



P O L I T E C H N I K A      Ś L Ą S K A

WYDZIAŁ  
MECHANICZNY TECHNOLOGICZNY

INSTYTUT MECHANIKI  
TEORETYCZNEJ I STOSOWANEJ

UL. KONARSKIEGO 18A  
44-100 GLIWICE  
TEL: +48 32 237 16 46  
FAX: +48 32 237 28 70  
RMT3@polsl.pl

NIP: 631-020-07-36 / REGON: 000001637 / ING BANK ŚLĄSKI SA O/GLIWICE / NR RACHUNKU: 60 1050 1230 1000 0002 0211 3056

prof. dr hab. inż. Eugeniusz Świtoński

Gliwice, 23.05.2019

Wpłynęło: Data 2019-06-03  
Ldż. 215 WIM: Dcu

## Recenzja

rozprawy doktorskiej mgr inż. Weroniki Kruszelnickiej  
pt. „Analiza procesu wielotarczowego rozdrabniania biomasy w ujęciu  
energochłonności i emisji CO<sub>2</sub>”

Opracowana na zlecenie Dziekana Wydziału Inżynierii Mechanicznej Uniwersytetu  
Technologiczno-Przyrodniczego w Bydgoszczy

### 1.0 Podstawa opracowania recenzji:

Podstawą opracowania recenzji jest uchwała Rady Wydziału Inżynierii Mechanicznej Uniwersytetu Technologiczno-Przyrodniczego w Bydgoszczy z dnia 2 kwietnia 2019r. oraz przepisy ustawy o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki (Dz.U. z 2014 r. poz. 1852 ze zm.).

### 2.0 Uwagi ogólne i uzasadnienie tematyki rozprawy

W związku z dynamicznym rozwojem sektora przetwarzania biomasy na cele energetyczne, pojawiła się potrzeba projektowania efektywnych urządzeń do rozdrabniania biomasy. Dotyczy to w szczególności optymalizacji wartości wybranych parametrów tarcz rozdrabniacza wielotarczowego. W dobie powszechnego dążenia do wysokiej efektywności energetycznej urządzeń kluczowe, w przypadku rozdrabniania, jest zoptymalizowanie zużycia energii podczas tego procesu. Miarą rozdrobnienia (podziału) materiału na części jest tzw. stopień rozdrobnienia (stopień dyskretyzacji), definiowany ogólnie jako iloraz wymiarów wielkości charakteryzującej cząstkę materiału przed rozdrobnieniem i po rozdrobnieniu rozdrabniaczem wielotarczowym. Istnieje wiele typów konstrukcji rozdrabniaczy, stosowanych do rozdrabniania biomasy. Dobór ich w procesie produkcyjnym zależy, między innymi, od rodzaju materiału wejściowego. W procesie rozdrabniania ważnym czynnikiem jest określenie optymalnych cech dynamicznych rozdrabniacza i jego parametrów eksploatacyjnych, które wyznacza się na podstawie badań teoretycznych i doświadczalnych. Główną ideą prowadzonych badań, dotyczących tych urządzeń, jest lepsze dostosowanie biomasy do celów energetycznych oraz redukcja objętości odpadów w przypadku biomasy odpadowej. Taki kierunek badań podjęła Doktorantka. Rozwiązania problemów analizowanych procesów Autorka dysertacji upatruje w zintegrowanym podejściu do elementów i relacji kształtujących energochłonność, efektywność, emisyjność rozdrabniania, eksploatacyjność, w powiązaniu z emisyjnością CO<sub>2</sub>. Określenie optymalnych cech konstrukcyjnych (geometrycznych, materiałowych i dynamicznych) i kinematycznych wielootworowych tarcz rozdrabniających (prędkości kątowe i gradienty prędkości między tarczami), a także zabezpieczenie przed nadmiernymi procesami

tribologicznymi, pozwoli producentom obniżyć ceny dostarczanych urządzeń oraz części zamiennych. Optymalizacja, parametrów eksploatacyjnych i cech dynamicznych rozdrabniaczy wielotarczowych, pozwoli na uzyskanie wymiernych efektów produkcyjnych.

### 3.0 Uzasadnienie tematu rozprawy

Przedstawione w rozprawie badania dotyczą wiedzy o wzajemnych relacjach cech konstrukcyjnych tarcz, ich cech ruchu oraz o procesach masowych materiałów uziarnionych - tzn. inżynierii rozdrabniania.

