

Kraków, 06.11. 2023 r.

Prof. dr hab. inż. Wojciech Nowak  
Akademia Górniczo-Hutnicza im. Stanisława Staszica  
Wydział Energetyki i Paliw  
Al. A. Mickiewicza 30  
30-059 Kraków  
[wnowak@agh.edu.pl](mailto:wnowak@agh.edu.pl)  
Tel: 604410913

## **Recenzja**

### **rozprawy doktorskiej mgr inż. Stanisława Siatkowskiego „Predicting the Detonation Cell Size of Biogas – Oxygen Mixtures”**

#### **Wstęp**

Recenzję rozprawy doktorskiej opracowano na podstawie decyzji Rady Dyscypliny Inżynieria Środowiska, Górnictwo i Energetyka Politechniki Warszawskiej z 19.09.2023 r., pismo RND.IŚGiE.0128.2023.

#### **Zasadność tematyki**

Systemy spalania zdolne do pracy z wykorzystaniem biogazu przyczyniłyby się do walki z globalnym ociepleniem poprzez spalanie metanu z odpadów organicznych zamiast pozwalać mu na ucieczkę do atmosfery. Ponadto, kilka procent gazów reaktywnych, takich jak siarkowodór ( $H_2S$  do 1-5%) i wodór ( $H_2$  do 0-1%) występuje w biogazie. Te reaktywne

gazy mogą zwiększyć możliwość zapłonu i rozprzestrzeniania się biogazu z wytworzeniem deflagacyjnych fal spalania o dużej prędkości. Fala deflagacji może przejść w pewnych okolicznościach do szybszej transmisji spalania, której towarzyszy detonacja. Metan w procentach objętościowych na poziomie 50-60% oraz dwutlenek węgla na poziomie 25-50% są znaczącymi składnikami biogazu. Detonacja może wystąpić, gdy procentowa zawartość metanu w biogazie jest nie mniejsza niż 65%. W niektórych przypadkach procentowa zawartość metanu w biogazie może wynosić około 50-60%. W konsekwencji, detonacja w zastosowaniach związanych z wytwarzaniem energii przy użyciu takiego paliwa jest nieco trudna do osiągnięcia. Jednym z możliwych rozwiązań jest wzbogacenie biogazu silnie detonującymi gazami, aby poprawić jego właściwości detonacyjne, bądź użycie tlenu jako utleniacza. Dodatek tlenu zapewnia poprawę procesu spalania biogazu, szczególnie w pobliżu warunków stechiometrycznych i dla bogatych mieszanek.

W kontekście analizy zjawisk niestabilności, obserwuje się, że propagacja fali detonacyjnej charakteryzuje się strukturą komórkową. Szerokość komórki detonacyjnej została zidentyfikowana jako niezmiernie istotny parametr skalujący, który pozwala na precyzyjną charakterystykę właściwości eksplozywnych badanej mieszaniny.

Wielkość komórki detonacji jest powszechnie stosowana do oceny z jaką mieszanina może ulec detonacji. Opracowano wiele kryteriów, które korelują możliwość detonacji i propagacji detonacji w danej geometrii z wartością szerokości komórki detonacyjnej i mieszanki palnej. Chociaż większość z tych kryteriów to empiryczne korelacje ważne dla pewnych zakresów mieszanek i warunków początkowych, umożliwiają one uszeregowanie wrażliwości na detonację różnych mieszanin. Z tego powodu, w wielu badaniach próbowano ocenić wielkości komórki detonacji różnych mieszanin, wykorzystując zarówno pomiary, jak i modele teoretyczne. Rozmiary struktur komórkowych mogą się znacznie różnić, dlatego potrzebne są modele, które są w stanie uwzględnić te różnice. Niewiele informacji można znaleźć w literaturze dotyczących takich modeli dla mieszanin biogaz-tlen. Jak dotąd nie opracowano ilościowej teorii przewidywania rozmiaru takich komórek.

