

Uniwersytet Technologiczno-Przyrodniczy  
im. Jana i Jędrzeja Śniadeckich w Bydgoszczy  
Wydział Inżynierii Mechanicznej

mgr inż. Weronika Kruszelnicka

# **AUTOREFERAT**

## **rozprawy doktorskiej**

**„Analiza procesu wielotarczowego rozdrabniania biomasy  
w ujęciu energochłonności i emisji CO<sub>2</sub>”**

Promotor:  
dr hab. inż. Andrzej Tomporowski, prof. nadzw. UTP

Promotor pomocniczy:  
Dr inż. Adam Mroziński

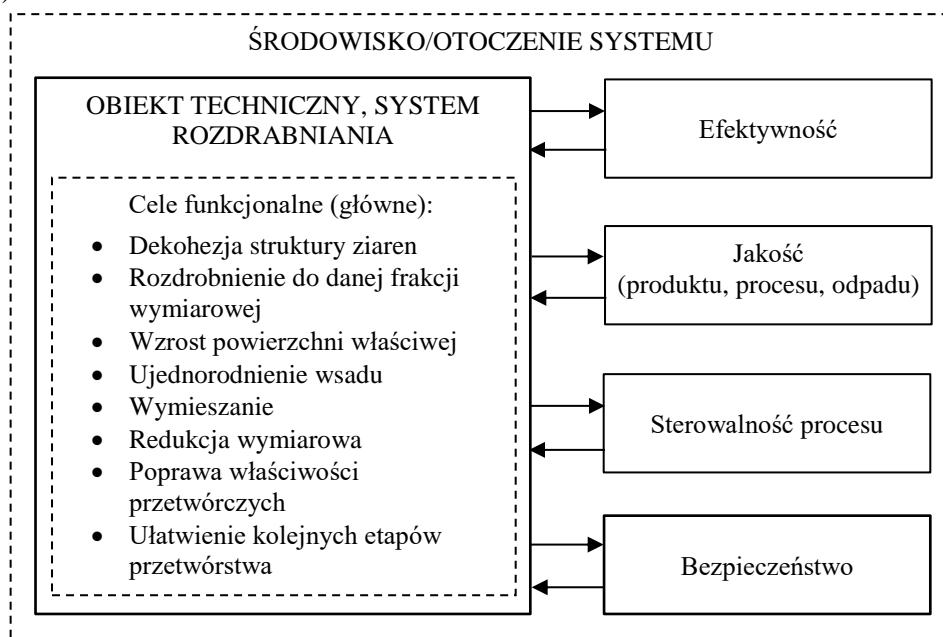
*Praca naukowa finansowana ze środków budżetowych na naukę w latach 2017-2021, jako projekt badawczy w ramach programu „Diamentowy Grant”*

Bydgoszcz, czerwiec 2019

## 1. WSTĘP

Rozdrabnianie, mielenie, kruszenie to określenia opisujące procesy celowego niszczenia struktury postaciowej materiałów pod wpływem oddziaływań ruchomych (najczęściej obrotowych) elementów roboczych rozdrabniacza. W wielu branżach (np. spożywczej, chemicznej, mineralnej, papierniczej, energetycznej itd.) rozdrabnianie stanowi niezbędny etap przetwórstwa. Szczególnie ważną rolę odgrywa w przemyśle energetycznym w przygotowaniu węgla i coraz częściej, biomasy do spalania w ciepłowniach i elektrociepłowniach.

Specyfika obszarów zastosowania procesów rozdrabniania narzuca pewne cechy pożądane, które można uznać za kryteria jakościowe dla uzyskiwanego produktu, m.in.: wielkość i kształt cząstek, odpowiedni rozkład granulometryczny przemiału, odpowiednią uzyskiwaną powierzchnię właściwą (Rys. 1.1).



Rys. 1.1. Cele procesu rozdrabniania surowców energetycznych

### 1.1. GENEZA PRACY

Przyczyn podjęcia tematyki efektywnej, skutecznej i programowanej regulacji procesu rozdrabniania biomasy ziarnistej przeznaczonej dla celów energetycznych oraz oceny jego energochłonności i środowiskowego oddziaływania jest kilka. W tej części wskazano motywy podjęcia i realizacji tematyki.

W myśl idei zrównoważonego rozwoju mówiącego o projektowaniu systemów, urządzeń i procesów z poszanowaniem trzech obszarów: środowiska, społeczeństwa i ekonomii linie przetwarzania biomasy powinny charakteryzować się jak najniższą energochłonnością i szkodliwością środowiskową. Ma to na celu także poprawę konkurencyjności paliw z biomasy w stosunku do tradycyjnych paliw kopalnych.

W literaturze niewiele pozycji zawiera treści dotyczące oceny kompleksowej (energetyczno-środowiskowej) systemów rozdrabniania dla spalania. W wielu pracach jako dwa podstawowe kryteria oceny tego procesu wskazuje się jednostkowe zużycie energii oraz stopień rozdrobnienia.

Wciąż niewystarczająca ilość i jakość opisów rozdrabniania, nieskuteczne rozwiązania technologiczne oraz niesatysfakcjonujące próby poprawy efektywności (energetycznej i ekologicznej) systemów rozdrabniających nie rozwiązują istotnych problemów: wysokich energetycznych nakładów na rozdrabnianie, małej wydajności i sprawności oraz jakości produktu określanej charakterystykami granulometrycznymi. Wychodząc naprzeciw, próby rozwiązania niedogodności (problemów) powinny opierać się o monitorowanie, kontrolowanie parametrów rozdrabniania m.in.: prędkości liniowej, kątowej tarcz, zużycia energii, poboru mocy, itd. Powyższe stanowi przesłankę do realizacji niniejszej rozprawy.

## **1.2. ZAKRES ROZPRAWY**

W celu zrealizowania podjętego zadania naukowego zakres przedmiotowej dysertacji obejmuje:

1. opis, analizę i krytyczną ocenę stanu wiedzy i techniki w zakresie zagadnień i problemów budowy i eksploatacji maszyn przetwórczych;
2. usystematyzowanie i uporządkowanie wskaźników i kryteriów oceny energetyczno-środowiskowej, w tym modeli procesu rozdrabniania oraz przyjęcie wytycznych do badań, analiz i ocen własnych;
3. dyskusję modeli w kierunku utworzenia metodyki energetyczno-środowiskowej analizy i badań energochłonności i emisji CO<sub>2</sub> rozdrabniania wielotarczowego biomasy;
4. opracowanie funkcji celu projektowania uwzględniającą wskaźniki mocy, wydajności, stopnia rozdrobnienia, energochłonności i emisji CO<sub>2</sub>;
5. wyznaczenie właściwości (fizycznych i wytrzymałościowych) materiałów rozdrabnianych (ryżu i kukurydzy) w postaci funkcji korelacji, regresji i adekwatności;
6. badania eksperymentalne wskaźników mocy, wydajności, stopnia rozdrobnienia, zintegrowanej energochłonności, zrównoważonej emisyjności i funkcji oceny energetyczno-środowiskowej.

## **2. ANALIZA STANU WIEDZY I TECHNIKI W ZAKRESIE TEMATYKI ROZPRAWY**

### **2.1. TEORIE I HIPOTEZY ROZDRABNIANIA**

Analizę stanu wiedzy zagadnienia rozpoczęto od podstawowych teorii opisujących w warunkach laboratoryjnych związek pracy i energii rozdrabniania ze zmianą objętości i powierzchni właściwej materiału. Najbardziej znanymi teoriami stosowanymi do opisu procesu rozdrabniania są teorie dotyczące określania energii potrzebnej do zmiany struktury postaciowej materiału. Są to m.in. teorie następujących badaczy:

- Rittingera (1867),
- Kicka (1885),
- Bonda (1952), z rozwinięciem Svensona i Murkesa oraz Holmsa,
- Bracha (1962), z rozwinięciem Sokołowskiego,
- Rebindera.

### **2.2. ZMIENNE I WSKAŹNIKI PROCESU WIELOTARCZOWEGO ROZDRABNIANIA**

Badania dotąd prowadzone dotyczyły: wpływu konstrukcji rozdrabniacza wielotarczowego na jakość produktów, właściwości wsadu, wydajność rozdrabniania; relacji pomiędzy właściwościami materiału a energią rozdrabniania.

Na podstawie wcześniej prowadzonych badań na rozdrabniaczach wielotarczowych wskazano czynniki maszynowe i procesowe wpływające na wydajność i stopień rozdrobnienia produktu. Należą do nich m.in.:

- ustawienie tarcz względem płaszczyzny poziomej,
- sposób podawania materiału wsadowego do komory rozdrabniania,
- liczba tarcz stałych i obrotowych,
- geometria tarcz i otworów w tarczach,
- kolejność ustawienia tarcz o różnej geometrii,
- wielkość szczeliny międzycieczowej.

Omówione dotychczas prowadzone badania nad procesem rozdrabniania wskazują na nie poruszane lub zbyt ogólnikowo traktowane zagadnienia środowiskowych i ekonomicznych aspektów rozdrabniania, modelowania zjawisk w nich zachodzących.

Wskaźniki procesu rozdrabniania obejmują wiele aspektów efektywnościowych, np. skuteczność, jakość produktu, jakość procesu, wydajność, energetyczną skuteczność, koszty itd. Podziału wskaźników dokonał m.in. M. Macko klasyfikując je na technologiczne, techniczne i ekonomiczne. Nie

wspomniano w nim o oddziaływaniach środowiskowych rozdrabniania. Te zaś zostały ujęte w podziale dokonany przez J. Flizikowskiego, który wskaźniki procesu rozdrabniania sklasyfikował w trzech grupach: jakości, efektywności, nieszkodliwości, co znacznie poszerza zakres wskaźników istotnych dla rozdrabniania. Klasyfikacji można tworzyć wiele, najprościej jednak zdaniem Autorki wskaźniki rozdrabniania można podzielić ze względu na obszar, którego dotyczą, np. wskaźniki:

- Produktu (właściwości takie jak: rozkład granulometryczny, powierzchnia właściwa, gęstość nasypowa, lepkość itd.),
- Procesu (energetyczne, technologiczne, jakości),
- Środowiska rozdrabniania (generowany hałas, emisje odpadów stałych, ciekłych i gazowych, generowane wibracje, itd.).

