agnieszka. 2012. „Współfermentacja osadów ściekowych i wybranych kosubstratów jako metoda efektywnej biometanizacji”. *Monografie – Polska Akademia Nauk, Komitet Inżynierii Środowiska*, 98.
- [15] Rahman Md Mukhlesur, Mohamed Amran Mohd. Salleh, Umer Rashid, Amimul Ahsan, Mohamad. Mujaffad Hossain, Chang, Six Rae. 2014. „Production of slow release crystal fertilizer from wastewaters through struvite crystallization – A review”. *Arabian Journal of Chemistry* (7):139-155.
- [16] Sutton Mark A., Oene Oenema, Jan, Willen Erisman, Adrian Leip, Hans van Grinsven, Wilfried Winiwarter. 2011. Too much of a good thing. “Nature”, 472, s. 159-161.
- [17] Sapek Barbara. 2014. „Nagromadzenie i uwalnianie fosforu w glebach-źródła, procesy, przyczyny”. *Woda-Srodowisko-Obszary Wiejskie* 14, 1 (45): 77-100.
- [18] Szatkowska Beata, Bjarne Paulsrud, Andrzej Tonderski. 2014. „Ocena potencjału biogazowego odpadów organicznych w województwie pomorskim”. W: *Ekonoenergetyka-Biogaz: badania, technologie, prawo i ekonomika w rejonie Morza Bałtyckiego*, red. A. Cenian, J. Gołaszewski, T. Noch, Wydawnictwo Gdańskiej Szkoły Wyższej, Gdańsk.
- [19] Tchobanoglous George, Franklin L. Burton, David H. Stensel. „Wastewater Engineering: Treatment, And Reuse”. (New York: Metcalf & Eddy, Inc., McGraw-Hill Book Company, 2003).
- [20] Uchwała Nr 88 Rady Ministrów z dnia 1 lipca 2016 r. w sprawie Krajowego planu gospodarki odpadami 2022, dostęp 30.06.2022: https://bip.mos.gov.pl/fileadmin/user_upload/bip/strategie_plany_programy/DGO/Krajowy_plan_gospodarki_odpadami_2022____M.P._poz._784_.pdf
- [21] Wiesmann Udo, In Su Choi, Eva-Maria Dombrowski. „Fundamentals of biological wastewater treatment”, (Weinheim: WILEY-VCH, Verlag GmbH&Co. KGaA, 2007)