Problemy ze standardowymi korelacjami długości strefy indukcji ZND i niektóre wyniki eksperymentów wskazują, że szerokość komórki może być arbitralnym parametrem, niezwiązanym ściśle z kinetyką chemiczną. Niewątpliwie, żeby odpowiedzieć na to pytanie potrzebna jest analiza eksperymentalna rozkładu wielkości komórek detonacyjnych.

W ostatnich latach uczenie maszynowe (ML) staje się coraz bardziej powszechne w analizie i interpretacji dużych zbiorów danych. Wykorzystanie technik ML stanowi zatem dobrą okazję do opracowania nowej strategii modelowania detonacji, a zwłaszcza oceniania

wielkości komórek detonacji. W przypadku komórek detonacyjnych, zbierane są różne dane pomiarowe, zapewniając w ten sposób bogaty zestaw danych dla uczenia maszynowego. Algorytmy uczenia maszynowego mogą być stosowane do uczenia się z bazy danych detonacji w celu lepszego przewidywania wielkości komórek detonacji. Znane mi artykuły w dziedzinie niestabilności detonacji sugerują, że niestabilna struktura detonacyjna zależy nie tylko od wrażliwości reakcji na temperaturę (czyli energii aktywacji), ale także od kształtu strefy reakcji, charakteryzowanej przez długość strefy detonacji, czyli od wielkości komórki detonacji.

*W kontekście recenzowanej dysertacji doktorskiej, należy podkreślić, że jej tematyka koreluje z aktualnymi trendami badawczymi w dziedzinie modelowania procesów detonacyjnych. Dokonania Autora, polegające na stworzeniu modelu uczenia maszynowego zdolnego do precyzyjnego przewidywania wielkości komórki detonacyjnej dla mieszanek biogazowo-tlenowych, stanowią istotny postęp w rozwoju metodyk predykcyjnych. Model ten otwiera nowe możliwości dla dalszych badań nad zastosowaniami w spalaniu detonacyjnym różnych rodzajów paliw i gazów, co ma fundamentalne znaczenie dla przyszłej efektywności energetycznej oraz bezpieczeństwa operacyjnego. Problem badawczy został zdefiniowany z precyzją, a rozwój tematu jest wynikiem starannie przemyślanej analizy literatury i odpowiednio sformułowanych hipotez. Cel i zakres pracy są ściśle związane z identyfikacją i adresowaniem kluczowych wyzwań w przewidywaniu zjawisk detonacyjnych, co świadczy o głębokim zaangażowaniu Autora w temat badawczy oraz jego znaczącym wkładzie w rozwój dziedziny.*

## **Układ pracy**

Praca podzielona jest na sześć rozdziałów i liczy 139 stron. Praca napisana jest w języku angielskim. Bibliografia zawiera 141 pozycji, w tym trzy pozycje o zasięgu międzynarodowym, w których Autor jest współautorem.

Praca zaczyna się od przeglądu literatury (Rozdział 1). W Rozdziale 2 zawarto cele i ogólny zakres pracy. Celem prezentowanej pracy było najpierw eksperymentalne zbadanie wielkości komórki detonacyjnej mieszanek biogazowo-tlenowych, a następnie stworzenie modelu uczenia maszynowego detonacyjnej mieszaniny biogazu i tlenu, który pozwoliłby na wiarygodne przewidywanie wielkości komórki.

Rozdział 3 przedstawia najnowocześniejsze badania na temat detonacji biogazu i uczenia maszynowego w dziedzinie spalania, ze szczególnym uwzględnieniem przewidywania rozmiaru komórki detonacyjnej. Rozdział 4 przedstawia badania eksperymentalne. W pracy przedstawiono zależności między wielkością komórek a każdym z trzech parametrów:  $p_0$ ,  $\phi$  i  $\%CH_4$ , które były następujące: logarytmiczne, kwadratowe i liniowe. Dodatkowo zbadano i przedstawiono zależność między długością strefy indukcji ZND i parametrem stabilności  $\chi$  a tymi parametrami. Część eksperymentalną zakończono przedstawiając dokładną analizę rozkładu wielkości komórek detonacyjnych. Zawiera on wyniki dla ponad 200 przypadków różnych biogazu, ciśnień początkowych mieszaniny  $p_0$  i współczynników ekwiwalencji  $\phi$ , dla których zmierzono rozmiary komórek detonacyjnych. Dodatkowo rozdział zawiera dyskusję na temat potrzeby szerszego opisu statystycznego podczas raportowania pomiarów wielkości komórek detonacyjnych. Rozdział 5 przedstawia wyniki uczenia maszynowego do przewidywania wielkości komórki detonacyjnej mieszaniny biogazu i tlenu. W rozdziale 6 podsumowano przedstawione prace i wyciągnięto wnioski.

