

dr hab.inż. Monika Żubrowska-Sudoł, prof. uczelni  
Politechnika Warszawska  
Wydział Instalacji Budowlanych, Hydrotechniki  
i Inżynierii Środowiska

Warszawa, 06 września 2024 r.

## **RECENZJA**

rozprawy doktorskiej mgr. inż. Adama Sztefka

**pt. „Wpływ ścieków surowych z ubojni na fermentację metanową w reaktorze beztlenowym  
wspomagany flotacją biogazem”**

Promotor: prof. dr hab. inż. Joanna Surmacz-Górska

Promotor pomocniczy: dr inż. Grzegorz Cema

### **1. Przedmiot recenzji i podstawa jej opracowania**

Recenzja dotyczy rozprawy doktorskiej o charakterze wdrożeniowym pt. „Wpływ ścieków surowych z ubojni na fermentację metanową w reaktorze beztlenowym wspomagany flotacją biogazem”, przygotowanej przez mgr. inż. Adama Sztefka. Praca została wykonana pod promotorską opieką prof. dr hab. inż. Joanny Surmacz-Górskiej oraz dr inż. Grzegorza Cemy w Katedrze Biotechnologii Środowiskowej na Wydziale Inżynierii Środowiska i Energetyki Politechniki Śląskiej.

Recenzję opracowano na podstawie umowy o dzieło zawartej w dniu 5 lipca 2024 roku pomiędzy Politechniką Śląską reprezentowaną przez prof. dr hab. inż. Mariusza Dudziaka a opiniodawcą.

### **2. Charakterystyka i ocena rozprawy**

#### **2.1. Ocena zasadności podjęcia tematu**

Dysertacja znajduje się w obszarze prac i badań naukowych nad biologicznymi metodami oczyszczania ścieków przemysłowych, a w szczególności dotyczy metod beztlenowych. Oczyszczanie ścieków w warunkach beztlenowych dedykowane jest dla ścieków charakteryzujących się wysokim stężeniem związków organicznych. W odróżnieniu od metod tlenowych pozwala na wyeliminowanie energochłonnego napowietrzania oraz na ograniczenie ilości produkowanych osadów. Jego istotną zaletą jest również produkcja odnawialnej energii w formie biogazu, co predysponuje przedmiotową

metodę oczyszczania ścieków jako spełniającą wyzwania stojące przed przedsiębiorstwami wobec wdrażania zasad gospodarki o obiegu zamkniętym. Ponieważ jednym z czynników limitujących efektywność fermentacji metanowej jest skuteczność procesu hydrolizy, w wyniku którego wielkocząsteczkowe związki organiczne przekształcane są do związków prostszych, uzasadnione jest prowadzenie prac badawczych nad przebiegiem i intensyfikacją tego procesu. Takiego zadania podjął się w badaniach własnych Doktorant. Swoimi zainteresowaniami badawczymi objął ścieki z ubojni. Warto w tym miejscu zaznaczyć, że niniejszy temat nie jest obszernie przeanalizowany w literaturze naukowej. Wymaga również badawczych prac przemysłowych oraz rozwojowych, których efektem byłoby opracowanie, zarówno ekonomicznych jak i zrównoważonych, rozwiązań technologicznych zapewniających wysoką efektywność procesu fermentacji metanowej. Jest to tym bardziej istotne, że w ostatnich latach odnotowano znaczący wzrost produkcji mięsa, a co za tym idzie zwiększyła się ilość ścieków produkowanych przez niniejszy sektor gospodarczy.

Biorąc pod uwagę przytoczone powyżej fakty stwierdzam, że temat rozprawy spełnia kryterium obiektywnej ważności, jako mający znaczenie dla rozwoju technologii beztlenowego oczyszczania ścieków pochodzących z ubojni, jak i w szerszym zakresie całej biotechnologii. Stanowi również istotny element działań zmierzających do opracowania zrównoważonych rozwiązań w obszarze oczyszczania ścieków przemysłowych. Temat spełnia także kryterium aktualności określone zainteresowaniem specjalistów z uwagi na ciągłe poszukiwanie i doskonalenie metod beztlenowego oczyszczania ścieków, które równolegle z usunięciem ładunku związków organicznych prowadzą do wytwarzania energii odnawialnej. Na spełnienie tego kryterium wskazuje również aktualny trend polegający na poszukiwaniu i wdrażaniu metod, które pozwolą na uniezależnienie krajowych gospodarek od paliw kopalnych. Wybór tematyki rozprawy uznać należy zatem za trafny i wychodzący naprzeciw oczekiwaniom kierowanym pod adresem środowisk naukowych.

