

Wydział Instalacji Budowlanych, Hydrotechniki i Inżynierii Środowiska

POLITECHNIKA WARSZAWSKA

Prof. dr hab. Małgorzata Wojtkowska

Warszawa, 8.09.2023 r.

Politechniki Warszawskiej

Wydziałem Instalacji Budowlanych, Hydrotechniki

i Inżynierii Środowiska,

ul. Nowowiejska 20,

00-653 Warszawa

RECENZJA

rozprawy doktorskiej Pani mgr inż. Karoliny Sobieraj

pt. Biological production of the carbon monoxide from biowaste,

Biologiczna produkcja tlenku węgla z bioodpadów

Promotorzy pracy: prof. dr hab. inż. Andrzej Białowiec, prof. Jacek Koziel, Eng., PhD

Formalna podstawa opracowania recenzji

Ocenę rozprawy doktorskiej dokonano na podstawie Uchwały Rady Dyscypliny Inżynieria Środowiska, Górnictwo i Energetyka Uniwersytetu Przyrodniczego we Wrocławiu podjętej dnia 10 lipca 2023 r.

Uzasadnienie celowości podjętego tematu badawczego

Kompostowanie to kontrolowany proces, podczas którego substancje organiczne ulegają rozkładowi na względnie stabilny nieszkodliwy kompost. Proces przebiega z udziałem bakterii, które występują w odpadach. Dla prawidłowego przebiegu procesu wymagane jest stworzenie odpowiednich warunków napowietrzania, temperatury i nawilżania. Głównymi elementami procesu jest mineralizacja i humifikacja. Podczas procesu kompostowania tlen z powietrza i mikroorganizmy



ul. Nowowiejska 20
00-653 Warszawa
tel. 22 234 74 89, 22 234 59 45
www.is.pw.edu.pl
e-mail: dziekan.wibhis@pw.edu.pl

Wydział Instalacji Budowlanych, Hydrotechniki i Inżynierii Środowiska

POLITECHNIKA WARSZAWSKA

aerobowe przetwarzają substancje organiczne na ditlenek węgla (CO_2), metan (CH_4), tlenki azotu (NO_x), lotne związki organiczne (LZO), odory, bioaerozole i wodę z jednoczesnym uwolnieniem energii. Niewiele jest prowadzonych badań naukowych i publikacji dotyczących wytwarzania CO w procesie kompostowania. Gaz ten jest bardzo często pomijany w opisie procesów kompostowania. Ze względu na konieczność poszukiwania nowych dróg pozyskiwania energii i odchodzenie od paliw kopalnych, których spalanie przyczynia się do wzrostu emisji gazów cieplarnianych, istotne jest zainteresowanie naukowców procesami biochemicznego przetwarzania odpadów organicznych w kierunku pozyskiwania CO, wytwarzanego poprzez kompostowanie. Procesy przebiegające z wytwarzaniem CO zależą od warunków prowadzenia biochemicznego kompostowania, czyli natlenienie, temperatura i obecność mikroorganizmów. Realizację badań naukowych, określonych zakresem przedstawionym w dysertacji, należy uznać za pracę o bardzo dużym znaczeniu, zwłaszcza w kontekście gospodarki w obiegu zamkniętym. W szczególności w świetle wzrastającej emisji gazów cieplarnianych. Badanie procesów biochemicznego kompostowania bioodpadów w kierunku wytwarzania i pozyskiwania CO, w kontekście ograniczenia emisji gazów do środowiska i wykorzystanie wyników badań w praktyce inżynierskiej, np. przy projektowaniu nowych instalacji biochemicznego przetwarzania odpadów komunalnych, jest jak najbardziej uzasadnione.

