

**Recenzja rozprawy doktorskiej  
Pana mgr inż. Michała Stępnia  
„Analiza procesów ciepłno-przepływowych w dezintegratorze substratów  
przeznaczonych do fermentacji metanowej”**

**Promotor rozprawy dr hab. inż. Piotr Krawczyk, prof. uczelni**

## **1. Wprowadzenie**

Recenzja została przygotowana w oparciu o decyzję Rady Naukowej Dyscypliny Inżynieria Środowiska, Górnictwo i Energetyka z dnia 29 czerwca 2021, pismo znak RND-IŚGiE-60/2021 w sprawie powierzenia mi opracowania recenzji przedmiotowej rozprawy.

Recenzja przygotowywana będzie w oparciu o następujące akty prawne:

- Ustawa z dnia 14 marca 2003 r. o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki (Dz. U. z 2017 poz. 1789 z późniejszymi zmianami),
- Rozporządzenie Ministra Nauki i Szkolnictwa Wyższego z dnia 19 stycznia 2018 r. w sprawie szczegółowego trybu i warunków przeprowadzania czynności w przewodzie doktorskim, w postępowaniu habilitacyjnym oraz w postępowaniu o nadanie tytułu profesora (Dz. U. z 2018 r. poz. 261),
- Ustawa z dnia 20 lipca 2018 r. Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (Dz. U. z 2018r., poz. 1668 z późniejszymi zmianami).

Recenzja opracowana została na podstawie przekazanej wraz z w/w pismem rozprawy doktorskiej stanowiącej opracowanie zwarte.

## **2. Ogólna ocena rozprawy wraz z uwagami krytycznymi**

### **2.1 Zakres rozprawy**

Przedłożona do recenzji rozprawa doktorska Pana mgr inż. Michała Stępnia poświęcona jest problematyce efektywnego zagospodarowania bioodpadów w kontekście rozwoju konstrukcji przeznaczonych do zwiększenia wydajności produkcji biogazowni/oczyszczalni ścieków w zakresie produkcji biogazu oraz skrócenie czasu fermentacji.

Przewód doktorski był wszczęty i prowadzony w dyscyplinie **Energetyka**.

Rozprawa została zawarta na 135 stronach tekstu zasadniczego. Pracę podzielono na siedem numerowanych rozdziałów z czego zasadniczą część pracy zawarto w rozdziałach 1-6, rozdział 7 zawiera obszerny spis literatury obejmujący 139 pozycje, z czego przewagę stanowią pozycje anglojęzyczne. Znaczny udział cytowanych prac pochodzi z ostatnich lat, co świadczy o bardzo

dobrym rozpoznaniu przez Doktoranta dorobku naukowego w zakresie merytorycznym przedmiotu rozprawy. W wykazie doktorant umieścił siedem publikacji własnego autorstwa, na które powołał się w pracy.

Praca zawiera również obszerny załącznik, w którym Autor w sposób szczegółowy przedstawił dokumentację wykonawczą omawianego w pracy urządzenia – dezintegratora substratów przeznaczonych do fermentacji metanowej.

Praca została napisana w języku polskim, liczy 135 stron, zawiera siedem numerowanych rozdziałów, jeden załącznik, spis treści, wykaz oznaczeń i spis literatury zawierający 136 pozycji.

We **wprowadzeniu** Autor określa tematykę pracy w kontekście problemów związanych z efektywnym prowadzenie procesu fermentacji metanowej osadów ściekowych i substratów wykorzystywanych w biogazowniach rolniczych. Określa też znaczenie rozwijanego przez siebie urządzenia dezintegratora – w kontekście cyklu pracy oczyszczalni ścieków i biogazowni (opcjonalnie z modułem kogeneracyjnym). Przedstawiona została istota dezintegracji oraz jej wpływ na proces fermentacji. Wprowadzenie zakończone zostało przeglądem dotychczasowych rozwiązań układów dezintegrujących i doświadczeniem w ich stosowaniu.

W bardzo krótkim rozdziale **drugim** przedstawiony jest cel pracy, polegający na stworzeniu nowatorskiej maszyny do dezintegracji mechanicznej substratów przeznaczonych do fermentacji metanowej. Cel pracy rozbity został na cele cząstkowe, m.in. przygotowanie projektu, budowa maszyny, testy.