Wskaźniki rozdrabniania umożliwiają skalarne porównanie zjawisk w procesie rozdrabniania. Biorąc pod uwagę przemysłową skalę rozdrabniania jako najważniejsze należy wskazać wskaźniki procesu: energetyczne i technologiczne.

### **2.3. ZAGADNIENIA OCENY ENERGETYCZNO-ŚRODOWISKOWEJ ROZDRABNIANIA**

Wprowadzanie ocen w kategoriach energetycznych i próśrodowiskowych do procesu konstrukcyjno- optymalizacyjnego w budowie i eksploatacji maszyn w tym technologii rozdrabniania prowadzi do powstawania nowych, lepszych rozwiązań konstrukcyjnych i procesowych. W pewnym sensie stanowi element napędowy konkurencyjności i innowacyjności technologii.

W dotychczas prowadzonych badaniach w zakresie inżynierii rozdrabniania wskazano, że w efekcie ocen energetycznej efektywności możliwa jest poprawa parametrów procesowo-ruchowych zespołu walcowego oraz wskazanie najlepszych technologii rozdrabniania dla danego produktu. Wykazano także, że opracowane modele efektywności mogą służyć nie tylko do oceny procesu, ale również do weryfikacji całej konstrukcji rozdrabniającej, a w szczególności zespołu rozdrabniającego.

Wyróżnia się m.in. kryteria oceny:

- energetycznej,
- środowiskowej,
- jakości,
- technologicznej.

### **2.4. WYTYCZNE DO ZADANIA WŁASNEGO**

Analiza stanu wiedzy i techniki budowy i eksploatacji maszyn przetwórczych przedmiotowego zagadnienia prowadzi do stwierdzenia, że dotąd nie opracowano precyzyjnych modeli matematycznych opisujących aspekty energetyczne i środowiskowe inżynierii rozdrabniania, w kierunku dalszego przetwórstwa bionośników energii. Wiedza dotycząca konstrukcji rozdrabniaczy oraz ich charakterystyk, charakterystyk biomateriałów i właściwości produktów rozdrabniania, zgromadzona w rozproszonych bazach wiedzy stanowi fundament prac mających na celu uporządkowanie metod identyfikacji oraz energetycznej i środowiskowej oceny technologii rozdrabniania biomateriałów na cele energetyczne. Jest to przyczyną do budowania zintegrowanych, obszernych baz wiedzy o materiale, procesie i maszynie.

Przeprowadzona analiza stanu wiedzy pozwala na stwierdzenie, że dalsze prace nad rozwojem modeli matematycznych wskaźników oceny energetycznej i środowiskowej wielotarczowego, wielootworowego rozdrabniania, w aspekcie wykorzystania na cele energetyczne wybranych bionośników energii, w efekcie przyniosą korzyści dotyczące zagadnień: poprawy jakości finalnego produktu wielokrawędziowego rozdrabniania, racjonalizacji gospodarowania energią, w szczególności jej oszczędzania, polepszenia bilansów ekologiczno-środowiskowych systemów rozdrabniania dla spalania biomasy oraz adekwatny opis zależności zmiennych w procesie rozdrabniania.

### 3. CEL I PROBLEM BADAŃ

#### 3.1. CELE PRACY

W świetle powyższych ustaleń za **cele pracy przyjęto**:

1. Opracowanie modelu matematycznego energochłonności i emisji CO<sub>2</sub> technologicznego quasi-ścianania 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-ścianania uziarnionej biomasy.

#### 3.2. SFORMUŁOWANIE PROBLEMU

Dla zrealizowania przyjętych celów pracy **sformułowano problemy naukowe** w postaci następujących pytań:

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-ścianania strumienia masy ziaren, możliwe jest opracowanie adekwatnego modelu matematycznego pracy użytecznej i strat energii technologicznego quasi-ścianania, 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-ścianania uziarnionej biomasy (ryżu, kukurydzy) w wielootworowym zespole rozdrabniającym wywierają celowo zmieniane (innowacyjne) cechy i relacje ruchu elementów tego zespołu?

### 4. METODYKA BADAŃ

#### 4.1. PRZYJĘTE KRYTERIA OCENY ROZDRABNIANIA

##### 4.1.1. Model wydajności wielotarczowego rozdrabniania

Wydajność rozdrabniania determinowana jest kluczowymi parametrami procesowymi i konstrukcyjnymi. W głównej mierze zależy od objętości otworów roboczych w pierwszej tarczy, jej prędkości obrotowej oraz wydajności dozowania warunkującej poziom wypełnienia przestrzeni otworów rozdrabniających. Wydajność masową rozdrabniania  $Q_r$  (g·s<sup>-1</sup>), można zatem opisać funkcją:

$$Q_r = f(V_{owT1}, \omega_1, \delta, t) \quad (4.1)$$

gdzie:

$V_{owT1}$  – objętość masy ziaren wprowadzanej do otworu w tarczy pierwszej, m<sup>3</sup>,

$\omega_1$  – prędkość kątowa tarczy pierwszej, rad·s<sup>-1</sup>

$\delta$  – współczynnik wypełnienia otworów, –,

$t$  – czas, s.

Wydajność rozdrabniania można zapisać jako:

$$Q_r = \frac{V_c \cdot \omega_1}{2\pi\rho_n} \quad (4.2)$$

$\rho_n$  – gęstość nasypowa ziarna, kg·m<sup>-3</sup>.

$V_c$  – całkowita objętość ziarna dozowanego w czasie jednego obrotu, m<sup>3</sup>.

Model matematyczny wydajności masowej rzeczywistej maszynowego, wielotarczowego rozdrabniania  $Q_{rnr}$  winien uwzględniać współczynnik wypełnienia przestrzeni otworów roboczych pierwszej tarczy  $\delta$  zależny od zmiennej wielkości ziaren, w tym rozkładu długości ziarna, opisany zależnością:

$$\delta = \frac{h_0 - \tilde{h}_0^{T1}}{h_0} A_d V_d + \frac{\tilde{h}_0^{T1}}{h_0} B_m V_m \quad (4.3)$$

gdzie:

$h_0$  – grubość tarczy, mm,

$\tilde{h}_0^{T1}$  – wysokość napełnienia otworu, mm,

$B_m$  – nieliniowy operator stochastyczny prawdopodobieństwa rozkładu ziaren po  $m$ -tym cięciu,

$V_m$  – rozkład objętości ziarna po  $m$ -tym cięciu,

$A_d$  – liniowy operator stochastyczny rozkładu ziaren podczas dozowania,

$V_d$  – rozkład objętości ziaren dozowanych.

Rzeczywista wydajność maszynowego, wielotarczowego rozdrabniania przyjmuje wówczas postać:

$$Q_r = \frac{V_{cRWT} \cdot \omega_1}{2\pi\rho_n} = \frac{n_{otw} \cdot \left( \frac{h_0 - \tilde{h}_0^{T1}}{h_0} A_d V_d + \frac{\tilde{h}_0^{T1}}{h_0} B_m V_m \right) \cdot u \int_0^t S(\tau) d\tau \cdot \omega_1}{2\pi\rho_n}. \quad (4.4)$$

$n_{otw}$  – liczba otworów w pierwszej tarczy.

$S$  – powierzchnia otworu, m<sup>2</sup>.

W warunkach maszynowych wydajność masową można monitorować również na podstawie zależności zmiany masy produktu rozdrabniania  $\Delta m$  w koszu odbiorczym w czasie obserwacji  $\Delta t$ :

$$Q_r = \frac{\Delta m}{\Delta t}. \quad (4.5)$$

#### 4.1.2. Model energochłonności

Energia quasi-ścianania w zespole wielotarczowym po uwzględnieniu ilości rozdrabnianej masy  $m$  i krotności przejścia materiału przez współpracujące pary tarcz  $z$  będzie równa:

$$E_{qs} = m \sum_{i=1}^z E_{qsj} = m \sum_{i=1}^z \left( \sum_{k=1}^{k=n} \frac{b_k}{100} \left( \frac{D_e}{d_k} - 1 \right) \frac{\sigma_z^2}{2E_r \cdot \rho_r \cdot \alpha_r} \right) \quad (4.6)$$

gdzie:

$m$  – masa rozdrobnionego materiału, kg,

$z$  – liczba przejść materiału przez pary tarcz otworowych,

$E_{qsj}$  – energia quasi-ścianania jednostki masy wsadu dla przejścia przez jedną parę tarcz otworowych, MJ·kg<sup>-1</sup>,

$\sigma_z$  – naprężenia zastępcze w materiale rozdrabnianym dla złożonego stanu naprężeń, MPa,

$b_k$  – procentowy udział  $k$ -tej klasy wymiarowej materiału po rozdrobnieniu, %,

$D_e$  – średni wymiar cząstek nadawy,

$d_k$  – zastępczy wymiar klasy wymiarowej, mm,

$E_r$  – względny moduł sprężystości ziarna, MPa,

$\rho_r$  – gęstość ziarna, Mg·m<sup>-3</sup>,

$\alpha_r$  – współczynnik przyrostu powierzchni po jednorazowym rozdrobnieniu.

Po każdym przejściu materiału przez parę tarcz otworowych zmianie ulegają wymiary cząstek. Dla przykładowej pary krawędzi tnących w sąsiednich tarczach roboczych wymiar cząstek w tarczy tzw. poprzedzającej ( $n$ ) opisany jest następującą zależnością:

$$D_e = \tilde{B}_{n,m} \rho_n^m = \left( 1 - \frac{x}{\tilde{y}_n^m} \right) \rho_n^m(x) + \frac{1}{\tilde{y}_n^m} \int_x^{l_{\max}} \rho_n(l) dl, \quad (4.7)$$

gdzie:

$\tilde{B}_{n,m}$  – operator stochastyczny,

$\rho_n^m$  – rozkład długości ziaren po  $m$ -tym cięciu przez  $n$ -tą tarczę,

$\tilde{y}_n^m$  – wysokość materiału w otworze roboczym  $n$ -tej tarczy po  $m$ -tym cięciu,

$l$  – długość ziarna.