Ogólna charakterystyka rozprawy

Rozprawa doktorska została przedstawiona w postaci monotematycznego cyklu publikacji, które zostały uszeregowane według etapów badań. Cztery prace zostały opublikowane w: *Energies* (2021), *Frontiers in Environmental Science* (2022), *Frontiers in Bioengineering and Biotechnology* (2023) i *Materials* (2023). Dwie zamieszczone publikacje są w trakcie recenzji w czasopismach *Environmental Microbiology Reports* i *Materials*. Wszystkie artykuły zostały opublikowane lub przygotowane do publikacji w latach 2021 – 2023. Część z nich została opublikowana w MDPI, gdzie



ul. Nowowiejska 20
00-653 Warszawa
tel. 22 234 74 89, 22 234 59 45
www.is.pw.edu.pl
e-mail: dziekan.wibhis@pw.edu.pl

Wydział Instalacji Budowlanych, Hydrotechniki i Inżynierii Środowiska

POLITECHNIKA WARSZAWSKA

cykl wydawniczy jest stosunkowo krótki. Wszystkie publikacje są wieloautorskie. We wszystkich artykułach Doktorantka jest pierwszym autorem. Łączny IF prezentowanych publikacji wynosi 26,229 (dla opublikowanych 18,475), a łączna punktacja MNiSW dla opublikowanych artykułów wynosi 480 (sumarycznie dla wszystkich autorów).

W przedstawionych, jako cykl monotematycznego zbioru artykułów, publikacjach zgodnie z numeracją zamieszczoną w pracy:

M1. Karolina Sobieraj, Sylwia Stegenta-Dąbrowska, Jacek A. Koziel, Andrzej Białowiec, 2021. *Modeling of CO Accumulation in the Headspace of the Bioreactor during Organic Waste Composting*, *Energies*, 14(5), 1-17, doi: 10.3390/en14051367

M2. Karolina Sobieraj, Sylwia Stegenta-Dąbrowska, Gang Luo, Jacek A. Koziel, Andrzej Białowiec, 2022. *Carbon Monoxide Fate in the Environment as an Inspiration For Biorefinery Industry: A Review*, *Frontiers in Environmental Science*, 10, 1-24, doi: 10.3389/fenvs.2022.822463

M3. Karolina Sobieraj, Sylwia Stegenta-Dąbrowska, Gang Luo, Jacek A. Koziel, Andrzej Białowiec, 2023. *Biological treatment of biowaste as an innovative source of CO —The role of composting process*, *Frontiers in Bioengineering and Biotechnology*, 11, 1-16, doi: 10.3389/fbioe.2023.1126737

M4. Karolina Sobieraj, Sylwia Stegenta-Dąbrowska, Christian Zafiu, Erwin Binner, Andrzej Białowiec, 2023. *Carbon monoxide production during biowaste composting under different temperature and aeration regimes*, *Materials*, 16(13), 4551, doi: 10.3390/ma16134551

M5. Karolina Sobieraj, Daria Derkacz, Anna Krasowska, Andrzej Białowiec, 2023. *Isolation and identification of CO-producing microorganisms from compost*, *Environmental Microbiology Reports* (under review)

M6. Karolina Sobieraj, Karolina Giez, Jacek A. Koziel, Andrzej Białowiec, 2023. *Assessment of emissions and potential occupational exposure to carbon monoxide during biowaste composting*, *Materials* (under review)



ul. Nowowiejska 20
00-653 Warszawa
tel. 22 234 74 89, 22 234 59 45
www.is.pw.edu.pl
e-mail: dziekan.wibhis@pw.edu.pl

Wydział Instalacji Budowlanych, Hydrotechniki i Inżynierii Środowiska

POLITECHNIKA WARSZAWSKA

udział Doktorantki był znaczący i obejmował opracowanie koncepcji i projektu badania, przygotowanie tekstów artykułów, abstraktów graficznych, rycin i tabel, a także opracowanie modelu matematycznego. W trakcie procesu recenzyjnego Doktorantka niosła poprawki do tekstów manuskryptów oraz przygotowała odpowiedzi dla recenzentów.

W pracy doktorskiej Pani mgr inż. Karolina Sobieraj sformułowała jako główny cel: **zdobycie nowej wiedzy z zakresu biologicznej produkcji CO podczas kompostowania bioodpadów.**

Czy to są procesy czysto biologiczne czy raczej biochemiczne?

