

POLITECHNIKA POZNAŃSKA
Wydział Inżynierii Środowiska i Energetyki
Instytut Inżynierii Środowiska i Instalacji Budowlanych
Zakład Zaopatrzenia w Wodę i Biogospodarki

Autoreferat rozprawy doktorskiej

**Intensyfikacja produkcji biogazu jako możliwość poprawy
bilansu energetycznego komunalnej oczyszczalni ścieków**



mgr inż. Magdalena Budych-Górzna

Promotor: prof. dr hab. inż. Piotr Oleśkowicz-Popiel

Recenzenci:

prof. dr hab. inż. Ewa Neczaj

dr hab. inż. Sylwia Fudala-Książek, prof. uczelni

Spis treści

LISTA PUBLIKACJI STANOWIĄCA PODSTAWĘ ROZPRAWY DOKTORSKIEJ ...	3
1. Wprowadzenie	5
2. Cel pracy.....	13
3. Cel, zakres i metodyka przeprowadzonych badań.....	14
4. Wyniki badań.....	17
5. Wnioski i znaczenie praktyczne pracy doktorskiej	18
Bibliografia	22
Załącznik: Aktywność naukowa	31

LISTA PUBLIKACJI STANOWIĄCA PODSTAWĘ ROZPRAWY DOKTORSKIEJ

Zgodnie z Ustawą z dnia 20 lipca 2018 r. Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce tekst jednolity Dz. U. 2021 poz. 478 Art. 187, ust. 3. „**Rozprawę doktorską może stanowić** praca pisemna, w tym monografia naukowa, **zbiór opublikowanych i powiązanych tematycznie artykułów naukowych**, praca projektowa, konstrukcyjna, technologiczna, wdrożeniowa lub artystyczna, a także samodzielna i wyodrębniona część pracy zbiorowej.”

1. **Magdalena Budych-Górzna**, Marcin Smoczyński, Piotr Oleśkowicz-Popiel: “Enhancement of biogas production at the municipal wastewater treatment plant by co-digestion with poultry industry waste.” Applied Energy 2016, 161, 387-394; 200 pkt. MNiSW; Impact Factor 8,848
<https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2015.10.007>

Magdalena Budych-Górzna była odpowiedzialna za przygotowanie stanowiska badawczego, opracowanie koncepcji i metodyki badań zarówno w testach laboratoryjnych jak i w pełnej skali technicznej. Magdalena Budych-Górzna prowadziła indywidualnie większość zaplanowanych, laboratoryjnych prac badawczych, zasilala proces fermentacji w badany substrat, pobierała próbki do badań. Dokonała analizy wyników uzyskanych na każdym etapie prac badawczych. Opracowała wyniki badań w postaci wykresów, tabel, dokonała kalkulacji korzyści technologicznych oraz energetycznych zastosowania badanego procesu w warunkach rzeczywistych oraz napisała manuskrypt. Wkład indywidualny w pracę: 75%.

2. **Magdalena Budych-Górzna**, Beata Szatkowska, Łukasz Jaroszyński, Bjarne Paulsrud, Ewelina Jankowska, Tymoteusz Jaroszyński, Piotr Oleśkowicz-Popiel “Towards an Energy Self-Sufficient Resource Recovery Facility by Improving Energy and Economic Balance of a Municipal WWTP with Chemically Enhanced Primary Treatment” Energies 2021, 14 (5), 1445; 140 pkt. MNiSW; Impact Factor 2,702
<https://doi.org/10.3390/en14051445>

Magdalena Budych-Górzna brała udział w opracowaniu koncepcji i metodyki badań zarówno w testach laboratoryjnych jak i testach w pełnej skali technicznej. Magdalena Budych-Górzna przeprowadziła indywidualnie część prac laboratoryjnych. Była odpowiedzialna za zebranie danych z testów laboratoryjnych oraz testów w pełnej skali. Dokonała analizy uzyskanych wyników badań. Opracowała wyniki badań w postaci wykresów, tabel, dokonała kalkulacji korzyści technologicznych, energetycznych i ekonomicznych zastosowania badanego procesu w warunkach rzeczywistych oraz napisała manuskrypt. Wkład indywidualny w pracę: 70%.

3. **Magdalena Budych-Górzna**, Łukasz Jaroszyński, Piotr Oleśkiewicz-Popiel “Improved energy balance at a municipal Wastewater Treatment Plant through waste activated sludge low-temperature alkaline pretreatment”, wysłany, w trakcie recenzji.

Magdalena Budych-Górzna brała udział w opracowaniu koncepcji i metodyki badań oraz budowie stanowiska badawczego. Magdalena Budych-Górzna przeprowadziła indywidualnie część prac laboratoryjnych. Zebrała oraz dokonała analizy uzyskanych wyników badań. Opracowała wyniki w postaci wykresów, tabel, dokonała kalkulacji korzyści technologicznych, energetycznych i ekonomicznych zastosowania badanego procesu w warunkach rzeczywistych oraz napisała manuskrypt. Wkład indywidualny w pracę: 75%.

1. Wprowadzenie

W związku z obserwowanymi zmianami klimatycznymi i globalnym ociepleniem wpływającymi na różne aspekty życia człowieka (Donnelly i in., 2017; Lawal i in., 2019), jak również zubożeniem zasobów naturalnych duże znaczenie zyskało w ostatnich latach pojęcie zrównoważonego rozwoju i gospodarki w obiegu zamkniętym. W odróżnieniu od klasycznego, liniowego modelu gospodarki opartego na bezwzględnej konsumpcji, gospodarka cyrkularna (*ang. circular economy*) stanowi bardziej przyjazny model, gdzie dbanie o zasoby naturalne stanowi priorytet w działalności gospodarczej. Jest to model dążący do znalezienia równowagi pomiędzy środowiskiem, gospodarką a funkcjonowaniem człowieka. W chwili obecnej globalna gospodarka jest cyrkularna zaledwie w 8,6%. Oznacza to, że ponad 90% zasobów jest marnowanych tworząc cyrkularną lukę tzw. „*Circular gap*” (Circular gap raport Initiative, 2020). Dążenie do przejścia na gospodarkę cyrkularną wymaga holistycznego spojrzenia obejmującego wiele dziedzin przemysłu oraz podjęcia konkretnych działań w kierunku odzysku surowców – w tym również odzysku energii.

Promowanie energii odnawialnej jest obecnie jednym z kluczowych celów polityki energetycznej Unii Europejskiej (Dyrektywa (EU) 2018/2001). Wiąże się to z jednoczesnym ograniczaniem zużycia energii z nieodnawialnych, kopalnych zasobów oraz obniżaniem emisji gazów cieplarnianych w celu zapobiegania drastycznym zmianom klimatycznym (Ramy polityki klimatyczno-energetycznej na lata 2020-2030). Gospodarka odpadami, w tym przeróbka osadów ściekowych, również zajmuje ważne miejsce w regulacjach unijnych. Zgodnie z hierarchią gospodarowania odpadami, należy unikać wytwarzania odpadów, a jeżeli nie jest to możliwe, minimalizować je i odzyskiwać przed ostatecznym unieszkodliwieniem (Dyrektywa 2008/98/WE).

Oczyszczalnie ścieków to zakłady o dużej energochłonności, które wytwarzają znaczne ilości osadu jako produktu ubocznego procesu oczyszczania ścieków (Kacprzak i in., 2017; Longo i in., 2016). Szacuje się, że w całkowitym zapotrzebowaniu na energię elektryczną w krajach rozwijających się dla sektora wodno-kanalizacyjnego przypada od 1% do 4% (Longo i in., 2016). Produkcja osadów ściekowych przez oczyszczalnie ścieków w UE to ponad 10 mln ton suchej masy rocznie (Kacprzak i in., 2017). Zarówno zużycie energii, jak i zagospodarowanie osadów stanowią największe koszty operacyjne komunalnych oczyszczalni ścieków.

Przez wiele lat koncentrowano się w procesie oczyszczania ścieków na skutecznym usuwaniu zanieczyszczeń w celu spełnienia coraz bardziej restrykcyjnych wymogów w tym zakresie. Jednak niewiele uwagi poświęcano zużyciu energii i optymalizacji kosztów operacyjnych. W ostatnich latach pogląd na oczyszczalnie ścieków zmienił się zasadniczo. Oczyszczalnie ścieków zaczęto postrzegać także jako rezerwuary cennych zasobów tj.: węgla, fosforu i azotu (Ye i in., 2018). Świadomość zmian klimatycznych spowodowała, że zwrócono większą uwagę na efektywność energetyczną oczyszczalni ścieków. Interesująca stała się koncepcja samowystarczalnej energetycznie oczyszczalni ścieków w dążeniu do zrównoważonego rozwoju i redukcji śladu węglowego (Maktabifard i in., 2020). Osiągnięcie samowystarczalności energetycznej oczyszczalni ścieków może odbywać się zarówno poprzez zmniejszenie zapotrzebowania na energię elektryczną (np. stosowanie mniej energochłonnych urządzeń czy zaawansowanych systemów sterowania) lub poprzez zwiększenie produkcji energii (np. energia produkowana z biogazu, fotowoltaika, pompy ciepła itd.) (Colacicco i Zacchei, 2020; Đurđević i in., 2019).

Jednym ze sposobów zwiększenia produkcji energii w oczyszczalni ścieków jest zwiększenie produkcji biogazu. Można to osiągnąć np. poprzez kofermentację z substratami zewnętrznymi (Masłoń i in., 2020; Tandukar i Pavlostathis, 2015), wstępną obróbkę osadu nadmiernego (Cano i in., 2015; Zhen i in., 2017) lub zagęszczenie węgla organicznego w osadnikach wstępnych poprzez chemicznie wzmocnioną obróbkę wstępną (*ang. chemically enhanced primary treatment - CEPT*) (Güven i in., 2019; Kooijman i in., 2017; Maktabifard i in., 2018).