Wymiary cząstek po przejściu przez parę krawędzi rozdrabniających znajdujących się w otworze roboczym tarczy tzw. następującej opisane są zależnością:

$$d_k = A_{n,m} \rho_n^m = \left( 1 - \frac{x}{y_{n+1} - \tilde{y}_{n+1}^m} \right) \rho_n^m(x) + \frac{1}{y_{n+1} - \tilde{y}_{n+1}^m} \int_x^{l_{\max}} \rho_n^m(l) dl, \quad (4.8)$$

gdzie:

$A_{n,m}$  – operator stochastyczny,

$\tilde{y}_{n+1}^m$  – wypełnienie otworu roboczego w tarczy następującej, po  $m$ -tym cięciu.

Po przeprowadzonych w rozprawie analizach wartość energii quasi-ścinania wynosi:

$$E_{qs} = Q \cdot t \sum_{i=1}^{2i-1} \left( \sum_{k=1}^{k=n} \frac{b_k}{100} \left( \frac{\tilde{B}_{n,m} \rho_n^m}{A_{n,m} \rho_n^m} - 1 \right) \frac{\sigma_z^2}{2E_r \cdot \rho_r \cdot \alpha_r} \right), \quad (4.9)$$

Dzieląc otrzymane równanie przez czas  $t$  otrzymuje się zależność na moc quasi-ścinania  $P_{qs}$  w postaci:

$$P_{qs} = \frac{E_{qs}}{t} = Q \cdot \sum_{i=1}^{2i-1} \left( \sum_{k=1}^{k=n} \frac{b_k}{100} \left( \frac{D_e}{d_k} - 1 \right) \frac{\sigma_z^2}{2E_r \cdot \rho_r \cdot \alpha_r} \right). \quad (4.10)$$

#### 4.1.3. Model jednostkowego zapotrzebowania na energię

Jednostkowe zapotrzebowanie na energię  $E_j$  ( $\text{kWh} \cdot \text{kg}^{-1}$ ) w ogólności określa ilość energii  $E$  przypadającą na jednostkę masy produktu  $m$ :

$$E_j = \frac{E}{m}. \quad (4.11)$$

Wzór na jednostkowe zapotrzebowanie na energię quasi-ścinania przyjmie postać:

$$E_{jqs} = \frac{P_{qs}}{Q} = \frac{Q \cdot \sum_{i=1}^{2i-1} \left( \sum_{k=1}^{k=n} \frac{b_k}{100} \left( \frac{D_e}{d_k} - 1 \right) \frac{\sigma_z^2}{2E_r \cdot \rho_r \cdot \alpha_r} \right)}{Q}, \quad (4.12)$$

$$E_{jqs} = \sum_{i=1}^{2i-1} \left( \sum_{k=1}^{k=n} \frac{b_k}{100} \left( \frac{D_e}{d_k} - 1 \right) \frac{\sigma_z^2}{2E_r \cdot \rho_r \cdot \alpha_r} \right). \quad (4.13)$$

Dla układu maszynowego wielotarczowego rozdrabniania jednostkowe zapotrzebowanie na energię wyrażone jest jako stosunek sumy mocy pobranej przez  $n$  tarcz rozdrabniacza  $N_{ii}$  do wydajności masowej  $Q$ :

$$E_j = \frac{\sum_{i=1}^n N_{ii}}{Q}. \quad (4.14)$$

#### 4.1.4. Model stopnia rozdrobnienia produktu

Wymiar średni ziaren po przejściu przez parę współpracujących tarcz zmienia się zgodnie z zależnością:

$$D_{zn} = D_z \cdot \beta^n, \quad (4.15)$$

gdzie:

$D_{zn}$  – średni wymiar ziarna po przejściu przez  $n$ -tą parę współpracujących tarcz rozdrabniacza,

$\beta$  – współczynnik redukcji wymiaru po przejściu przez parę tarcz rozdrabniających,

$D_z$  – średnica zastępcza ziarna wyznaczona na podstawie wyników analizy granulometrycznej, mm,

$n$  – liczba przejść przez tarcze.

Przekształcając zależność (4.15) otrzymujemy, że:

$$\beta^n = \frac{D_{zn}}{D_z} = \frac{\sum_{i=1}^n d_m \cdot q_m}{\sum_{i=1}^n d_i \cdot q_i}, \quad (4.16)$$

stąd średni stopień rozdrobnienia przyjmuje postać:

$$i_{sr} = \frac{1}{\beta^n} = \frac{D_z}{D_{zn}} = \frac{\sum_{i=1}^n d_i \cdot q_i}{\sum_{i=1}^n d_m \cdot q_m}. \quad (4.17)$$

gdzie:

$d_i$  – wymiar średni  $i$ -tej klasy wymiarowej, mm,  
 $q_i$  – udział masowy  $i$ -tej klasy wymiarowej w nadawie, -.

#### 4.1.5. Model zintegrowanej energochłonności

Energochłonność zintegrowana rozdrabniania ujmuje najważniejsze wskaźniki procesu, które związane są w sposób pośredni lub bezpośredni z zapotrzebowaniem mocy i energii. Za składowe modelu zintegrowanej energochłonności przyjęto wskaźniki:

- wydajności rozdrabniania  $K_{Qr}$ ,  $K_{Qr} = Q_r$ ,
- zapotrzebowania mocy  $K_P$ ,  $K_P = \frac{1}{P_r}$ ,
- jednostkowego zapotrzebowania na energię  $K_{Ej}$ ,  $K_{Ej} = \frac{1}{E_j}$ ,
- stopnia rozdrobnienia  $K_i$ ,  $K_i = i_{80}$ .

Dzięki temu uzyskano związek ilościowy pomiędzy najważniejszymi wskaźnikami rozdrabniania w ujęciu energochłonności. Zintegrowaną energochłonność opisano, w ujęciu kryterialnym zaproponowanym przez J. Zawadę, następująco:

$$E_{zint} = K_{Qr} \cdot K_P \cdot K_{Ej} \cdot K_i \cdot \quad (4.18)$$

#### 4.1.6. Model zrównoważonej emisyjności

Emisja CO<sub>2</sub> ekwiwalentnego w procesie rozdrabniania powiązana jest ściśle z jego energochłonnością. Zależność na emisyjność zrównoważoną przedstawia się następująco:

$$e_{zrów} = f(P_R, \Delta E_{eco}, t_R), \quad (4.19)$$

gdzie:

$\Delta E_{eco}$  – przyrost korzyści ekologicznych, kWh,  
 $P_R$  – pobór mocy w procesie rozdrabniania, kW,  
 $t_R$  – czas rozdrabniania, h,

Zależność na emisyjność zrównoważoną przedstawia się następująco:

$$e_{zrów} = P_R \cdot \frac{1}{\Delta E_{eco}} \cdot \frac{1}{t_R}. \quad (4.20)$$

Za korzyści ekologiczne przyjęto emisję równoważną energii elektrycznej wytworzonej ze spalania rozdrobnionej biomasy energetycznej, która mogłaby zasilać proces rozdrabniania, pomniejszoną o zużycie energii na rozdrobnienie zgodnie z zależnością:

$$\Delta E_{eco} = E_{es} - E_{Rt}, \quad (4.21)$$

gdzie:

$E_{es}$  – energia elektryczna wytworzona ze spalania rozdrobnionej biomasy, kWh,  
 $E_{Rt}$  – energia elektryczna zużyta w procesie rozdrabniania, kWh.  
 Energia elektryczna ze spalania biomasy równa jest:

$$E_{es} = E_s \cdot k_e = W_i \cdot m_b \cdot k_e, \quad (4.22)$$

$E_s$  – energia ze spalania biomasy, kWh,  
 $W_i$  – wartość opałowa rozdrobnionej biomasy, kWh·kg<sup>-1</sup>,  
 $m_b$  – masa rozdrobnionej spalanej biomasy, kg,  
 $k_e$  – współczynnik kogeneracji,  $k_e=0,4$ .

#### 4.1.7. Funkcja oceny energetyczno-środowiskowej

Na podstawie wcześniej opisanych modeli utworzono funkcję oceny procesu rozdrabniania, która uwzględnia zarówno aspekty energetyczne i środowiskowe w postaci emisji. Podobnie jak w przypadku zintegrowanej energochłonności posłużono się modelem kryterialnym zaproponowanym przez J. Zawadę. Za kryteria oceny energetyczno-środowiskowej przyjęto:

- kryterium energochłonności  $K_E$ ,  $K_E = \frac{1}{E_{zint}}$ ,



- kryterium emisyjności  $K_e$ ,  $K_e = \frac{1}{e_{zrów}}$

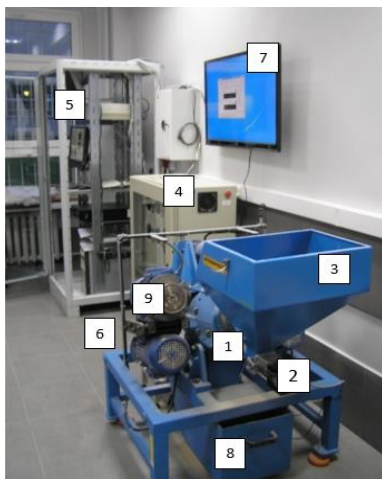
Do oceny rozdrabniania zaproponowano zatem funkcję oceny energetyczno-środowiskowej w postaci:

$$F_{e-s} = K_E \cdot K_e = \frac{1}{E_{zint}} \cdot \frac{1}{e_{zrów}} \quad (4.23)$$

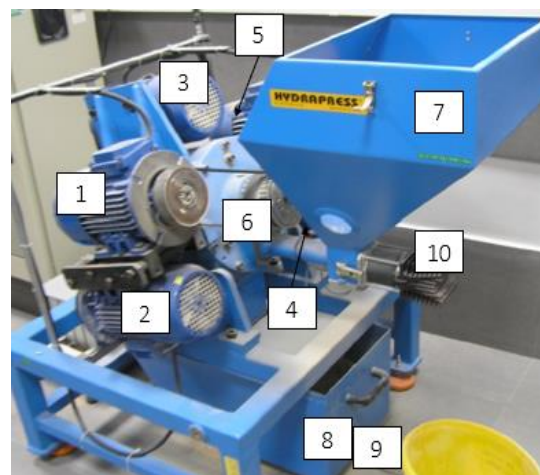
## 4.2. STANOWISKO BADAŃ MASZYNOWYCH

Stanowisko badawcze monitorowania charakterystyk użytkowych rozdrabniania składa się z modułów: maszynowego (rozdrabniacz RWT-KZ\_5), sterowniczego (aplikacja MŁYN 2018, podzespoły sterujące, aplikacja AG\_2018, czujniki), logistycznego (układ dozowania wsadu), zasilania (połączenia elektryczne, zespół silników). Widok stanowiska badawczego przedstawiono na rysunku 4.1.