Autorka rozprawy przedstawiła logiczne i jasne cele cząstkowe, tj:

1) Określenie optymalnego poziomu napowietrzenia i warunków termicznych produkcji CO podczas kompostowania bioodpadów; 2) Izolacja i identyfikacja mikroorganizmów odpowiedzialnych za produkcję CO podczas kompostowania bioodpadów; 3) Wyznaczanie wskaźników emisji CO z pryzm kompostowych w skali technicznej; 4) Ocena potencjalnego narażenia zawodowego pracowników kompostowni na CO podczas kompostowania bioodpadów.

Postawione w pracy cele Doktorantka podzieliła na dwa obszary realizowane w dysertacji:

I. Charakterystyka biologicznej produkcji CO podczas kompostowania bioodpadów (cele badawcze 1-3). Obszar ten został przedstawiony w badaniach opisanych w artykułach M2 do M5.

II. Analiza narażenia pracowników kompostowni na skutek biologicznej produkcji CO (cel badawczy 4). Informacje dotyczące obszaru II znajdują się w publikacjach M1 i M6.

Tezy pracy, jakie chciała udowodnić Doktorantka poprzez swoje badania, sformułowała poprawnie.

W pracy doktorskiej Doktorantka postawiła 5 tez - H1: Wzrost temperatury procesu kompostowania bioodpadów powyżej optymalnej wartości 59°C spowoduje wzrost intensywności produkcji CO; H2: Wzrost intensywności napowietrzania bioodpadów, a co za tym idzie ich natlenienia, spowoduje zmniejszenie intensywności produkcji CO podczas kompostowania bioodpadów; H3: Podczas kompostowania bioodpadów produkcja biotycznego CO jest spowodowana aktywnością



ul. Nowowiejska 20
00-653 Warszawa
tel. 22 234 74 89, 22 234 59 45
www.is.pw.edu.pl
e-mail: dziekan.wibhis@pw.edu.pl

Wydział Instalacji Budowlanych, Hydrotechniki i Inżynierii Środowiska

POLITECHNIKA WARSZAWSKA

mikroorganizmów: bakterie tlenowe w warunkach mezofilnych i bakterie beztlenowe w warunkach termofilnych ze zmniejszoną ilością O₂; H4: Zawracanie materiału na pryzmę kompostową w skali technicznej powoduje zmniejszenie współczynników emisji CO na skutek wzmożonego utleniania bioodpadów; H5: Stężenie CO powstałego podczas kompostowania bioodpadów w hermetycznej, zamkniętej hali może przekroczyć bezpieczny próg stężeń CO dla pracowników zakładu wynoszący 100 ppm. Część z postawionych hipotez (H1 i H2) jest znana z założeń procesów chemicznych. Nie mniej jednak Doktorantka potwierdza te założenia w swoich wnikliwych badaniach, opisanych szczegółowo w załączonych artykułach, co prezentuje dobrze całościowy obraz zagadnienia.

Po wprowadzeniu do tematyki badawczej (rozdz. 1), Doktorantka dobrze opisała stan wiedzy na temat wytwarzania CO podczas kompostowania (rozdz.2), biotyczną produkcję CO podczas kompostowania (rozdz. 3) oraz problem badawczy, cel badań i hipotezy badawcze (rozdz. 4). W rozdziale 5 przedstawiona została struktura dysertacji opisowo i w formie graficznej. W rozdziale 6 przedstawiła krótko treść każdego z manuskryptów, wyróżniając najważniejsze osiągnięcia naukowe. Materiały i metody podsumowano w Rozdziale 7. Najważniejsze efekty uzyskane z badań oraz ich wpływ na dyscyplinę inżynierii środowiska, górnictwa i energetyki omówiono w rozdziale 8. W rozdziale 9 zaprezentowano wnioski oraz dokonano weryfikacji hipotez badawczych. W rozdziale 10 wskazano przyszłe kierunki badań w zakresie produkcji CO w procesie kompostowania.