W wielu komunalnych oczyszczalniach ścieków istniejące komory fermentacyjne wykazują rezerwy technologiczne spowodowane tym, że są one obciążone w mniejszym stopniu niż wynika to z parametrów projektowych. Wprowadzenie zmian w procesie fermentacji i jego usprawnienie w wyniku zastosowania CEPT czy obróbki wstępnej osadu nadmiernego, potencjalnie zwiększa możliwości obciążenia komór dodatkowym substratem. W sytuacji pojawiających się rezerw można rozważyć kofermentację substratów pozyskanych spoza oczyszczalni z osadami ściekowymi w celu osiągnięcia wyższej produkcji energii i lepszego wykorzystania istniejących kubatur fermentacyjnych (Eduok i in., 2017; Rodrigues i in., 2019). Kofermentacja pozwala więc na wykorzystanie odpadów i jednocześnie zwiększa produkcję biogazu (Grosser i Neczaj, 2016). Jest to jedna z metod zwiększających samowystarczalność energetyczną oczyszczalni ścieków (Jenicek i in., 2012). Kofermentacja osadu z różnymi substratami może również skutkować

znacznym wzrostem produkcji biogazu w porównaniu z monofermentacją osadu ściekowego (Davidsson i in., 2008; Nag i in., 2019). Fermentacja odpadów z przemysłu spożywczego o wysokiej zawartości węgla organicznego wpływa bowiem na poprawę stosunku węgla do azotu (C/N) (Koch i in., 2016; Mata-Alvarez i in., 2014). Stosunek C/N w osadzie ściekowym jest niski (Koch i in., 2016) i zazwyczaj znacznie poniżej optymalnego zakresu C/N 15–30 dla beztlenowej fermentacji metanowej (Anzola-Rojas i in., 2015). Mieszanie osadów ściekowych z odpadami bogatymi w węgiel organiczny, poprawia stosunek C/N wsadu i wpływa na poprawę procesu fermentacji. Koch i in. (2015) w badaniach kofermentacji odpadów spożywczych wskazali wzrost potencjału biogazowego w związku z poprawą stosunku C/N z 8,8 do 17,7. Niezwykle istotny jest dobór kosubstratu oraz ustalenie ilości kosubstratu tak, aby zachować stabilność i efektywność procesu fermentacji. Yalcinkaya i Malina (2015) badali wpływ kofermentacji osadów z tłuszczem z separatorów w restauracjach i punktach gastronomicznych. Uzysk metanu wzrósł z 384 ml CH₄/g VS (bez dodatku tłuszczu) do 536 ml CH₄/g VS (przy 25% dodatku tłuszczu w odniesieniu do ładunku VS) i 641 ml CH₄/g VS (przy 46% dodatku tłuszczu w odniesieniu do ładunku VS). Jednak przy większym dodatku tłuszczu tj. 70%, kofermentacja osadu nie powiodła się a produkcja biogazu spadła praktycznie do zera z powodu wzrostu stężenia VFA i zahamowania procesu fermentacji metanowej (Yalcinkaya i Malina, 2015).

Celem kofermentacji odpadów, oprócz zwiększonej ilości generowanego biogazu, może być również poprawa bilansu energetycznego oczyszczalni ścieków. Koch i in. (2016) ustalili, że dodatek 10 % odpadów spożywczych w pełnej skali powoduje wzrost produkcji energii własnej pozwalający znacząco zwiększyć pokrycie zapotrzebowania zakładu na energię z 25% na 78%. W innych badaniach autorzy doszli do wniosku, że korzystne efekty można zaobserwować przy dodaniu do 12,5% (w przeliczeniu na masę) lub do 35% (w przeliczeniu na VS) kosubstratu (Koch i in., 2015). Kofermentacja różnych odpadów ma zazwyczaj pozytywny wpływ na ogólny uzysk metanu (Castro-Molano i in., 2018).

Osad wstępny jest łatwiej fermentowalny w porównaniu do osadu nadmiernego. W związku z tym jego bardziej efektywna separacja na etapie oczyszczania wstępnego jest korzystna dla produkcji biogazu w procesie fermentacji metanowej. CEPT jest jedną z metod wskazywanych w najnowszej literaturze dających możliwość poprawy separacji osadu wstępnego i intensyfikacji produkcji biogazu. Poprzez dozowanie koagulantów (nieorganicznych np. chlorku żelaza II FeCl₂, siarczaniu żelaza III Fe₂(SO₄)₃, chlorku glinu

AlCl₃ lub organicznych np. poliaminy) na dopływie do osadników zwiększa się separację zawiesziny w osadnikach, która następnie jako osad wstępny, kierowana jest do komór fermentacyjnych (Guven i in., 2019; Ju i in., 2016; Kooijman i in., 2017; Lin i in., 2017; Maktabifard i in., 2018). Koagulacja wpływa zatem na poprawę sedymentacji i wychwytywania materii organicznej cennej z punktu widzenia procesu fermentacyjnego. Mechanizm procesu polega na tworzeniu i agregacji kłaczków, które osiadając zwiększają skuteczność oczyszczania wstępnego (Kooijman i in., 2017). Koagulacja umożliwia wzrost redukcji zanieczyszczeń w osadnikach wstępnych m.in. zawieszin (TSS) czy biochemicznego zapotrzebowania na tlen (BOD) nawet przy zwiększonych przepływach przez osadniki wstępne (Chagnon i Harleman, 2002). W związku z tym infrastruktura części mechanicznej oczyszczalni może być mniejsza, co zmniejsza koszty inwestycyjne (Remy i in., 2014). Ponadto CEPT daje możliwość albo zmniejszenia wielkości kolejnych obiektów oczyszczalni na etapie projektowym, albo zwiększenia wydajności istniejącej oczyszczalni ścieków (Haydar i Aziz, 2009). Koncepcja CEPT była szeroko badana w ostatnich dziesięcioleciach w celu zmniejszenia obciążenia organicznego na etapie biologicznego oczyszczania ścieków (Chakraborty i in., 2020; Wang i in., 2009). W ostatnich latach zainteresowanie CEPT jako metodą odzyskiwania zasobów stopniowo rosło, ponieważ stwierdzono, że ma ona pozytywny wpływ na zmniejszenie zużycia energii (Taboada-Santos i in., 2019; Taboada-Santos i in., 2020). Wynika to głównie z mniejszego zapotrzebowania na energię w części tlenowej oczyszczalni ścieków, jak również ze zwiększonej produkcji energii w trakcie procesu fermentacji beztlenowej (McCarty i in., 2011; Zaborowska i in., 2016).

Wychwytywanie węgla przez CEPT prowadzi w konsekwencji do obniżenia C/N w ściekach kierowanych do części biologicznej oczyszczalni. Zachwianie stosunku C/N może istotnie utrudniać redukcję azotu przy użyciu konwencjonalnego procesu nityfikacji-denitryfikacji, dla którego wymagania dotyczące węgla organicznego są konkretnie zdefiniowane. Proporcje chemicznego zapotrzebowania na tlen do azotu (COD/N) powinny mieścić się w zakresie od 6/1 do 10/1 (Lemaire i in., 2008). Dlatego redukcja azotu, w strumieniu bocznym tj. odciekach z odwadniania, przed ich wprowadzeniem do głównego ciągu ściekowego oczyszczalni, może rozwiązać te trudności. Połączenie częściowej nityfikacji z procesem Anammox (PN/A) stało się dobrze ugruntowaną technologią oczyszczania odcieków. Ponad 100 pełnowymiarowych instalacji autotroficznej redukcji azotu w procesie Anammox zostało zainstalowanych i jest eksploatowanych w oczyszczalniach ścieków na strumieniach odcieków bogatych w NH₄⁺,

np. w Holandii (Apeldoorn, Amersfort), Niemczech (Ingolstadt) czy Szwecji (Malmo) (Lackner i in., 2014). W procesie PN/A azot amonowy jest utleniany do azotynów przez nityfikanty, a następnie bakterie anammox przekształcają azot amonowy, łącząc go z wytworzonym azotynem w azot i śladowe ilości azotanu. Proces autotroficzny PN/A daje możliwość praktycznie wyeliminowania zapotrzebowania na węgiel organiczny oraz zmniejszenia energii niezbędnej do napowietrzania o 60% w porównaniu z procesem konwencjonalnym (Arora i in., 2021; Lackner i in., 2014). Zgodnie z danymi literaturowymi, zapotrzebowanie energetyczne układów oczyszczania strumienia bocznego PN/A waha się od 0,8 kWh/kg N do 2 kWh/kg N (Lackner i in., 2014), przy czym skuteczność usuwania można utrzymać na poziomie ponad 85% (Han i in., 2020). W porównaniu z układami konwencjonalnymi, gdzie nakłady energii wynoszą 4 kWh/kg N, energochłonność PN/A jest bardzo niska i doskonale komponuje się w układach technologicznych promujących samowystarczalność energetyczną oczyszczalni ścieków. Zastosowanie koagulantów w poprawie oczyszczania wstępnego prowadzi do zmiany proporcji osadów generowanych w oczyszczalni. Wzrasta ilość osadu wstępnego a maleje ilość osadu nadmiernego, co daje możliwość zwiększenia produkcji biogazu w procesie fermentacji beztlenowej. Jednak dla zabezpieczenia wymaganej redukcji azotu w oczyszczalni przy obniżonym stosunku COD/N konieczne może być autotroficzne podczyszczanie strumienia ścieków z odwadniania