## **2.2. Charakterystyka rozprawy**

Praca obejmuje 119 stron tekstu, zawiera 70 tabel oraz 57 rysunków. Uzupełnienie rozprawy stanowi wykaz wykorzystanych w pracy symboli, streszczenie w języku polskim oraz wykaz literatury obejmujący 112 pozycji. Wykorzystane pozycje bibliograficzne odpowiadają tematyce dysertacji.

Praca została podzielona na 7 głównych rozdziałów. Rozdział 1. jest wprowadzeniem do zagadnienia będącego przedmiotem dysertacji, stanowiąc jednocześnie przekonujące uzasadnienie podjętej tematyki badawczej. Jego podrozdziały tworzą logiczną całość, przedstawiając w pierwszej kolejności horyzontalne aspekty związane z przemysłem mięsnym (Rozdz. 1.1), takie jak jego rozwój i związany z nim wpływ na środowisko naturalne, przechodząc następnie do charakterystyki ścieków powstających

w analizowanym sektorze (Rozdz. 1.2) oraz światowych regulacji prawnych dotyczących wymagań stawianych ściekom odprowadzanym do środowiska (Rozdz.1.3) i kończąc na omówieniu aspektów związanych z oczyszczaniem ścieków powstających w przemyśle mięsnym (Rozdz. 1.4). Najbardziej rozbudowanym elementem tej części pracy jest podrozdział 1.4. Zawiera on wnikliwe omówienie poszczególnych elementów schematu oczyszczalni ścieków, który najczęściej wykorzystywany jest w przypadku ścieków z zakładów mięsnych. Autor w szczególności opisał: urządzenia do mechanicznego oczyszczania ścieków, zbiorniki retencyjne, procesy i urządzenia fizykochemicznego oczyszczania ścieków oraz systemy biologiczne w podziale na metody tlenowe i beztlenowe. Biorąc pod uwagę tematykę opiniowanej rozprawy doktorskiej należy szczególnie podkreślić przegląd literatury dotyczący sposobów wstępnego przygotowania ścieków przed wprowadzeniem ich do komór fermentacyjnych. Autor zaprezentował zasadę poszczególnych metod wstępnej obróbki, przykłady ilustrujące możliwości intensyfikacji produkcji biogazu przy ich wykorzystaniu, a w konkluzji wskazał ich wady i zalety.

Rozdział 2. poświęcono celowi i zakresowi pracy, precyzując główny cel przeprowadzonych badań jako *„opracowanie metodyki skutecznej i szybkiej, a także zasadnej ekonomicznie hydrolizy ścieków z ubojni, która będzie możliwa do zastosowania w skali technicznej”* i formułując trzy następujące cele cząstkowe: 1) *„opracowanie metod analizy ścieków z ubojni”*, 2) *„określenie wpływu temperatury i odczynu ścieków na efekty hydrolizy ścieków z ubojni”*, 3) *„wybór najlepszej metody hydrolizy ścieków z ubojni poprzez przetestowanie dwóch najbardziej skutecznych wariantów hydrolizy przy optymalnym obciążeniu reaktora beztlenowego pracującego w sposób ciągły w skali laboratoryjnej”*. Sprecyzowanie celu badawczego poprzedzono uzasadnieniem podjęcia tematu, stanowiącym syntezę zagadnień zaprezentowanych we wprowadzeniu.

W rozdziale 3. Autor bardzo szczegółowo i czytelnie opisał metodykę realizacji własnych eksperymentów. Opis zawiera wszystkie elementy, które pozwoliłyby na powtórzenie przedmiotowych eksperymentów przez inne zespoły badawcze. Zaliczyć do nich należy: sprecyzowanie miejsca poboru prób, szczegółowe omówienie procedury wszystkich eksperymentów ze wskazaniem wykorzystywanej aparatury/sprzętu oraz wyjaśnieniem założeń przyjętych podczas ich realizacji, przedstawienie zastosowanych metodyk analitycznych w odniesieniu do poszczególnych wskaźników fizykochemicznych. Dopełnieniem opisu jest materiał ilustrujący stanowiska badawcze lub/i ich elementy.