W rozdziale **trzecim**, poświęconym koncepcji opracowywanego urządzenia – dezintegratora Autor przedstawia założenia oraz podstawowe cechy przyjęte w opracowywanej koncepcji. Przyjęto, że będzie to maszyna bazująca na lokalnym spadku ciśnienia wystarczającym do wywołania zjawiska kawitacji. Z kolei spadek ciśnienia będzie wynikiem działania siły odśrodkowej działającej na przepływający w wirniku płyn. Autor zdecydował się na wirnik w postaci walca z odpowiednimi otworami przelotowymi. Opisane są zagadnienia jakie należy rozważyć w dalszym ciągu prac, m.in. dobór napędu, dobór materiału, uszczelnień, technologii wykonania czy dalszej możliwości przeskalowania opracowanego prototypu. W tym rozdziale Autor przedstawia teoretyczne podstawy kawitacji pod kątem wykorzystania go w proponowanym rozwiązaniu.

Rozdział **czwarty** poświęcony jest analizie numerycznej zjawisk przepływowych zachodzących w dezintegratorze. Opisuje on obliczenia numeryczne wykonane przy użyciu metody CFD w celu weryfikacji i/lub potwierdzenia prawidłowości wstępnego doboru poszczególnych rozwiązań konstrukcyjnych i operacyjnych przyjętych przez Autora na etapie tworzenia koncepcji dezintegratora. Rozdział zawiera omówienie podstawowych równań mechaniki płynów z zastosowaniem do przypadku wirującego płynu wokół osi pionowej, wprowadzenia do obliczeniowej mechaniki płynów wraz z teorią matematyczną, omówiona została implementacja numeryczna modelu zjawisk przepływowych zachodzących w analizowanym dezintegratorze. Autor przedstawia geometrię wykorzystaną w dalszej części do budowy siatek, odpowiednie warunki brzegowe, model turbulencji i inne. Zasadniczą część rozdziału stanowi przedstawienie odpowiednich wyników modelowania wraz z ich komentarzem i odpowiednimi porównaniami. Istotną częścią rozdziału jest podsumowanie, w którym Autor dokonał weryfikacji założeń przyjętych na etapie koncepcyjnym.



Rozdział **piąty** przedstawia opis konstrukcji i wykonania dezintegratora w oparciu o wyniki otrzymane w rozdziale czwartym. Opisane zostały warunki narzucone na konstrukcję. Opracowano konstrukcję przeznaczoną do badań laboratoryjnych w dwóch wersjach: podstawowej i rozwojowej. Główna różnica pomiędzy tymi wersjami polega w wyposażeniu wersji rozwojowej w odpowiednie zbieraki, noże oraz przeciwnoże. W rozdziale zawarte są rysunki i zdjęcia przedstawiające schematycznie konstrukcję urządzenia. Dokładniejsze informacje zawarte są w załączniku.

Rozdział **szósty** opisuje badania stanowiskowe zaprojektowanego urządzenia przeprowadzone w dwu etapach. Stanowisko badawcze dla etapu pierwszego składało się z: badanego układu dezintegratora, szybkiej kamery oraz odpowiedniej elektroniki pomiarowej i oprogramowania. W etapie drugim wykonano analizy chemiczne mające za zadanie ocenić efektywność procesu dezintegracji w zaprojektowanym dezintegratorze. Zilustrowane to zostało za pomocą wcześniej zdefiniowanych wskaźników, takich jak stopień dezintegracji, zmian rozpuszczonego ChZT (SCOD), koncentracji lotnych kwasów tłuszczowych czy całkowitego stopnia aktywności.

Rozdział **siódmy** stanowi podsumowanie całości pracy przedstawiający wykonane prace oraz główne wnioski wysunięte na podstawie analizy wyników tych badań. Przedstawione są również propozycje dalszych prac, w tym sposoby adaptacji urządzenia do skali przemysłowej

## 2.2 Ocena prawidłowości wyboru tematu

Problematyka poruszona w pracy, tj. zwiększenie produkcji biogazu z jednostki substratu jest istotna co najmniej z dwóch punktów widzenia:

- zagospodarowania odpadów produkowanych przez społeczeństwo, w tym bioodpadów znajdujących się zarówno w grupie odpadów komunalnych jak i przemysłowych. Odpady te są obecnie poddawane recyklingowi, przekształcane termicznie, a sposobem zyskującym na znaczeniu jest ich kompostowanie i fermentacja – w ten sposób możliwe jest wytwarzanie biogazu,
- zwiększenie udziału odnawialnych źródeł energii w całkowitej produkcji energii elektrycznej, m.in. ze względu na odpowiednie dyrektywy unijne i inne regulacje. Jedną z tych technologii polega na wykorzystaniu biogazu pozyskiwanego z biogazowni. Obserwujemy stały trend wzrostowy ilości wytwarzanego biogazu jak i mocy zainstalowanej w biogazowniach.