Osad nadmierny (WAS) powstający w procesie biologicznego oczyszczania ścieków jest trudno fermentowalnym substratem. W porównaniu do osadu wstępnego (PS) wydzielanego w części mechanicznej oczyszczalni uzysk biogazu z osadu nadmiernego jest zdecydowanie mniejszy. Zgodnie z danymi literaturowymi, jednostkowa produkcja biogazu z osadu nadmiernego mieści się w przedziale 0,5–0,9 m³/g VS_{red} (Bolzonella i in., 2005). Powszechną praktyką jest mieszanie PS i WAS dla osiągnięcia wyższej jednostkowej produkcji biogazu, do ok. 1 m³/kg VS_{red} (Metcalf & Eddy, 1991). Osad nadmierny składa się głównie z biomasy bakteryjnej, węglowodanów, białek, substancji humusowych i kwasów nukleinowych (Gonzalez i in., 2018). Większość substancji organicznych w osadzie nadmiernym jest uwięziona w komórkach mikroorganizmów lub związana w zewnątrzkomórkowych substancjach polimerowych (EPS) (Frolund i in., 1996; Sheng i in., 2010). We wcześniejszych pracach badawczych stwierdzono, że obecność złożonej struktury kłaczkowej, odporne ściany komórkowe i inne związki organiczne o dużej masie cząsteczkowej w osadzie utrudniają jego hydrolizę (Zhen i in., 2017). Problem z przeprowadzeniem efektywnej hydrolizy prowadzi do konieczności

zapewnienia dłuższego czasu fermentacji (HRT), wymaga komór fermentacyjnych o większej objętości i skutkuje mniejszą wydajnością produkcji biogazu. Aby poprawić hydrolizę i przyspieszyć produkcję metanu, wskazane jest zastosowanie obróbki wstępnej osadu nadmiernego, przed jego wprowadzeniem do procesu fermentacji (Nguyen i in., 2021; Zhen i in., 2017).

Obróbka wstępna ma głównie na celu rozbicie kłaczków osadu, hydrolizę EPS i zniszczenie komórek bakteryjnych zawartych w osadzie. W efekcie masa organiczna zawarta w komórkach jest uwalniana do fazy rozpuszczonej, co skutkuje lepszą dostępnością substratu dla konsorcjów mikroorganizmów w procesie fermentacji metanowej, a w konsekwencji zwiększeniem produkcji metanu. W literaturze można znaleźć różne metody obróbki wstępnej osadu nadmiernego: termiczne (Barber, 2016; Choi i in., 2018), mechaniczne (Nah i in., 2000), mikrofalowe (Gil i in., 2018), ultradźwiękowe (Lizama i in., 2018; Pilli i in., 2011), mikrobiologiczne (Kavitha i in., 2017), chemiczne, np. alkaliczne (Li i in., 2008; Li i in., 2012) lub metody hybrydowe, takie jak termochemiczno-dźwiękowe (Kavitha i in., 2016).

Wśród wielu różnych metod obróbki wstępnej największe zainteresowanie budzą metody chemiczne i termiczne. Wśród metod chemicznych są to głównie metody z użyciem reagentów kwasowych lub reagentów zasadowych. Wcześniejsze badania wykazały, że obróbka kwasowa jest mniej skuteczna niż alkaliczna w przypadku osadu nadmiernego (Nazari i in., 2017; Zhen i in., 2017). Jest wprawdzie skuteczniejsza w solubilizacji substancji lignocelulozowych obecnych we wstępnym osadzie ściekowym i powoduje zwiększenie uzysku biogazu, ale wymaga niskiego pH reakcji w zakresie pH 2-3 i wymaga korekty odczynu przed wprowadzeniem osadu do komór fermentacyjnych (Devlin i in., 2011). Stężone kwasy nie są preferowane do wstępnej obróbki ze względu na ich korozyjny charakter i ponieważ mogą powodować zwiększone koszty w procesie neutralizacji (Bhatt i Shilpa, 2015).

Alkaliczna obróbka jest stosunkowo prosta do wdrożenia na pełną skalę (Zhen i in., 2017). Nie wymaga skomplikowanych urządzeń i jest prosta w obsłudze, dlatego ta metoda jest interesująca dla operatorów oczyszczalni ścieków. Spośród odczynników alkalicznych NaOH jest najbardziej skuteczny w procesie hydrolizy osadów i przez to zwiększaniu produkcji biogazu (Li i in., 2008). Jednak obróbka wstępna alkaliczna wymaga dużych dawek NaOH, aby osiągnąć wymagany stopień solubilizacji materii organicznej, co prowadzi do podwyższenia pH w reaktorach fermentacyjnych (Li i in., 2012). Początkowe pH fermentacji po wprowadzeniu osadu poddanego obróbce alkalicznej

powinno być kontrolowane na poziomie niższym niż 8,0. Dawki powyżej 0,1 mol/L (200 mg/g TS) mogą powodować zahamowanie procesu fermentacji metanowej (Li i in., 2012). Dlatego też przed wprowadzeniem osadu do procesu fermentacji często stosuje się regulację pH kwasem (np. HCl), ale w wielu przypadkach nie zapobiega to nadmiernemu wzrostowi stężenia Na^+ i ryzyku zahamowania procesu przez zasolenie (Li i in., 2012).

Obróbkę wstępną można realizować również poprzez podgrzewanie osadu. W literaturze dzieli się ją na wysokotemperaturową obróbkę termiczną $> 100^\circ\text{C}$ oraz obróbkę niskotemperaturową $< 100^\circ\text{C}$ (Climent i in., 2007). Wysokotemperaturowa hydroliza termiczna jest dobrze ugruntowaną i wdrożoną komercyjnie technologią obróbki wstępnej, która pierwotnie stosowana była do poprawy odwadniania osadu (Neyens i Baeyens, 2003). Przez wiele lat badano również wpływ obróbki termicznej na intensyfikację procesu fermentacji metanowej i wzrost produkcji biogazu, co zostało zebrane w pracy przeglądowej (Pilli i in., 2014). Ze względu na zalety związane z poprawą odwadnialności osadu oraz wzrostem produkcji biogazu, hydroliza wysokotemperaturowa została skomercjalizowana. Powstało kilka technologii wysokotemperaturowych, m.in. CambiTHP™ i Biothelys® (Pilli i in., 2014). Obróbka wstępna w niskiej temperaturze ($< 100^\circ\text{C}$) na ogół skutkuje mniejszymi efektami hydrolizy w porównaniu z metodami alkalicznej obróbki wstępnej z użyciem wodorotlenku sodu (Liu i in., 2019). Natomiast połączenie tych dwóch metod daje synergistyczny efekt dezintegracji, a nawet podwaja produkcję metanu, czyniąc taką połączoną metodę konkurencyjną w stosunku do metod wysokotemperaturowych ($> 100^\circ\text{C}$) (Liu i in., 2019; Xiao i in., 2020). Dlatego też niskotemperaturowa alkaliczna metoda obróbki wstępnej umożliwia zmniejszenie zużycia alkaliów, jak również zmniejszenie zużycia energii w procesie. Jednak w większości badań związanych z obróbką termiczno-alkaliczną stosuje się raczej wysokie dawki NaOH, co wymaga dostosowania pH przed wprowadzeniem osadu do komór fermentacyjnych (Chen i in., 2020; Ruffino i in., 2016; Xiao i in., 2020). W literaturze nieliczne są badania oceniające wpływ termiczno-alkalicznej obróbki wstępnej dawką NaOH niższą niż 60 g NaOH/kg TS na proces fermentacji metanowej.

Mając na względzie powyższe, w niniejszej rozprawie doktorskiej skoncentrowano się na możliwości zwiększenia produkcji biogazu i odzysku energii w komunalnej oczyszczalni ścieków. Zaprezentowano podejście wielokierunkowe z założeniem holistycznego spojrzenia na oczyszczalnię jako jeden organizm łączący wiele procesów, które wzajemnie na siebie oddziałują. Podstawą oceny rozważanych metod były wyniki przeprowadzonych badań laboratoryjnych, pilotażowych i testów w pełnej skali. Oprócz

oceny wpływu badanych metod na intensyfikację produkcji biogazu i stabilność procesu fermentacji, ocenie poddawano również inne skutki wprowadzenia badanego procesu np. wpływ na ilość produkowanego osadu, jakość odcieków i spełnienie parametrów oczyszczania ścieków. Temu wszystkiemu przyświecał też cel, aby zbudowana koncepcja była nie tylko technologicznie efektywna, ale również efektywna pod względem ekonomicznym.