Ujęcie energochłonności i emisji CO<sub>2</sub> procesu rozdrabniania materiałów uziarnionych, poprzez analizowanie, ocenianie i tworzenie, realizuje Autorka w oparciu o kryteria efektywnej wydajności, zapotrzebowania mocy, jednostkowego zużycia energii, relacji wielkości cząstek wsadu i produktu, a przede wszystkim zintegrowanej energochłonności, zrównoważonej emisyjności oraz funkcji energetyczno-środowiskowej.

Podjęcie próby rozwiązania sformułowanych w dysertacji problemów ma na celu zaproponowanie i weryfikację modelu matematycznego umożliwiającego zaprojektowanie zespołu konstrukcji procesowej spełniającego wymagania funkcjonalności, postaci, jakości otrzymywanych ziaren produktu, przy jednoczesnym spadku jednostkowego zapotrzebowania na energię, który wynika z relacji wydajności masowej i zapotrzebowania mocy, przy zachowaniu technologicznego stopnia rozdrobnienia oraz minimalizacji funkcji energetyczno-środowiskowej. Badania, analiza procesu wielotarczowego rozdrabniania biomasy w ujęciu energochłonności i emisji CO<sub>2</sub> to istotny problem inżynierii mechanicznej, budowy i eksploatacji systemów maszynowych, w szczególności ich projektowania, sterowania, optymalizacji energetyczno-środowiskowej.

**Praca jest oryginalna i można stwierdzić, że ze względu na walory poznawcze i aplikacyjne realizowanych badań podjęta tematyka rozprawy doktorskiej została określona prawidłowo, a złożoność rozpatrywanych zagadnień stanowi interesujący obszar badań naukowych.**

### 4.0 Opis rozprawy doktorskiej

Praca zawiera 7 zasadniczych rozdziałów, w tym wstęp, dodatkowo zestawienie bibliografii, wykazy tabel, oznaczeń i rysunków; na końcu streszczenia. Jest edytowana na 142 stronach, bibliografia obejmuje 148 pozycji różnorodnej literatury, jest 12 pozycji własnych lub współautorskich. Praca jest właściwie zilustrowana graficznie (72 rysunki) a dane uporządkowane są tabelarycznie (57 tabel).

W pracy przedstawiono stan wiedzy i praktykę problematyki energetyczno-środowiskowej analizy efektywności procesu rozdrabniania biomateriałów uziarnionych młynem wielotarczowym i na tej podstawie zaproponowano założenia własnej metodyki badań prowadzeniowych oraz analizę, ocenę i rozwój proponowanych konstrukcji w świetle uzyskanych wyników. Szczegółowy zakres dysertacji dotyczy:

- analizy stanu wiedzy i techniki w zakresie tematyki rozprawy,
- celu i problemu badań,
- metodyki badań,
- wyników badań,
- podsumowania,
- wniosków.

## 5.0 Cel i założenia pracy

Jako główny cel pracy przyjęto:

1. Opracowanie modelu matematycznego energochłonności i emisji CO<sub>2</sub> technologicznego quasi-ścinania uziarnionej biomasy dla potrzeb projektowania wielootworowych (tarczowych) zespołów rozdrabniających;
2. Eksperymentalne wyznaczenie wpływu wybranych parametrów procesu wielotarczowego wielootworowego rozdrabniania na energochłonność, (jednostkowe zużycie energii) i zrównoważone emisje CO<sub>2</sub> technologicznego quasi-ścinania uziarnionej biomasy.

Dla osiągnięcia tego celu sformułowane zostały następujące problemy badawcze:

1. Czy uwzględniając zmienne parametry ruchu tarcz i otworów w tarczach przepustowo-tnących, wytrzymałość ziaren ryżu i kukurydzy, przekroje robocze i liniową prędkość maszynowego quasi-ścinania strumienia masy ziaren, możliwe jest opracowanie adekwatnego modelu matematycznego pracy użytecznej i strat energii technologicznego quasi-ścinania, wydajności, stopnia rozdrabniania i wskaźników emisji CO<sub>2</sub> dla potrzeb projektowania wielootworowych zespołów rozdrabniających?
2. Jaki wpływ na pracę użyteczną i straty energii, wydajność, stopień rozdrobnienia i wskaźniki emisji CO<sub>2</sub> technologicznego quasi-ścinania uziarnionej biomasy (ryżu, kukurydzy) w wielootworowym zespole rozdrabniającym wywierają celowo zmieniane (innovacyjne) cechy i relacje ruchu elementów tego zespołu?