W związku z powyższym istotne jest opracowanie odpowiednich technologii zarówno do efektywniejszej utylizacji odpadów (np. osadów ściekowych z możliwością pozyskania z nich biogazu) jak również zwiększenia produktywności biogazowni. Biorąc to pod uwagę, istotnego znaczenia nabiera całokształt prac zmierzających do rozwoju konstrukcji urządzeń realnie wpływających na produkcję biogazu. Z tego powodu wszelkie prace, łączące aspekty techniczne i środowiskowe zmierzające do wsparcia rozwoju technologicznego jednostek związanych z wytwarzaniem biogazu uznają za bardzo wartościowe.

**Mając na uwadze wyżej przytoczone argumenty, uznają że temat rozprawy doktorskiej mgr inż. Michała Stępnia został wybrany prawidłowo, jako bardzo aktualny, a całość podjętej pracy wynikała nie tylko z problematyki naukowo-badawczej, ale przede wszystkim nakierowana była na osiągnięcie potencjalnych efektów praktycznych z obszaru konstrukcji urządzeń wspomagających proces pozyskiwania biogazu.**

## 3. Analiza treści rozprawy wraz z uwagami krytycznymi

W niniejszym rozdziale recenzji skupiam się na zagadnieniach naukowych samodzielnie rozwiązanych przez doktoranta, krytyce prawidłowości rozważań zawartych w pracy, pozyskanych wynikach i

wniosków przedstawionych przez Doktoranta. Przedstawię pewne uwagi dyskusyjne i wątpliwości, które nasunęły mi się podczas lektury rozprawy. Przedstawię również uwagi na temat oryginalności rozprawy jak i wskaże główne walory rozprawy.

### **3.1 Zagadnienia naukowe i utylitarne rozwiązane samodzielnie przez Doktoranta**

Po przeprowadzeniu analizy treści rozprawy stwierdzam, że postawiony przez Doktoranta cel pracy został zrealizowany.

Do najważniejszych zagadnień naukowych rozwiązanych samodzielnie przez Doktoranta zaliczam:

- krytyczna analiza literatury,
- opracowanie modelu numerycznego,
- budowa prototypu na bazie własnej koncepcji i wyników symulacji,
- przeprowadzenie pomiarów na stanowiskach badawczych.

Za najistotniejsze elementy pracy w aspekcie praktycznym uważam:

- konstrukcja urządzenia o zakładanej funkcjonalności,
- przeprowadzenie serii analiz eksperymentalnych,
- opracowanie zestawu zaleceń do konstrukcji nowej generacji urządzeń

### **3.2 Uwagi krytyczne do pracy**

Treść rozprawy dowodzi, że Doktorant bardzo dobrze orientuje się w przedstawionej problematyce. Nie stwierdzam w tym zakresie uchybień i oceniam znajomość przedmiotu zagadnienia przez Doktoranta, w tym jego przygotowanie zawodowe i naukowe – bardzo pozytywnie.

Poniżej zamieszczam uwagi, które uznaję za drobne lub posiadające charakter porządkowy, niektóre z nich jednakże wymagają pewnej dyskusji naukowej podczas publicznej obrony pracy. Uwagi do pracy można podzielić na trzy kategorie:

#### Uwagi formalne związane ze strukturą pracy, tj.

- widoczny jest brak postawionych tez pracy, powoduje to, że brak jest podstaw poznawczych, które przyjmuje się dążąc do rozwiązania postawionego problemu naukowego, które niejako pełnią rolę punktów oparcia pracy.
- w sformułowaniu celu pracy (rozdział drugi) stwierdzono, że cel pracy został osiągnięty w wyniku realizacji zadań cząstkowych. Zdaniem recenzenta wszelkie dywagacje, czy postawiony cel pracy powinny wieńczyć pracę i bazować na konkluzjach z wyników przeprowadzonych i opisanych badań – zatem można twierdzić, że to stwierdzenie pojawiło się zbyt wcześnie.