Rozdział 4. to omówienie uzyskanych wyników. Autor rozpoczyna tę część pracy od przedstawienia charakterystyki ścieków wykorzystanych w eksperymentach (Rozdz. 4.1). Kolejny podrozdział (Rozdz. 4.2) prezentuje wyniki szeregu doświadczeń, których celem było opracowanie metodyki pomiaru stężenia związków rozpuszczonych, która była wykorzystywana w dalszych etapach badawczych do

oceny skuteczności procesów wstępnej hydrolizy oraz fermentacji metanowej. Porównano metody polegające na sączeniu próby przez sączonek o średnicy porów  $0,22\ \mu\text{m}$  oraz wstępnej koagulacji analizowanej próby ścieków. Analizowano zmiany następujących wskaźników: ChZT, ogólny węgiel organiczny, azot ogólny oraz fosfor ogólny. Na podstawie uzyskanych wyników do dalszych badań wybrano metodę pomiaru związków rozpuszczonych zakładającą wstępną koagulację analizowanej próby ścieków. Rozdział 4.3 poświęcono omówieniu wyników eksperymentu, którego celem było sprawdzenie, jaki wpływ na „świeże” ścieki powstające w ubojni ma retencja ścieków. Autor wykazał, że „wpływ wytworzonego zespołu mikroorganizmów pozostającego w ściekach w zbiorniku retencyjnym wraz z nie wywiezionymi do końca ściekami występuje, ale dla dalszego oczyszczania ścieków jest on niewielki i może zostać pominięty”. Przeprowadzony eksperyment pozwolił również na wybór miejsca poboru ścieków do dalszych badań. Istotnym elementem omówienia wyników jest rozdział 4.5. Zawiera on szczegółową analizę przebiegu i efektywności procesu hydrolizy w zależności od temperatury ( $22^{\circ}\text{C}$  i  $35^{\circ}\text{C}$ ), odczynu (pH: 3, 5, 7-8, 9 i 11) i czasu trwania tego procesu (1 – 5 dób) oraz ocenę wpływu wybranych wariantów wstępnej hydrolizy na potencjał metanowy ścieków z ubojni. W pierwszym z wymienionych przypadków podczas 5 dniowego procesu hydrolizy kontrolowano zmiany wartości ChZT, stężenia azotu ogólnego (Nog), azotu amonowego oraz lotnych kwasów tłuszczowych (LKT), uwzględniając przy tym rozpuszczoną frakcję ChZT i Nog. Wyniki tak zaplanowanych doświadczeń dały podstawę do wyboru następujących wariantów hydrolizy:  $22^{\circ}\text{C}$  i pH 9;  $35^{\circ}\text{C}$  i pH 7-8;  $35^{\circ}\text{C}$  i pH 9, dla których po 1, 2, 3 i 5 dniu trwania tego procesu badano potencjał metanowy przedmiotowych ścieków. Uzyskane wyniki odniesiono do próby hydrolizowanej w temperaturze  $22^{\circ}\text{C}$  i pH 7-8 (próba kontrolna). Spostrzeżenia poczynione podczas testów porcjowych pozwoliły na wybór warunków prowadzenia procesu hydrolizy w kolejnym etapie badawczym, w którym proces fermentacji metanowej prowadzono jako hodowlę ciągłą. W rozdziale 4.6 w wyczerpujący sposób omówiono przebieg procesu fermentacji dla prób poddanych wstępnej hydrolizie w następujących warunkach: 1)  $35^{\circ}\text{C}$ , czas trwania: 5 dni, 2)  $35^{\circ}\text{C}$  i pH 9, czas trwania: 3 dni. Uzyskiwane efekty odniesiono do wariantu, w którym ścieki wprowadzane do reaktora beztlenowego nie były uprzednio poddawane wstępnej hydrolizie. Na ich podstawie stwierdzono brak istotnej intensyfikacji usuwania zanieczyszczeń organicznych (wyrażonych ChZT) w wyniku zastosowania wstępnej hydrolizy. Odnotowano również negatywny wpływ podwyższonego pH na efektywność metanogenezy. Dla wybranych próbek ścieków z ubojni wykonano analizę metagenomiczną. Omówieniu składu mikrobiologicznego biomasy biorącej udział w procesie hydrolizy oraz fermentacji metanowej poświęcono rozdział 4.7. Przedmiotowe wyniki przedstawiono na poziomie taksonomicznym typu.

