

RECENZJA

rozprawy doktorskiej mgr inż. Marcina Janika

pt.

"Wpływ mieszania dezintegrującego zagęszczonych osadów nadmiernych na warunki ich płynięcia"

Recenzję rozprawy doktorskiej mgr inż. Marcina Janika pt. „Wpływ mieszania dezintegrującego zagęszczonych osadów nadmiernych na warunki ich płynięcia” opracowano na zlecenie Dziekana Wydziału Inżynierii i Ochrony Środowiska Politechniki Śląskiej

1. Układ i zakres rozprawy

Praca doktorska mgr inż. Marcina Janika wpisuje się w bardzo aktualny nurt dyskusji dotyczących potrzeby wprowadzania, jak również rodzaju stosowanych metod dezintegracji osadów nadmiernych w ciągu przeróbki osadów ściekowych. Kryterium wprowadzenia dezintegracji było dotychczas związane przede wszystkim z możliwością intensyfikacji procesów stabilizacji osadów, wskutek zmian podatności dezintegrowanych osadów nadmiernych na biochemiczny rozkład w warunkach fermentacji metanowej. Oczekiwana w tym procesie zwiększona ilość pozyskiwanego biogazu, którego energia przekształcana jest w układach kogeneracyjnych na energię elektryczną i ciepło, powinna zrekompensować nakłady energetyczne poniesione w procesach dezintegracyjnych. Ten, zaznaczam, dominujący obecnie sposób postrzegania dezintegracji osadów nadmiernych wywodzi się z konkretnej wiedzy eksploatatorów na temat słabej podatności osadów nadmiernych, pochodzących z współczesnych technologii osadu czynnego z usuwaniem związków biogenych, na biochemiczny rozkład w (stabilizację) w warunkach bezwzględnie beztlenowych komór fermentacji. Jednakże tylko takie postrzeganie dezintegracji ograniczałoby w praktyce jej zastosowanie tylko do oczyszczalni o wystarczająco dużej RLM, by budowanie instalacji kogeneracji uznano za ekonomicznie uzasadnione.

Rozprawa mgr Janika naukowo udowadnia i opisuje efekt dezintegracji, który był obserwowany zarówno w skalach badawczych, jak też praktyce eksploatacyjnej w oczyszczalniach, prowadzących dezintegrację ale traktowany trochę jak „efekt uboczny”, ponieważ nie był mierzony ani opisywany żadnymi wskaźnikami. Tym efektem było



upłynnienie osadów świadczące o tym, iż dezintegracja zmienia właściwości osadów nie tylko pod kątem ich chemii i biochemii ale także właściwości reologicznych.

Praca Doktoranta otwiera zatem dyskusję nad celowością wprowadzenia dezintegracji osadów nadmiernych w każdej oczyszczalni, która stosuje w ciągu przeróbki osadów zagęszczanie mechaniczne osadów nadmiernych przed ich skierowaniem do dalszej przeróbki, nawet jeżeli w tej oczyszczalni nie jest wykorzystywana energia biogazu.

Istota tej dyskusji opiera się ponownie na obserwacjach, z wieloletniej już praktyki eksploatacyjnej zagęszczania mechanicznego osadów nadmiernych, iż proces ten posiada nie tylko absolutne zalety, wynikające z znacznego zmniejszenia objętości komór stabilizacyjnych i zużycia energii w toku fermentacji (nie grzejemy wody tylko osady) ale posiada również wady. Są one związane z pogorszeniem się warunków transportu hydraulicznego i wymieszania zawartości komór fermentacyjnych i są tym bardziej uciążliwe im efekt zagęszczania jest wyższy, co jest min. związane z koniecznością stosowania w tym procesie polielektrolitów. Tworzenie dużych, zwartych flokuł osadów, korzystne na etapie zagęszczania jest odpowiedzialne za pogorszenie warunków transportu i mieszania, pogarsza również warunki rozwoju fermentacji, blokując pierwszą, najbardziej istotną dla procesu fazę hydrolizy osadów nadmiernych, które i tak, jak już wspomniano, są słabo podatne na przemiany biochemiczne. Nie bez powodu zatem Doktorant zarówno tytuł rozprawy, jak postawioną w niej tezę, odnosi do osadów nadmiernych **zagęszczonych**, ponieważ przywrócenie korzystnych właściwości hydraulicznych osadów zagęszczonych jest możliwe w procesie ich dezintegracji.