## 6.0 Metodyka rozwiązania problemu

Przeprowadzona w pracy analiza dotychczasowego stanu wiedzy i techniki pozwoliła na uporządkowanie kryteriów oceny rozdrabniania pod kątem energochłonności i emisji, a także jakości produktu.

W dyskusji zaproponowanych modeli energochłonności, przy ustalonych cechach ruchowych, czasowych, materiałowych i konstrukcyjnych, stwierdzono słusznie, że minimalizowanie poboru mocy biegu jałowego  $P_{bj}$  jest ograniczone. Minimalizowanie zapotrzebowania mocy w warunkach maszynowych można sprowadzić więc do minimalizowania poboru mocy na zasadniczy proces odkształcania trwałego ziaren, czyli na rozdrabnianie  $P_{pr}$ . Moc rozdrabniania wynika z mocy potrzebnej do trwałego odkształcania materiału wsadowego, mocy na transport materiału wewnątrz komory rozdrabniania, mocy na zwwyżkę aerodynamiczną oraz strat mocy na skutek tarcia wzajemnego cząstek i zewnętrznego o elementy maszyny.

Interesującym rozwiązaniem, łączącym wiele aspektów procesu rozdrabniania było zastosowanie przez Autorkę modelu poboru mocy, wydajności masowej i zintegrowanej efektywności, dzięki temu uzyskano związek ilościowy pomiędzy najważniejszymi wskaźnikami materiału, maszyny, procesu i następstw rozdrabniania w ujęciu energochłonności. Emisja CO<sub>2</sub> ekwiwalentnego w procesie rozdrabniania powiązana jest ściśle z poborem mocy i jego energochłonnością. Słusznie zauważono, że poprawa środowiskowego oddziaływania procesu, produktu, maszyny (np. poprzez redukcję, eliminację CO<sub>2</sub>), przy zachowaniu innych celów: zwiększenia wydajności oraz uzyskanie produktu o pożądanej jakości, w procesie o podwyższonej efektywności energetycznej może opierać się o tzw. modele pobadawcze. Opracowanie modeli opisujących wydajność, stopień rozdrobnienia,

energochłonność, emisyjność nie jest możliwe bez prowadzenia eksperymentów i badań doświadczalnych.

Przedstawiono autorskie, badawcze modele zintegrowanej energochłonności, zrównoważonej emisyjności i funkcje oceny energetyczno-środowiskowej wraz z ich weryfikacją na rzeczywistym obiekcie – rozdrabniaczu pięciotarczowym. Uzyskane wyniki badań umożliwiają zastosowanie modeli energochłonności i emisyjności w sterowaniu, projektowaniu i konstruowaniu rozdrabniaczy wielotarczowych.

Zaproponowano narzędzie rozdrabniające – liczne tarcze z wykonanymi w rzędach na promieniach wodzących otworami przepustowo-rozdrabniającymi, których postać i wymiary konstrukcyjne zapobiegają podgrzewaniu rozdrabnianego materiału (aeracja), nadmiernemu zużyciu energii i krawędzi roboczych (dominujące zjawisko quasi-ścianienia), a sprzyjają zwiększaniu wydajności procesu (łatwa transmisja otworowa) i jakości produktu rozdrabniania (duża powtarzalność geometryczna ziaren produktu).

Badania analityczne procesu rozdrabniania obejmowały trzy główne etapy metodycznie ze sobą powiązane, których realizacja pozwoliła na osiągnięcie celu rozprawy:

1. Badanie własności wytrzymałościowych ziaren rozdrabnianych, próbę ściskania i ścinania ziaren ryżu i kukurydzy ze stałą prędkością  $v_s=2 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$  przeprowadzone dla 100 ziaren ryżu i 100 ziaren kukurydzy na maszynie wytrzymałościowej Instron 5966.
2. Eksperyment numeryczny, który obejmował warunki rozdrabniacza wielotarczowego z nowoczesnym, informatycznym instrumentarium badawczym LABVIEW, systemem monitorowania parametrów procesu.
3. Analiza uzyskanych wyników w zakresie wytrzymałości ziaren oraz wpływu prędkości ścinania na energię rozdrabniania; wpływu zmian prędkości kątowych na kryteria oceny rozdrabniania: wydajność, jednostkowe zapotrzebowanie na moc i energię, stopień rozdrobnienia, zintegrowaną energochłonność, emisyjność zrównoważoną oraz funkcję oceny energetyczno-środowiskowej.