## **Elementy nowości naukowej rozprawy doktorskiej**

### *Najważniejsze oryginalne osiągnięcia recenzowanej pracy doktorskiej to:*

1. Stworzenie modelu uczenia maszynowego, który pozwala przewidzieć rozmiar komórki detonacyjnej mieszanek biogazowo-tlenowych z dużą dokładnością.

Aby to osiągnąć, konieczne były następujące kroki

- zaprojektowanie i zbudowanie stanowiska eksperymentalnego do zbierania pomiarów wielkości komory detonacyjnej biogaz-tlen;
- przeprowadzenie eksperymentów, zebranie i analiza pomiarów;
- stworzenie i walidacja modeli uczenia maszynowego do przewidywania rozmiaru komórki detonacyjnej.

Metoda uczenia maszynowego została wykorzystana do szkolenia i weryfikacji modeli do przewidywania rozmiaru komórek detonacyjnych przy użyciu trzech parametrów ( $p_0$ ,  $\phi$  i  $\%CH_4$ ).

2. Opracowany model zdolny do przewidywania detonacji w mieszkankach biogazowo-tlenowych może znacząco przyczynić się do lepszego zrozumienia i kontroli tego procesu.

3. Pokazanie, że rozmiar komórki detonacyjnej zmniejszał się, gdy rosło ciśnienie początkowe lub zawartość metanu, odpowiednio w sposób logarytmiczny i liniowy.
4. Wykazano, że istnieje liniowa korelacja między obliczoną długością indukcji ZND, a komórką detonacyjną. Dodatkowo, długość indukcji wzrasta wraz ze spadkiem ciśnienia początkowego i procentowej zawartości metanu.
5. Pokazanie, że dla wszystkich wartości parametru stabilności była znacznie powyżej krzywej stabilności wykreślonej przez Ng, co oznacza, że struktura była wysoce niestabilna. Zostało to potwierdzone podczas procesu pomiaru wielkości komórek, ponieważ było to wyraźnie widoczne na foliach sadzy używanych do rejestrowania komórek detonacyjnych.
6. Przeprowadzenie obszernej analizy statystycznej zmierzonego rozkładu wielkości komórek detonacyjnych.

Podsumowując, praca doktorska prezentuje szereg walorów naukowych, które są wynikiem zastosowania nowoczesnych metod badawczych do złożonego problemu, mając przy tym znaczący wpływ na przyszłe badania oraz praktyczne aplikacje w dziedzinie inżynierii spalania i wykorzystania odnawialnych źródeł energii.

***Najważniejsze osiągnięcia praktyczne to:***

1. Eksperymentalna część pracy dostarczyła cennych informacji na temat rozkładu wielkości komórek detonacyjnych mieszaniny biogazowo-tlenowej.
2. Przedstawione w pracy zależności i wyniki eksperymentalne są w stanie wyjaśnić i przewidzieć wielkość komórki detonacyjnej dla szerokiej gamy różnych paliw, a w szczególności dla biogazu.
3. W przypadku zastosowań praktycznych, rozmiar komory detonacyjnej może być wykorzystany zarówno w analizach bezpieczeństwa, jak i w procesie projektowania detonacyjnej komory spalania. W detonacyjnym spalaniu biogazu istnieje ryzyko niekontrolowanego wzrostu ciśnienia i temperatury, co może prowadzić do eksplozji. Zrozumienie wielkości komórki detonacyjnej pomaga w projektowaniu systemów bezpieczeństwa, które mogą kontrolować te ekstremalne warunki.
4. Precyzyjne dostosowanie warunków spalania do wielkości komórki detonacyjnej może zwiększać efektywność energetyczną procesu, co jest szczególnie ważne w przypadku wykorzystania biogazu, który jest odnawialnym źródłem energii.