Za metodę wystarczającą do osiągnięcia poprawy tych właściwości Doktorant uznał, i słusznie, mieszanie dezintegrujące stawiając tezę, że **„możliwa jest zmiana właściwości reologicznych osadów nadmiernych wyniku zastosowania mieszania dezintegrującego w celu poprawy warunków ich płynięcia”**. W toku rozprawy Doktorant konsekwentnie przedstawia zarówno teoretyczne podstawy, które upoważniały go do postawienia takiej tezy, jak też wyniki licznych badań i analizy statystyczne wyników, które pozwoliły Mu postawioną tezę udowodnić.

Pierwsza część pracy przedstawia aktualny stan wiedzy z zakresu obejmującego badane zagadnienie. Omówiono istotne dla procesu mieszania właściwości fizyczne, w tym reologiczne, osadów nadmiernych. Osady, które są układem wielofazowym, potraktowano w uproszczeniu jako układ dwufazowy, co pozwoliło na powiązanie różnych aspektów badawczych mieszania zawiesin nienewtonowskich oraz dezintegracyjnego mieszania osadów ściekowych.

Celem pracy było doświadczalne określenie zmian właściwości płynięcia zagęszczonych osadów nadmiernych poddanych dezintegracji mechanicznej w mieszalniku o standardowej geometrii. Doktorant postawił sobie zadanie udowodnienia, iż mieszanie dezintegracyjne może upłynnić osady w takim stopniu, że zmiana ich charakterystyki reologicznej w kierunku upłynnienia prowadzi w konsekwencji do zmniejszenia oporów przepływu w rurociągach osadowych, co zostało udowodnione i poparte stosownymi obliczeniami. Ten aspekt rozprawy świadczy o jej walorach użytkowych, ponieważ zmniejszenie oporów hydraulicznych transportu osadów jest efektem pożądanym dezintegracji, który powinien być wykorzystany w praktyce eksploatacyjnej węzła osadowego oczyszczalni ścieków, zmniejszając tym samym zużycie energii w procesach przeróbki osadów.

2. Ocena metodologii badań

Najbardziej wartościową merytorycznie częścią pracy, zawierającą najwięcej elementów nowości i świadcząca o samodzielności, inwencje badawczej i dobrym, a nawet bardzo dobrym opanowaniu warsztatu badawczego przez Doktoranta jest część dotycząca metodologii badań. Dla wykazania zmian właściwości reologicznych osadów poddawanych dezintegracji Doktorant przeniósł i zaadaptował do badań własnych procedury z inżynierii chemicznej, służące o badań układów dwuskładnikowych jakimi są zawiesiny.

Właściwości reologiczne osadów ściekowych są właściwościami cieczy nieniuetonowskich i tiksotropowych, co było już niejednokrotnie wykazywane w przebiegu badań wielu autorów cytowanych przez doktoranta, jednakże mieszanie osadów jako proces technologiczny w ich przeróbce nie jest dotychczas dobrze rozpoznane i nie zostało spójnie opracowane teoretycznie. Trudności badania osadów ściekowych wynikają nie tylko z faktu, iż nie są one zawiesiną ale układem polidispersyjnym, wielofazowym. Rzeczywiste osady, pobierane w ciągu przeróbki w oczyszczalni ścieków, a takie były podmiotem badań Doktoranta, są także układem, który zmienia swoje właściwości w czasie, wskutek zachodzących w nim przemian biochemicznych (obecność w osadach organizmów żywych oraz składników podatnych na rozkład biologiczny). To narzuca reżym zarówno dla poboru próbek osadów jak i ograniczenia czasokresu pomiarów na jednej próbce, co zostało bardzo dobrze uwzględnione przez Doktoranta w planie badań i doborze odpowiednich procedur.

Jako przedmiot badań Doktorant wybrał, osady nadmierne z 5 dużych oczyszczalni ścieków aglomeracji górnośląskiej, o podobnym charakterze zlewni, co miało wpłynąć na zbliżony charakter osadów i jednorodność prób dla opracowania modeli parametrów reologicznych. Jak później wykazały badania, początkowe właściwości osadów zagęszczonych były jednak znaczącym czynnikiem kategoryzującym.