#### Uwagi związane z redakcją pracy i sposobem prezentacji materiału

- brak jest dokładnego zdefiniowania i porównania wersji podstawowej i rozwojowej dezintegratora, różnicę można dostrzec w przypadku geometrii siatek i pewnych parametrów. Przydałoby się zestawienie cech np. w tabeli



- sposób prezentacji wyników nie pozwala na zorientowanie odnośnie wielu podawanych wielkości, powinno to być jakoś bardziej dobitnie przedstawione (np. wyróżnione obszary dla zachodzenia kawitacji itp.), tyczy się to grafik przedstawionych w rozdziale 4 (m.in. obszarów spadku ciśnienia czy intensywności cyrkulacji/kawitacji),
- wskazane byłoby umieszczenie spisu symboli i użytych skrótów,
- brak odniesienia się w tekście do informacji zawartej na niektórych rysunkach i odpowiedniego jej skomentowania (np. rysunek 1.6 Istota dezintegracji – zaprezentowane są schematyczne grafiki z których niewiele wiadomo), rys. 3.3 wymagałby dalszego omówienia, m.in. jak zmienia się ciśnienie statyczne i co tak naprawdę jest tu widoczne, rys. 3.4 – tylko kolorowa grafika, 3.5 – jakie mikrouszkodzenia są tu widoczne i dlaczego przypisujemy je kawitacji, rys. 4.3 bez omówienia jest dość niejasny i nic nie wnoszący, 4.4 standardowa ilustracja podręcznikowa wklejona bez szerszego omówienia.
- Rozdział 6.2 zdaniem recenzenta opracowany jest zbyt skrótowo i przez to może być trudno zrozumiały dla niefachowców w tym konkretnych zakresie wiedzy.

#### Uwagi merytoryczne

- Przedstawione w 4.3.1 wnioski wydają się być trywialne, wręcz oczywiste (intensywność cyrkulacji rośnie wraz ze wzrostem prędkości obrotowej wirnika). Jednak tutaj można mieć zastrzeżenie związane ze ścisłością wywodu – co to jest intensywność cyrkulacji, nie zostało to nigdzie zdefiniowane ani na prezentowanych obliczeniach i grafikach nie pojawia się taka wielkość (też w części teoretycznej). Drugi wniosek – nie jest jasne, gdzie ciśnienie na wirniku spada poniżej ciśnienia saturacji. Sformułowanie „... istnieje prawdopodobieństwo zaistnienia kawitacji.” Jest bardzo nieprecyzyjne w kontekście wykorzystania takiego wyniku do projektowania urządzenia technicznego – czy jest jakaś możliwość określenia tego prawdopodobieństwa (np. jakaś skala barwna na rysunku) Bo może być np. znikomo małe! Podobnie w 4.3.2 mamy „duże prawdopodobieństwo”.
- Brak porównania wariantów, np. ewolucja obszaru prawdopodobieństwa i intensywności kawitacji w zależności od promienia i prędkości obrotowej wirnika dezintegratora. W tej chwili dość trudno widoczne są te wszystkie obszary.
- Biorąc pod uwagę równanie 4.10, jest oczywiste, że siła odśrodkowa jest tym większa im większy jest promień i prędkość obrotowa. Zatem jest oczywiste, że spośród analizowanych wariantów ten o największych wartościach promienia (200 mm) i prędkości obrotowej (3000 obr./min) będzie najkorzystniejszy. Zatem jaki jest sens prezentowanych obliczeń? Co nowego wniosło CFD poza ten oczywisty wniosek? Przydałaby się tu dyskusja na temat zalet zastosowania podejścia CFD. Np. można by podać zwiększenie się rozmiaru obszaru kawitacji. Tyczy się to również wniosku ze strony 81 „Zależność ta jest kwadratową funkcją prędkości obrotowej, ..”i „...można wysnuć wniosek, iż długość promienia ma również znaczenie ..” – znowu oczywisty wniosek na podstawie równania 4.10 – dlatego sensowne byłoby podanie odpowiednich współczynników i wartości, które można otrzymać tylko na podstawie CFD i pokazanie jak faktycznie zostało rozszerzone podejście analityczne! Proszę Doktoranta o wyjaśnienie podczas publicznej obrony.