Moduł maszynowy stanowi rozdrabniacz RWT-5KZ, którego głównymi elementami strukturalnymi są: obudowa, korpus rozdrabniacza, komora robocza, kosz zasypowy, kosz odbiorczy produktu i zespół rozdrabniający (Rys. 4.2). Zespół rozdrabniający składa się z pięciu tarcz roboczych, zasilanych niezależnie z pięciu silników elektrycznych, co umożliwia sterowanie i monitorowanie charakterystyk oddzielnie dla każdej tarczy.



Rys. 4.1. Stanowisko badawcze: 1- rozdrabniacz pięciotarczowy RWT\_5KZ, 2- podajnik ślimakowy, 3- kosz zasypowy, 4- szafa sterownicza, 5- jednostka sterująca z PC i modułami przetwarzania i archiwizowania danych, 6- system identyfikacji i pomiaru wielkości cząstek produktu rozdrabniania, 7- monitor prezentacji wyników, 8- kosz odbiorczy produktu, 9- układ napędowy z przekładniami pasowo-zębatymi



Rys. 4.2. Budowa modułu maszynowego stanowiska inteligentnego monitorowania charakterystyk użytkowych rozdrabniania: 1-, 2-, 3-, 4-, 5- silniki napędowe tarcz rozdrabniających, 6- zespół tarcz, 7- kosz zasypowy, 8- kosz odbiorczy, 9- waga produktu, 10- podajnik ślimakowy

## 4.3. PLAN I PROGRAM BADAŃ

Badania procesu rozdrabniania obejmowały zasadniczo trzy główne etapy logicznie ze sobą powiązane, których realizacja pozwoli na osiągnięcie celu rozprawy:

- **ETAP I: Wyznaczenie własności wytrzymałościowych ziaren rozdrabnianych**
- **ETAP II: Eksperyment maszynowy**

W planie badawczym uwzględniono pięć różnych programów badań (PB) nastaw prędkości kątowych w zależności od sposobu przyrostu prędkości (tabela 4.1. – tabela 4.5.)

- **ETAP III: Analiza wyników**

Tabela 4.1. Konfiguracje ustawień prędkości tarcz roboczych dla PB I

PB	Konfiguracja	$\omega_1$	$\omega_2$	$\omega_3$	$\omega_4$	$\omega_5$	$\Delta\omega$
		rad·s <sup>-1</sup>	rad·s <sup>-1</sup>	rad·s <sup>-1</sup>	rad·s <sup>-1</sup>	rad·s <sup>-1</sup>	rad·s <sup>-1</sup>
I	1	20	25	30	35	40	5
	2	20	30	40	50	60	10
	3	20	35	50	65	80	15
	4	20	40	60	80	100	20

Tabela 4.2. Konfiguracje ustawień prędkości tarcz roboczych dla PB II

PB	Konfiguracja	$\omega_1$	$\omega_2$	$\omega_3$	$\omega_4$	$\omega_5$	$\Delta\omega$
		rad·s <sup>-1</sup>	rad·s <sup>-1</sup>	rad·s <sup>-1</sup>	rad·s <sup>-1</sup>	rad·s <sup>-1</sup>	rad·s <sup>-1</sup>
II	1	100	80	60	40	20	20
	2	80	65	50	35	20	15
	3	60	50	40	30	20	10
	4	40	35	30	25	20	5

Tabela 4.3. Konfiguracje ustawień prędkości tarcz roboczych dla PB III

PB	Konfiguracja	$\omega_1$	$\omega_2$	$\omega_3$	$\omega_4$	$\omega_5$	$\Delta\omega$
		rad·s <sup>-1</sup>	rad·s <sup>-1</sup>	rad·s <sup>-1</sup>	rad·s <sup>-1</sup>	rad·s <sup>-1</sup>	rad·s <sup>-1</sup>
III	1	20	40	20	40	20	20
	2	45	25	45	25	45	20
	3	75	50	75	50	75	25
	4	100	80	100	80	100	20

Tabela 4.4. Konfiguracje ustawień prędkości tarcz roboczych dla PB IV

PB	Konfiguracja	$\omega_1$	$\omega_2$	$\omega_3$	$\omega_4$	$\omega_5$	$\Delta\omega$
		rad·s <sup>-1</sup>	rad·s <sup>-1</sup>	rad·s <sup>-1</sup>	rad·s <sup>-1</sup>	rad·s <sup>-1</sup>	rad·s <sup>-1</sup>
IV	1	20	40	20	40	20	20
	2	20	60	20	60	20	40
	3	20	80	20	80	20	60
	4	20	100	20	100	20	80

Tabela 4.5. Konfiguracje ustawień prędkości tarcz roboczych dla PB V

PB	Konfiguracja	$\omega_1$	$\omega_2$	$\omega_3$	$\omega_4$	$\omega_5$	$\Delta\omega$
		rad·s <sup>-1</sup>	rad·s <sup>-1</sup>	rad·s <sup>-1</sup>	rad·s <sup>-1</sup>	rad·s <sup>-1</sup>	rad·s <sup>-1</sup>
V	1	100	20	100	20	100	80
	2	100	40	100	40	100	60
	3	100	60	100	60	100	40
	4	100	80	100	80	100	20

W tabeli 4.6 przedstawiono wyszczególnienie planowanych działań i aparatury potrzebnej do realizacji badań.

Tabela 4.6. Zestawienie planowanych działań i wykorzystywanej aparatury

Działania	Metody	Instrumentarium
Określenie właściwości wytrzymałościowych biomasy ziarnistej przyjętej do badań (ryż, kukurydza)	Styczna próba ściskania, próba ścinania ze stałą prędkością $v_s$	Maszyna wytrzymałościowa z napędem śrubowym INSTRON 5966.
	Próba ścinania ze zmienną prędkością $v_s$	Maszyna wytrzymałościowa Instron E3000
Określenie średniego wymiaru ziaren materiału wsadowego	Analiza granulometryczna	Camsizer firmy Retsch
Określenie wilgotności materiału wsadowego	Analiza wilgotności metodą wagową	Wagosuszarka MAC 210/NP
Badania laboratoryjne rozdrabniania	Eksperyment na obiekcie rzeczywistym	Rozdrabniacz pięcioletkowy RWT_KZ_5 z systemem monitorowania parametrów procesu
Analiza wyników	Analizy statystyczne	MS Office Excel, Statistica

## 5. WYNIKI BADAŃ I ICH ANALIZA

### 5.1. WYNIKI DLA PRÓBY STATYCZNEGO ŚCISKANIA

W wyniku przeprowadzonej próby statycznego ściskania 100 ziaren ryżu i kukurydzy wyznaczano następujące wartości:

- $F_s$  – maksymalną siłę ściskającą, N,
- $R_c$  – granicę wytrzymałości na ściskanie, MPa,
- $W_1$  – pracę wykonaną nad ziarnem do momentu pierwszego pęknięcia, mJ.

Siły maksymalne  $F_s$  podczas rozwoju pęknięcia dla ryżu zawierały się w przedziale (73,25-324,78 N, a dla kukurydzy w przedziale (110,74-1539,94) N. Naprężenia  $R_c$  dla ryżu zawierały się w przedziale (6,74-42,65) MPa, a dla kukurydzy odpowiednio (2,12-15,06) MPa. Praca  $W_1$  dla ryżu zawierała się w przedziale (0,48-98,93) mJ, a dla kukurydzy (25,02-557,74) mJ.

### 5.2. WYNIKI BADAŃ DLA PRÓBY ŚCINANIA

#### *Ścinanie ze stałą prędkością $v_s$*

Na podstawie wartości sił i przemieszczeń uzyskanych podczas próby ścinania ze stałą prędkością  $v_s=2 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$  100 ziaren ryżu i kukurydzy na maszynie wytrzymałościowej Instron 5966, wyznaczano następujące wielkości:

- $F_T$  – siłę tnącą, N,
- $\tau$  – naprężenia tnące, MPa,
- $W_T$  – pracę cięcia, mJ.

Dla ziaren ryżu siła tnąca  $F_T$  zawierała się w przedziale odpowiednio (3,52-70,91) N, a dla ziaren kukurydzy w przedziale (28,91-294,99) N. Naprężenia tnące  $\tau$  dla ryżu zawierały się w przedziale (0,66-13,70) MPa, a dla kukurydzy odpowiednio (1,03-12,08) MPa. Praca  $W_T$  dla ryżu zawierała się w przedziale (0,06-9,52) mJ, a dla kukurydzy (0,59-172,69) mJ.

