

Łódź, dn.12.05.2021 r.

Prof.dr hab.inż. Marek Dziubiński
Wydział Inżynierii Procesowej i Ochrony
Środowiska Politechniki Łódzkiej
90-924 Łódź, ul. Wólczańska 213

RECENZJA ROZPRAWY DOKTORSKIEJ

mgr inż. Beaty Jaworskiej-Jóźwiak

**pt.” Zwiększenie efektywności procesu produkcji wapna poprzez zastosowanie
deflokulanta w procesie transportu hydromieszaniny”**

Promotor pracy: dr hab. inż. Artur Bartosik, prof.PŚk

1. Wybór tematu badawczego

Przesyłanie cieczy lub hydromieszanin przewodami stanowi istotny element rozwiązań technologicznych w wielu gałęziach przemysłu. Do zalet takiego transportu należą: niskie koszty, zachowanie wysokiej czystości transportowanego medium, eliminacja zanieczyszczenia środowiska oraz łatwość monitorowania i automatyzacji takiego procesu.

Jest rzeczą oczywistą, że przesyłanie mediów rurociągami związane jest ze znacznymi wydatkami energetycznymi. W dobie narastających trudności z pozyskiwaniem energii oraz koniecznością optymalizacji kosztów transportu konieczne staje się opracowywanie nowych energooszczędnych technologii oraz metod transportu mediów umożliwiających zmniejszenie zużycia energii. Do metod takich należą: metody wykorzystujące zjawiska anormalnych redukcji oporów przepływu przy dodaniu do transportowanego medium wielkocząsteczkowych polimerów (efekt Tomsa), metody stosujące jako dodatki środki powierzchniowo czynne SPC lub deflokulanty obniżające opory przepływu przy transporcie mediów, metody transportu dwufazowego ciecz-gaz realizowanego za pomocą sprężonego powietrza (stosowane głównie przy transporcie stężonych zawiesin o złożonych właściwościach reologicznych) oraz metody modyfikacji właściwości reologicznych transportowanych mediów. Każda z tych metod znalazła szerokie zastosowanie w praktyce i była przedmiotem wielu prac badawczych.

Mimo opublikowania w literaturze przedmiotu bardzo dużej liczby prac nie udało się w pełni wyjaśnić mechanizmu redukcji oporów przepływu - pomimo zaproponowania wielu hipotez tego zjawiska - oraz zaproponować uniwersalnych równań modelowych, które pozwalałyby przewidywać wartości zredukowanych oporów przepływu.

Celem prezentowanej pracy było opracowanie optymalnych parametrów transportu hydromieszanin popłuczkowych powstających w procesie produkcji wapna, poprzez dobór odpowiednich deflokulantów umożliwiających znaczne obniżenie oporów przepływu hydromieszanin. Podjęcie tego zagadnienia w recenzowanej pracy uważam za w pełni uzasadnione zarówno z teoretycznego jak i praktycznego punktu widzenia. Badania takie odpowiadają najnowszym trendom badawczym związanych z zagadnieniami intensyfikacji szerokiej gamy procesów oraz mechaniki płynów wielofazowych i co szczególnie ważne stwarzają szerokie możliwości aplikacyjne.

2. Charakterystyka pracy

Recenzowana praca została wykonana na Wydziale Zarządzania i Modelowania Komputerowego Politechniki Świętokrzyskiej pod kierunkiem dr hab. inż. A. Bartosika, prof. PŚk. Jest ona kontynuacją wieloletnich badań procesu transportu hydromieszanin prowadzonych przez promotora pracy.

Praca składa się z sześciu rozdziałów, wniosków oraz spisu literatury zawierającego 94 pozycje, z czego 5 to publikacje, w których Doktorantka była ich współautorem. Całość zawarta jest na 171 stronach oraz 10 stronach załączników, w których przedstawiono rysunki techniczne rurociągu przemysłowego oraz wyniki obliczeń spadku ciśnienia przy przepływie hydromieszanin o różnej koncentracji masowej.