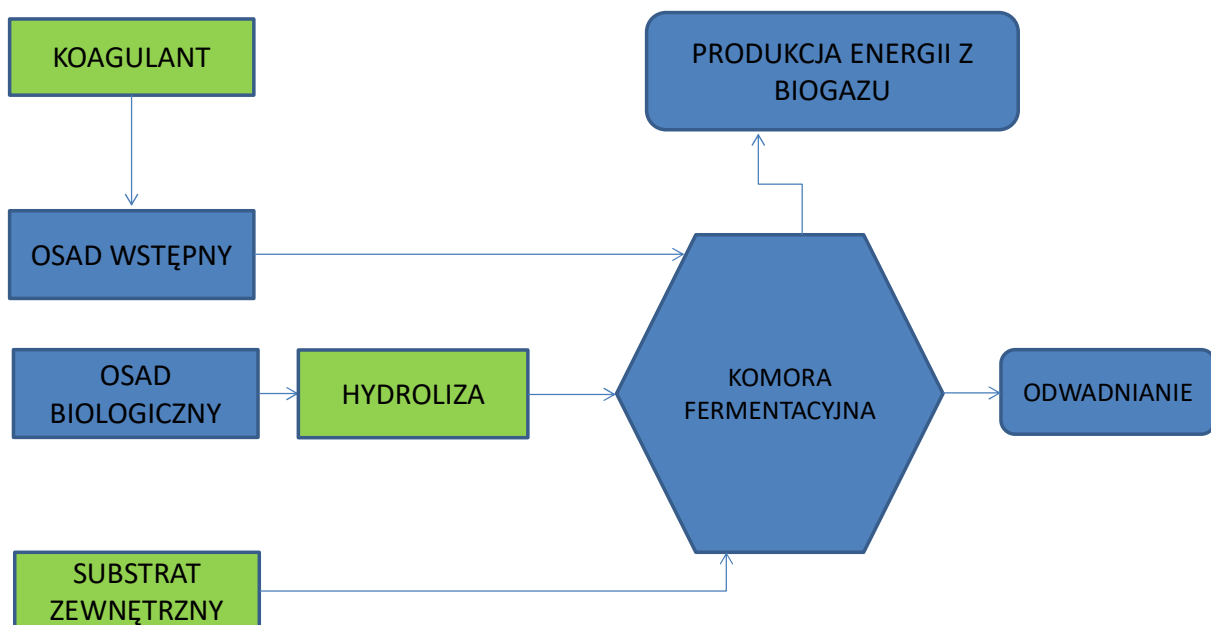
2. Cel pracy

Celem niniejszej pracy było opracowanie koncepcji poprawy bilansu energetycznego komunalnej oczyszczalni ścieków poprzez zintensyfikowanie procesu fermentacji i zwiększenie produkcji biogazu. Biogaz spalany w jednostkach kogeneracyjnych daje możliwość wyprodukowania zarówno energii elektrycznej jak i ciepła pokrywając tym samym częściowo lub całkowicie potrzeby technologiczne oczyszczalni. Dążąc do rozwiązań mogących znaleźć zastosowanie aplikacyjne w pełnej skali założono, że przyjęte rozwiązania muszą również spełniać warunek zmniejszenia kosztów eksploatacyjnych.

Zakres pracy obejmował trzy obszary badawcze:

- kofermentację **odpadów organicznych** pozyskanych spoza oczyszczalni (substrat zewnętrzny) oraz przebadanie jej wpływu na produkcję biogazu;
- separację **osadu wstępnego** (przez zastosowanie koagulanta) oraz przebadanie jej wpływu na produkcję biogazu;
- obróbkę wstępną (hydrolizę) **osadu nadmiernego** zagęszczonego oraz przebadanie jej wpływu na produkcję biogazu;

Wybór obszarów badawczych podyktowany był praktyczną znajomością potencjału technologicznego komunalnych oczyszczalni ścieków. Obszary badawcze zostały przedstawione na Rys. 1.



Rys. 1. Schematyczna prezentacja obszarów badawczych w niniejszej rozprawie doktorskiej

3. Cel, zakres i metodyka przeprowadzonych badań

Celem podjętych badań było wnikliwe przebadanie wybranych procesów potencjalnie mogących zwiększyć produkcję biogazu tj.: (a) kofermentacji, (b) strącania wstępnego w koncepcji CEPT oraz (c) obróbki wstępnej osadu nadmiernego. Badania zostały zaplanowane tak, aby uzyskać wszelkie niezbędne dane pozwalające ocenić skuteczność, użyteczność i wykonalność wybranych procesów jednostkowych w pełnej skali technicznej.

Zakres badań dla poszczególnych procesów obejmował:

(a) Kofermentacja

- ✓ Testy fermentacyjne półciągłe: określenie parametrów procesu fermentacji przy różnych dawkach odpadów tłuszczowych, poflotacyjnych z przemysłu drobiarskiego: produkcja biogazu, produkcja metanu, parametry procesu fermentacji tj.: redukcja masy organicznej, czas fermentacji, obciążenie komory fermentacyjnej, parametry zawartości komory fermentacyjnej, stabilność procesu;
- ✓ Testy w pełnej skali: sprawdzenie efektywności kofermentacji w pełnej skali; określenie parametrów procesu fermentacji przy fermentacji odpadów z przemysłu drobiarskiego z osadami ściekowymi: produkcja biogazu, produkcja metanu, parametry procesu fermentacji tj.: redukcja masy organicznej, czas fermentacji, obciążenie komory fermentacyjnej, parametry zawartości komory fermentacyjnej, stabilność procesu, ocena ryzyka inhibicji procesu;
- ✓ Bilans energii: obliczenie na podstawie uzyskanych w testach wskaźników tj.: jednostkowej produkcji biogazu oraz jednostkowej produkcji metanu z odpadu, ilości energii możliwej do uzyskania w pełnej skali technicznej na oczyszczalni o wielkości 1 mln PE, szacując wzrost pokrycia zapotrzebowania na energię elektryczną.

(b) Strącanie wstępne:

- ✓ Testy zlewkowe: ustalenie najbardziej efektywnej dawki siarczanu żelaza Fe_2SO_4 (PIX);

- ✓ Testy pilotażowe: sprawdzenie efektywności strącania dla wybranej dawki PIX na pilotażowej instalacji oczyszczania ścieków; ocena redukcji zanieczyszczeń;
 - ✓ Testy w pełnej skali: sprawdzenie efektywności strącania dla wybranej dawki PIX w pełnoskalowej oczyszczalni ścieków; ocena redukcji zanieczyszczeń w osadnikach wstępnych; ocena przebiegu procesu fermentacji: produkcja biogazu, produkcja metanu, parametry procesu fermentacji tj.: redukcja masy organicznej, czas fermentacji, obciążenie komory fermentacyjnej, parametry zawartości komory fermentacyjnej, stabilność procesu, ocena ryzyka inhibicji procesu;
 - ✓ Bilans energii i rachunek ekonomiczny: na podstawie wyników testów w pełnej skali wykonano bilans masy i energii, określono przyrost produkcji energii oraz wzrost pokrycia zapotrzebowania na energię oczyszczalni w pełnej skali; wykonano również bilans kosztów i oszczędności szacując w ten sposób opłacalność wdrożenia technologii na obiekcie w pełnej skali (1 mln PE).
- (c) Obróbka wstępna osadu nadmiernego:
- ✓ Testy zlewkowe: ustalenie parametrów termiczno-alkalicznej obróbki wstępnej: dawka reagenta, czas obróbki, temperatura obróbki;
 - ✓ Testy fermentacyjne półciągle: określenie parametrów procesu fermentacji dla osadu poddanego obróbce wstępnej: produkcja biogazu, produkcja metanu, parametry procesu fermentacji tj.: redukcja masy organicznej, czas fermentacji, obciążenie komory fermentacyjnej, parametry zawartości komory fermentacyjnej, stabilność procesu, ocena ryzyka inhibicji procesu;
 - ✓ Bilans energii i rachunek ekonomiczny: na podstawie wskaźnika jednostkowej produkcji metanu dla osadu poddanego obróbce wstępnej, określono przyrost produkcji metanu, przyrost produkcji energii oraz wzrost pokrycia zapotrzebowania na energię oczyszczalni w pełnej skali; wykonano również bilans kosztów i oszczędności szacując w ten sposób opłacalność wdrożenia technologii na obiekcie w pełnej skali (1 mln PE).

Badania laboratoryjne i pilotażowe realizowane na potrzeby niniejszej pracy doktorskiej (testy zlewkowe, testy fermentacyjne i pilotażowe testy strącania wstępnego) przeprowadzone zostały na Stacji Badawczej Centralnej Oczyszczalni Ścieków w Koziegłowach na specjalnie przygotowanych stanowiskach badawczych. Testy w pełnej

skali prowadzone były bezpośrednio w Centralnej Oczyszczalni Ścieków w Koziegłowach poprzez włączenie procesów badanych do rzeczywistego procesu technologicznego oczyszczalni.

Wszystkie metody analityczne stosowane przy ocenie przebiegu badanych procesów zostały opisane w punkcie 4.2. rozprawy doktorskiej a substraty do badań scharakteryzowane w punkcie 4.3 rozprawy.

Badania prowadzone były wg ściśle ustalonego planu badań, co szczegółowo zostało przedstawione w punkcie 4.4. rozprawy „Metody eksperymentalne”. W punkcie tym pokazano również schematy i zdjęcia stanowisk badawczych. Podstawowym celem badawczym było zbadanie przyrostu produkcji biogazu/metanu dla każdego z analizowanych procesów wybranych dla intensyfikacji procesu fermentacji. Istotnym elementem rozprawy było również przeprowadzenie bilansu energii dla oczyszczalni ścieków o wielkości 1 mln PE na podstawie uzyskanych wyników badawczych. Metodyka zastosowana do obliczenia ilości produkowanej energii oraz założenia przyjęte do obliczeń zostały również szczegółowo opisane w punkcie 4.4. rozprawy.

4. Wyniki badań

Przebadano trzy metody intensyfikacji produkcji biogazu w komunalnej oczyszczalni ścieków: kofermentację odpadów z przemysłu drobiarskiego, chemiczne strącanie CEPT oraz obróbkę wstępną osadu nadmiernego.

A. Badania kofermentacji odpadów umożliwiły uzyskanie następujących wyników:

- wzrost produkcji biogazu z $0,5 \text{ m}^3/\text{kg VS}$ (próba bez dodatku odpadu) do $0,62 \text{ m}^3/\text{kg VS}$ (przy dawce odpadu 20,7% w odniesieniu do ładunku VS) dla HRT ~ 35 dni (pierwszy etap badań laboratoryjnych),
- wzrost produkcji biogazu z $0,41 \text{ m}^3/\text{kg VS}$ (próba bez dodatku odpadu) do $0,51 \text{ m}^3/\text{kg VS}$ (przy dawce odpadu 12% w odniesieniu do ładunku VS) dla HRT ~ 27 dni (drugi etap badań laboratoryjnych),
- wzrost produkcji biogazu o prawie 30% z $0,38 \pm 0,04 \text{ m}^3/\text{kg VS}$ do $0,49 \pm 0,06 \text{ m}^3/\text{kg VS}$ (przy dawce odpadu 12,8% w odniesieniu do ładunku VS) dla HRT ~ 26 dni (testy w skali technicznej),
- wzrost produkcji metanu o prawie 30% z $0,25 \pm 0,02 \text{ m}^3/\text{kg VS}$ do $0,32 \pm 0,04 \text{ m}^3/\text{kg VS}$ (przy dawce odpadu 12,8% w odniesieniu do ładunku VS) dla HRT ~ 26 dni,
- sukcesywne zwiększanie dawki zapewnia adaptację mikroorganizmów fermentacyjnych do nowego substratu wprowadzanego do procesu fermentacji; proces przebiega stabilnie, nie zaobserwowano obniżenia pH, VFA utrzymywało się poniżej 100 mg/L przez cały okres badań.

