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

mgr inż. Weronika Kruszelnicka

## 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

Bydgoszcz, marzec 2019

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

Składam serdeczne podziękowania Promotorowi, Panu dr. hab. inż. Andrzejowi Tomporowskiemu, prof. nadzw. UTP za opiekę naukową i wsparcie procesu twórczego. Dziękuję również Promotorowi pomocniczemu, Panu dr. inż. Adamowi Mrozińskiemu za cenne wskazówki merytoryczne.

Podziękowania kieruję także do Pana Prof. dr. hab. inż. Józefa Flizikowskiego za inspirujące twórczą pracę wskazówki.

Dziękuję także Rodzicom za wsparcie i wyrozumiałość.

# Spis treści

W	YKA	Z PODSTAWOWYCH POJĘĆ UŻYTYCH W PRACY	7
1.	WS	ТЕР	9
	11	GENEZA PRACY	11
	1.1.	ZAKRES ROZPRAWY	13
~	4 NT		
2. D4	ANA OZDI	ALIZA SIANU WIEDZY I IEUHNIKI W ZAKKESIE IEMATYKI DAWV	14
ĸ	UZFI	XA W 1	14
	2.1.	TEORIE I HIPOTEZY ROZDRABNIANIA	14
	2.2.	ZMIENNE I WSKAŹNIKI PROCESU WIELOTARCZOWEGO ROZDRABNIANIA	18
		2.2.1. Metody badań i rozwoju wielotarczowego rozdrabniania	18
		2.2.2. Charakterystyki ruchowe i energetyczne wielotarczowego	
		rozdrabniania	22
		2.2.3. Wskaźniki procesu rozdrabniania	26
	2.3.	ZAGADNIENIA OCENY ENERGETYCZNO-ŚRODOWISKOWEJ ROZDRABNIANIA	28
		2.3.1. Kryteria oceny energetycznej	30
		2.3.2. Kryteria oceny środowiskowej	33
		2.3.3. Kryteria jakosci	34
		2.3.4. Kryteria oceny technologicznej	36
		2.3.5. Podsumowanie i wytyczne do zadania własnego	37
3.	CEI	L I PROBLEM BADAŃ	39
	3.1.	CELE PRACY	39
	3.2.	SFORMUŁOWANIE PROBLEMU	39
4.	ME'	TODYKA BADAŃ	41
	4 1		4.1
	4.1.	MODEL OBIEKTU BADAN	41
	4.2.	PRZYJĘTE KRYTERIA OCENY ROZDRABNIANIA	43
		4.2.1. Model wydajności wielotarczowego rozdrabniania	43
		4.2.2. Model energochionnosci	52
		4.2.5. Model jednostkowego zapotrzebowania na energię	
		4.2.4. Model stopina iozarobinema produktu	
		4.2.5. Wodel zmegrowanej energoemonioser	
		4.2.0. Wodel złowno ważonej emisyjności	00
	43	MATERIAL V ROZDRARNIANIE	01
	ч.э.	4 3 1 Ziarna ryżu i kukurydzy	61
		4 3 2 Właściwości analizowanych ziaren	62
	44	METODA OZNACZENIA WILGOTNOŚCI	62
	4.5.	METODY BADAŃ ROZDRABNIANIA ZIAREN.	63
		4.5.1. Przygotowanie próbek	63
		4.5.2. Próba statycznego ściskania	63
		4.5.3. Próba ścinania	64
	4.6.	STANOWISKO BADAŃ MASZYNOWYCH	64
	4.7.	PLAN I PROGRAM BADAŃ	71

5.	WY	NIKI BAD	AŃ	75
	5.1.	WYNIKI BA	DAŃ LABORATORYJNYCH	75
		5.1.1.	Wyniki dla próby statycznego ściskania	75
		5.1.2.	Wyniki badań dla próby ścinania	77
		5.1.3.	Wyniki badań mocy, wydajności, jednostkowego	
			zapotrzebowania na energię, stopnia rozdrobnienia	81
	5.2.	ANALIZA V	VYNIKÓW BADAŃ LABORATORYJNYCH ROZDRABNIANIA	88
		5.2.1.	Analiza wpływu zmiennych na pobór mocy rozdrabniania	88
		5.2.2.	Analiza wpływu zmiennych na wydajność rozdrabniania	94
		5.2.3.	Analiza wpływu zmiennych na jednostkowe zużycie energii	97
		5.2.4.	Analiza wpływu zmiennych na stopień rozdrobnienia	100
		5.2.5.	Analiza zintegrowanej energochłonności	103
		5.2.6.	Analiza zrównoważonej emisyjności	108
		5.2.7.	Analiza funkcji oceny energetyczno-środowiskowej	112
6.	POI	DSUMOWA	ANIE	117
7.	WN	IOSKI		119
	7.1.	WNIOSKI P	OZNAWCZE	119
	7.2.	WNIOSKI A	PLIKACYJNE	122
	7.3.	WNIOSKI D	O DALSZYCH BADAŃ	123
SF	PIS PI	IŚMIENNI	CTWA	124
SF	IS T.	ABEL		134
SF	IS R	YSUNKÓV	V	137
ST	RES	ZCZENIE		141
SU	JMM	ARY		142