Wprowadzenie do tematyki pracy doktorskiej Doktorantka przedstawiła w dwóch publikacjach (M2 i M3). Są to artykuły przeglądowe, w których dokonała przeglądu literatury prezentującej charakterystykę biologicznej produkcji CO w różnych środowiskach. W artykule M2 Doktorantka dokonała przeglądu piśmiennictwa dotyczącego biologicznych przemian CO w ekosystemach w odniesieniu do biorafinerii. Opisane zostały przemiany CO w ekosystemach, w szczególności zebrano informacje na temat procesów CO w glebie, wodzie i atmosferze oraz omówiono wpływ CO na rośliny, zwierzęta i ludzi. Przegląd uwzględnia również potrzebę opracowania nowych rozwiązań w zakresie



ul. Nowowiejska 20
00-653 Warszawa
tel. 22 234 74 89, 22 234 59 45
www.is.pw.edu.pl
e-mail: dziekan.wibhis@pw.edu.pl

Wydział Instalacji Budowlanych, Hydrotechniki i Inżynierii Środowiska

POLITECHNIKA WARSZAWSKA

wdrażania biogospodarki o obiegu zamkniętym i podkreśla potencjał wykorzystania CO jako niewykorzystanego cennego zasobu dla różnych procesów. W artykule podkreślono, że należy rozwijać badania w zakresie rozwój bioreakcji przemiany woda-gaz, w produkcji energii elektrycznej podczas bioelektrochemicznej konwersji gazu syntezowego oraz elektrofermentacji jako źródła biochemikaliów. Autorzy publikacji podkreślili, że technicznie i ekonomicznie wdrożenie takich procesów jest bardzo trudne i wymaga szerokich badań naukowych. Warunki prowadzenia procesów muszą uwzględniać zmienność surowców odpadowych, co wymaga dalszych badań kinetyki reakcji w skali laboratoryjnej, aby dostarczyć danych pozwalających na modelowanie koncepcji biorafinerii w skali przemysłowej.

W drugim przeglądowym artykule (M3) autorzy podsumowali podstawową wiedzę z zakresu biochemii, niezbędną do realizacji produkcji tlenku węgla na bazie biologicznej. Przeprowadzono analizę złożonych danych na temat procesów z udziałem mikroorganizmów tlenowych i beztlenowych, metabolizujących CO. Oceniono potencjalne przyszłe możliwości ekstrakcji CO w biologicznych systemach przetwarzania odpadów, a także potencjalne czynniki ograniczające takie procesy.

Moją uwagę zwraca zapis „biologiczne„ procesy. Nie zgadzam się z takim definiowaniem procesu otrzymywania CO. Według mnie jest to zawsze proces co najmniej biochemiczny, a często abiotyczny czyli chemiczny, jak sama Doktorantka wcześniej opisała. Proszę o ustosunkowanie się do tej uwagi.

Kolejne artykuły (M4 i M5) dotyczą badań wykonanych w skali laboratoryjnej. Badania zostały zaprojektowane w odniesieniu do informacji zawartych w artykułach przeglądowych (M2 i M3). W artykule M4 zbadano potencjał produkcji CO podczas kompostowania bioodpadów w kontrolowanych warunkach laboratoryjnych w zależności od różnych szybkości napowietrzania i temperatur. W tym celu przeprowadzono procesy kompostowania w warunkach od psychrofilnych do termofilnych (35, 45, 55 i 65°C), przy różnym stopniu napowietrzenia w stechiometrycznym zapotrzebowaniu na tlen (2,7, 3,4, 4,8 i 7,8 L·h⁻¹). Badania prowadzono w szklanych bioreaktorach przez 14 dni, podczas



ul. Nowowiejska 20
00-653 Warszawa
tel. 22 234 74 89, 22 234 59 45
www.is.pw.edu.pl
e-mail: dziekan.wibhis@pw.edu.pl

Wydział Instalacji Budowlanych, Hydrotechniki i Inżynierii Środowiska

POLITECHNIKA WARSZAWSKA

których co 24 godziny wykonywano pomiary stężenia CO, stężenia O₂ i zawartość CO₂ oraz temperatury. Mierzono też stężenie wybranych parametrów chemicznych. Na podstawie dziennych wartości stężeń CO wyznaczono kinetykę wytwarzania CO podczas kompostowania (wartość maksymalną stężenie CO i stała szybkość (k) zmian stężenia CO) metodą regresji liniowej i nieliniowej. Według autorów najważniejszym osiągnięciem naukowym w tych badaniach było ustalenie optymalnych warunków termicznych (<45°C) i napowietrzenia (<3,4 L·h⁻¹) dla produkcji CO podczas kompostowania bioodpadów, co przyczyniło się do opracowania zaleceń dla tego procesu. Ustalone parametry są nowością w badaniach naukowych dotyczących reakcji otrzymywania CO z kompostu.