Po teoretycznej analizie charakteru mieszania w różnych typach mieszalników, z różnymi typami mieszadeł Doktorant wybrał dla oceny wpływu mieszania na dezintegrację osadów mieszalnik standardowy, o proporcjach $H/D=1$ i położeniu mieszadła $1/3 H$ nad dnem mieszalnika, z turbinami generującymi przepływ osiowo promieniowy, w którym jako parametry stałe przyjęto kształt mieszalnika i wymiary mieszadła. Urządzenia takie są często stosowane w przemyśle do homogenizacji układów dwufazowych, zwłaszcza zawiesin. Pomimo dobrze opisanych zasad mieszania homogenizującego trudno znaleźć, poza nielicznymi przykładami, opracowania charakteryzujące zastosowanie sił ścinających w przeróbce osadów ściekowych, które określa się jako „mieszanie dezintegrujące”. W procesie homogenizacji ujednorodnienie mieszanych substancji realizowane są przy optymalnej mocy mieszania. W przypadku dezintegracji rozmyślnie stosowane są wyższe nakłady energetyczne dla uzyskania jak największych sił tnących ponieważ głównym czynnikiem dezintegrującym, czyli niszczącym skupiska mikroorganizmów połączonych w flokuły osadów zagęszczonych, jak również same mikroorganizmy, są siły ścinające.

Energia włożona w proces dezintegracji w mieszalniku zależy od mocy mieszania, którą Doktorant określił w oparciu o pomiar momentu obrotowego i częstości obrotów mieszadła. Zapotrzebowanie mocy mieszania wynika z obrotów i średnicy mieszadła. Zależy też od gęstości zawiesiny i charakterystyki mocy danego typu zastosowanego mieszadła. Ilość energii włożonej do procesu dezintegracji zależy również od czasu trwania mieszania.

Dla określenia mocy mieszania, w oparciu o pomiary momentu obrotowego na wale mieszadła, Doktorant uwzględnił wyznaczoną przez siebie poprawkę wynikającą z oporów łożyska; poprawkę tę obliczył w oparciu o pomiary momentu obrotowego mieszadła bez turbiny, jak to nazwał „na sucho”. Należy podkreślić, że stanowisko badawcze wraz z urządzeniem do mieszania dezintegracyjnego zostało wykonane w oparciu o projekt Doktoranta. Doktorant zadbał o to by w pomiarach reologicznych szczelina odpowiadała wielkości badanych cząstek osadów wykonując, za pomocą granulometru laserowego, pomiary wielkości cząstek i rozkład wielkości cząstek osadów po dezintegracji. Zadbał również o ograniczenie poślizgu na ściankach cylindrów przez odpowiednią obróbkę (zmatowienie) powierzchni cylindrów oraz o zapobieganie sedymentacji cząstek w trakcie pomiarów; uwzględnił również destrukcję cząstek osadów w trakcie pomiarów. Pomiary były prowadzone w warunkach przepływu laminarnego, a zakres pomiarowy szybkości ścinania został ograniczony do szybkości ścinania odpowiadających prędkościom przepływu w rurociągach ciągów osadowych oczyszczalni ścieków.

Zmiana w przebiegu badań wybranych ww. wartości charakterystyk mieszania, dla ustalonych warunków prowadzenia procesu i wybranych właściwości osadów pozwoliła na zmiany charakteru płynięcia osadów. Według przedstawionego w rozprawie planu badawczego Doktorant wykonał szereg pomiarów reologicznych celem określenia zmian parametrów dla wybranego modelu potęgowego, jako funkcji zmiennych charakteryzujących mieszanie dezintegracyjne. Potęgowy model reologiczny Ostwalda –de Waele został wybrany jako najlepiej opisujący zależność naprężeń ścinających od szybkości ścinania w osadach ściekowych – doboru dokonano w oparciu wyniki pomiarów i wyniki obliczeń programem „Rheosolution” autorstwa pracowników Wydziału Wiertnictwa, Nafty i Gazu AGH.