We wprowadzeniu Doktorantka przedstawiła elementy podstaw teoretycznych hydrotransportu, proces technologiczny produkcji wapna oraz przegląd literatury przedmiotu. W niezwykle skromnym przeglądzie literatury dotyczącej transportu rurowego hydromieszanin zabrakło mi choćby krótkiej wzmianki o kilku innych metodach transportu hydromieszanin szeroko stosowanych w praktyce przemysłowej, a mianowicie: transportu hydromieszanin za pomocą sprężonego powietrza w postaci przepływu dwufazowego ciecz-gaz, metod opartych na

modyfikacji właściwości reologicznych hydromieszaniny czy wreszcie metod opartych na wykorzystaniu efektu Tomsa.

Rozdział drugi prezentuje cel, hipotezę i koncepcje realizacji badań, zaś krótki rozdział trzeci omawia dobór składników deflokulanta oraz prezentuje właściwości fizykochemiczne składników opracowanych w pracy deflokulantów. Doktorantka zaproponowała składy deflokulantów będących mieszaniną w różnych proporcjach dwóch składników, a mianowicie szkła wodnego sodowego i kaszki wapiennej, która jest produktem odpadowym w procesie gaszenia wapna.

W obszernym rozdziale czwartym - stanowiącym prawie połowę objętości pracy - Doktorantka przedstawiła pomiary i opis właściwości reologicznych stosowanych w badaniach hydromieszanin stwierdzając, że są one płynami wykazującymi silne właściwości nienewtonowskie rozrzedzane ścinaniem oraz posiadające jednocześnie granicę płynięcia. Udowodniła więc, że badane hydromieszaniny wykazują silne zmiany lepkości ze wzrostem szybkości ścinania. Natomiast w obliczeniach oporów przepływu – zaprezentowanych w rozdz.5 – te same hydromieszaniny traktowano o dziwo jako płyny newtonowskie o dość przypadkowo i arbitralnie przyjętej stałej wartości lepkości dla szybkości ścinania odpowiadającej największej prędkości przepływu hydromieszaniny w rurociągu.

Dyskutując uzyskane wyniki pomiarów reologicznych hydromieszanin Doktorantka stwierdza, że po dodaniu deflokulantów lepkość hydromieszanin dla wartości szybkości ścinania równej 1000 s^{-1} malała o około 17% do 31% (zależnie od koncentracji hydromieszaniny), co jest oczywiście korzystne z punktu widzenia transportu rurowego takich mediów. Niejasne jest dla mnie dlaczego porównywano wartości lepkości hydromieszanin bez i z dodatkiem deflokulantów dla szybkości ścinania równej 1000 s^{-1} , ponieważ takie szybkości ścinania w modelowanym przepływie analizowanych hydromieszanin w rurociągu o średnicy 200 mm są niemożliwe do osiągnięcia, bo odpowiadałyby prędkości przepływu hydromieszanin w w/w rurociągu rzędu 15-20 m/s.

Doktorantka opisała uzyskane w badaniach reologicznych krzywe płynięcia hydromieszanin wykonane w szerokim zakresie szybkości ścinania modelem reologicznym Herschela – Bulkleya dla nieliniowych płynów plastycznolepkich. Uzyskane parametry reologiczne modelu Herschela – Bulkleya zastosowała do obliczania wartości skorygowanej szybkości ścinania przy przepływie płynu nienewtonowskiego w rurze, które obliczyła z zależności opracowanych dla

całkowicie innego modelu reologicznego, a mianowicie modelu potęgowego i koncepcji przepływu takich płynów w przewodach opracowanej przez Metznera i Reeda (1955). Nastąpiło więc zasadnicze pomylenie znaczenia rodzajów i wartości parametrów reologicznych płynów nienewtonowskich uzyskiwanych przy opisie ich krzywych płynięcia różnymi modelami reologicznymi, czyli zastosowanie parametrów reologicznych modelu Herschela-Bulkleya w równaniach opisujących przepływ płynu nienewtonowskiego w przewodach opracowanych dla modelu potęgowego płynu.