W dalszej kolejności przeanalizowano statystycznie, merytorycznie wyniki w zakresie związków pomiędzy zmiennymi zintegrowanej energochłonności, zrównoważonej emisyjności, a szczegółowo: wydajności, zapotrzebowania mocy, jednostkowego zużycia energii oraz analizy postaci i wymiarów geometrycznych produktu rozdrabniania i stopnia rozdrobnienia.

Szczegółowa analiza wyników badań poboru mocy, wydajności, jednostkowego zużycia energii, stopnia rozdrobnienia, energochłonności i najważniejszej, syntetycznej funkcji oceny energetyczno-środowiskowej pozwoliła na sformułowanie licznych wniosków. Znaczący dla projektowania, konstruowania i sterowania rozdrabnianiem wielotarczowym biomateriałów uziarnionych jest model, w postaci wielomianu drugiego stopnia najlepiej opisujący wyniki badań w zakresie warunków: kukurydzy, rozdrabniacza pięciotarczowego i badawczego przyrostu prędkości kątowej na tarczach  $\Delta\omega$ . Przedstawiono istotne wnioski, typu poznawczego, praktycznego jako wytyczne do dalszych badań i zastosowań wdrożeniowych.

**W sposób wyróżniający opracowano i zrealizowano oryginalną metodykę badań studialnych, cyfrowych i doświadczalnych, która doprowadziła do wyznaczenia licznych, użytecznych modeli partykularnych, oraz nowego, zintegrowanego energetyczno-środowiskowego podejścia do procesu rozdrabniania dwóch uziarnionych biomateriałów innowacyjnym młynem pięciotarczowym, do racjonalnego projektowania, konstruowania i sterowania, a w konsekwencji użytecznej eksploatacji nowego zespołu mielącego.**

## 7.0 Uwagi ogólne

Analizując treści zawarte w monografii nasuwają się następujące uwagi ogólne. Związane ze sformułowanymi problemami badawczymi, które mają charakter pytań.

1. Opracowanie modelu matematycznego (raczej fizycznego) energochłonności i emisji CO<sub>2</sub> w procesie rozdrabniania biomasy, który stanowił by podstawę w procesie projektowo-konstrukcyjnym wielootworowych (tarczowych) zespołów rozdrabniających. Dla osiągnięcia tego celu sformułowane zostały pytania badawcze, dotyczące uzyskania pożądanej pracy użytecznej, efektu procesowego.

2. Jaki wpływ na pracę użyteczną i straty energii, wydajność, stopień rozdrobnienia i wskaźniki emisji CO<sub>2</sub> w wielootworowym zespole rozdrabniającym mają cechy i relacje ruchu elementów tego zespołu.

Zdaniem recenzenta te pytania należało przedstawić w tezie pracy, którą należałoby udowodnić.

### 7.1 Uwagi szczegółowe:

W dalszych publikacjach proponuję, do rozważenia, wykorzystanie następujących spostrzeżeń związanych z tekstem rozprawy:

s.11<sup>19</sup> - wartość energetyczna zdecydowanie w MJ·kg<sup>-1</sup>;

s.14, zależność (2.1) przyrost powierzchni materiału: powinno być  $\Delta S$ , a nie  $\Delta s$ ;

s.19, rys.2.2 - w legendzie zasygnalizowano pojęcie siły F, której nie podano na rysunku;

s.30<sup>3-4</sup> - dość niefortunne zdanie "Spełnienie wymagań, ... wymaga ...";

s.31 zależność (2.49) - czy jednostka zapotrzebowania energii w J jest poprawna?

s.41, rys.4.1 - Emisje zajęły dość oryginalne miejsce na rysunku, najczęściej zarezerwowane dla "stałych badawczych", a przecież są, zgodnie z dalszym opisem, zmiennymi zależnymi?

s.51<sup>10</sup> - trzeba dodać "w otworach" pierwszej tarczy;

s.53<sup>13</sup> - w wielu miejscach rozprawy i na tej stronie, na odkształcenia rozdrabniające Doktorantka używa określenia "zniszczenie" materiału, myślę, że ładniej i adekwatnie można pisać: "trwałe odkształcenie materiału";

s.55<sup>1</sup> - w tym przypadku trzeba dodać "...klasy wymiarowej "produktu", "

s.66, rys.4.11 - gdzieś zniknął tekst z prostokątów dolnych schematu blokowego, a na rys.4.12 zespół tarcz 8 przesunął się do kosz odbiorczego!?

s.67<sup>1</sup> - myślę, że dokładniej byłoby zamiast "tarcz roboczych zasilanych", napisać: tarcz roboczych "napędzanych";

s.84<sup>3</sup>, s.85<sup>8</sup> - Doktorantka używa zamiennie określenia "jednostkowe zużycie energii" (np., s.84 i inne w pracy) i "jednostkowe zapotrzebowanie na energię" (np. s.85 i inne w pracy); czy można ten zapis ujednoczyć?

s.111<sup>2</sup>, s.111<sup>13</sup> - Doktorantka używa określenia "emisyjność zintegrowana", a powinno być "emisyjność zrównoważona" i opisuje "zrównoważoną emisyjność" jako "zintegrowaną energochłonność" we wprowadzającym komentarzu do zależności (5.1).