- Przy sformułowaniu wniosku „Wyposażenie maszyny w elementy wspomagające rozdrabnianie większych struktur organicznych, tj. zabieraki .... ma niewielki wpływ na rozkład ciśnienia” – gdzie to widać – nie podano odnośnika do odpowiednich wyników obliczeń.
- Przedstawione na stronie 79 sformułowanie „...sugerują pozytywny wpływ wprowadzenia modyfikacji na rozpad struktur biologicznych.” Nie precyzuje jaki rodzaj modyfikacji jest tu wymieniony.
- Nie jest jasne dlaczego dla obliczeń przyjęto temperaturę 15°C, czy taka panuje podczas przemian biologicznych?
- Nie jest jasne stwierdzenie „...można odnotować propagację obszarów, w których ciśnienie spada poniżej 1705 Pa (rys. 4.25 ...)”. Naprawdę na tych rysunkach trudno jest to recenzentowi odnotować.
- Rys. 4.28 – co to są te przerywane linie? Czy to jest jakieś dopasowanie nieliniowe?
- Wniosek ze strony 82 „Reasumując ...ilość wody, gęstość mieszaniny ..wirnika” nie wygląda na wniosek z CFD – bo nie ma zaprezentowanych odpowiednich rozkładów tych wielkości – tj. ilości zawartej wody czy całkowitej gęstości mieszaniny dla poszczególnych wariantów obliczeń.
- Odnośnie rozpędzania i gwałtownego wyhamowania – przydałoby się porównanie odpowiedniego ciśnienia z ciśnieniem przy ruch obrotowym.
- Brak jakiegokolwiek powiązania wyliczonych parametrów fizycznych z intensywnością dezintegracji (wielkość niezdefiniowana).
- Na stronie 103 pojawia się sformułowanie „Intensywność zjawiska znacząco wzrasta przy 2100 obr./min” (mowa tu o kawitacji) co nie potwierdza wyników symulacji (np. wniosek z 4.3.6).
- Sformułowanie str. 103 „Zaobserwowanie pęcherzyków gazu ...”, - otóż tych pęcherzyków nie zaobserwowano, wcześniejsze sformułowanie „Rozjaśniony obraz sugeruje powstanie cienkich strug gazu.” Jest bliższy prawdy – zresztą to sugerują zdjęcia z kamery przedstawione na rys. 6.7-6.10. Skąd wniosek że w cieczy (jak rozumiem) powstają pęcherzyki gazu, a nie jest to efekt silnego parowania powierzchniowego bez wrzenia? Proszę Doktoranta o wyjaśnienie podczas publicznej obrony.
- kilka uwag związanych jest z symulacją CFD:
  - czy możliwe jest wykorzystanie innej metody modelowania ruchu wirnika w analizowanym przypadku (zamiast ISM)?;
  - czy testowano inne modele turbulencji i ich wpływ na rozwiązanie, czy też ograniczono się tylko do modelu k-epsilon?;
  - str 63 - dla jakich parametrów podane jest kryterium zbieżności? Tylko dla turbulencji?;
  - dlaczego podano tylko wartość średnią parametru skośności? Jakie są wartości minimalne i maksymalne oraz odchylenie standardowe? W przypadku skośności wartością decydującą o jakości siatki jest wartość maksymalna, która nie może przekraczać wartości



0,95. Przy podanej tylko wartości średniej nie można stwierdzić, czy siatka jest dobra czy zła;

- "jakość" elementów siatki - jakim jest opisana parametrem (bo jest ich bardzo wiele), jak zdefiniowana?; dobra praktyka wymaga przeprowadzenia analizy wrażliwości rozwiązania na wielkość elementów siatki. Czy taka analiza była zrobiona?