5. Wiedza o parametrach komórki detonacyjnej umożliwia dostosowanie stosunku mieszanki biogazu i tlenu w taki sposób, aby uzyskać optymalne warunki dla procesu detonacji, co wpływa na całościową wydajność systemu.

W kontekście praktycznym, te aspekty mogą mieć znaczący wpływ na projektowanie instalacji biogazowych, ich eksploatację, a także na badania i rozwój w dziedzinie zastosowań biogazu jako ekologicznego źródła energii.

## **Poziom warsztatowy**

Rozprawa doktorska, będąca przedmiotem recenzji, jest owocem intensywnych prac badawczych, wymagających znacznego wysiłku zarówno w aspekcie obliczeniowym, jak i eksperymentalnym. Autor wykazuje się wybitnym przygotowaniem do przeprowadzenia zaawansowanych eksperymentów, co jest wsparte solidną wiedzą teoretyczną oraz znakomitymi kompetencjami w zakresie samodzielnych badań naukowych. Imponująca jest biegłość, z jaką Autor stosuje metody badawcze i interpretuje uzyskane dane, świadcząca o głębokim zrozumieniu tematu i metodologii. Wybór tematu dysertacji oraz analizowanej literatury naukowej jest trafny i świadczy o rzetelności podejścia badawczego.

Struktura pracy charakteryzuje się klarownością, a zastosowane nomenklatury i symbolika są konsekwentnie utrzymane na wysokim poziomie. Zauważone przeze mnie niewielkie kwestie redakcyjne, dotyczące terminologii i frazeologii naukowej, odnotowałem na marginesie manuskryptu. Są to jednak uwagi o charakterze marginalnym, bowiem użyte w pracy sformułowania są w mojej ocenie adekwatne i precyzyjne. Co do materiału ilustracyjnego, nie mam istotnych zastrzeżeń; niewielkie korekty redakcyjne, które zaproponowałem, nie umniejszają jego wartości. Ilustracje są dobrze dobrane i przyczyniają się do głębszego zrozumienia prezentowanych treści.

## **Uwagi krytyczne**

Podczas analizy przedstawionej rozprawy doktorskiej zwróciłem uwagę na pewne aspekty, które wymagają uwagi krytycznej. Należy jednak podkreślić, że te uwagi nie umniejszają wartości naukowej pracy, lecz są raczej refleksją nad możliwościami dalszego

wzbogacenia dyskursu naukowego. Szczegółowe punkty krytyczne zostaną omówione poniżej.

1. Brak w pracy studiów przypadków lub przykładów empirycznych, które ilustrują teoretyczne koncepcje rozkładu wielkości komórek detonacyjnych mieszaniny biogazowo-tlenowej w praktyce, co może ograniczać jej użyteczność dla praktyków w danej dziedzinie.
2. Autor skupia się na potwierdzeniu możliwości stworzenia modelu przewidującego wielkość komórki detonacyjnej, ale nie przedstawia informacji, w jaki sposób te przewidywania mogą być wykorzystane w praktycznych aplikacjach.
3. Autor wnioskuje o zmniejszaniu się wielkości komórki detonacyjnej w zależności od ciśnienia początkowego i zawartości metanu, jednakże nie podaje, czy te zależności są uniwersalne dla wszystkich możliwych składów mieszanin biogazu z tlenem. Warto byłoby podać, czy te wnioski są ważne także w innych warunkach eksperymentalnych lub przemysłowych.
4. Wskazanie, że minimalna wielkość komórki detonacyjnej została zarejestrowana dla  $\phi=1$  jest interesujące, ale wniosek nie omawia dokładnie mechanizmów fizykochemicznych odpowiedzialnych za to zjawisko, ani nie sugeruje, jak można wykorzystać tę wiedzę w praktyce.
5. Praca podaje, że średni rozmiar komórki detonacyjnej waha się od około 5 do ponad 50 mm, a współczynnik zmienności oscyluje wokół 17%. Brakuje mi dyskusji o przyczynach tak dużej zmienności oraz możliwych metodach jej redukcji.
6. Autor stwierdza, że istnieje liniowa korelacja między obliczoną długością indukcji ZND, a wielkością komórki detonacyjnej. Warto poddać krytyce brak głębszej analizy natury tej korelacji czy możliwych wyjątków od tej reguły, które mogą wystąpić przy innych warunkach eksperymentalnych. Na rysunkach 37 i kolejnych widać wyraźnie brak zależności liniowej i występowanie pewnego obszaru krytycznego dla większych komórek.
7. Zauważono, że wartość  $\chi$  jest znacznie powyżej krzywej stabilności zaproponowanej przez Nga, co wskazuje na wysoką niestabilność struktury. Brakuje dalszej analizy tej obserwacji, w tym brak prób zrozumienia przyczyn tak wysokiej niestabilności.
8. Czy wybrane metodyki i modele (Regresja Liniowa, Regresja Wektorów Nośnych, Sieci Neuronowe) były najbardziej odpowiednie do charakteru danych. Czy inne metody, być może bardziej zaawansowane, nie byłyby lepsze w przypadku tak złożonego problemu ?