Badania prowadzono w dwóch seriach badawczych o przyjętej różnej metodyce pomiarów reologicznych. W serii I badaniom poddano próbki osadów z 5 oczyszczalni ścieków(K, B, Z, G, T), każda na 3 poziomach zmienności 3 wybranych zmiennych (zawartości suchej masy, prędkości obwodowej mieszadła i czasu mieszania). Ze względu na zmieniające się w funkcji właściwości fizykochemiczne osadów, Doktorant słusznie przyjął w I serii badań metodykę pomiarów reologicznych polegającą na poddawaniu tej samej próbki osadów pobranej z mieszalnika wzrastającym prędkościom ścinania. Zaletą tej metody była możliwość wyznaczenia krzywej z jednego pomiaru i wykonanie badań dla większej liczby prób. Mimo, że postępowanie takie nie pozwala na uchwycenie właściwości tiksotropowych osadów i powinno być stosowane dla cieczy reostabilnych wyniki badań, a właściwie ich analiza statystyczna dostarczyła szeregu informacji dla określenia zależności opisujących parametry wybranego modelu reologicznego. Analiza ta m.in. wykazała istotny wpływ pochodzenia osadów na ich właściwości reologiczne i wskazała istnienie 3 jednorodnych grup osadów ze względu na parametr n (wskaźnik płynięcia) oraz aż 4 grupy jednorodne ze względu na parametr k (wskaźnik konsystencji) w modelu potęgowym. Pozwoliło to na usunięcie z badań serii II osady z oczyszczalni K, które nie „pasowały” do żadnej z grup jednorodnych. W trakcie badań pierwszej serii, z dwóch zaproponowanych w badaniach turbin, tarczowej i łopatkowej, łopatkowa okazała się mniej korzystna, gdyż zawieszały się na niej części stałe powiązane włosami, znajdującymi się w osadach ściekowych nadmiernych (mimo, iż osady te w ciągu ich przeróbki zwykle są poddawane macerowaniu), dlatego w badaniach właściwości reologicznych zastosowano tylko turbinę tarczową. Doktorant przeprowadził również pomiary wykazujące, że kilkakrotny pobór próbek osadów do badań reologicznych nie wpływa istotnie na przebieg procesu mieszania dezintegrującego.

W drugiej serii pomiarów Doktorant uwzględnił dodatkowo w modelu reologicznym właściwości tiksotropowe osadów określane przez zmianę parametrów modelu reologicznego

w czasie pomiaru w reometrze. Ze względu na sposób wykonania pomiarów - w tej serii badawczej kolejne punkty pomiarowe dla jednej próbki osadów pobranej z mieszalnika wyznaczone były w odrębnym badaniu, - możliwe było przeprowadzenie ich wyłącznie dla 2 poziomów zmiennych wejściowych procesu mieszania dezintegracyjnego (4 osadów z oczyszczalni B, Z, G i T i trzech wartości stężenia suchej masy).

3. Aspekty poznawcze i utylitarne rozprawy

Doktorant ustalił, iż na kształt krzywej płynięcia osadów zagęszczonych wpływa przede wszystkim zawartość suchej masy w osadach natomiast czas dezintegracji oraz szybkość obwodowa mieszadła wpływają w mniejszym stopniu. Ważnym czynnikiem jest również czas ścinania w reometrze. W obu seriach pomiarowych analiza wariancji wykazała istotne różnice pomiędzy średnimi wartościami parametrów modelu potęgowego dla osadów przed i po dezintegracji. O znaczącej poprawie warunków płynięcia osadów świadczyło zmniejszanie się wartości parametru k ze wzrostem prędkości ścinania i czasu mieszania w obydwu seriach. Upłynnienie osadów, ale też monitorowany przez Doktoranta przyrost temperatury, związany z rozpraszaniem energii mechanicznej przekazywanej podczas mieszania dezintegrującego, wpływało na zmniejszenie mocy mieszania w czasie trwania tego procesu.

Wymienione wyniki badań dowodzą, iż mieszanie dezintegrujące może sprawdzić się jako metoda poprawy warunków płynięcia silnie zagęszczonych osadów ściekowych i powinno znaleźć zastosowanie w ciągu zagęszczania osadów ściekowych przed pompowaniem osadów zagęszczonych do komór stabilizacji. Wprowadzenie mieszania dezintegrującego do ciągu przeróbki osadów, umożliwia zastosowanie wyższego stopnia zagęszczania osadów i następnie obniżenie ich lepkości za pomocą dezintegracji, co w konsekwencji umożliwia zwiększenie obciążenia komór stabilizacji ładunkiem suchej masy organicznej. Ze względu na warunki pracy urządzeń do transportu i mieszania osadów, przy ustalaniu parametrów pracy zagęszczaczy mechanicznych powinno się określać wartości graniczne suchej masy osadów w oparciu o ich badania reologiczne oraz obliczenia strat przepływu w rurociągach i ocenę warunków mieszania w komorach stabilizacji.