B. Testy strącania CEPT doprowadziły do następujących wyników:

- wzrost produkcji biogazu o ponad 20% z $0,43 \text{ m}^3/\text{kg VS}$ do $0,53 \text{ m}^3/\text{kg VS}$
- wzrost redukcji masy organicznej w komorach fermentacyjnych z 43,6% do 50,6%
- wzrost suchej masy osadu odwodnionego z $21,5 \pm 0,9\%$ do $24,4 \pm 1,7\%$
- zmniejszenie ilości wytwarzanego osadu odwodnionego z 167 Mg/d do 148 Mg/d.
- zmniejszenie stężenia siarkowodoru w biogazie o 40%
- zmniejszenie stężenia P_{rozp} w komorach fermentacyjnych o 52%

C. Termiczno-alkaliczna obróbka wstępna osadu nadmiernego spowodowała:

- wzrost SCOD w osadzie nadmiernym zagęszczonym poddanych obróbce wstępnej z 148 ± 18 mg/L do $13\ 650 \pm 1\ 638$ mg/L i uzyskanie stopnia dezintegracji $DD = 28,7\%$
- wzrost produkcji metanu z $210,4 \pm 10,9$ mL CH₄/gVS (bez obróbki wstępnej, przy HRT = 21,5 d) do $248,8 \pm 13,1$ mL CH₄/gVS i $267,1 \pm 14,3$ mL CH₄/gVS (dla fermentacji osadu po obróbce wstępnej termiczno-alkalicznej oraz czasie fermentacji odpowiednio: HRT = 15 d i HRT = 21,5 d)
- wzrost redukcji masy organicznej w komorach fermentacyjnych z $43,5 \pm 1,94\%$ (bez obróbki wstępnej, HRT = 21,5 d) do $50,9 \pm 1,75\%$ (z obróbką wstępną, HRT = 21,5 d)
- wzrost stężenia N-NH₄ w procesie fermentacji z $1\ 200 \pm 29$ mg/L (bez obróbki wstępnej, przy HRT = 21,5 d) do $1\ 505 \pm 15$ mg/L i $1\ 520 \pm 14$ mg/L (dla osadu po obróbce wstępnej przy HRT 15 d)
- wzrost stężenia Prozp z 505 ± 21 mg/L (bez obróbki wstępnej, przy HRT 21,5 d) do 540 ± 20 mg/L i 548 ± 8 mg/L (przy obróbce wstępnej oraz czasie fermentacji odpowiednio: HRT = 15 d i HRT = 21,5 d)

Wyniki badań niezależnie dla każdej z badanych metod potwierdziły możliwość zwiększenia produkcji biogazu i metanu.

5. Wnioski i znaczenie praktyczne pracy doktorskiej

Przebadane w ramach niniejszej rozprawy doktorskiej metody intensyfikacji produkcji biogazu okazały się skuteczne. Pozwalają na zbudowanie nowego, korzystnego pod względem technologicznym, ekonomicznym i ekologicznym modelu oczyszczalni ścieków komunalnych.

Model ten wprowadza w klasyczny model oczyszczalni dodatkowe procesy (Rys. 2.):

1. Proces kofermentacji odpadów tłuszczowych z przemysłu drobiarskiego: dozowanie odpadów w ilości do 20% w odniesieniu do ładunku VS wprowadzanego do komór fermentacyjnych w mieszaninie osadów.
2. Proces strącania wstępnego CEPT: dozowanie koagulantu PIX (Fe₂(SO₄)₃) w ilości 60 g PIX/L dopływających ścieków.

3. Proces obróbki wstępnej osadu nadmiernego (WAS): dozowanie 30% NaOH w ilości 2 mL/L osadu (16g NaOH/kg TS) z jednoczesnym ogrzewaniem osadu w temp. 60°C przez 1 h.

W oparciu o uzyskane wyniki badań skalkulowano przyrost produkcji energii z biogazu oraz zmniejszenie zapotrzebowania na energię w części biologicznej oczyszczalni o wielkości 1 mln PE (Centralna Oczyszczalnia Ścieków w Koziegłowach). Stwierdzono, że możliwe jest wyprodukowanie dodatkowej energii elektrycznej z biogazu:

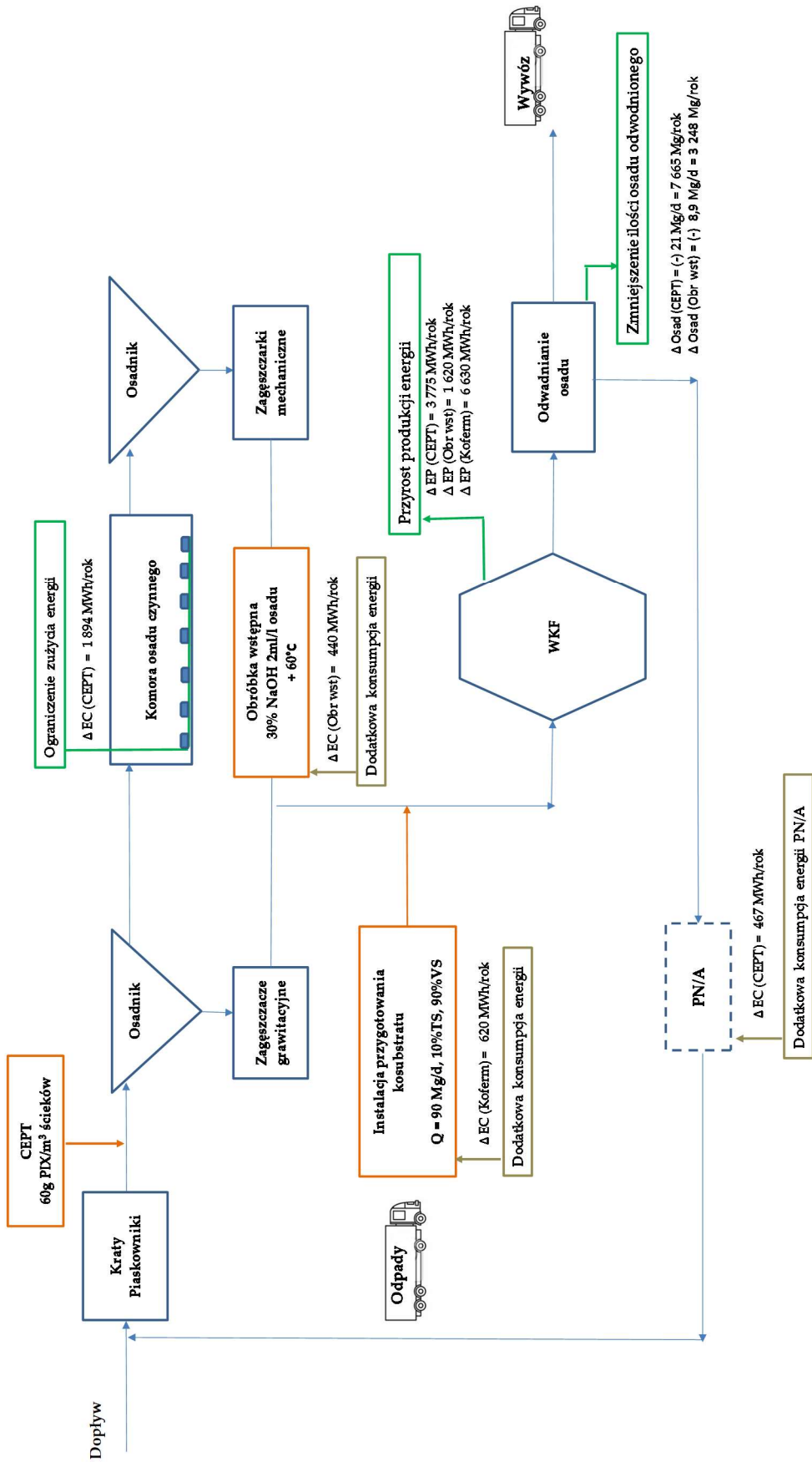
- w ilości $5\,737 \pm 700$ MWh/rok w wyniku zastosowania kofermentacji odpadów tłuszczowych z przemysłu drobiarskiego;
- w ilości $3\,775 \pm 389$ MWh/rok w wyniku zastosowania CEPT
- w ilości $1\,827 \pm 99$ MWh/rok w wyniku zastosowania obróbki wstępnej osadu nadmiernego,
- jak również ograniczenie konsumpcji energii na napowietrzaniu części biologicznej w wyniku zastosowania CEPT (redukcja obciążenia organicznego) o $\sim 1\,900$ MWh/rok.

Dla analizowanej oczyszczalni korzyści energetyczne wynikające z zastosowania badanych metod zestawiono w Tabeli 1. Model efektywnej oczyszczalni ścieków komunalnych przedstawiono graficznie na schemacie (Rys. 2.).