Pracę kończą, wynikające bezpośrednio z omówienia i dyskusji wyników, syntetyczne wnioski (Rozdział 5), a także zaproponowane przez Autora perspektywy dalszych badań (Rozdział 6). W ostatnim z wymienionych rozdziałów podkreślono, że doktorat wdrożeniowy realizowany w Politechnice Śląskiej był dla firmy EMI istotnym krokiem w kierunku budowania efektywnej współpracy pomiędzy przemysłem i nauką. Na podstawie przeprowadzonych badań stwierdzono, iż wdrożenie przez firmę beztlenowej metody oczyszczania ścieków z ubojni będzie się skupiało na jedno stopniowym reaktorze beztlenowym, a wyniki odnoszące się do wykorzystania procesu wstępnej hydrolizy będą wykorzystywane do dalszego rozwoju beztlenowych technologii oczyszczania ścieków.

### 2.3. Pytania i uwagi do pracy

Przedstawiona do recenzji praca została napisana starannie, ze stosunkowo niewielką liczbą błędów edytorskich. Rozprawę cechuje czytelny sposób prezentowania wyników i wyciąganych na ich podstawie wniosków. Wnikliwa analiza przedłożonej do oceny pracy dała podstawę do sformułowania niżej zestawionych uwag i komentarzy:

1. Str. 4; Tabelę 5 zatytułowano „Parametry oczyszczonych ścieków odprowadzanych do kanalizacji na świecie”, natomiast tytuł rozdziału wskazuje, że Autor prezentuje wymagania stawiane ściekom odprowadzanym do odbiornika.
2. Str. 15; W pierwszym zacytowanym przez Autora przykładzie zabrakło informacji z jakim substratem współfermentowane były odpady pochodzenia zwierzęcego.
3. Str. 18; W opisie chemicznych metod wstępnej obróbki ścieków zabrakło kilku uściślających informacji: „Dodatek 0,3 g NaOH/g organicznej suchej masy ....” - warto byłoby sprecyzować o jaki substrat chodzi; „Badania osadu nadmiernego...() mieszanego z obornikiem bydlęcym w proporcji 50 na 50 %...”- do czego odnosiła się przytoczona proporcja (do objętości?); „W doświadczeniu z osadem czynnym nadmierny dodatek ługu sodowego...” – sugerowałabym raczej podanie wartości niż używanie sformułowania „nadmierny dodatek”.
4. Str. 19; Opis zmian wartości w zacytowanym fragmencie jest niejasny: „Badania rozpuszczonego ChZT oraz rozpuszczonego węgla organicznego całkowitego wykazały natomiast wzrost odpowiednio z wartości 100 mg/dm<sup>3</sup> do 210 mg/dm<sup>3</sup> do wartości 760 mg/dm<sup>3</sup> do 947 mg/dm<sup>3</sup> oraz 80 mg/dm<sup>3</sup> do 130 mg/dm<sup>3</sup> do wartości 560 mg/dm<sup>3</sup> do 920 mg/dm<sup>3</sup>.”
5. Str. 21; W rozprawie doktorskiej staramy się unikać potocznych sformułowań, takich jak „słaby osad czynny”.
6. W rozdziale 1.4.4.2 Autor przedstawił między innymi zalety i wady poszczególnych sposobów wstępnej obróbki ścieków przed ich wprowadzeniem do komór beztlenowych. Odnosząc się do tych zagadnień zabrakło mi przykładów wskazujących na możliwość zmniejszenia ilości