Uzyskane wyniki dla temperatury i natlenienia nie są skrajne – dlaczego? Proszę na podstawie wiedzy wyjaśnić zależność stężenia CO od stężenia tlenu i temperatury!

Autorzy publikacji, oznaczonej jako M5, w kolejnych badaniach wykazali, że produkcja CO może mieć charakter biotyczny, związany z aktywnością mikroorganizmów. W tych wstępnych badaniach wyizolowali i zidentyfikowali mikroorganizmy potencjalnie odpowiedzialnych za produkcję CO w kompoście. Badania wykazały, że wyizolowane mikroorganizmy to szczepy bakteryjne, w większości bakterie Gram-dodatnie w kształcie pałeczki. Kinetyka procesu zależna była od stężenia O₂ i CO₂ w warunkach przebiegających reakcji. Badania te stanowią również nowość naukową w odniesieniu do warunków procesu produkcji CO z kompostu o dużej zawartości biomasy.

Czy ilość mikroorganizmów ma też wpływ na stężenie uwalnianego CO?

W kolejnych publikacjach (M1 i M6) przedstawiony został problem gromadzenie się toksycznych substancji, w tym tlenku węgla (CO), w pomieszczeniach zamkniętych podczas procesu kompostowania. Bardzo ważnym elementem pracy doktorskiej było opracowanie modelu akumulacji



ul. Nowowiejska 20
00-653 Warszawa
tel. 22 234 74 89, 22 234 59 45
www.is.pw.edu.pl
e-mail: dziekan.wibhis@pw.edu.pl

Wydział Instalacji Budowlanych, Hydrotechniki i Inżynierii Środowiska

POLITECHNIKA WARSZAWSKA

CO w przestrzeni bioreaktora podczas kompostowania odpadów organicznych oraz ocena wpływu wentylacji przestrzeni nad roztworem zamkniętego kompostu. Wpływ wentylacji został oceniony poprzez modelowanie gromadzenia się CO w dwóch wariantach: bez wentylacji przestrzeni bioreaktora podczas procesu oraz z krótką codzienną wentylacją przez otwieranie bioreaktora w celu uwolnienia zebranego CO. Opracowany model pozwala na przewidywanie bezpiecznego dla człowieka stężenia CO, które w procesie kompostowania nie powinno przekraczać 100 ppm w fazie nadpowierzchniowej. W pracy dokonano oceny ryzyka zawodowego narażenia pracowników na CO w dużych kompostowniach. Do najważniejszych osiągnięć naukowych publikacji M1 należało opracowanie zaleceń minimalnego poziomu wymiany powietrza wymaganego do utrzymania stężenia CO poniżej wartości progowej oraz wysokości hałdy odpadów odpowiedniej do zmniejszenia ryzyka gromadzenia się CO. Zaproponowany model może być ogólnie dostępny i wykorzystany do symulacji doboru wydajności systemu wentylacji kompostowni w celu zapewnienia bezpieczeństwa procesu, ograniczając narażenie pracowników kompostowni na toksyczne działanie CO.

W publikacji M6 określona została wielkość emisji CO netto ze zwałów kompostowych w skali technicznej w otwartej przestrzeni oraz ocena narażenia pracowników na podwyższone stężenie CO w zamkniętej kompostowni. Ważnym wynikiem naukowym tych badań było określenie wskaźników emisji CO netto dla kompostowni hermetycznych i otwartych w warunkach stabilnych i mieszania pryzmy.

W moim przekonaniu jest to bardzo ważny element pracy doktorskiej, uwzględniający bezpieczeństwo człowieka w stosowaniu zaawansowanych technologii kompostowania bioodpadów. Jednak bezpieczeństwo człowieka zależy również od ilości i rodzaju mikroorganizmów, niezbędnych do właściwego przebiegu procesu produkcji tlenku węgla (CO) podczas kompostowania bioodpadów.