Tab. 1. Wpływ poszczególnych metod intensyfikacji biogazu na przyrost produkcji energii

Metoda intensyfikacji biogazu	Przyrost biogazu	Przyrost metanu	Przyrost produkcji energii	Oszczędność energii	Przyrost zużycia energii	Dodatkowa energia netto	Źródło
	Δ PB	Δ PM	Δ EP	Δ EC	(-) Δ EC	Δ EE	
	m ³ /d	m ³ CH ₄ /d	MWh/rok	MWh/rok	MWh/rok	MWh/rok	
Kofermentacja	7 000	4 550	5 737		620	5 117	Publikacja 1
CEPT	4 426	2 832	3 775	1 894	467	5 202	Publikacja 2
Obróbka wstępna	2 109	1 371	1 827		440	1 387	Publikacja 3
Suma	13 535	8 753	11 339	1 894	1 527	11 706	

Model efektywnej oczyszczalni ścieków



Rys. 2. Model efektywnej energetycznie komunalnej oczyszczalni ścieków

Wdrożenie wszystkich przebadanych w ramach niniejszej pracy procesów do komunalnej oczyszczalni ścieków o wielkości 1 mln PE, dla której wykonano obliczenia, daje możliwość sukcesywnego wzrostu produkcji biogazu, metanu, a w konsekwencji również wzrostu produkcji energii elektrycznej oraz zwiększenia pokrycia zapotrzebowania oczyszczalni na energię.

Podsumowując, energia wyprodukowana w kogeneracji z dodatkowej ilości metanu poprawia bilans energetyczny oczyszczalni. Dzięki każdej z proponowanych metod, produkcja dodatkowej energii zapewnia zwiększenie niezależności energetycznej obiektu i zmniejszenie zapotrzebowania na energię z zewnętrznej sieci energetycznej. Uwzględniając potrzeby własne każdej z instalacji, proponowane procesy (kofermentacja, CEPT, obróbka wstępna) pozwalają łącznie na pokrycie obecnego zapotrzebowania oczyszczalni w energię elektryczną w niemalże 50%. W odniesieniu do obecnego, rzeczywistego pokrycia zapotrzebowania z kogeneracji w wysokości 75%, implementacja proponowanych rozwiązań technologicznych spowoduje zatem nadprodukcję (w stosunku do potrzeb) w wysokości ponad 20%. Dodatkowo zwiększenie redukcji masy organicznej w komorach fermentacyjnych w wyniku zastosowania CEPT i obróbki wstępnej osadu nadmiernego daje w efekcie mniejszą ilość osadu odwodnionego o ~ 12% w przypadku CEPT i ponad 8% w przypadku obróbki wstępnej (Rys. 2). Wszystkie powyższe korzyści wpływają na generowanie wymiernych oszczędności finansowych dla oczyszczalni ścieków.

Samowystarczalność energetyczna oczyszczalni jest tematem często podejmowanym w ostatnich latach. Dążenie do niezależności energetycznej znajduje odzwierciedlenie w licznych badaniach i poszukiwaniu rozwiązań najbardziej efektywnych (Koch i in. 2016; Macintosh i in., 2019; Taboada-Santos i in. 2019). Szczególnie istotne jest, aby proponowane rozwiązania były nie tylko korzystne pod względem energetycznym tj.: produkcji dodatkowej energii czy zmniejszaniu zapotrzebowania na energię, ale również powinny to być rozwiązania przyjazne środowisku i ekonomicznie opłacalne, o krótkim okresie zwrotu inwestycji (Macintosh i in., 2019). Niniejsza rozprawa bardzo dobrze wpisuje się w obecne trendy oraz potwierdza fakt, że wielokierunkowe działania zmierzające do intensyfikacji produkcji biogazu na oczyszczalni ścieków komunalnych są w stanie przynieść wymierne korzyści.

Bibliografia

- A Policy Framework for Climate and Energy in the Period from 2020 to 2030. Communication from the Commission to the European Parliament, the Council, the Economic and Social Committee and the Committee of the Regions, Brussels 22.01.2014
<https://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=COM:2014:0015:FIN:EN:PDF>
(data dostępu 31.01.2021)
- Anzola-Rojas, Md. P, Gonçalves da Fonseca, S., Canedo da Silva, C., Maia de Oliveira, V., Zaiat, M., 2015. The use of the carbon/nitrogen ratio and specific organic loading rate as tools for improving biohydrogen production in fixed-bed reactors. *Biotechnology Reports*, 5, 46-54
<https://doi.org/10.1016/j.btre.2014.10.010>
- Arora, A.S., Nawaz, A., Qyyum, M.A., Ismail, S., Aslam, M., Tawfik, A., Yun, C.M., Lee, M., 2021. Energy saving anammox technology-based nitrogen removal and bioenergy recovery from wastewater: Inhibition mechanisms, state-of-the-art control strategies, and prospects. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 135, 110126
<https://doi.org/10.1016/j.rser.2020.110126>
- Barber, W.P.F., 2016. Thermal hydrolysis for sewage treatment: A critical review. *Water Research* 104, 53-71
<https://doi.org/10.1016/j.watres.2016.07.069>
- Bhatt, S.M., Shilpa, 2014. Lignocellulosic feedstock conversion, inhibitor detoxification and cellulosic hydrolysis – a review. *Biofuels*, 5, 633-649
<https://doi.org/10.1080/17597269.2014.1003702>
- Bolzonella, D., Pavan, P., Battistoni, P., Cecchi, F., 2005. Mesophilic anaerobic digestion of waste activated sludge: influence of the solid retention time in the wastewater treatment process. *Process Biochemistry* 40, 1453-1460
<https://doi.org/10.1016/j.procbio.2004.06.036>
- Cano, R.J., Pérez-Elvira, S., Fdz-Polanco, F., 2015. Energy feasibility study of sludge pretreatments: A review. *Applied Energy*, 149, 176–185
<https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2015.03.132>
- Castro-Molano, L. D. P., Escalante-Hernández, H., Lambis-Benítez, L. E., Marín-Batista, J. D., 2018. Synergistic effects in anaerobic codigestion of chicken manure with industrial wastes. *DYNA*, 85(206), 135–141

<https://doi.org/10.15446/dyna.v85n206.68167>

Chagnon, F., Harleman, D.R.F., 2002. An Introduction to Chemically Enhanced Primary Treatment, Massachusetts Institute of Technology 2002

<https://pdfs.semanticscholar.org/f0bd/980176f5920cf06afd1ec7174dfb37c0cab5.pdf>

(data dostępu 10.05.2020)

Chakraborty, T., Balusani, D., Smith, S., Santoro, D., Walton, J., Nakhla, G., Ray, M.B., 2020. Reusability of recovered iron coagulant from primary municipal sludge and its impact on chemically enhanced primary treatment. Separation and Purification Technology, 231, 115894

<https://doi.org/10.1016/j.seppur.2019.115894>

Chen, H., Yi, H., Li H., Guo X., Xiao B., 2020. Effects of thermal and thermal-alkaline pretreatments on continuous anaerobic sludge digestion: Performance, energy balance and, enhancement mechanism. Renewable Energy, 147 (1), 2409-2416

<https://doi.org/10.1016/j.renene.2019.10.051>

Choi, J-M., Han, S-K., Lee, Ch-Y., 2018. Enhancement of methane production in anaerobic digestion of sewage sludge by thermal hydrolysis pretreatment. Bioresource Technology, 259, 207-213

<https://doi.org/10.1016/j.biortech.2018.02.123>

Climent, M., Ferrer, I., Baeza, MD., Artola, A., Vazquez, F., Font, X., 2007. Effects of thermal and mechanical pretreatments of secondary sludge on biogas production under thermophilic conditions. Chemical Engineering Journal, 133 (1-3), 335-342

<https://doi.org/10.1016/j.cej.2007.02.020>

Colacicco, A., Zacchei, E., 2020. Optimization of energy consumptions of oxidation tanks in urban wastewater treatment plants with solar photovoltaic systems. Journal of Environmental Management, 276, 111353

<https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2020.111353>

Davidsson, Å., Löfstedt, C., la Cour Jansen, J., Gruvberger, C., Aspegren, H., 2008. Codigestion of grease trap sludge and sewage sludge. Waste Management, 28, 986–992

<https://doi.org/10.1016/j.wasman.2007.03.024>

Devlin, D.C., Esteves, S.R.R., Dinsdale, R.M., Guwy A.J., 2011. The effect of acid pretreatment on the anaerobic digestion and dewatering of waste activated sludge. Bioresource Technology, 102, 4076-4082

<https://doi.org/10.1016/j.biortech.2010.12.043>

- Directive (EU) 2018/2001. Directive of the European Parliament and of the Council on the Promotion of the Use of energy from Renewable Sources, 11 December 2018
<https://eur-lex.europa.eu/legal-content/en/TXT/?uri=CELEX:32018L2001>
(data dostępu 31.01. 2021).
- Directive 2008/98/EC. Directive of the European Parliament and of the Council on Waste and Repealing Certain DIRECTIVES, of 19 November 2008.
<https://eur-lex.europa.eu/eli/dir/2008/98/oj> (data dostępu 31.01.2021).
- Donnelly, C., Wouter, G., Andersson, J., Gerten, D., Pisacane, G., Roudier, P., Ludwig, F., 2017. Impacts of climate change on European hydrology at 1.5, 2 and 3 degrees mean global warming above preindustrial level. *Climatic Change*, 143, 13-26
<https://doi.org/10.1007/s10584-017-1971-7>
- Đurđević, D., Balić, D., & Franković, B., 2019. Wastewater heat utilization through heat pumps: The case study of City of Rijeka. *Journal of Cleaner Production*, 231, 207–213
<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.05.235>
- Eduok, S., Ferguson, R., Jefferson, B., Villa, R., Coulon, F., 2017. Aged-engineered nanoparticles effect on sludge anaerobic digestion performance and associated microbial communities. *Science of The Total Environment*, 609, 232–241
<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.07.178>
- Frolund, B., Palmgren, R., Keiding, K., Nielsen, P.H, 1996. Extraction of extracellular polymers from activated sludge using a cation exchange resin. *Water Research*, 30, 1749-1758
[https://doi.org/10.1016/0043-1354\(95\)00323-1](https://doi.org/10.1016/0043-1354(95)00323-1)
- Gil, A., Siles, J.A., Martín, M.A., Chica, A.F., Estévez-Pastor, F.S., Toro-Baptista, E., 2018. Effect of microwave pretreatment on semi-continuous anaerobic digestion of sewage sludge. *Renewable Energy* 115, 917-925
<https://doi.org/10.1016/j.renene.2017.07.112>
- Gonzalez, A., Hendriks, A.T.W.M., van Lier, J.B., de Kreuk, M., 2018. Pre-treatments to enhance the biodegradability of waste activated sludge: Elucidating the rate limiting step. *Biotechnology Advances*, 36-5, 1434-1469
<https://doi.org/10.1016/j.biotechadv.2018.06.001>
- Grosser, A., Neczaj, E., 2016. Enhancement of biogas production from sewage sludge by addition of grease trap sludge. *Energy Conversion and Management*, 125, 301–308
<https://doi.org/10.1016/j.enconman.2016.05.089>.