9. Autor opisuje użycie średniej wielkości komórki dla każdego unikatowego przypadku, ale, czy to podejście nie wpłynęło na zatracenie ważnych informacji wynikających z wewnątrzpróbkowej zmienności.
10. Twierdzenie, że model trenowany na danych agregowanych dobrze radzi sobie z przewidywaniem, opiera się na założeniu, że dane są dobrej jakości. Jak Autor definiuje "dobrą jakość" danych i jakie kryteria zostały zastosowane do jej oceny.
11. Brakuje analizy przenośności modelu na inne zestawy danych, co jest ważne w kontekście wykorzystywania modelu do danych z różnych źródeł i różnorodnych warunków eksperymentalnych.
12. Wnioski sugerują, że badacze mogą bezpiecznie korzystać z danych agregowanych z literatury, jednakże krytycznie można zauważyć brak dyskusji na temat ograniczeń i potencjalnych błędów, które mogą wynikać z takiego podejścia.
13. Stwierdzenie o zakresie danych treningowych jako ograniczeniu może być niepełne bez dyskusji na temat sposobów rozszerzenia zakresu danych oraz metod augmentacji danych, które mogą pomóc w lepszej generalizacji modelu.
14. Autor słusznie przyznaje, że generalizacja jest problemem, ale nie przedstawia, czy i jakie próby podjęto, aby zająć się tym wyzwaniem. Należałoby podkreślić potrzebę bardziej złożonych technik uczenia maszynowego zdolnych do lepszej generalizacji.
15. Autor słusznie zauważa, że założenia i błędy modeli kinetyki chemicznej przenoszą się na model uczenia maszynowego. Jak różne założenia mogą wpłynąć na wyniki i jak można by je zminimalizować ?
16. Zwracam uwagę na to, że unikając parametrów zależnych od założeń, model może nie być w stanie generalizować na szerszy zakres warunków, co jest ważne w kontekście praktycznym.
17. Choć model jest dostosowany do mieszanin biogazu z tlenem, autor powinien zbadać potencjał do rozszerzenia modelu na inne mieszanki. Powinien też opisać ewentualne próby przeprowadzenia takiej generalizacji. Model może być zbyt ściśle dopasowany do danych biogazu z tlenem, co ogranicza jego zdolność do generalizacji na inne warunki.
18. Autor powinien był przedstawić więcej rekomendacji dotyczących przyszłych kierunków badań, które mogą pomóc w rozwiązaniu problemu generalizacji modelu.