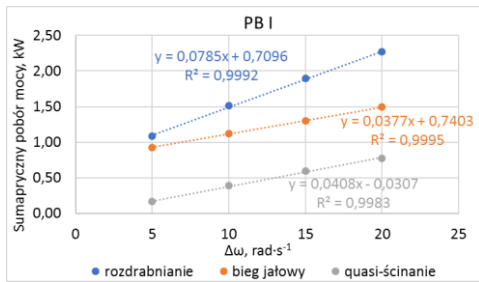
#### *Ścinanie z różnymi prędkościami $v_s$*

Ścinanie z różnymi prędkościami  $v_s$  przeprowadzono na maszynie wytrzymałościowej Instron E3000. Z otrzymanych danych wynika, że wartości sił  $F_T$  oraz pracy  $W_T$  okazały się większe dla kukurydzy niż dla ryżu. Z kolei ziarna ryżu charakteryzowały się większą wartością naprężeń tnących  $\tau$  niż ziarna kukurydzy. Podobne rezultaty otrzymano w próbie ścinania ze stałą, małą wartością  $v_s=2 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$ . Przeprowadzona analiza wykazała, że pomiędzy prędkością ścinania  $v_s$  a siłami tnącymi  $F_T$ , naprężeniami tnącymi  $\tau$  i pracą ścinania  $W_T$  nie zachodzą związki istotne statystycznie w przypadku obu ziaren.

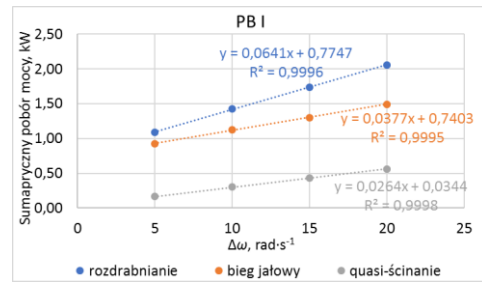
### 5.3. ANALIZA WPLYWU ZMIENNYCH NA POBÓR MOCY ROZDRABNIANIA

Analiza regresji pomiędzy przyrostem prędkości a poborem mocy dla programów badawczych I, II, IV i V wykazała, że najlepiej związek ten we wszystkich przypadkach opisuje zależność liniowa (Rys. 5.1 – Rys. 5.2.) . Zarówno dla rozdrabniania ryżu jak i kukurydzy dopasowanie modeli liniowych w analizowanych programach badawczych było większe niż 0,9, z wyjątkiem modeli poboru mocy na quasi-ścinanie w PB V dla obu rozdrabnianych ziaren. Z analiz wynika, że dodatni przyrost prędkości powoduje wzrost poboru mocy (PB I, II, IV), natomiast ujemny przyrost wywołuje spadek poboru mocy (PB V). W przypadku trzeciego programu badawczego zaobserwowano, że im wyższe prędkości kątowe ustawiano w konfiguracjach, tym wyższy był pobór mocy (Rys. 5.3 i Rys. 5.4). Na podstawie otrzymanych wyników stwierdzono, że pobór mocy na quasi-ścinanie ziaren ryżu był niższy niż pobór mocy na quasi-ścinanie ziaren kukurydzy we wszystkich przypadkach (Rys. 5.1 – Rys. 5.4).

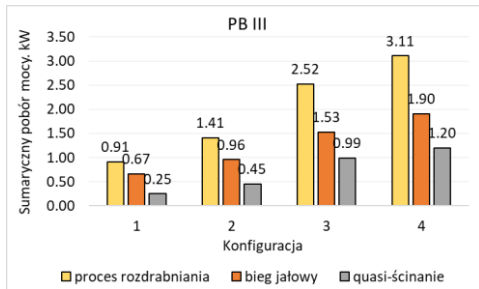
Modele liniowe wyjaśniały zmiany poboru mocy na bieg jałowy w zależności od prędkości kątowych w powyżej 94% dla tarcz: pierwszej, drugiej, trzeciej i piątej (np. Rys. 5.5 i Rys. 5.6.). Jedyne dla tarczy czwartej model liniowy poboru mocy na bieg jałowy nie był dopasowany ( $R^2<0,1$ ), inne modele nieliniowe również nie opisywały tej zmienności w sposób istotny (Rys. 5.7 i Rys. 5.8).



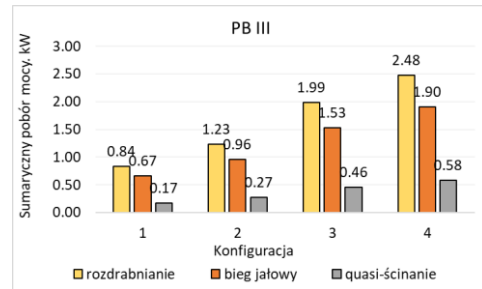
Rys. 5.1. Pobór mocy w funkcji przyrostu prędkości podczas rozdrabniania kukurydzy dla PB I



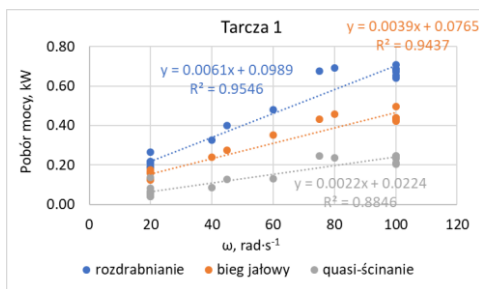
Rys. 5.2. Pobór mocy w funkcji przyrostu prędkości podczas rozdrabniania ryżu dla PB I



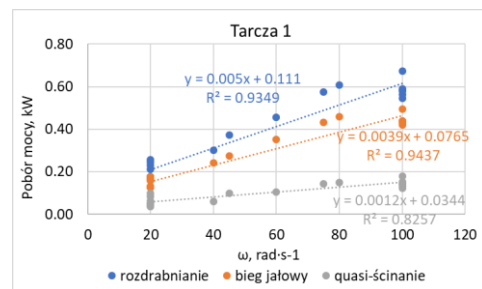
Rys. 5.3. Zmiany poboru mocy podczas rozdrabniania kukurydzy w PB III



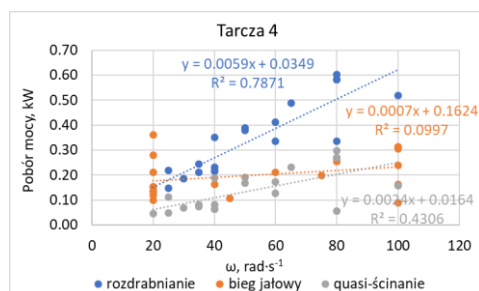
Rys. 5.4. Zmiany poboru mocy podczas rozdrabniania ryżu w PB III



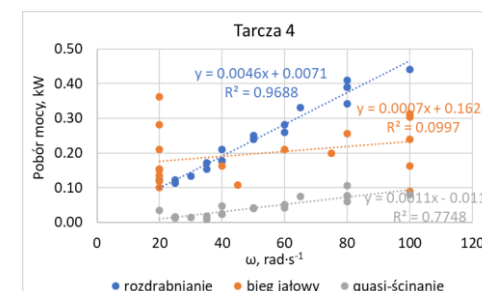
Rys. 5.5. Pobór mocy w funkcji prędkości kątowej podczas rozdrabniania kukurydzy na tarczy 1



Rys. 5.6. Pobór mocy w funkcji prędkości kątowej podczas rozdrabniania ryżu na tarczy 1



Rys. 5.7. Pobór mocy w funkcji prędkości kątowej podczas rozdrabniania kukurydzy na tarczy 4

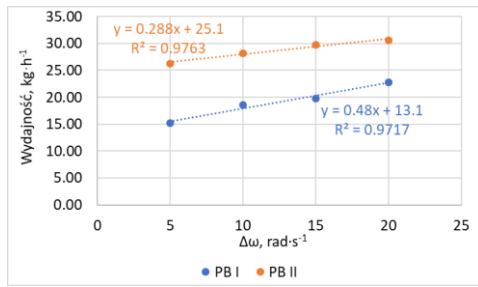


Rys. 5.8. Pobór mocy w funkcji prędkości kątowej podczas rozdrabniania ryżu na tarczy 4

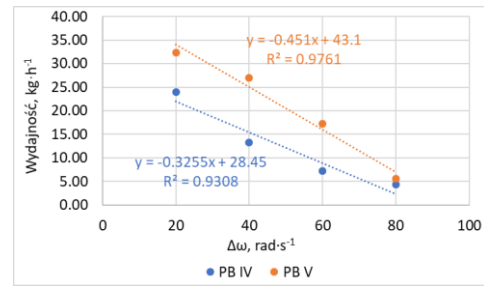
## 5.4. ANALIZA WPŁYWU ZMIENNYCH NA WYDAJNOŚĆ ROZDRABNIANIA

Na podstawie analizy regresji wyznaczono modele liniowe zależności wydajności od przyrostu prędkości  $\Delta\omega$ . Dopasowanie modeli liniowych wydajności w analizowanych programach badawczych dla obu rozdrabnianych ziaren było większe niż 0,94 (Rys. 5.9 – Rys. 5.12). Dodatnia zmiana prędkości kątowej powoduje wzrost wydajności o czym świadczą zależności dla PB I i PB II (Rys. 5.9 i Rys. 5.11), natomiast ujemna zmiana wiąże się ze zmniejszeniem wydajności, co zaobserwowano w przypadku PB V (Rys. 5.10 i Rys. 5.12). Zauważalnym jest fakt, że wzrost prędkości kątowych na tarczach rozdrabniacza wywołuje wzrost wydajności. Dla trzeciego programu badawczego ta zależność również

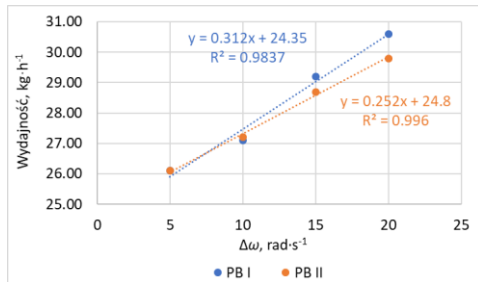
występuje (Rys. 5.13 i Rys. 5.14).