- Guven, H., Dereli, R.K., Ozgun, H., Ersahin, M.E., Ozturk, I., 2019. Towards sustainable and energy efficient municipal wastewater treatment by up-concentration of organics. *Progress in Energy and Combustion Science*, 70, 145–168
<https://doi.org/10.1016/j.pecs.2018.10.002>
- Han, X., Zhang, S., Yang, S., Zhang, L., Peng, Y., 2020. Full-scale partial nitrification/anammox (PN/A) process for treating sludge dewatering liquor from anaerobic digestion after thermal hydrolysis. *Bioresource Technology*, 297, 122380
<https://doi.org/10.1016/j.biortech.2019.122380>
- Haydar, S., Aziz, J.A., 2009. Characterization and treatability studies of tannery wastewater using chemically enhanced primary treatment (CEPT)—A case study of Saddiq Leather Works. *Journal of Hazardous Materials*, 163, 1076–1083
<https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2008.07.074>
- Jenicek, P., Bartacek, J., Kutil, J., Zabranska, J., Dohanyos, M., 2012. Potentials and limits of anaerobic digestion of sewage sludge: Energy self-sufficient municipal wastewater treatment plant? *Water Science and Technology*, 66, 1277-1281
<https://doi.org/10.2166/wst.2012.317>
- Ju, F., Wang, Y., Lau, F.T.K., Fung, W.C., Huang, D., Xia, Y., Zhang, T., 2016. Anaerobic digestion of chemically enhanced primary treatment (CEPT) sludge and the microbial community structure. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 100, 8975–8982
<https://doi.org/10.1007/s00253-016-7730-2>
- Kacprzak, M., Neczaj, E., Fijałkowski, K., Grobelak, A., Grosser, A., Worwag, M., Rorat, A., Brattebo, H., Almås, Å., Singh, B.R., 2017. Sewage sludge disposal strategies for sustainable development. *Environmental Research*, 156, 39–46
<https://doi.org/10.1016/j.envres.2017.03.010>
- Kavitha, S., Rajesh, B.J., Subitha, G., Ushani, U., Tae, Y.I., 2016. Impact of thermo-chemo-sonic pretreatment in solubilizing waste activated sludge for biogas production: Energetic analysis and economic assessment. *Bioresource Technology*, 219, 479-486
<https://doi.org/10.1016/j.biortech.2016.07.115>
- Kavitha, S., Subbulakshmi, P., Rajesh, B.J., Gobi, M., Tae, Y.I., 2017. Enhancement of biogas production from microalgal biomass through cellulolytic bacterial pretreatment. *Bioresource Technology*, 233, 34-43
<https://doi.org/10.1016/j.biortech.2017.02.081>

- Koch, K., Helmreich, B., Drewes, J.E., 2015. Co-digestion of food waste in municipal wastewater treatment plants: effect of different mixtures on methane yield and hydrolysis rate constant. *Applied Energy*, 137, 250–255
<https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2014.10.025>
- Koch, K., Plabst, M., Schmidt, A., Helmreich, B., Drewes, J.E., 2016. Co-digestion of food waste in a municipal wastewater treatment plant: comparison of batch tests and full-scale experiences. *Waste Management*, 47, Part A, 28-33
<http://dx.doi.org/10.1016/j.wasman.2015.04.022>
- Kooijman, G., De Kreuk, M.K., Van Lier, J.B., 2017. Influence of chemically enhanced primary treatment on anaerobic digestion and dewaterability of waste sludge. *Water Science and Technology*, 76, 1629–1639
<https://doi.org/10.2166/wst.2017.314>
- Lackner, S., Gilbert, E.M., Vlaeminck, S.E., Joss, A., Horn, H., van Loosdrecht, M.C., 2014. Full-scale partial nitrification/anammox experiences—An application survey. *Water Research*, 55, 292–303
<https://doi.org/10.1016/j.watres.2014.02.032>
- Lawal, S., Lennard, C., Hewitson, B., 2019. Response of southern African vegetation to climate change at 1.5 and 2.0° global warming above the pre-industrial level. *Climate Services*, 16, 100134
<https://doi.org/10.1016/j.cliser.2019.100134>
- Lemaire, R., Marcelino, M., Yuan, Z., 2008. Achieving the nitrite pathway using aeration phase length control and step-feed in an SBR removing nutrients from abattoir wastewater. *Biotechnology and Bioengineering*, 100, 1228–1236
<https://doi.org/10.1002/bit.21844>
- Li, H., Jin, Y., Mahar, R., Wang, Z., Nie, Y., 2008. Effects and model of alkaline waste activated sludge treatment. *Bioresource Technology*, 99, 5140-5144
<https://doi.org/10.1016/j.biortech.2007.09.019>
- Li, H., Li, Ch., Zou, S., 2012. Optimized alkaline pretreatment of sludge before anaerobic digestion. *Bioresource Technology*, 123, 189-194
<https://doi.org/10.1016/j.biortech.2012.08.017>
- Lin, L., Li, R.-H., Li, Y., Xu, J., Li, X.-Y., 2017. Recovery of organic carbon and phosphorus from wastewater by Fe-enhanced primary sedimentation and sludge fermentation. *Process Biochemistry*, 54, 135–139
<https://doi.org/10.1016/j.procbio.2016.12.016>

- Liu, X., Xu, Q., Wang, D., Yang, Q., Wu, Y., Li, Y., Fu, Q., Yang, F., Liu, Y., Ni, B.-J., Wang, Q., Li, X., 2019. Thermal-alkaline pretreatment of polyacrylamide flocculated waste activated sludge: Process optimization and effects on anaerobic digestion and polyacrylamide degradation. *Bioresource Technology*, 281, 158-167
<https://doi.org/10.1016/j.biortech.2019.02.095>
- Lizama, A.C., Figueiras, C.C., Zapeda, A., Ruiz-Espinoza, J.E., 2018. Effect of ultrasonic pretreatment on the semicontinuous anaerobic digestion of waste activated sludge with increasing loading rates. *International Biodeterioration & Biodegradation*, 130, 32-39
<https://doi.org/10.1016/j.ibiod.2018.03.013>
- Longo, S., D'Antoni, B.M., Bongards, M., Chaparro, A., Cronrath, A., Fatone, F., Lema, J.M., Mauricio-Iglesias, M., Soares, A., Hospido, 2016. A. Monitoring and diagnosis of energy consumption in wastewater treatment plants. A state of the art and pro-posals for improvement. *Applied Energy*, 179, 1251–1268
<https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2016.07.043>
- Maktabifard, M.; Zaborowska, E.; Makinia, J., 2018. Achieving energy neutrality in wastewater treatment plants through energy savings and enhancing renewable energy production. *Reviews in Environmental Science and Bio/Technology*, 17, 655–689
<https://doi.org/10.1007/s11157-018-9478-x>
- Maktabifard, M., Zaborowska, E., Makinia, J., 2020. Energy neutrality versus carbon footprint minimization in municipal wastewater treatment plants. *Bioresource Technology*, 300, 122647
<https://doi.org/10.1016/j.biortech.2019.122647>
- Masłoń, A., Czarnota, J., Szaja, A., Szulżyk-Cieplak, J., Łagód, G., 2020. The Enhancement of Energy Efficiency in a Wastewater Treatment Plant through Sustainable Biogas Use: Case Study from Poland. *Energies*, 13, 6056
<https://doi.org/10.3390/en13226056>
- Mata-Alvarez, J., Dosta, J., Romero-Güiza, M.S., Fonoll, X., Peces, M., Astals S., 2014. A critical review on anaerobic co-digestion achievements between 2010 and 2013. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 36, 412-427
<https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.04.039>
- McCarty, P.L., Bae, J., Kim, J., 2011. Domestic Wastewater Treatment as a Net Energy Producer—Can This be Achieved? *Environmental Science and Technology*, 45, 7100–7106
<https://doi.org/10.1021/es2014264>