- Nie jest jasne sformułowanie ze strony 103 „...po wprowadzeniu wybranej części energii wyrażonej jako gęstość energii  $\epsilon_L$  ...” – o co tu chodzi? Co to za energia (jak zdefiniowana) i jak ją się wprowadza. Poproszę więcej informacji na ten temat. Brak jest opisu układu na stanowisku badawczym odpowiedzialnego za wprowadzanie tej energii (łącznie z zadaniem określonej wartości) i co to znaczy wprowadzanie energii – w jakiej formie, w jakim przedziale czasu itp. ten punkt wymaga szerszej dyskusji. Proszę Doktoranta o wyjaśnienie podczas publicznej obrony.
- Str. 104 „... można się spodziewać wzrostu”, „...istnieje próg gęstości energii” – gdzie tej próg został przedstawiony i ile wynosi? „Radykalny wzrost w/w parametrów ...” – nieściśle sformułowania.
- Bardzo kiepskie rysunki 6.11-6.15 – wbrew szkolnym zasadom, m.in. co ilustrują fantazyjne linie ciągłe, brak określenia niepewności pomiarowych, brak próby dopasowania jakimiś uzasadnionymi zależnościami teoretycznymi czy empirycznymi.
- Dla 6.11 – jeśli próbki różniły się zawartością suchej masy, to jak można by określić zależność zmian rozpuszczonego ChZT w zależności od zawartości suchej masy (w tej chwili niewidoczna)?
- Rozdz.7 . Na jakiej podstawie stwierdzono, że prędkość obrotowa 3000 obr./min jest optymalna? Z pracy wynika, że jest to najlepsza z trzech wybranych do rozważań – co jest oczywistym wnioskiem z wyrażenia na siłę odśrodkową. Nie analizowano przyjęcia większych prędkości, a z teorii nie wynika, że należałoby oczekiwać pogorszenia parametrów pracy urządzenia dla wyższych prędkości obrotowych (a wręcz przeciwnie). Oczywiście można tu mówić o problemach technicznych z wyższymi prędkościami obrotowymi, zużyciem energii elektrycznej itp., ale w pracy nie zostało to przedyskutowane.

Podkreślić należy, że wskazane uwagi nie umniejszają znacząco wartości naukowej pracy. Przedstawiony cel pracy został osiągnięty, zakres pracy także umożliwił recenzentowi odpowiednie odniesienie się do postawionego problemu badawczego.

Praca jest dość starannie zredagowana, oprócz drobnych potknięć stylistycznych nie spotkałem w niej błędów ortograficznych ani tzw. literówek.

### **3.3 Oryginalność pracy i jej główne walory**

Doktorant zrealizował dość szeroki zakres prac zarówno badawczych jak i konstrukcyjnych, uzyskując wyniki pozwalające na konstrukcję dezintegratora w dwu wersjach.

Zakres zrealizowanych prac stanowi oryginalny dorobek Doktoranta a uzyskane wyniki dostarczają wniosków, które mogą być przydatne na etapie rozwoju konstrukcji dezintegratorów oraz innych prac ukierunkowanych na poprawę parametrów energetycznych i środowiskowych - są zatem cenne nie tylko z naukowego, ale również z praktycznego punktu widzenia.

Uzyskany w trakcie realizacji pracy materiał jest wartościowy i z pewnością wart dalszej popularyzacji poprzez np. zaprezentowanie uzyskanych wyników na konferencjach naukowych czy w czasopiśmie. W tym kontekście wiele uwag krytycznych tyczy się poprawy jakości takiej prezentacji.

#### 4. Wnioski końcowe

Zdaniem recenzenta, przedstawiona do recenzji praca oraz dotychczasowy dorobek naukowy Autora w pełni spełniają wymagania stawiane do uzyskania tytułu doktora nauk technicznych określone w Art. 13.1 przywołanej w pkt. 1 Ustawy [3] warunki i wymagania stawiane rozprawom doktorskim.

Praca poświęcona jest zagadnieniu w pełni aktualnemu, wpisując się w prowadzone w szeregu ośrodkach krajowych i zagranicznych badania związane z procesami fermentacji metanowej, w tym polegające na optymalizacji pracy i konstrukcji coraz bardziej efektywnych urządzeń. W pracy otrzymane zostały wartościowe wyniki, które zdaniem recenzenta mogą znaleźć wdrożenie w przemyśle.

**Reasumując, pomimo pewnych niedociągnięć redakcyjnych i uwag natury formalnej związanych ze strukturą pracy oraz zarzutów merytorycznych, jednak nie umniejszających istotnie wartości otrzymanych wyników, recenzent wnioskuje o dopuszczenie pracy Pana mgr Michała Stępnia do publicznej obrony.**

Recenzent jednocześnie **wnioskuje o wyróżnienie pracy.** Swój wniosek opieram na szerokim zakresie prac przeprowadzonych przez doktoranta, zaprezentowanych we właściwej rozprawie jak i w jej integralnej części – załączniku. Na uznanie zasługuje własnoręczne wykonanie konstrukcji działających prototypów, na bazie których udało się przeprowadzić rozbudowane i czasochłonne pomiary w rzeczywistych instalacjach, w powiązaniu z analizą danych i symulacjami komputerowymi.