### WYKAZ PODSTAWOWYCH POJĘĆ UŻYTYCH W PRACY

*Analiza* – ocena kryterialna budowy i eksploatacji maszyn przetwórczych, procesu podziału biomasy za pomocą wskaźników energochłonności i emisji,

*Proces wielotarczowego rozdrabniania* – zbiór operacji, zabiegów i czynności związanych z ruchem, podziałem, mieszaniem, rozcieraniem surowca w rozdrabniaczu o zespole roboczym zbudowanym z kilku tarcz z otworami,

*Biomasa* – materiał biologiczny, uziarniony np. ryż, kukurydza, poddawany rozdrobnieniu w celu przygotowania do dalszego wykorzystania energetycznego, np. spalania,

*Energochlonność* – zużycie energii przez złożony układ technologiczny na realizację pracy użytecznej i rozproszeń nieużytecznych (drgania, ciepło, wibracje, tarcie nieużyteczne, emisje),

*Emisje*  $CO_2$  – ilość ekwiwalentu  $CO_2$  z procesu użytecznego rozdrabniania i wykorzystania energetycznego biomasy w ujęciu zrównoważonym

#### 1. WSTĘP

Nie bez znaczenia dla budowy i eksploatacji maszyn przetwórczych, w tym rozdrabniaczy, młynów, oraz inteligentnego rozwoju produktu (konstrukcji młyna i produktu przemiału) i procesu wielotarczowego rozdrabniania uziarnionej biomasy, w kierunku zmniejszania energochłonności i emisji CO<sub>2</sub> pozostają kluczowe założenia i wymagania stawiane współczesnej gospodarce i społeczeństwu w obowiązujących dokumentach mówiących o strategiach rozwoju państw wspólnoty europejskiej. Wspomniano w nich o trzech głównych rodzajach rozwoju [1,2]:

- 1. rozwój inteligentny (RI) zakładający rozwój gospodarki w oparciu o wiedzę i wdrażanie innowacji,
- rozwój zrównoważony (RZ) polegający na wsparciu działań w gospodarce sprzyjających zwiększaniu efektywności korzystania z zasobów energo-materialnych, zwiększania konkurencyjności oraz obniżania wpływów środowiskowych,
- 3. rozwój sprzyjający włączeniu społecznemu (RWS) wspierający działania w gospodarce dla zwiększania poziomu zatrudnienia w celu zapewnienia spójności społeczno-terytorialnej.

Dla budowy i eksploatacji rozdrabniaczy uziarnionej biomasy najważniejszy jest rozwój inteligentny, mimo, że pozostałe rodzaje rozwoju mają wiele aspektów pozytywnych.

Rozdrabnianie, mielenie, kruszenie to określenia opisujące procesy celowego niszczenia struktury postaciowej materiałów pod wpływem oddziaływań ruchomych (najczęściej obrotowych) elementów roboczych rozdrabniacza [3–9]. W wielu branżach (np. spożywczej, chemicznej, mineralnej, papierniczej, energetycznej itd.) rozdrabnianie stanowi niezbędny etap przetwórstwa [10–12]. Szczególnie ważną rolę odgrywa w przemyśle energetycznym w przygotowaniu węgla i coraz częściej, biomasy do spalania w ciepłowniach i elektrociepłowniach, czego wyrazem jest intensywność badań i działań zmierzających do poprawy jakości procesu a także produktu rozdrabniania przejawiająca się w wielu publikacjach w tym zakresie [8,13–17].

W efekcie rozdrobnienia materiałów pojawia się szereg korzyści związanych ze zmniejszeniem wymiarów cząstek, np.: redukcja przestrzeni w miejscu składowania i magazynowania, polepszenie efektywności transportu paliwa do miejsca dalszego przetwórstwa lub utylizacji, poprawa własności wsadu mieszanki paliwowej i w konsekwencji jej łatwiejsze dozowanie oraz utrzymanie prawidłowych parametrów procesu spalania [11,18–20].

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 [3,21]. Niniejsza praca zawierać będzie zagadnienia dotyczące rozdrabniania biomasy przeznaczonej na cele energetyczne, dlatego omówione zostaną cele istotne dla branży energetycznej. Obejmują one postulaty związane bezpośrednio z przetwarzaniem materiału, realizowaną funkcją, przeznaczeniem systemu (cele główne) oraz cele procesowe, globalne w relacjach wzajemnych sprzężeń i oddziaływań środowiska wraz z systemem technicznym (Rys. 1.1) [15,22–24].