Po przeprowadzonej rozmowie i dyskusji wyjaśniającej Doktorantka dokonała przeliczenia uzyskanych danych doświadczalnych, które to obliczenia przedstawiła mi w przesłanym aneksie rozdz. 5 i 6 oryginalnej pracy. **Wykonane w pracy nowe obliczenia modelowe, poprawne merytorycznie akceptuję i stwierdzam, że moja recenzja dotyczy poprawionej wersji rozdz.5 i 6 recenzowanej pracy doktorskiej.**

Poprawiony rozdział piąty pracy to prezentacja prostego modelu obliczeniowego i symulacja teoretyczna wpływu dodatku deflokulantów do hydromieszanin na wielkość obniżenia oporów przepływu przy ich transporcie rurowym. Doktorantka wykonała zmodyfikowany opis właściwości reologicznych hydromieszanin oraz wykonała skorygowane modelowe obliczenia spadku ciśnienia przy przepływie hydromieszanin oraz hydromieszanin z dodatkiem deflokulantów. Krzywe płynięcia opisała w dużo mniejszym zakresie szybkości ścinania od 2 do 70 s⁻¹, niż w oryginalnej pracy, w której zakres ten wynosił od około 0,1 do 1000 s⁻¹. Zawężony zakres opisu krzywej płynięcia odpowiadał zakresowi szybkości ścinania występującemu w modelowanym rurociągu o średnicy 200 mm i umożliwił bardziej precyzyjny opis krzywych płynięcia w interesującym zakresie szybkości ścinania występującym w przepływie rurowym. Po stwierdzeniu, że wielkość granicy płynięcia hydromieszanin była mała w stosunku do występujących w przewodzie naprężeń stycznych Doktorantka zdecydowała się na uproszczony opis krzywej płynięcia poprzez zaniedbanie granicy płynięcia. Przy takim założeniu stosowany do opisu krzywych płynięcia złożony model reologiczny Herschela-Bulkleya redukuje się do prostego modelu potęgowego i taki model reologiczny Autorka zastosowała w dalszych obliczeniach. Jest to pewne uproszczenie obliczeń, poprawne merytorycznie i dopuszczalne w rozważanym przypadku przepływu analizowanych hydromieszanin w stosunku do rozpatrywania ich jako płyny newtonowskie, co

założono – wbrew wynikom wykonanych badań reologicznych – w wykonanych obliczeniach oporów przepływu hydromieszanin w oryginalnej wersji pracy.

Zastosowany przez Doktorantkę uproszczony opis modelowania przepływu hydromieszanin wykazujących cechy płynu nienewtonowskiego jest sugerowany w literaturze przedmiotu - szczególnie w przypadku wystąpienia przepływu turbulentnego płynów nienewtonowskich - przez wybitnych specjalistów tych zagadnień, a mianowicie prof. J. Richardsona z University of Wales, Swansea i Prof. R. Chhabre z Indian Institute of Technology, Kanpur w ich monografii: R.P. Chhabra, J.F. Richardson „Non-newtonian flow and applied rheology. Engineering application” Butterworth-Heinemann, Oxford (2008).

W wyniku przeprowadzonych badań reologicznych Doktorantka potwierdziła znaczny spadek lepkości analizowanych hydromieszanin po dodaniu do nich optymalnych dawek deflokulanta. Wykonane obliczenia oporów przepływu hydromieszanin wykazujących właściwości płynów nienewtonowskich potwierdziły znaczące obniżenie ich oporów przepływu po dodaniu optymalnych dawek deflokulantów. Największe prawie 2,5 krotne zmniejszenie oporów przepływu odnotowano po dodaniu deflokulanta do hydromieszaniny o koncentracji 42,75 %.