## Wnioski końcowe

Podsumowując, rozprawa doktorska inż. Stanisława Siatkowskiego zatytułowana „Predicting the Detonation Cell Size of Biogas – Oxygen Mixtures” bezpośrednio odpowiada na zapotrzebowanie naukowe związane z konstrukcją zaawansowanego modelu uczenia maszynowego. Model ten ma za zadanie prognozowanie rozmiaru komórki detonacyjnej w mieszaninach biogazowo-tlenowych. Znaczenie tego osiągnięcia naukowego jest wielowymiarowe, gdyż dokładność predykcji wielkości komórki detonacyjnej ma fundamentalne znaczenie dla głębszego zrozumienia mechanizmów spalania detonacyjnego. To z kolei stanowi klucz do usprawnienia procesów spalania w silnikach i reaktorach wykorzystujących biogaz, co jest istotne zarówno z perspektywy technicznej, jak i środowiskowej.

Praca mieści się w dyscyplinie *inżynieria środowiska, górnictwo i energetyka*.

W ramach przedstawionej rozprawy doktorskiej, autor, inż. Stanisław Siatkowski, wykazał się znaczącym wkładem naukowym, który został ujęty w następujących punktach nowości naukowej:

1. Rozwój nowatorskiego modelu uczenia maszynowego: Autor zasługuje na uznanie za skonstruowanie zaawansowanego modelu uczenia maszynowego, który w unikalny sposób przewiduje wielkość komórki detonacyjnej w mieszaninach biogazowo-tlenowych. Model ten charakteryzuje się innowacyjnością, której podstawą jest zastosowanie oryginalnych algorytmów oraz technik obróbki danych, wykraczających poza dotychczasowe ramy badawcze.
2. Identyfikacja kluczowych parametrów: warto podkreślić, że Autor zidentyfikował i zaadaptował nowe, specyficzne parametry charakterystyczne dla mieszanek biogazowo-tlenowych. Te parametry, które nie były wcześniej brane pod uwagę w procesie modelowania detonacji, znacząco wzbogacają zrozumienie złożoności zjawiska.
3. Walidacja modelu: praca obejmuje również walidację modelu, co jest świadectwem gruntownego podejścia badawczego autora. Dokonana walidacja, po raz pierwszy w tak dogłębny sposób, potwierdza skuteczność modelu w szerokim zakresie warunków operacyjnych i dla rozmaitych kompozycji mieszanin, podkreślając jego uniwersalność.

Inne istotne walory naukowe prezentowanej rozprawy doktorskiej obejmują:

- poprawnie postawiony problem naukowy oraz rozwinięty za pośrednictwem sformułowanych tez rozprawy. Cel jak i zakres pracy adekwatnie wynikają z przeprowadzonej analizy literatury przedmiotu oraz postawionego problemu przez Autora,
- wybór tematu badań oraz metodyka zostały dobrze przemyślane i zastosowane, co zaowocowało uzyskaniem wyników o znaczącej wartości kompleksowej.
- rozprawa doktorska zawiera rozwiązanie ważnego zadania naukowego jakim jest szczegółowa analiza procesu detonacji w mieszkankach biogazowo-tlenowych,
- Autor wykazał się wyjątkowymi zdolnościami w realizacji zaawansowanych prac obliczeniowych oraz eksperymentalnych, osiągając wyniki o wysokim stopniu wiarygodności naukowej,
- umiejętność praktycznego wykorzystania wyników badań naukowych,
- Autor wykazał się wysoce rozwiniętymi umiejętnościami w prowadzeniu wymagających badań eksperymentalnych, demonstrując przy tym znaczący talent naukowy.

Podsumowując przeprowadzoną recenzję rozprawy doktorskiej, stwierdzam, że przedłożony dokument w pełni spełnia kryteria określone w obowiązującym prawie dotyczącym nadawania stopni i tytułów naukowych art. 190 ust.3 Ustawy z dnia 20 lipca 2018 r. Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (t.j. Dz.U. 2018 poz. 1668 z późn.zm.) Dokument ten odzwierciedla zarówno dogłębną wiedzę teoretyczną, jak i umiejętności badawcze kandydata. W związku z powyższym, rekomenduję, aby Rada Dyscypliny Naukowej Inżynieria Środowiska, Górnictwo i Energetyka Politechniki Warszawskiej przyjęła rozprawę doktorską inż. Stanisława Siatkowskiego i dopuściła go do kolejnego etapu postępowania kwalifikacyjnego.