Poznanie właściwości wsadu, maszyny oraz wzajemnych relacji i oddziaływań rozdrabniacza z materiałem wsadowym jest rzeczą trudną z uwagi na złożoność występujących zjawisk i procesów związanych z przepływem masy. Próby uporządkowania i wyjaśnienia tych zależności podejmowane były od wielu lat [25–30]. W dalszym ciągu jednak nie opracowano modeli dokładnie opisujących proces rozdrabniania. Utrudnieniem w znalezieniu adekwatnych rozwiązań są czynniki zakłócające proces, do których należą m. in. zmienne właściwości materiału wsadowego takie jak: wytrzymałość mechaniczna materiału, jego twardość, podatność na rozdrabnianie [31,32]. Wymienione właściwości materiałowe wywierają znaczący wpływ na wybór odpowiedniego rozdrabniacza do przemiału, a także na przebieg samego procesu rozdrabniania i jego parametry: wydajność, efektywność czy energochłonność [23,33,34].



Rys. 1.1. Cele procesu rozdrabniania surowców energetycznych. Opracowanie własne na podstawie [15,22–24]

Różnorodność materiałów rozdrabnianych, ich zmienne właściwości przyczyniają się do powstawania nowych, coraz doskonalszych konstrukcji zespołów rozdrabniających, tak aby zapewniały jak najniższe zużycie energii przy jak najwyższej wydajności [35].

Niedostateczna ilość informacji aspektach środowiskowego W oddziaływania procesu rozdrabniania w relacji maszyna-materiał-otoczenie skłoniła autorkę do usystematyzowania i uporządkowania właściwości maszyny i materiału (biomasy ziarnistej) uwzględniając jego wykorzystanie w celach energetycznych. W efekcie doprowadziło to do opracowania oryginalnej efektywności energetyczno-środowiskowej metodyki badań procesu rozdrabniania mając na uwadze zjawiska tarcia i przepływu masy oraz cechy materiału wsadowego i konstrukcji rozdrabniającej.

#### **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 pracy wskazano motywy podjęcia i realizacji tematyki.

Światowa konsumpcja energii elektrycznej i cieplnej od 1990 r. wzrasta nieustannie [36]. W związku z obserwowanym dynamizmem zmian i zachodzących przemian na rynku energetyki dotyczącym wytwarzania energii ze źródeł innych niż węgiel, większą uwagę zaczęto przywiązywać do wykorzystywania "czystych", niskoemisyjnych technologii [23,37,38]. Zalicza się do nich technologie oparte na przetwarzaniu energii wiatru, słońca, wody i biomasy. Biomasa, ze względu na ogólnodostępność i wysoką wartość energetyczną stanowi jeden z najbardziej rozpowszechnionych surowców alternatywnych [39–42]. Jej wartość energetyczna w zależności od rodzaju zawiera się w przedziale (8-20) GJ·kg<sup>-1</sup> [37].

Najprostszą i najpowszechniejszą metodą energetycznego wykorzystania biomasy jest jej spalanie np. w kotłach ciepłowni i elektrociepłowni [43]. Coraz bardziej popularne stają się inne formy energetycznego przetwórstwa np.: zgazowanie, produkcja biometanu, estryfikacja i pozyskiwanie bioetanolu itp. [11]. Pozyskanie energii zawartej w strukturze biomasy wymaga jej wcześniejszego odpowiedniego przygotowania: suszenia, rozdrabniania, pelletyzacji, itd [23]. Zabiegi te wymagają pewnych nakładów energetycznych, co znacząco wpływa na obniżenie energetyczno-środowiskowego bilansu w całym cyklu istnienia materiału energetycznego (drewna, ziaren biomasy, itp.) [44–48]. 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 [49,50]. Ma to na celu także poprawę konkurencyjności paliw z biomasy w stosunku do tradycyjnych paliw kopalnych [51,52].

Rozdrabnianie jest jednym z najpowszechniej stosowanych procesów przygotowawczych nośników energii (konwencjonalnych i niekonwencjonalnych) do spalania [11]. W przypadku ziarniaków biomasy redukcję wymiarów przeprowadza się najczęściej na młynach walcowych, bebnowych, kulowych, młotkowych (bijakowych) oraz tarczowych [23,53]. względem jakości uzyskiwanego efekty pod Najlepsze produktu. energochłonności procesu wydajności uzyskuje się dla młynów młotkowych i tarczowych [11,23]. Po to, by maksymalnie wykorzystać potencjał rozdrabnianych surowców, energochłonność w trakcie rozdrabniania (przetwarzania) powinna być jak najniższa. Niestety obecnie stosowane młyny i rozdrabniarki w dalszym ciągu charakteryzują się dużym zużyciem energii przy niskiej wydajności [11.22,54,55]. Staje się to przyczynkiem do podejmowania badań, tworzenia rozwiązań konstrukcyjnych i technologicznych zmierzających efektywności energetycznej i środowiskowej do poprawy układów rozdrabniających. Kluczowym elementem jest wprowadzanie i wdrażanie ekoinnowacyjnych systemów, ocenianych już na etapie projektu z wykorzystaniem np. analizy wielokryterialnej. Kryteria doboru technologii rozdrabniania i oceny jej działania powinny jednoznacznie wskazywać na rozwiązania spełniające założenia zrównoważonego rozwoju.