Stwierdzenie przez Doktoranta istotnych różnic między wyznaczanymi parametrami reologicznymi przyjętego modelu Ostwalda - de Waele dla osadów z wybranych oczyszczalni ścieków sugeruje konieczność indywidualnego podejścia do analizy możliwości wprowadzenia mieszania dezintegracyjnego osadów w każdej z oczyszczalni. Wyniki badań i informacje o technologii zagęszczania na wybranych oczyszczalniach mogą także sugerować istotny wpływ stosowanych środków chemicznych do kondycjonowania osadów.-

statystycznie określona jednorodność osadów z oczyszczalni G i Z może być skutkiem stosowania takiego samego polielektrolitu w procesie zagęszczania.

Innym ważnym dla dezintegracji zjawiskiem, którego pojawienie się potwierdziły badania Doktoranta było zjawisko kawitacji, wykazane w oparciu o analizę mierzonych wartości momentu obrotowego w procesie mieszania dezintegrującego. Pojawianie się kawitacji zależało od prędkości obwodowej mieszadła oraz zawartości suchej masy w osadach. Osady ściekowe cechują się dużą podatnością na występowanie zjawiska kawitacji, które przez badaczy procesów dezintegracji mechanicznej uważane jest za przyczynę rozpadu komórek mikroorganizmów i efekt hydrolizy osadów, powodujący wzrost ChZT substancji rozpuszczonych w cieczy osadowej i wzrost podatności na biochemiczny rozkład w procesie stabilizacji.

4. Elementy nowości

- Jak już wspomniano elementy nowości zawiera przede wszystkim metodologia prowadzonych badań. Przeprowadzenie badań mieszania dezintegracyjnego zagęszczonych osadów nadmiernych w układzie mieszalnika o standardowej geometrii poszerza wiedzę z zakresu mieszania układów wielofazowych, w stosunku do układów dwuskładnikowych zawiesin, pozwalając na odniesienie wyników do innych, poza osadami ściekowymi, substancji badanych w mieszalnikach o podobnej konstrukcji. Uzyskane w skali laboratoryjnej wyniki mogą posłużyć, poprzez powiększenie skali, do projektowania urządzeń na potrzeby techniczne, przy czym zmiany parametrów reologicznych wskutek dezintegracji stanowią istotne dane do projektowania procesów mieszania i przepływu zagęszczonych osadów nadmiernych.
- Praca otwiera także szerokie pole badawcze dla badań innych rodzajów mieszania jakim poddawane są na oczyszczalniach osady ściekowe, a które mają zupełnie inne cele niż mieszanie dezintegracyjne, np. mieszanie osadów dużych stężeniach suchej masy w komorach fermentacyjnych nie może zachodzić przy dużych prędkościach scinania a musi zapewniać pełne ujednoczenie mieszanego medium. Mam nadzieję, że w przyszłych pracach badawczych Doktorant odniesie się do problematyki mieszania osadów także w innych aspektach niż dezintegracja.
- Przyjęty w II serii sposób pomiaru pozwala na określenie parametrów modelu reologicznego z uwzględnieniem zmian właściwości reologicznych w trakcie pomiaru w reometrze. Przedstawiona metodyka odpowiada rzeczywistej charakterystyce osadów, które nie są płynem reostabilnym i nie można w ich przypadku dobrać modelu reologicznego bez uwzględnienia zmian parametrów w czasie.