Czy Doktorantka przewiduje takie badania w przyszłości?



ul. Nowowiejska 20
00-653 Warszawa
tel. 22 234 74 89, 22 234 59 45
www.is.pw.edu.pl
e-mail: dziekan.wibhis@pw.edu.pl

Wydział Instalacji Budowlanych, Hydrotechniki i Inżynierii Środowiska

POLITECHNIKA WARSZAWSKA

Na podstawie uzyskanych wyników prowadzonych eksperymentów Doktorantka prawidłowo zweryfikowała postawione w pracy hipotezy. Hipotezy 2, 3 i 5 zostały pozytywnie zweryfikowane badaniami, natomiast dwie pozostałe zostały odrzucone.

Autorka dysertacji przewiduje kontynuację badań w zakresie analizy szczepów bakterii biorących udział w produkcji CO podczas kompostowania bioodpadów, szczególnie ich zmienność w trakcie procesu. Proszę o wyjaśnienie jaką zmienność Doktorantka rozważa?

W przyszłych badaniach Doktorantka zamierza zająć się również interesującym zagadnieniem, jakim jest biologiczna produkcja CO przez bakterie poparta badaniami bioinformatycznymi i danymi omicznymi, pozwalającymi na scharakteryzowanie zmiennych wpływających na procesy metaboliczne produkcji CO.

Uwagi szczegółowe i dyskusyjne

Praca została napisana bardzo starannie i zawiera tylko istotne informacje związane z tematem dysertacji. Zestaw tabel i rysunków jest właściwie dobrany i opracowany. Wykresy przedstawiające wyniki badań ilustrują poruszane zagadnienia i w sposób odpowiedni podsumowują procesy badawcze będące przedmiotem analiz. Nie dostrzegłam, z bardzo małymi wyjątkami, istotnie niepoprawnych konstrukcji składowych.

Wnikliwa lektura rozprawy pozwoliła na sformułowanie kilku pytań i uwag o merytorycznym i polemicznym charakterze. Nie mają one jednak wpływu na moją końcową ocenę wartości merytorycznej rozprawy:

Podsumowanie – wniosek końcowy

Pani mgr inż. Karolina Sobieraj wykazała się dobrą ogólną wiedzą teoretyczną w zakresie procesu kompostowania bioodpadów (dyscyplina inżynieria środowiska, górnictwo i energetyka, nauki



ul. Nowowiejska 20
00-653 Warszawa
tel. 22 234 74 89, 22 234 59 45
www.is.pw.edu.pl
e-mail: dziekan.wibhis@pw.edu.pl

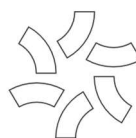
Wydział Instalacji Budowlanych, Hydrotechniki i Inżynierii Środowiska

POLITECHNIKA WARSZAWSKA

inżynieryjno – techniczne). Jakość i poprawność prowadzonych badań w zaplanowanym zakresie, wraz z interpretacją wyników, należy uznać za umiejętność samodzielnego prowadzenia badań naukowych. Zastosowanie odpowiednich metod oraz przeprowadzenie badań w skali laboratoryjnej i na obszarze rzeczywistych kompostowni ma potencjał aplikacyjny.

Biorąc pod uwagę bardzo duży wkład Doktorantki w zrealizowanych badaniach naukowych oraz istotny wpływ prezentowanych wyników w naukę, stwierdzam, że oceniana przeze mnie rozprawa doktorska spełnia wymogi stawiane dysertacjom doktorskim. W związku z powyższym wnoszę do Rady Dyscypliny Inżynierii Środowiska, Górnictwo i Energetyka Uniwersytetu Przyrodniczego we Wrocławiu o dopuszczenie Pani mgr inż. Karolina Sobieraj do dalszych etapów przewodu doktorskiego.

Małgorzata Wojtkowska



ul. Nowowiejska 20
00-653 Warszawa
tel. 22 234 74 89, 22 234 59 45
www.is.pw.edu.pl
e-mail: dziekan.wibhis@pw.edu.pl