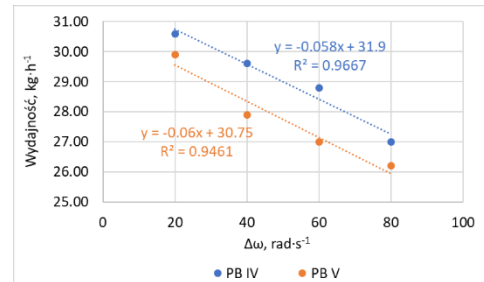
Rys. 5.9. Wydajność rozdrabniania kukurydzy w funkcji przyrostu prędkości dla PB I i PB II



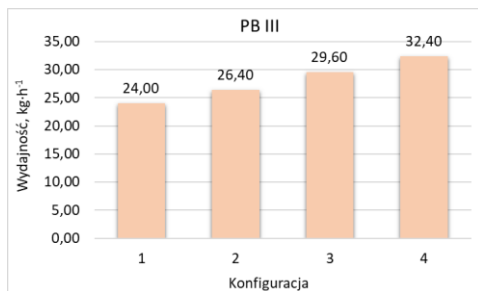
Rys. 5.10. Wydajność rozdrabniania kukurydzy w funkcji przyrostu prędkości dla PB IV i PB V



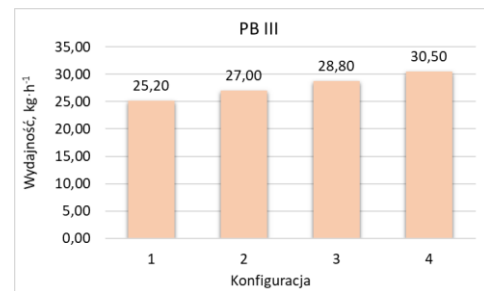
Rys. 5.11. Wydajność rozdrabniania ryżu w funkcji przyrostu prędkości dla PB I i PB II



Rys. 5.12. Wydajność rozdrabniania ryżu w funkcji przyrostu prędkości dla PB IV i PB V



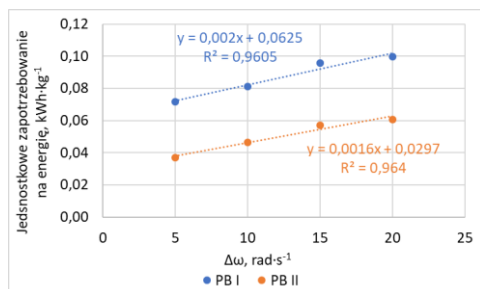
Rys. 5.13. Zmiany wydajności rozdrabniania kukurydzy w PB III



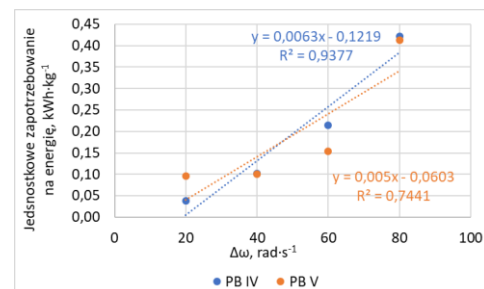
Rys. 5.14. Zmiany wydajności rozdrabniania ryżu w PB III

## 5.5. ANALIZA WPŁYWU ZMIENNYCH NA JEDNOSTKOWE ZAPOTRZEBOWANIE NA ENERGIĘ

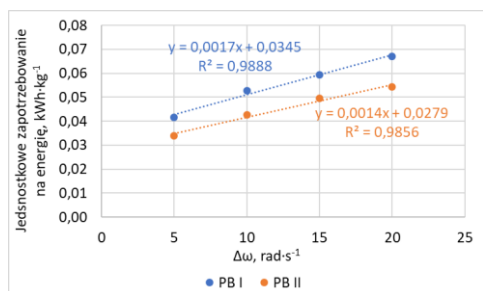
Dla jednostkowego zapotrzebowania na energię na podstawie analizy regresji wyznaczono modele liniowe w funkcji przyrostu prędkości  $\Delta\omega$ .



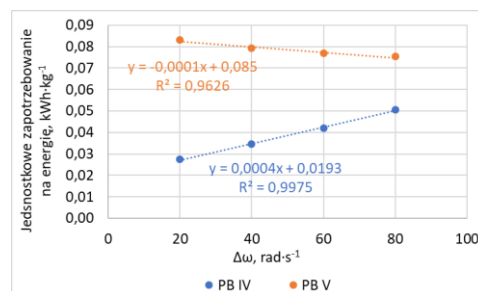
Rys. 5.15. Jednostkowe zapotrzebowanie na energię rozdrabniania kukurydzy w funkcji przyrostu prędkości dla PB I i PB II



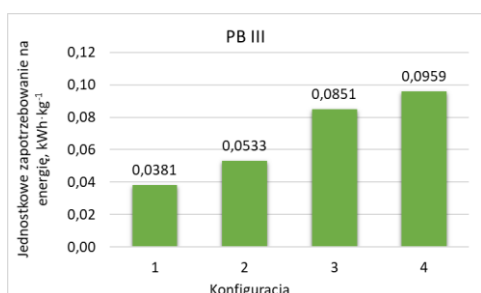
Rys. 5.16. Jednostkowe zapotrzebowanie na energię rozdrabniania kukurydzy w funkcji przyrostu prędkości dla PB IV i PB V



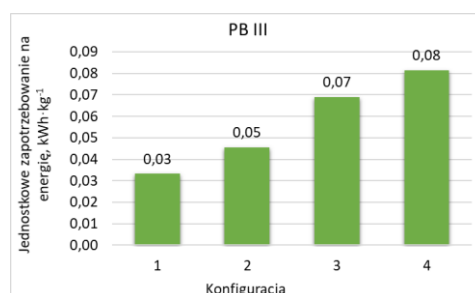
Rys. 5.17. Jednostkowe zapotrzebowanie na energię rozdrabniania ryżu w funkcji przyrostu prędkości dla PB I i PB II



Rys. 5.18. Jednostkowe zapotrzebowanie na energię rozdrabniania ryżu w funkcji przyrostu prędkości dla PB IV i PB V



Rys. 5.19. Zmiany jednostkowego zapotrzebowania na energię rozdrabniania kukurydzy w PB III

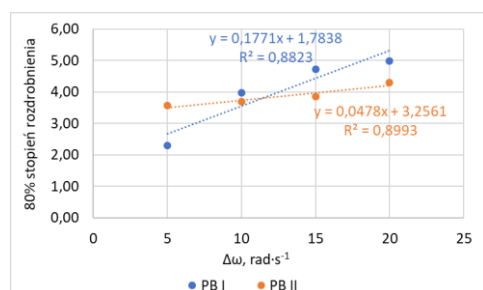


Rys. 5.20. Zmiany jednostkowego zapotrzebowania na energię rozdrabniania ryżu w PB III

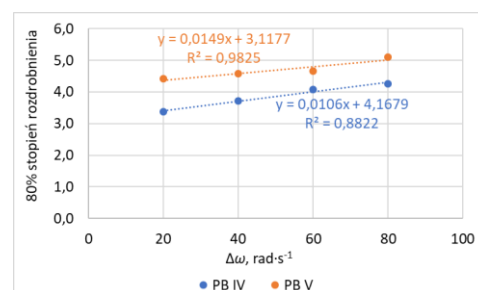
Dopasowanie otrzymanych modeli w analizowanych programach badawczych dla obu rozdrabnianych ziaren było większe niż 0,96 (Rys. 5.15 – Rys. 5.18), z wyjątkiem modelu jednostkowego zapotrzebowania na energię w PB V dla kukurydzy, dla którego stopień dopasowania wyniósł 0,74 (Rys. 5.16). Zauważalnym jest fakt, że wzrost prędkości kątowych na tarczach rozdrabniacza wywołuje wzrost zapotrzebowania na energię, co potwierdzają otrzymane wyniki dla analizowanych programów badawczych (Rys. 5.15 – Rys. 5.20).

## 5.6. ANALIZA WPLYWU ZMIENNYCH NA STOPIEŃ ROZDROBNIENIA

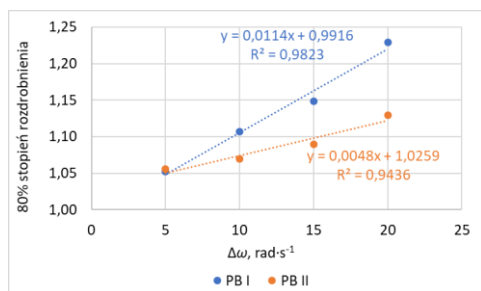
Dla 80% stopnia rozdrobnienia na podstawie analizy regresji wyznaczono modele liniowe w funkcji przyrostu prędkości  $\Delta\omega$ . Dopasowanie otrzymanych modeli w analizowanych programach badawczych dla obu rozdrabnianych ziaren było większe niż 0,88 (Rys. 5.21 – Rys. 5.24). Zauważalnym jest fakt, że wzrost prędkości kątowych na tarczach rozdrabniacza wywołuje wzrost stopnia rozdrobnienia co potwierdzają otrzymane wyniki dla analizowany programów badawczych (Rys. 5.21 – Rys. 5.26).