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 [33,56].

Badania nad energetycznymi aspektami samego rozdrabniania prowadzone są nieustannie od końcówki XIX wieku. Od tamtej pory powstało wiele teorii wiążących zużycie energii z jakością produktu, efektywnością procesu (zjawiska) rozdrobnienia. Należą do nich m.in. hipotezy Rittingera, Kicka, Holmesa, Charlesa, Rebindera, Mielnikowa, Bonda i statystyczna. Opierają się one jednak o pewne uproszenia dotyczące podobieństwa cząstek, nieuwzględniania sił rozdrabniania oraz występują ograniczenia w ich stosowalności [22,27,30,57,58]. Polskie doświadczenia w zakresie badań nad energochłonnością obejmują eksperymenty prowadzone np.: przez J. Flizikowskiego, Malewskiego, Tomporowskiego, Zawadę, Bracha czy Sidora [1,6,35,59–64]. Ten ostatni w swych pracach poruszał zagadnienia modelowania idealnego procesu mielenia [65]. Środowiskowych ocen oddziaływania systemów rozdrabniania nie prowadzi się lub prowadzone są one ogólnikowo [66,67], mimo, że znaczna część emisji gazów cieplarnianych (np. CO<sub>2</sub>) pochodzi właśnie z tych systemów.

Mnogość zagadnień i zjawisk zachodzących podczas rozdrabniania materiałów biologicznych, w tym ziaren biomasy przeznaczonych dla przemysłu energetycznego wymaga rozważania i określenia wielu kryteriów dostosowanych do specyfiki przedsiębiorstwa, systemu, konstrukcji rozdrabniacza i właściwości materiału (jego struktury postaciowej, składu chemicznego, wilgotności). Identyfikacja zmiennych i parametrów wpływających na efekt końcowy rozdrabniania (jakość produktu, energochłonność i wydajność procesu) umożliwia określenie korzystnych warunków w jakich uzyskiwane efekty są jak najlepsze [23,54]. 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;
- dyskusję modeli w kierunku utworzenia metodyki energetycznośrodowiskowej analizy i badań energochłonności i emisji CO<sub>2</sub> rozdrabniania wielotarczowego biomasy;
- 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

Badania budowy i eksploatacji maszyn przetwórczych, w tym procesów rozdrabniania, i ich ulepszania trwają nieustannie. Podstawą ich prowadzenia jest ciągłe udoskonalanie, wprowadzanie rozwiązań innowacyjnych, spełniających wymagania odbiorców, użytkowników pod względem wydajności, kosztów eksploatacji, zużycia energii i jakości [68,69].

#### 2.1. TEORIE I HIPOTEZY ROZDRABNIANIA

Analizę stanu wiedzy zagadnienia rozpoczęto od podstawowych teorii opisujących w warunkach laboratoryjnych związki 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 [70]:

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

Pierwsza z teorii, **teoria Rittingera**, nazywana teorią powierzchniową mówi, że praca potrzebna do rozdrobnienia materiału zmienia się proporcjonalnie do tworzonej powierzchni podczas rozdrabniania zgodnie z zależnością [71]:

$$L = k_1 \cdot \Delta s \tag{2.1}$$

gdzie:

L – praca kruszenia, Nm,

 $\Delta s$  – przyrost powierzchni materiału, m<sup>2</sup>,

 $k_1$  – współczynnik proporcjonalności (praca konieczna do utworzenia jednostki powierzchniowej).

Energia rozdrabniania cząstki w tym przypadku wynosi:

$$E_m = k \cdot \left(\frac{1}{x_2} - \frac{1}{x_1}\right) \tag{2.2}$$

gdzie:

 $E_m$  – energia rozdrabniania, J,

k – współczynnik proporcjonalności,

 $x_1$  – wymiar ziarna przed rozdrobnieniem, mm,

*x*<sub>2</sub> – wymiar ziarna po rozdrobnieniu, mm.

Druga z teorii, zwana teorią objętościową (**teoria Kicka**), to teoria wprowadzona w 1885 roku przez F. Kicka. Teoria ta opiera się na znajomości wytrzymałości materiału podczas jego zgniatania lub uderzania. Przyjmuje się,

że powstałe odkształcenie materiału następuje pod wpływem działającego obciążenia zewnętrznego (siły ściskającej), która powoduje powstawanie naprężeń w materiale rozdrabnianym. W momencie, gdy naprężenia powstałe przekroczą wartość granicy wytrzymałości na ściskanie następuje rozpad ziarna na mniejsze fragmenty, innymi słowy ulega on rozdrobnieniu. Z założeń teorii Kicka wynikają trzy zasady:

 stosunek prac niezbędnych do uzyskania takiej samej zmiany struktury postaciowej dwóch ziaren podobnych jest równy co do wartości stosunkowi ich ciężaru lub objętości [71]:

$$\frac{L_1}{L_2} = \frac{V_1}{V_2} = \frac{G_1}{G_2} = \frac{1}{k^3}$$
(2.3)

gdzie:

 $L_1$ ,  $L_2$  – praca użyta do rozdrobnienia ziaren pierwszego i drugiego;

 $V_1$ ,  $V_2$  – objętości ciał, odpowiednio: pierwszego i drugiego;

- $G_1$ ,  $G_2$  ciężary ciał, odpowiednio: pierwszego i drugiego;
- k stosunek wymiarów liniowych ciał podobnych,  $k = \frac{d_I}{d_2}$ ;
- 2. stosunek sił koniecznych do wystąpienia zmiany geometrii dwóch ciał podobnych jest taki jak stosunek ich powierzchni [71]:

$$\frac{L_1}{L_2} = \frac{P_1 \Delta l_1}{P_2 \Delta l_2} = \frac{p \cdot F_1 \cdot \Delta l_1}{p \cdot F_2 \cdot \Delta l_2} = \frac{1}{k^3}$$
(2.4)

 praca jednorazowego podziału ciała o znanych wymiarach i kształcie jest co do wartości równa iloczynowi masy (lub objętości) tego ciała i jednostkowej pracy jednokrotnego podziału. Dla tego przypadku wzór na pracę wg. Kicka przedstawia się następująco [71]:

$$L_{K} = L_{jK} \cdot V = \frac{\sigma_{N}^{2} \cdot V}{2E} = C_{K} \cdot V$$
(2.5)

gdzie:

 $C_K$  – stała materiałowa,

 $L_{jK}$  – jednostkowa praca podziału masy (objętości) ciała,  $L_{jK} = C_K$ , *V* – objętość.

Energia rozdrabniania wg. teorii Kicka dana jest równaniem:

$$E_m = k \cdot \ln \frac{x_1}{x_2} \tag{2.6}$$

Kolejna z teorii, **teoria Bonda**, zakłada, że rozdrabnianie stanowi pewną część zmiany wymiaru bryły o nieskończenie dużym wymiarze na nieskończoną ilość brył o nieskończenie małym wymiarze (dążącym do zera). Zgodnie z tą teorią energią zakumulowana w materiale jest odwrotnie proporcjonalna do pierwiastka kwadratowego umownego wymiaru ziaren. W opisie Bond jako umowny wymiar ziarna przyjął dla nadawy i produktu

osiemdziesięcioprocentowy wymiar wynikający z analizy sitowej ziaren. Zależność na energię rozdrabniania wg. teorii Bonda przedstawia równanie [70]:

$$E = K_{BO} \left[ \frac{1}{\sqrt{d_{80}}} - \frac{1}{\sqrt{D_{80}}} \right]$$
(2.7)

gdzie:

 $D_{80}$  - rozmiar otworu sita, przez które przechodzi 80% ziaren nadawy,  $d_{80}$  - rozmiar otworu sita, przez które przechodzi 80% produktu rozdrabniania.  $K_{BO}$  – współczynnik proporcjonalności Bonda.

W teorii Bonda do wyznaczenia energii rozdrabniania konieczna jest znajomość współczynnika  $K_{BO}$ , a dokładniej indeksu pracy  $W_i$  (work index), który określa odporność materiału na rozdrabnianie. Współczynnik proporcjonalności Bonda wyraża się równaniem [70]:

$$K_{BO} = 10W_i \tag{2.8}$$

Indeks pracy  $W_i$  jest charakterystyczny dla danego materiału rozdrabnianego. Definiuje się go jako pracę potrzebną do rozdrobnienia jednostki masy materiału od wymiaru nieskończonego do 100 µm. Indeks pracy dla różnych materiałów wyznaczany jest za pomocą metody Bonda dla młynka kulowego zgodnie z równaniem [71]:

$$W_i = \frac{16}{G^{0.82}} \sqrt{\frac{\gamma}{100}} \cdot 1,1 \ [kWh/Mg]$$
(2.9)

gdzie:

 $\gamma$  – wielkość otworów sita kontrolnego, µm; w tym przypadku 100 µm,

G – ilość drobnego materiału powstającego podczas jednego obrotu młynka.

Kolejną z hipotez jest **hipoteza Bracha**. Według niej materia ciała, która poddawana jest obciążeniu, ulega rozpadowi w momencie przekroczenia granicznej, właściwej dla tej materii energii odkształcenia. Pierwsze podstawowe założenie tej teorii opisuje zjawisko kruszenia ciała o wymiarze D do brył o wymiarze  $d_1$  wg. zależności [70]:

$$d_1 = \frac{D}{\alpha} \tag{2.10}$$

gdzie:

 $\alpha$ – wskaźnik pojedynczego zmniejszenia wymiaru cząstki, stały dla danego materiału.