## 8.0 Ocena formalna

Przedstawione powyżej uwagi i zastrzeżenia nie umniejszają merytorycznej wartości pracy, którą oceniam bardzo pozytywnie i uważam, że zasługuje na wyróżnienie przez Radę Wydziału Inżynierii Mechanicznej UTP w Bydgoszczy. Prezentowana praca powinna być kontynuowana w zakresie uniwersalizacji wyników.

Stwierdzam, że planowany cel pracy został w pełni zrealizowany. Poczyniono istotny krok naukowy i praktyczny w badaniach procesu wielotarczowego rozdrabniania biomasy w ujęciu energochłonności i emisji CO<sub>2</sub>, co rozszerza wiedzę inżynierii mechanicznej w obszarze budowy i eksploatacji systemów maszynowych, w szczególności w zakresie optymalizacji cech dynamicznych rozdrabniaczy.

Przedstawione wyniki otwierają nowe możliwości budowy i eksploatacji maszyn, w szczególności dla badań zmierzających do zastosowania modelu matematycznego procesu wielotarczowego rozdrabniania biomasy w ujęciu energochłonności i emisji CO<sub>2</sub> dla potrzeb projektowania, konstruowania i użytecznego sterowania.

Literatura dobrana jest właściwie, wszystkie pozycje aktualnej i różnorodnej literatury zostały zacytowane w rozprawie. Autorka wykonała starannie, pracochłonne zadanie, nie popełniając dostrzegalnych i istotnych błędów. Wyniki badań teoretycznych zostały zweryfikowane eksperymentem i mogą być wdrożone w praktyce inżynierskiej.

### 9.0 Wniosek końcowy

Cel pracy został w pełni zrealizowany, a zawarte w monografii wyniki badań, które mają wysokie wartości poznawcze i użyteczne, mogą być wdrożone w przemyśle. Poprawność i oryginalność postawionego metodologicznego celu pracy jest niepodważalna.

Analiza autorska źródeł literatury światowej i stanu techniki świadczy o znacznej wiedzy Autorki w dyscyplinie naukowej. Stwierdzić można nowatorstwo i oryginalność rozprawy w stosunku do stanu wiedzy i stanu techniki reprezentowanych przez literaturę światową. Potwierdzić można istotne znaczenie uzyskanych wyników dla inżynierii mechanicznej, budowy i eksploatacji maszyn. Autorka dysertacji wykazała umiejętności przekonującego przedstawienia uzyskanych przez siebie wyników.

Podsumowując recenzowaną rozprawę doktorską Pani mgr inż. Weroniki Kruszelnickiej pt „Analiza procesu wielotarczowego rozdrabniania biomasy w ujęciu energochłonności i emisji CO<sub>2</sub> stwierdzam, że spełnia ona ustawowe wymagania stawiane pracom doktorskim, wg Ustawy o Stopniach i Tytułach Naukowych z dnia 14.03.03, Dz. U. 2003 nr 65 poz. 595, w szczególności art. 13, ustęp 2., utrzymanym w mocy zgodnie z art.179 ust. 2 ustawy z dnia 3 lipca 2018 roku - Przepisy wprowadzające ustawę - Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (Dz.U. 2018, poz. 1669). **Stawiam więc do Rady Wydziału Inżynierii Mechanicznej UTP w Bydgoszczy wniosek o dopuszczenie jej do publicznej obrony w dyscyplinie inżynieria mechaniczna, budowa i eksploatacja maszyn.** Równocześnie stawiam wniosek o wyróżnienie rozprawy doktorskiej (Uzasadnienie: rozprawa prezentuje wysoki poziom, biorąc pod uwagę rangę rozwiązanego problemu, zakres i jakość badań wyróżnia się oryginalnością zastosowanych metod i narzędzi badawczych, posiada szczególne walory poznawcze, użytkowe i aplikacyjne).

Świątkowski Eugeniusz