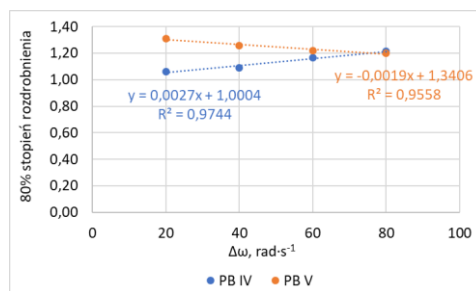
Rys. 5.21. 80% stopień rozdrobnienia kukurydzy w funkcji przyrostu prędkości dla PB I i PB II



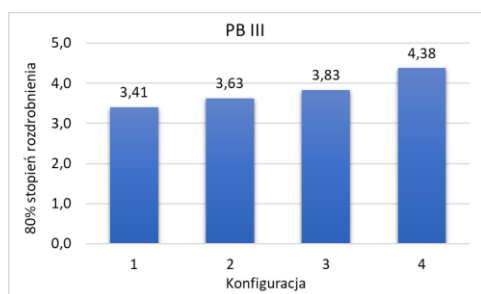
Rys. 5.22. 80% stopień rozdrobnienia kukurydzy w funkcji przyrostu prędkości dla PB IV i PB V



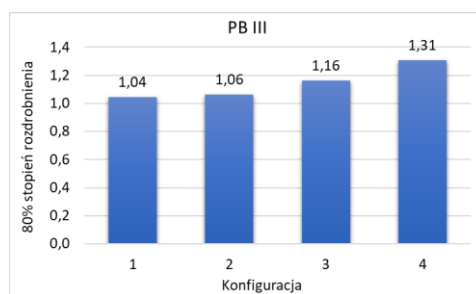
Rys. 5.23. 80% stopień rozdrobnienia ryżu w funkcji przyrostu prędkości dla PB I i PB II



Rys. 5.24. 80% stopień rozdrobnienia ryżu w funkcji przyrostu prędkości dla PB IV i PB V



Rys. 5.25. Zmiany 80% stopnia rozdrobnienia kukurydzy w PB III

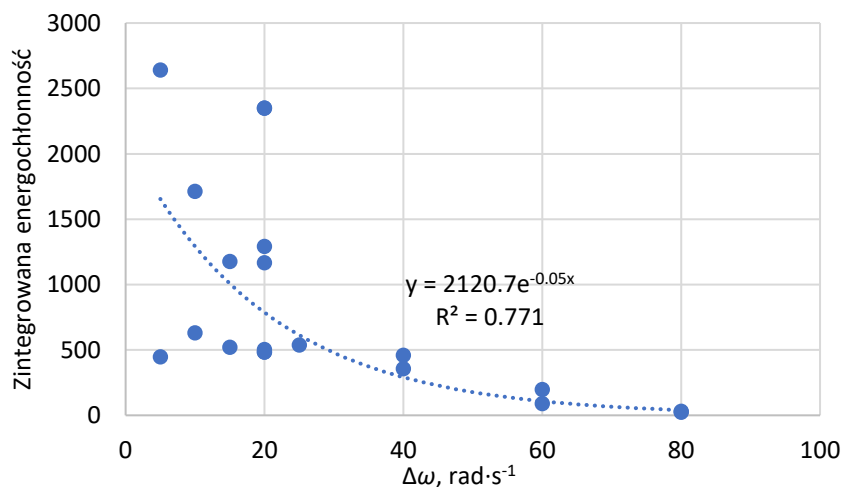


Rys. 5.26. Zmiany 80% stopnia rozdrobnienia ryżu w PB III

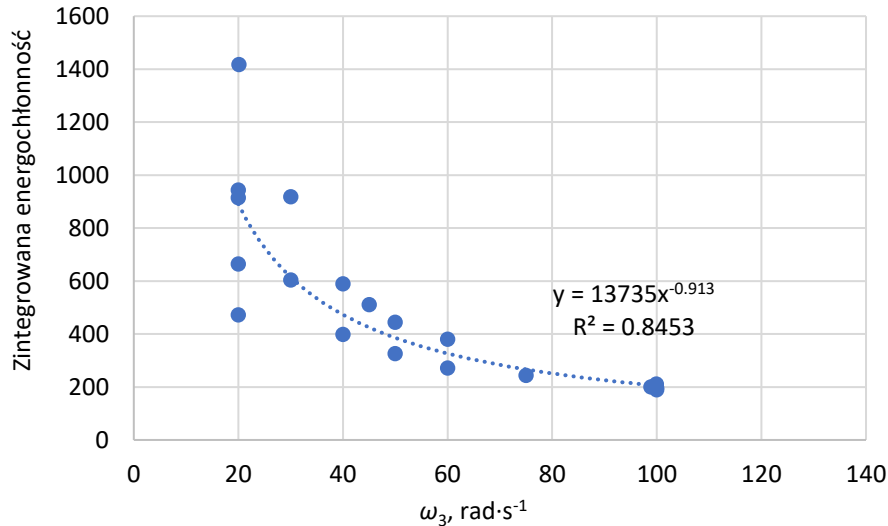
## 5.7. ANALIZA ZINTEGROWANEJ ENERGOCHŁONNOŚCI

Modelem nieliniowym najlepiej opisującym zmiany zintegrowanej energochłonności rozdrabniania kukurydzy na rozdrabniaczu pięciotarczowym w zależności od przyrostu prędkości kątowej na tarczach  $\Delta\omega$ , okazał się model wykładniczy (Rys. 5.27). Zaobserwowano, że energochłonność zintegrowana maleje wraz ze zwiększaniem się wartości  $\Delta\omega$ .

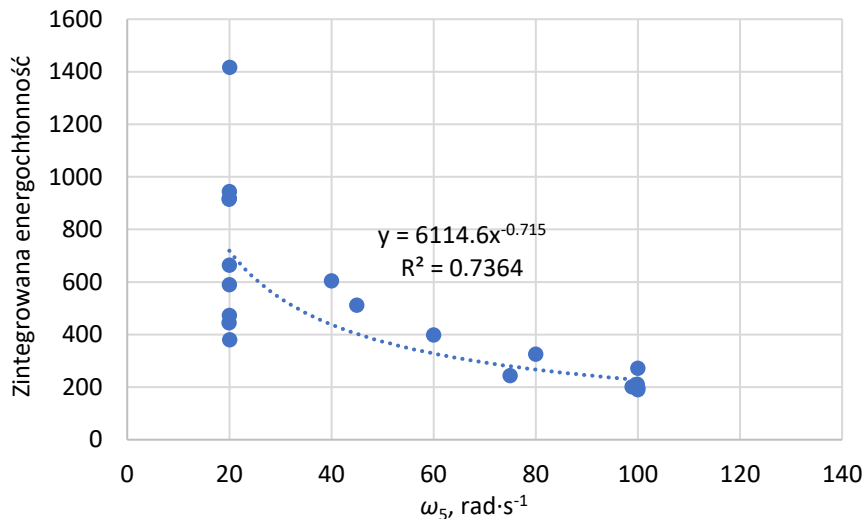
W przypadku rozdrabniania ryżu związek zintegrowanej energochłonności i prędkości kątowej na tarczach spośród badanych modeli najlepiej opisywał model potęgowy (Rys. 5.28. i Rys. 5.29.). Zależności te wskazują, że energochłonność zintegrowana maleje wraz ze wzrostem prędkości kątowych na tarczach rozdrabniacza.



Rys. 5.27. Zintegrowana energochłonność rozdrabniania kukurydzy w funkcji przyrostu prędkości kątowej



Rys. 5.28. Zintegrowana energochłonność rozdrabniania ryżu w funkcji prędkości kątowej trzeciej tarczy rozdrabniacza pięciotarczowego, gdy  $\omega_2$  i  $\omega_4$  zawierały się w przedziale (20-100) rad·s<sup>-1</sup>



Rys. 5.29. Zintegrowana energochłonność rozdrabniania ryżu w funkcji prędkości kątowej piątej tarczy rozdrabniacza pięciotarczowego, gdy  $\omega_4$  zawierała się w przedziale (20-100) rad·s<sup>-1</sup>

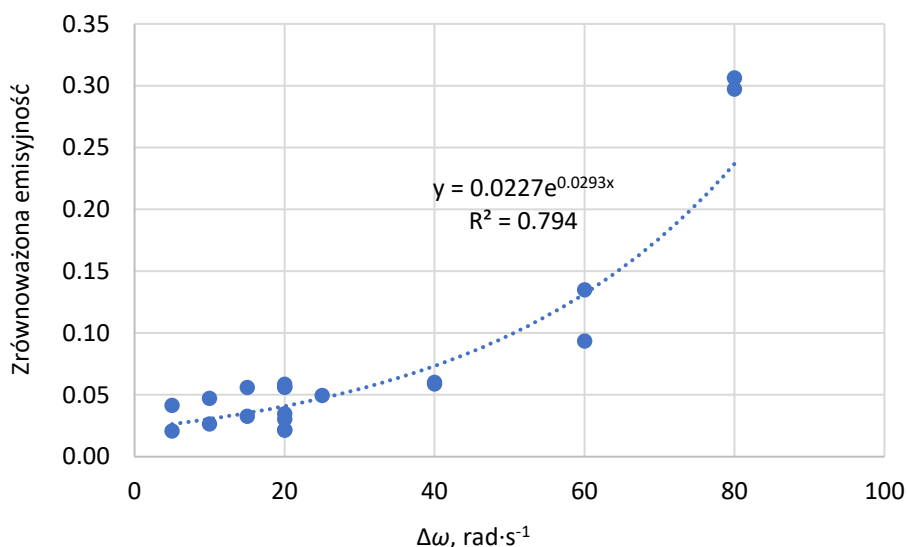
## 5.8. ANALIZA ZRÓWNOWAŻONEJ EMISYJNOŚCI

W przypadku rozdrabniania ryżu związek zrównoważonej emisyjności i prędkości kątowej na tarczach spośród badanych modeli najlepiej opisywał model uwzględniający dwie zmienne  $\omega_3$  i  $\omega_5$  charakteryzował się dopasowaniem na poziomie 0,926 i najlepiej opisywał zmienność emisyjności zrównoważonej ( $p < 0,05$  dla współczynników,  $F = 106,42$ , istotność  $F < 0,0001$ ).

$$e_{zrów} = 0,000212\omega_3 + 0,000106\omega_5 + 0,014091$$

Modelem nieliniowym najlepiej opisującym zmiany zrównoważonej emisyjności rozdrabniania kukurydzy na rozdrabniaczu pięciotarczowym w zależności od przyrostu prędkości kątowej na tarczach  $\Delta\omega$ , okazał się model wykładniczy (Rys. 5.30),