5. Uwagi o charakterze ogólnym i dyskusyjnym

- Plan badań i ogrom wykonanej pracy byłyby bardziej czytelne gdyby Doktorant przedstawił plan w ujęciu graficznym lub tabelarycznym.
- Wnioski dotyczące badań są zbyt rozbudowane, przykładowo wnioski (b) i (c) mogłyby stanowić uzupełnienie podsumowania.
- Proponuję inne sformułowanie wniosku o charakterze ogólnym pkt.(e), sądzę, że lepiej podkreślające rolę badań jakie wykonał Doktorant, mianowicie „wykonane badania stanowią podstawę do dalszych prac ukierunkowanych na analizę możliwości kształtowania właściwości reologicznych osadów nadmiernych zagęszczonych, dzięki wprowadzeniu mieszania dezintegracyjnego tych osadów w mieszalnikach w skali technicznej, wraz z modelowaniem przepływu osadów w rurociągach i mieszania w komorach fermentacyjnych”.
- W literaturze zaistniały już symbole, które są określają wielkości zdefiniowane przez Doktoranta tj. energii odniesionej do jednostki objętości jako E_V (volumic energy) [kWh/m^3] lub do suchej masy osadów E_S (specyfic energy)[kWh/kg s.m.], warto zatem aby w przyszłych publikacjach Doktorant używał zwyczajowo przyjętych symboli.
- Zamieszczenie w pracy reogramów dla wszystkich 5 osadów zagęszczonych dałoby dodatkowa informację Czytelnikowi o różnicach charakterystyki reologicznej tychże. Co Doktorant rozumie pod pojęciem suchej masy granicznej (wniosek ogólny(b) i jaką propozycję zdefiniowania tej bardzo istotnej z wielu względów wielkości, może zaproponować Doktorant na podstawie przeprowadzonych badań i wiedzy z zakresu przeróbki osadów? Obecnie w procesie fermentacji za technologicznie i technicznie uzasadnione uważa się stężenie suchej masy w osadach zagęszczonych rzędu 6 - 7%, chociaż nowoczesne techniczne zagęszczacze umożliwiają uzyskanie wyższych stężeń. Jakiego rzędu zagęszczenia można będzie wymagać w procesach mechanicznego zagęszczania po wprowadzeniu mieszania dezintegracyjnego osadów zagęszczonych?
- Jak Doktorant definiuje wprowadzone przez siebie sformułowanie „osady słabo sflokulowane”.

6. Uwagi o charakterze szczegółowym.

- Styl i język rozprawy są bardzo zwięzłe, czasami Doktorant używa skrótów myślowych, utrudniających szybkie rozeznanie Czytelnika „co autor miał na myśli”.

- Doktorant wymiennie używa określeń osad/osady, proponowałabym jednak powszechnie akceptowaną w środowisku naukowców zajmujących się osadami ściekowymi słowo „osady”, taka sama uwaga dotyczy określeń próby/próbki własności/właściwości-powszechnie uważa się, że są to próbki oraz właściwości.. Określenie parametry zastrzegłabym tylko do parametrów równaniach i modelach.
- Proponuję, by w publikacjach dotyczących zagadnień poruszanych w rozprawie Doktorant stosował konsekwentnie sformułowanie „mieszanie dezintegracyjne”, co odróżni ten rodzaj mieszania osadów, od innych również stosowanych w przeróbce osadów ściekowych i trwale zastąpi, potocznie używaną, aczkolwiek nie w pełni odpowiadającą zmianom właściwości osadów, formę „homogenizacja osadów”.
- W rozprawie występuje szereg drobnych błędów natury edycyjnej, przykładowo. podpisy pod Rys.30 i 38 powinny dotyczyć parametru k a nie n ; w równaniach na str. 70 i 72 zamiast Θ_m powinno być v_m ; w kilku równaniach „w zastępstwie” litery v występuje ν (wg. spisu oznaczająca kinematyczny współczynnik lepkości).
- Podpisy pod rysunkami zawierającymi krzywe reologiczne powinny zawsze zawierać informacje dla jakich zmiennych procesu mieszania dezintegracyjnego zostały wykonane zwłaszcza w odniesieniu do stężenia suchej masy, nawet jeżeli są to reogramy przykładowe jak na Rys 24-26.

7. Podsumowanie i końcowa ocena pracy

Recenzowana rozprawa dotyczy ważnej obecnie dziedziny badań dotyczących dezintegracji osadów ściekowych celem intensyfikowania procesów ich przeróbki. Rozprawa ta spełnia wymagania stawiane przez obowiązującą obecnie ustawę o stopniach i tytułach naukowych tj. stanowi oryginalne rozwiązanie problemu naukowego, wykazuje ogólną wiedzę teoretyczną Kandydata w dyscyplinie naukowej oraz Jego umiejętność samodzielnego prowadzenia pracy naukowej. Rozprawa dowodzi dojrzałości naukowej Doktoranta przejawiającej się w doborze bardzo aktualnej tematyki pracy, prawidłowym sformułowaniu problemu i ustawieniu zakresu pracy, opanowaniu warsztatu naukowego, a także w zakresie rzetelności w prezentowaniu wyników i formułowania wniosków. Poziom merytoryczny rozprawy, mimo zgłoszonych uwag krytycznych, uważam za wysoki. Wobec powyższego, stawiam wniosek o dopuszczenie rozprawy do obrony publicznej.

Z poważaniem


dr hab. inż. Ewa Zielewicz