W kolejnych przejściach (cyklach) uzyskuje się produkty odpowiednio mniejsze [70]:

$$d_2 = \frac{D}{\alpha^2}; d_3 = \frac{D}{\alpha^3}; d_4 = \frac{D}{\alpha^4}; ...; d_n = \frac{D}{\alpha^n}$$
 (2.11)

Drugie ważne założenie tej teorii odnosi się do związku pomiędzy energią rozdrabniania i wymiarem ciała rozdrabnianego i zakłada, że wraz ze zmniejszaniem się wymiarów rozdrabnianych cząstek jednostkowa energia rozdrabniania  $E_j$  (konieczna do jednokrotnego rozdrobnienia jednostki masy o wymiarze cząstek D) rośnie, zgodnie z zależnością [70]:

$$E_j = E_1 \left(\frac{D_0}{D}\right)^m \tag{2.12}$$

gdzie:

 $E_1$  – praca potrzebna do jednokrotnego rozkruszenia jednostki masy ciał o wymiarze  $D_0$ ;

m – wykładnik ustalany doświadczalnie.

Po odpowiednich przekształceniach otrzymuje się [70]:

$$E = K_B \left( \frac{1}{d^m} - \frac{1}{D^m} \right) \tag{2.13}$$

lub w innej postaci [72]:

$$E_{RB} = \frac{\sigma_r^2}{2E_r \cdot \rho_r \cdot \alpha_r} (n_{wsr} - 1)$$
(2.14)

gdzie:

 $E_{RB}$  – energia rozdrabniania jednostki masy materiału rozdrabnianego, MJ·kg<sup>-1</sup>,  $\sigma_r$  – naprężenia ściskające niszczące ziarno, MPa,

 $E_r$  – względny moduł sprężystości ziarna, MPa,

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

 $\alpha_r$  – współczynnik przyrostu powierzchni po jednokrotnym skruszeniu próbki,-,  $n_{swr}$  – średni ważony stopień rozdrobnienia, -.

Równanie wynikające z hipotezy Bracha zmodyfikował F. Molendowski. Wg niego pracę rozdrabniania można wyznaczyć z zależności [72]:

$$E_{RM} = \sum_{k=1}^{k=n} \frac{b_k}{100} \left( \frac{D_e}{d_k} - 1 \right) \frac{\sigma_r^2}{2E_r \cdot \rho_r \cdot \alpha_r}$$
(2.15)

gdzie:

 $E_{RM}$  – energia rozdrabniania masy rozdrabnianych ziaren, MJ·kg<sup>-1</sup>,

 $b_k$ - procentowy udział k-tej klasy wymiarowej materiału po rozdrobnieniu, %,  $D_e$ - średni wymiar cząstek nadawy,

 $d_k$  – zastępczy wymiar klasy wymiarowej, mm.

Model ten uwzględnia właściwości fizyczne materiału rozdrabnianego, współczynnik przyrostu powierzchni właściwej materiału, rozkład granulometryczny produktu rozdrabniania [72].

Zgodnie z **teorią Rebindera**, energia rozdrabniania stanowi sumę energii potrzebnej do tworzenia nowych powierzchni podczas rozdrabniania i energii odkształceń ciała. Wyrażana jest za pomocą zależności:

$$E_m = \sigma \cdot \Delta S + k \cdot \Delta V \tag{2.16}$$

gdzie:

 $\sigma$  – względna energia przypadająca na jednostkę powierzchni ciała,

 $\Delta S$  – przyrost powierzchni właściwej sumy cząstek ciała w procesie rozdrabniania,

 $k-{\rm względna}$ energia odk<br/>ształceń plastycznych i sprężystych przypadająca na jednostkę objętości,

 $\Delta V$  – przyrost objętości sumy cząstek w procesie rozdrabniania.

Przedstawione teorie oceny pracy i energii rozdrabniania znajdują zastosowanie w ściśle określonych warunkach laboratoryjnych. Nie uwzględniają one aspektów energetycznych związanych z maszynowym, przemysłowym rozdrabnianiem, gdzie oprócz pracy i energii niszczenia materiału konieczne jest dostarczenie dodatkowej porcji energii na opory ruchu, zwyżkę aerodynamiczną, wielokrotność cięcia, straty związane ze sprawnością.

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

#### 2.2.1. Metody badań i rozwoju wielotarczowego rozdrabniania

Rozwój konstrukcji rozdrabniaczy tarczowych, wielotarczowych trwa począwszy od początku lat 60. XX w. Od momentu pojawienia się pierwszej konstrukcji młyna wykorzystującego co najmniej dwie tarcze (z których minimum jedna wykonuje ruch obrotowy) powodujące ścinanie, quasi-ścinanie materiałów powstało wiele modyfikacji tego rozwiązania poprzez: zastosowanie kilku tarcz w zespole roboczym rozdrabniacza, zmiany ukształtowania tarcz (tarcze o różnym kształcie, tarcze z otworami o różnej geometrii), możliwość regulacji szczeliny międzytarczowej, zastosowanie dodatkowych układów wibracyjnych czy tzw. układów water jet. Znalazły one zastosowanie m.in. w przemyśle rolniczym, chemicznym, farmaceutycznym, wydobywczym i energetycznym [73,74].