Rozdział szósty to ocena efektywności procesu transportu hydromieszanin oraz oszacowanie możliwych do uzyskania oszczędności ekonomicznych przy stosowaniu transportu takich hydromieszanin z dodatkiem deflokulantów opracowanych w pracy oraz określenie optymalnych warunków transportu hydromieszaniny z punktu widzenia procesowego i ekonomicznego. W przeprowadzonej analizie obliczano sumaryczne koszty procesu transportu 27 t/h fazy stałej transportowanej w postaci hydromieszanin o różnej koncentracji 21,3%, 28,14%, 35,0%, 42,75% i 50,0% mas. Uwzględniono w niej koszty energii elektrycznej pobieranej przez pompę wirową, koszty zakupu deflokulanta oraz koszty wody przemysłowej dostarczanej do instalacji.

Optymalnym rozwiązaniem okazał się transport 27 t/h cząstek fazy stałej w postaci hydromieszaniny o stężeniu 42,75% z dodatkiem deflokulanta. W transporcie takim uzyskuje się dwukrotne zmniejszenie ilości wody przemysłowej dostarczanej do instalacji w stosunku do hydromieszaniny bazowej o stężeniu 21,3 % oraz zmniejszenie poboru energii elektrycznej przez silnik pompy szlamowej o 55%. Transport hydromieszaniny o zwiększonej koncentracji – możliwy dzięki dodaniu

deflokulanta – umożliwia uzyskanie znacząco zmniejszonych sumarycznych kosztów pracy instalacji wynoszących około 1 mln zł w skali rocznej.

Rozdział siódmy to bardzo rozbudowane szczegółowe wnioski podsumowujące uzyskane wyniki pracy.

3. Ocena merytoryczna pracy

Recenzowana praca doktorska jest pracą doświadczalno-teoretyczną z przesuniętym punktem ciężkości w kierunku eksperymentu. Praca napisana jest poprawnym językiem, szata graficzna jest staranna i nie budzi zastrzeżeń. Prezentowane rysunki i wykresy są czytelne i dobrze opracowane. W mojej ocenie praca jest wykonana samodzielnie i w znacznym stopniu stanowi oryginalne opracowanie wybranych aspektów hydrodynamiki przepływu rurowego hydromieszanin wapiennych z dodatkiem deflokulantów. Umiejętność ta świadczy o dojrzałości Doktorantki do samodzielnego rozwiązywania stawianych przed nią problemów naukowo-badawczych.

Do najważniejszych osiągnięć - będących elementami nowości naukowej - pracy należy zaliczyć:

1. Zastosowanie metody planowania eksperymentu do określenia składu deflokulantów będących mieszaniną szkła wodnego sodowego oraz kaszki wapiennej umożliwiających obniżenie oporów przepływu transportowanych hydromieszanin wapiennych.
2. Wykonanie szerokiego zakresu badań umożliwiających określenie wpływu dodatku deflokulantów na właściwości reologiczne transportowanych hydromieszanin oraz określenie optymalnych warunków transportu rurowego 27 t/h cząstek fazy stałej w postaci hydromieszaniny.
3. Określenie efektów ekonomicznych uzyskiwanych przy transporcie rurowym hydromieszanin wapiennych z dodatkiem opracowanych deflokulantów.

4. Uwagi i zapytania .

W trakcie czytania pracy nasunęło mi się kilka uwag i zastrzeżeń merytorycznych oraz korektorsko-stylistycznych, które wymagają wyjaśnienia w trakcie publicznej obrony pracy:

1. Jak Doktorantka ocenia nakłady pracy wykonane przy zastosowaniu metody planowania eksperymentu w stosunku do uzyskanych efektów i wskazań dotyczących ograniczenia zakresu wykonanych w pracy badań?
2. Dlaczego na wykresach rys. 4.21, 4.23, 4.26, 4.29, 4.32 i 4.35 w oryginalnej wersji pracy przedstawiono zależności lepkości hydromieszanin od szybkości ścinania w zakresie $200 - 1000 \text{ s}^{-1}$, podczas gdy dla obliczeń oporów przepływu hydromieszanin ważne były dane doświadczalne w zakresie szybkości ścinania od około 2 s^{-1} do maksymalnej wartości 70 s^{-1} . Taki zakres szybkości ścinania występuje bowiem przy transporcie hydromieszanin z rozważanymi natężeniami przepływu w rurociągu.
3. Proszę skomentować w kontekście wyników badań przedstawionych na rys.4.8 dotyczących zmian lepkości hydromieszanin w czasie ich mieszania, na potencjalne wyniki obliczeń oporów przepływu w rurociągu przemysłowym. W zależności od natężeń przepływu hydromieszanin ich czas przebywania w rurociągu, w którym hydromieszanina będzie podlegała procesowi ścinania będzie wynosił od 460s do około 14360s w przypadku najmniejszego natężenia przepływu hydromieszaniny.
5. Przedstawione na str.125 równanie ciągłości przepływu (5.4) nie odpowiada przyjętym przekrojom 1-1 i 2-2, dla których napisano równanie Bernoulliego, a wynikająca z niego równość prędkości $U_{S1} = U_{S2}$ jest w sprzeczności z opisem wartości poszczególnych parametrów równ.(5.1).
6. Dlaczego w zależności (6.7) zastosowano wielkość mocy na wale pompy P_w , a nie wielkość poboru mocy przez silnik elektryczny P_s napędzający pompę ? Takie podejście powoduje nie uwzględnienie w rozważaniach sprawności silnika elektrycznego.
7. Doktorantka wykazała w kilku miejscach tekstu pracy niezrozumienie wielu pojęć reologicznych – patrz str.49, 100 i 120.
8. Doktorantka stosuje w pracy wartości wyznaczanych doświadczalnie parametrów reologicznych określane z dokładnością do 6 miejsc po przecinku – proszę o komentarz na ten temat.
9. Autorka nie ustrzegła się wielu błędów korektorskich i stylistycznych. Jednymi z najczęściej występujących są zwroty: „...własności reologiczne” lub „...spadek ciśnienia przepływu”. Nie ma "większych liczb Reynoldsa" są jedynie większe wartości liczby Reynoldsa. Autorka używa również zwrotu „.....ilość punktów

doświadczalnych" zamiast "...liczba punktów doświadczalnych". Doktorantka nieprawidłowo używa również pojęcia „wiskozymetria” oraz „pomiaru wiskozymetrycznego”.

10. Spis literatury zawiera wiele błędów. W osiemnastu pozycjach literaturowych podano rażąco niepełne informacje utrudniające odnajdywanie i korzystanie z cytowanych w pracy materiałów źródłowych.

Przedstawione uwagi mają charakter polemiczny i w mojej opinii nie umniejszają wartości pracy, lecz dla jej przejrzystości wymagają wyjaśnienia podczas jej publicznej obrony.

5. Wniosek końcowy

Praca doktorska mgr inż. Beaty Jaworskiej-Jóźwiak podejmuje bardzo trudny i złożony, interdyscyplinarny problem hydrodynamiki przepływu hydromieszanin wykazujących cechy płynów nienewtonowskich rozrzedzanych ścinaniem. Rozprawa napisana jest poprawnie pod względem formalnym i merytorycznym. Wnioski wynikające z wykonanych badań własnych są właściwie udokumentowane. Autorka wykazała się znajomością wiedzy z zakresu mechaniki płynów nienewtonowskich i jest przygotowana do prowadzenia badań w tej dziedzinie.

Stwierdzam, że rozprawa doktorska mgr inż. B. Jaworskiej-Jóźwiak stanowi samodzielne rozwiązanie wybranych problemów przepływu hydromieszanin wykazujących właściwości płynów nienewtonowskich w przewodach o przekroju kołowym oraz wnosi elementy nowości naukowej w poznaniu takich przepływów.

Reasumując stwierdzam, że recenzowana praca wykonana w dziedzinie nauk technicznych i dyscyplinie inżynieria mechaniczna spełnia warunki stawiane rozprawom doktorskim. Wnoszę o jej przyjęcie i dopuszczenie mgr inż. B. Jaworskiej - Jóźwiak do publicznej obrony pracy.