- Macintosh, C., Astals, S., Sembera, C., Ertl, A., Drewes, J.E., Jensen, P.D., Koch, K., 2019. Successful strategies for increasing energy self-sufficiency at Grüneck wastewater treatment plant in Germany by food waste co-digestion and improved aeration. *Applied Energy*, 242, 15, 797-808
<https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2019.03.126>
- Metcalf & Eddy Inc. *Wastewater engineering: treatment, disposal, reuse*, Int. ed. New York: McGraw-Hill; 1991
- Nag, R., Auer, A., Markey, B.K., 2019. Anaerobic digestion of agricultural manure and biomass – critical indicators of risk and knowledge gaps. *Science of the Total Environment*, 690, 460–479
<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.06.512>
- Nah, I.W., Kang, Y.W., Hwang, K.Y., Song, W.K., 2000. Mechanical pretreatment of waste activated sludge for anaerobic digestion process. *Water Research*, 34, 2362-2368
[https://doi.org/10.1016/S0043-1354\(99\)00361-9](https://doi.org/10.1016/S0043-1354(99)00361-9)
- Nazari, L., Yuan, Z., Santoro, D., Sarathy, S., Ho, D., Batstone, D.J., Xu, Ch., Ray, M.B., 2017. Low-temperature thermal pre-treatment of municipal wastewater sludge: Process optimization and effects on solubilization and anaerobic degradation, *Water Research*, 113, 111-123
<https://doi.org/10.1016/j.watres.2016.11.055>
- Neyens, E., Baeyens, J., 2003. A review of thermal sludge pre-treatment processes to improve dewaterability. *Journal of Hazardous Materials*, 98, 51-67
[https://doi.org/10.1016/S0304-3894\(02\)00320-5](https://doi.org/10.1016/S0304-3894(02)00320-5)
- Nguyen, K., Kumar Chaudhary, D., Hari Dahal, R., Hoang Trinh, N., Kim, J., Chang, S. W., Hong, Y., Duc La, D., Nguyen, X.C., Hao Nogo, H., Chung, W.J, Nguyen, D. D., 2021. Review on pretreatment techniques to improve anaerobic digestion of sewage sludge. *Fuel*, 285, 119105
<https://doi.org/10.1016/j.fuel.2020.119105>
- Pilli, S., Bhunia, P., Yan, S., LeBlanc, R.J., Tyagi, R.D., Surampalli, R.Y., 2011. Ultrasonic pretreatment of sludge: A review. *Ultrasonics Sonochemistry* 18, 1-18.
<https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2010.02.014>
- Pilli, S., Yan, S., Tyagi, R. D., Surampalli, R. Y., 2014. Thermal Pretreatment of Sewage Sludge to Enhance Anaerobic Digestion: A Review. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, 45(6), 669–702

<https://doi.org/10.1080/10643389.2013.87652>

Remy, C., Boulestreau, M., Lesjean, B., 2014. Proof of concept for a new energy-positive wastewater treatment scheme. *Water Science and Technology*, 70, 1709–1716

<https://doi.org/10.2166/wst.2014.436>

Rodrigues, R.P., Rodrigues, D.P., Klepacz-Smolka, A., Martins, R.C., Quina, M.J., 2019. Comparative analysis of methods and models for predicting biochemical methane potential of various organic substrates. *Science of the Total Environment*, 649, 1599–1608

<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.08.270>

Ruffino, B., Campo, G., Cerutti, A., Zanetti, M., Lorenzi, E., Scibilia, G., & Genon, G. (2016). Preliminary Technical and Economic Analysis of Alkali and Low Temperature Thermo-alkali Pretreatments for the Anaerobic Digestion of Waste Activated Sludge. *Waste and Biomass Valorization*, 7(4), 667–675

<http://dx.doi.org/10.1007/s12649-016-9537-x>

Sheng, G-P., Yu, H-Q., Li, X-Y., 2010. Extracellular polymeric substances (EPS) of microbial aggregates in biological wastewater treatment systems: A review. *Biotechnology Advances*, 28-6, 882-894

Taboada-Santos, A., Lema, J.M., Carballa, M., 2019. Energetic and economic assessment of sludge thermal hydrolysis in novel wastewater treatment plant configurations. *Waste Management*, 92, 30–38

<https://doi.org/10.1016/j.wasman.2019.05.003>

Taboada-Santos, A., Rivadulla, E., Paredes, L., Carballa, M., Romalde, J., Lema, J.M., 2020. Comprehensive comparison of chemically enhanced primary treatment and high-rate activated sludge in novel wastewater treatment plant configurations. *Water Research*, 169, 115258

<https://doi.org/10.1016/j.watres.2019.115258>

Tandukar, M., Pavlostathis, S.G., 2015. Co-digestion of municipal sludge and external organic wastes for enhanced biogas production under realistic plant constraints. *Water Research*, 87, 432–445

<https://doi.org/10.1016/j.watres.2015.04.031>

Wang, H., Li, F., Keller, A.A., Xu, R., 2009. Chemically enhanced primary treatment (CEPT) for removal of carbon and nutrients from municipal wastewater treatment plants: A case study of Shanghai. *Water Science and Technology*, 60, 1803–1809

<https://doi.org/10.2166/wst.2009.547>

- Xiao, B., Tang, X., Yi, H., Dong, L., Han, Y., Liu, J., 2020. Comparison of two advanced anaerobic digestions of sewage sludge with high-temperature thermal pretreatment and low-temperature thermal-alkaline pretreatment. *Bioresource Technology*, 304, 122979
<https://doi.org/10.1016/j.biortech.2020.122979>
- Yalcinkaya, S., Malina, J.F., 2015. Anaerobic co-digestion of municipal wastewater sludge and un-dewatered grease trap waste for assessing direct feed of grease trap waste in municipal digesters. *International Biodeterioration & Biodegradation*, 104, 490–497
<https://doi.org/10.1016/j.ibiod.2015.08.007>
- Ye, Y., Ngo, H.H., Guo, W., Liu, Y., Chang, S.W., Nguyen, D.D., Liang, H., Wang, J., 2018. A critical review on ammonium recovery from wastewater for sustainable wastewater management. *Bioresource Technology*, 268, 749–758
<https://doi.org/10.1016/j.biortech.2018.07.111>
- Zaborowska, E., Czerwionka, K., Makinia, J., 2016. Strategies for achieving energy neutrality in biological nutrient removal systems—A case study of the Slupsk WWTP (northern Poland). *Water Science and Technology*, 75, 727–740
<https://doi.org/10.2166/wst.2016.564>.
- Zhen, G., Lu, X., Kato, H., Zhao, Y., Li, Y-Y., 2017. Overview of pretreatment strategies for enhancing sewage sludge disintegration and subsequent anaerobic digestion: Current advances, full-scale application and future perspectives. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 69, 559-577
<https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.11.187>

Załącznik: Aktywność naukowa

Konferencje:

1. Magdalena Budyh-Górzna, Piotr Oleśkowicz-Popiel, Łukasz Jaroszyński. Low cost pretreatment of waste activated sludge for increased biogas production at the MWWTP. LET2019- The 16th IWA Leading Edge Conference on Water and Wastewater Technologies, Edinburgh, czerwiec 2019
1. Magdalena Budyh-Górzna, Piotr Oleśkowicz-Popiel. Resource recovery at the WWTP. Inter Baltic Biogas Arena (IBBA), Workshop Poznań 2017
2. Magdalena Budyh-Górzna. Współpraca w projekcie: Intensyfikacja produkcji biogazu w Centralnej Oczyszczalni Ścieków w Poznaniu poprzez wprowadzenie współfermentacji. III Forum Gospodarcze Politechniki Poznańskiej, marzec 2016
3. Beata Szatkowska, Łukasz Jaroszyński, Bjarne Paulsrud, Magdalena Budyh-Górzna, Krzysztof Szczepecki, Tymoteusz Jaroszyński. Organic coagulants for increased biogas production and reduced Energy consumption at WWTPs. 9th European Wastewater Management Conference, Manchester, październik 2015
4. Magdalena Budyh-Górzna, Piotr Oleśkowicz-Popiel, Marcin Smoczyński. Enhancement of biogas production at municipal WWTP: experience from laboratory and full-scale trials. 7th European Meeting on Chemical Industry and Environment, Tarragona, czerwiec 2015

Udział w projektach grantowych:

1. „Shortcut Nitrification In activated sludge process Treating domestic wastewater - key technology for low-carbon and clean wastewater treatment” (SNIT)

Nr projektu: NOR/POLNOR/SNIT/0033/2019

Kierownik projektu: dr inż.. Kamil Janiak

Projekt realizowany przez Konsorcjum: Politechnika Wrocławska, Politechnika Śląska, MPWiK Wrocław, Aquanet S.A., COWI

Rola w projekcie: Koncepcja, plan, harmonogram badań, wykonanie badań i analiza wyników dla WP2

2. " Integrated system of SIMultaneous Recovery of Energy, organics and Nutrients and generation of valuable products from municipal wastewater" (SIREN)

Nr projektu: NOR/POLNOR/SIREN/0069/2019

Kierownik projektu: dr hab. inż. Zbysław Dymaczewski, prof. PP

Projekt realizowany przez Konsorcjum: Politechnika Poznańska, Politechnika Gdańska, Politechnika Śląska, Uniwersytet Warmińsko-Mazurski, Aquanet S.A., Vestfjordens Avløpsselskap, Norwegian Institute for Water Research

Rola w projekcie: Koncepcja, plan, harmonogram badań, wykonanie badań i analiza wyników dla WP1

3. „RESilient WATER Innovation for Smart Economy” (REWAISE)

Nr projektu: 869496

Koordynator projektu: Aqualia (Hiszpania)

Projekt realizowany przez Konsorcjum: 24 partnerów w tym Aquanet S.A. i Politechnika Poznańska

Rola w projekcie: Koncepcja, plan, harmonogram badań, udział w realizacji prac badawczych w ramach WP4

4. "Integrated technology for improved Energy balance and reduced greenhouse gas emissions at municipal wastewater treatment plants"

Nr projektu: POL-NOR/197025/37/2013

Kierownik projektu: prof. dr hab. inż. Piotr Oleśkowicz-Popiel (WP6)

Rola w projekcie: Udział w realizacji WP6