W zależności od ilości współpracujących tarcz i ich ukształtowania wyróżnia się następujące rodzaje młynów [75–77]:

- jednotarczowe tego typu konstrukcje posiadają zespół rozdrabniający składający się z ruchomej, obrotowej tarczy i współpracującej z nią nieruchomej powierzchni;
- dwutarczowe w tego typu młynach zespół roboczy rozdrabniacza tworzą dwie współpracujące ze sobą obrotowe tarcze;
- wielotarczowe zespół roboczy rozdrabniacza wielotarczowego tworzą więcej niż dwie tarcze;
- wibracyjne w tego typu młynach tarczowych wykorzystywane są wibracje o dużej częstotliwości;

Rozdrabnianie w młynach tarczowych zachodzi w wyniku oddziaływania co najmniej dwóch elementów wykonujących najczęściej ruch obrotowy, pomiędzy które wprowadzany jest wsad. Struktura materiału wsadowego znajdującego się pomiędzy współpracującymi powierzchniami elementów rozdrabniających zostaje zniszczona na skutek, wywoływanego ruchem tarcz, złożonego stanu naprężeń ścinających, ściskających i nacisków powierzchniowych przekraczających wartość naprężeń niszczących w materiale. Uproszczony model obciążeń i naprężeń podczas quasi-ściskania przedstawiono na rysunku 2.1. Zachodzące zjawiska trudno jest opisać szczegółowymi modelami, zarówno po stronie materiału jak i po stronie maszyny (w zakresie opisu tarcia, zmian temperatury, energii itp.), dlatego cały czas podejmowane są badania i próby zmierzające do wyznaczenia zależności dla wielotarczowego rozdrabniania np. w pracach [73,78,79].



Rys. 2.1. Schemat obciążeń i naprężeń podczas quasi-ściskania; F – siła obciążająca. Opracowanie własne na podstawie [80]

W przypadku rozdrabniania wielootworowego, wielotarczowego charakterystycznym jest proces przejścia materiału przez zespół rozdrabniający. Ziarno przechodząc przez otwory współpracujących, obracających się ze zmienną prędkością obrotową tarcz ulega ścinaniu zgodnie z rysunkiem 2.2.



Rys. 2.2. Model quasi-ścinania materiału w rozdrabniaczu wielotarczowym, d<sub>1</sub>, d<sub>2</sub>, d<sub>3</sub>-średnice otworów, h<sub>1</sub>, h<sub>2</sub>, h<sub>3</sub> - grubości tarcz, s<sub>1</sub> - wymiar szczeliny międzytarczowej, F - siła wymuszająca,  $\omega_1$ ,  $\omega_2$ ,  $\omega_3$  - prędkości kątowe tarcz

Badania dotąd prowadzone dotyczyły: wpływu konstrukcji rozdrabniacza wielotarczowego na jakość produktów, właściwości wsadu, wydajność rozdrabniania; relacji pomiędzy właściwościami materiału a energią rozdrabniania [80–84].

Relacje energetyczne rozdrabniania wielotarczowego opisywał wielokrotnie w pracach J. Flizikowski [59,73,85,86]. Jego rozważania skupiają się na innowacyjnym modelowaniu energetyczno-środowiskowych relacji procesu rozdrabniania, inteligentnym rozwoju konstrukcji wielotarczowych zespołów rozdrabniających z wykorzystaniem zaawansowanych technik komputerowych w procesie projektowania tarcz i samoregulacji procesu rozdrabniania [1,87–90].

Zależności przepływu masy i kąta usypu wsadu na wydajność rozdrabniania w młynie pięciotarczowym poruszał w swoich pracach [91,92] A. Tomporowski oraz M. Opielak [91,93]. Zajmowali się oni także zagadnieniami nierównomierności rozdrabniania [92,94,95]. W tabeli 2.1 zestawiono przykładowe badania dotyczące procesu rozdrabniania wielotarczowego prowadzone w okresie ostatnich 25 lat.

Lp.	Prowadzone badania	Ref.
1	Wyznaczenie zależności i wpływów cech konstrukcyjnych rozdrabniacza i cech fizyko-mechanicznych wsadu na parametry rozdrabniania tj. energochłonność i jakość	[96]
2	Badanie nierównomierności działania rozdrabniaczy wielotarczowych	[94,95]
3	Badanie efektywności procesu rozdrabniania w naddźwiękowym rozdrabniaczu tarczowym	[97]
4	Badanie wpływu rozmiaru szczeliny międzytarczowej na jakość produktu rozdrabniania, energochłonność, wydajność	[77]
5	Analiza strat energii w postaci ciepła podczas rozdrabniania i możliwości jego odzysku	[98]
6	Analiza dynamiczna sił działających na materiał rozdrabniany i tarczę roboczą	[81]
7	Badanie wpływu parametrów procesu rozdrabniania na właściwości fizyczne i mikrostrukturę produktu	[99]