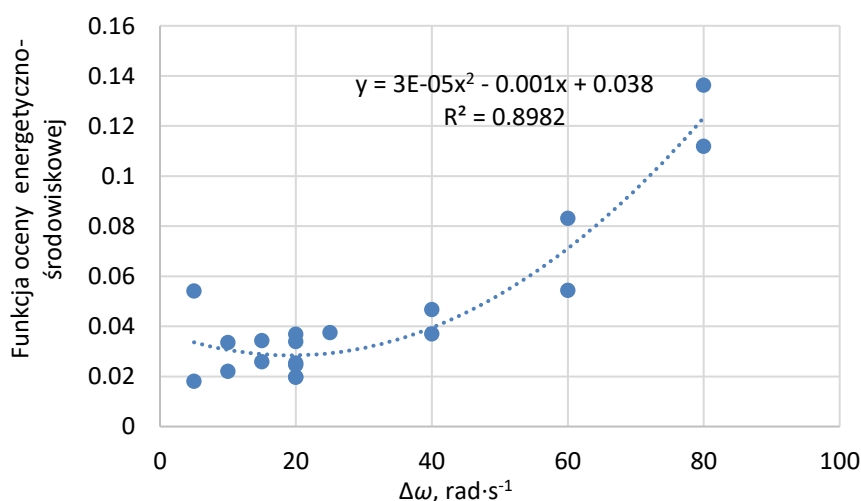




Rys. 5.30. Zrównoważona emisyjność rozdrabniania kukurydzy w funkcji przyrostu prędkości kątowej

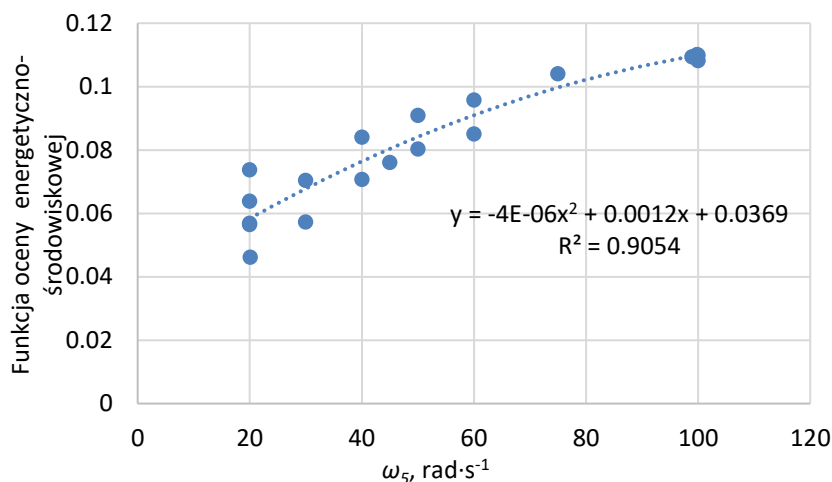
## 5.9. ANALIZA FUNKCJI OCENY ENERGETYCZNO-ŚRODOWISKOWEJ

Modelem nieliniowym najlepiej opisującym zmiany funkcji energetyczno-środowiskowej rozdrabniania kukurydzy na rozdrabniaczu pięciotarczowym w zależności od przyrostu prędkości kątowej na tarczach  $\Delta\omega$ , okazał się model kwadratowy (Rys. 5.31), o współczynniku determinacji  $R^2 = 0,898$ . Zaobserwowano, że funkcja oceny energetyczno-środowiskowej rośnie wraz ze zwiększaniem się wartości  $\Delta\omega$ .



Rys. 5.31. Funkcja oceny energetyczno-środowiskowej rozdrabniania kukurydzy w funkcji przyrostu prędkości kątowej

W przypadku rozdrabniania ryżu związek funkcji oceny energetyczno-środowiskowej i prędkości kątowej na tarczy piątej, spośród badanych modeli innych niż liniowe, najlepiej opisywał model kwadratowy. Zależność ta wyjaśniała ponad 90% zmienności (Rys. 5.32). Zależność wskazuje, że funkcja oceny energetyczno-środowiskowej zwiększa swoje wartości wraz ze wzrostem prędkości kątowych na tarczach rozdrabniacza.



Rys. 5.32. Funkcja oceny energetyczno-środowiskowej ryżu w funkcji prędkości kątowej piątej tarczy rozdrabniacza pięciotarczowego, gdy  $\omega_4$  zawierała się w przedziale (20-100) rad·s<sup>-1</sup>

Przeprowadzona analiza regresji metodą krokową wykazała, że najlepiej zmienność funkcji opisywał model trzech zmiennych (ponad 92%). Dobrym dopasowaniem ( $R^2=0,887$ ) charakteryzował się także model dwóch zmiennych  $\omega_3$  i  $\omega_5$ .

## 6. WNIOSKI

### 6.1. WNIOSKI POZNAWCZE

Na podstawie przeprowadzonego postępowania badawczego wykazano, że za pomocą autorskich modeli zintegrowanej energochłonności, zrównoważonej emisyjności i funkcji oceny energetyczno-środowiskowej można porównać procesy rozdrabniania i wskazać spośród nich ten najmniej energochłonny i emisyjny

Na podstawie wyników otrzymanych w próbach ściskania i ścinania wykazano, że wartości sił ściskających ( $F_s$ ) i ścinających ( $F_T$ ), oraz pracy ściskania ( $W_I$ ) i ścinania ( $W_T$ ) są większe dla kukurydzy niż dla ryżu. Z kolei ziarna ryżu charakteryzują się większą wartością naprężeń ściskających  $R_c$  i ścinających  $\tau$  niż ziarna kukurydzy.

Wykazano, że wartości sił, naprężeń i pracy cięcia w przypadku obu ziaren były niższe niż wartości sił, naprężeń i pracy ściskania, co stanowi pewną uniwersalizację otrzymanych wyników w zakresie przeprowadzonych badań i analiz wielotarczowego rozdrabniania ziarniaków biomasy.

Z przeprowadzonych badań własnych wynika, że pomiędzy prędkością ścinania  $v_s$  a siłami tnącymi  $F_T$ , naprężeniami tnącymi  $\tau$  i pracą ścinania  $W_T$  w przypadku obciążeń monotonicznych nie zachodzą związki istotne statystycznie w przypadku obu ziaren.

Wykonane analizy wyników badań wskazały silną zależność poboru mocy rozdrabniania, wydajności, jednostkowego zapotrzebowania na energię, stopnia rozdrobnienia, zintegrowanej energochłonności, emisyjności zrównoważoną i funkcji oceny energetyczno-środowiskowej od ustawień prędkości kątowych tarcz rozdrabniacza. Dla powyższych parametrów wyznaczono modele matematyczne związków z prędkościami kątowymi. Na podstawie analiz stwierdzono następujące prawidłowości:

- pobór mocy, wydajność, jednostkowe zapotrzebowanie na energię, stopień rozdrobnienia, emisyjność zrównoważona i funkcja oceny energetyczno-środowiskowej zwiększają się wraz ze zwiększaniem się prędkości kątowych tarcz,
- zintegrowana energochłonność maleje wraz ze zwiększaniem się prędkości kątowych tarcz rozdrabniacza wielotarczowego

Przeprowadzone badania w poszczególnych programach badawczych wykazały, że dobór prędkości kątowych na poszczególnych tarczach rozdrabniacza wielotarczowego nie jest bez znaczenia, a proces rozdrabniania uzyskuje wyższe wartości wskaźników rozdrabniania dla ustawień z uporządkowanym gradientem prędkości, np., wzrost prędkości od tarczy pierwszej do ostatniej o stałą wartość.

## **6.2. WNIOSKI APLIKACYJNE**

1. Opracowane modele zintegrowanej energochłonności, emisyjności zrównoważonej i funkcji oceny energetyczno-środowiskowej mogą stanowić praktyczne narzędzie doboru parametrów konstrukcyjnych i procesowych rozdrabniania na etapie projektowania lub badań przedwdrożeniowych rozdrabniaczy.
2. Warty rozważenia jest zmniejszenie energochłonności maszyny przez zmniejszenie zapotrzebowania na moc biegu jałowego np. poprzez zmiany konstrukcyjne tarcz lub całej konstrukcji zespołu tnącego, tak aby zminimalizować opory ruchu.
3. W konsekwencji przeprowadzonych badań i analiz zaleca się przekładniowe i konstrukcyjne (średnica i skok ślimaka z objętością otworów roboczych) zsynchronizowanie parametrów pracy dozownika ślimakowego z prędkością obrotową pierwszej tarczy roboczej.
4. W celu obniżania energochłonności i emisyjności rozdrabniania rozpatrując energochłonność w ujęciu sprawnościowym należy zwiększać sprawność poszczególnych elementów układu napędowego: silnika, przekładni, sprzęgła.

## **6.3. WNIOSKI DO DALSZYCH BADAŃ**

1. Dalsze badania w zakresie budowy i eksploatacji rozdrabniaczy biomasy w aspekcie ich energochłonności i emisyjności powinny być ukierunkowane na znalezienie związków pomiędzy wybranymi cechami konstrukcyjnymi zespołu rozdrabniającego a poborem mocy, wydajnością, stopniem rozdrobnienia, jednostkowym zużyciem energii, zintegrowaną energochłonnością, emisyjnością zrównoważoną oraz funkcją energetyczno-środowiskową.
2. Dodatkowo wskazuje się potrzebę określenia wpływu strumienia dozowania materiału na wydajność procesu i pozostałe wskaźniki, w tym energochłonność i emisyjność rozdrabniania. Przede wszystkim sugeruje się eksperymentalną weryfikację, poprzedzoną postępowaniem analitycznym, celem ustalenia i opisanie związku przyczynowo-skutkowego przepustowości pierwszej tarczy rozdrabniacza z prędkością dozowania wsadu.