- produkowanego biogazu przy zastosowaniu metod mechanicznych. Przedstawienie tego wątku dawałoby pełny obraz wpływu różnych metod wstępnej obróbki wsadu kierowanego do komór beztlenowych na przebieg i efektywność procesu fermentacji metanowej.
7. Str. 32; Opis metodyki przeprowadzania procesu koagulacji warto byłoby uzupełnić o informacje dotyczące czasu trwania szybkiego oraz wolnego mieszania.
  8. Str. 36; Wydaje się, że Autor błędnie podał temperaturę prowadzenia hydrolizy, cyt. „około 20°C”. W dalszej części pracy wymieniana jest wartość 22°C.
  9. Str. 46; W tabelach 14 i 15 nie określono rodzaju wartości zamieszczonych w kolumnie drugiej. Przypuszczalnie są to wartości średnie.
  10. Autor w rozprawie doktorskiej podjął się między innymi porównania dwóch metod określania stężenia związków organicznych w ściekach. Jedną z nich polegała na sączeniu przez sączonek o średnicy porów 0,22  $\mu\text{m}$ . Co skłoniło Autora do wyboru tego typu sączoneka? W celu określenia związków rozpuszczonych prowadzi się sączenie przez sączonek o średnicy porów 0,1  $\mu\text{m}$ . Niektóre grupy badawcze wykorzystują sączoneki o średnicy porów 0,45  $\mu\text{m}$ , ale w tym przypadku w filtracji oprócz związków rozpuszczonych obecne są również „drobne” związki koloidalne.
  11. Analizując wyniki przedstawione w tabelach 35, 39, 42 i 45 daje się zauważyć, że wartości stężenia azotu amonowego w próbach bez i z koagulacją są różne. Przykładowo stężenie w dniu 1 w próbie bez koagulacji wynosi 88  $\text{mg}/\text{dm}^3$  a w próbie koagulowanej 130  $\text{mg}/\text{dm}^3$  (Tab. 35, str. 68). Proszę o wyjaśnienie obserwowanego zjawiska.
  12. Str. 111; Na rysunku 56 brak wykresu oznaczonego w tytule jako A.
  13. Autor w dysertacji zaznaczył, że uzyskane wyniki zostaną wykorzystane w działaniach rozwojowych/wdrożeniowych firmy EMI. Proszę o przybliżenie jaki jest aktualny stan przedmiotowych działań.
  14. W kilku miejscach pracy jako jednostkę objętości wykorzystano litr. W większości przypadków posługiwano się  $\text{dm}^3$ . Warto wykorzystywać jednakowy sposób wyrażania jednostek miar.
  15. W pracy błędnie użyto sformułowań: „stężenie ChZT”, „stężenie BZT<sub>5</sub>”. Ponieważ wskaźniki te w sposób pośredni wyrażają ilość związków organicznych występujących w ściekach, stosujemy sformułowania „wartość ChZT”, „wartość BZT<sub>5</sub>”.
  16. W pracy można się również doszukać kilku błędów o charakterze językowym lub/i edycyjnym. Przykładowo: „ $\text{dm}^3$ ”, „zgodnie z Rysunek.”, „W Tabela...”, str.24: jako separatora dziesiątego użyto kropki, podczas gdy w pozostałej części pracy jest to przecinek; str. 55: na rysunku 16 jeden z punktów oznaczono kolorem niebieskim; str. 113: „...typ ten może rozkładać organicznej związki azotowe...”; str. 114: brak kropki na końcu zdania; w spisie literatury brak kropki przy niektórych pozycjach lub zamienne wykorzystywanie przecinka.

Przedstawione powyżej uwagi mają charakter wyłącznie dyskusyjny i nie podważają wartości naukowej przedstawionej do recenzji pracy, co pozwala sformułować konkluzję końcową.

#### **2.4. Podsumowanie wartości merytorycznej pracy i wniosek końcowy**

Po starannym zapoznaniu się z rozprawą doktorską mgr inż. Adama Sztefka stwierdzam, że spełnia ona wymagania stawiane przed doktoratami wdrożeniowymi. Badania przeprowadzone w ramach niniejszej pracy wpisują się w aktualny nurt rozwoju beztlenowych metod oczyszczania ścieków. Wnoszą nowe elementy poznawcze w obszarze wpływu procesu hydrolizy na przebieg i efektywność beztlenowego oczyszczania ścieków, w szczególności powstających w ubojniach. Przedstawiony w dysertacji materiał badawczy jest spójny i wartościowy zarówno pod względem praktycznym, jak i naukowym. Dysertacja potwierdza znajomość ogólnej wiedzy teoretycznej Autora w dyscyplinie inżynieria środowiska, górnictwo i energetyka. Dokumentuje również umiejętność planowania i prowadzenia badań naukowych, opracowania i dyskusji wyników oraz wyciągania wniosków.

Tym samym oceniana rozprawa doktorska spełnia wymagania formalne dla tego typu prac zawarte w Ustawie z dnia 20 lipca 2018 r. Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce. Dlatego wnioskuję do Rady Dyscypliny Inżynieria Środowiska, Górnictwo i Energetyka Politechniki Śląskiej o dopuszczenie Pana mgr inż. Adama Sztefka do dalszego etapu postępowania w sprawie nadania stopnia doktora.