Tabela 2.1. Wybrane badania prowadzone nad procesem wielotarczowego rozdrabniania w okresie ostatnich 25 lat

Na parametry procesu rozdrabniania wielotarczowego i rozdrabniania w ogóle ma wpływ wiele zmiennych czynników, poczynając od właściwości materiału, na parametrach roboczych zespołu rozdrabniającego kończąc (Rys. 2.3) [100–103]. Znajomość zmiennych oddziałujących na proces rozdrabniania jest ważna z punktu widzenia optymalnego projektowania procesu [45]. Czynniki te można sklasyfikować jako: materiałowe, procesowe i środowiskowe.



Rys. 2.3. Czynniki mające wpływ na proces wielotarczowego rozdrabniania. Opracowanie własne na podstawie [100]

Do właściwości materiałów rozdrabnianych (biomasy) mających największy wpływ na przebieg procesu wielotarczowego rozdrabniania zalicza się podatność na rozdrabnianie (siłę jaką należy użyć do zniszczenia struktury postaciowej materiału), wilgotność, postać geometryczną materiału (jego kształt przed i po rozdrobnieniu), gęstość materiału, a także gęstość nasypową [25,45,104,105]. Parametry te wpływają na uzyskiwany efekt rozdrabniania (stopień rozdrobnienia, podatność na aglomerację, powierzchnię właściwą) i w efekcie na klasyfikację produktu rozdrabniania do dalszego energetycznego przetwórstwa [106,107]. Możliwości przewidywania i modelowania zachowania biomasy w trakcie rozdrabniania ułatwiają dobór odpowiedniego sposobu rozdrabniania i konstrukcji rozdrabniającej do rodzaju materiału. Pozwala to na uzyskiwanie rozdrobnionej biomasy o jak najwyższej jakości i właściwościach wymaganych w dalszych energetycznych procesach przetwórczych np. spalaniu, a także obniżyć straty materiału wsadowego i koszty procesowe [45].

Na podstawie badań na rozdrabniaczu pięciotarczowym w pracy [73] 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 go komory rozdrabniania,
- liczba tarcz stałych i obrotowych,
- geometria tarcz i otworów w tarczach,

- kolejność ustawienia tarcz o różnej geometrii,
- wielkość szczeliny międzytarczowej.

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.

# 2.2.2. Charakterystyki ruchowe i energetyczne wielotarczowego rozdrabniania

Poznanie relacji ruchu tarcz i przepływu masy jest podstawowym, koniecznym elementem do zrozumienia istoty procesu wielotarczowego rozdrabniania i zachodzących w nim zjawisk, ponieważ mają one znaczący wpływ na wydajność i efektywność rozdrabniania.

Na rysunku 2.4 przedstawiono schemat przepływu wsadu przez tarczowy, wielootworowy zespół rozdrabniający. Materiał wsadowy ulega ścinaniu w momencie przechodzenia przez otwory w tarczach. Aby ścinanie mogło zachodzić, musi zostać spełniony warunek:

$$\omega_{n-1} \neq \omega_n \neq \omega_{n+1} \tag{2.17}$$

gdzie:  $\omega_n$  – prędkość kątowa na *n*-tej tarczy,  $\omega_{n-1}$  – prędkość kątowa tarczy poprzedzającej *n*-tą tarczę,  $\omega_{n+1}$  prędkość kątowa tarczy następującej po *n*-tej tarczy.



Rys. 2.4. Schemat przepływu masy w rozdrabniaczu wielotarczowym z oznaczeniem efektywnych pól (powierzchni) rozdrabniania. Opracowanie własne na podstawie [85]

Cały przekrój otworów nie zostaje wykorzystany, co ma związek z zadanymi różnymi prędkościami na tarczach. Tylko pewna część powierzchni otworu jest efektywnie wykorzystywana. Dla par otworów w sąsiednich tarczach wyznaczono relację [73]:

$$k_{(i+1)/i,j} = \frac{F_{i+1}}{F_c}$$
(2.18)

 $k_{(i+1)/i,j}$  – wskaźnik powierzchni efektywnej przejścia materiału pomiędzy parami otworów sąsiadujących tarcz,

 $F_{i+1}$  – powierzchnia całkowita otworu następującego w zespole tarcz rozdrabniających, m<sup>2</sup>,

 $F_i$  – powierzchnia całkowita otworu poprzedzającego w zespole tarcz rozdrabniających, m<sup>2</sup>.

Łączna powierzchnia dla współpracujących otworów tarcz sąsiadujących może być wyznaczona z zależności [73]:

$$k_{n(i+1)k(i,j)} = \frac{\sum F_{n(i+1)}}{F_{k(i)}}$$
(2.19)

 $K_{n(i+1)k(i,j)}$  – wskaźnik powierzchni przejścia materiału dla łącznej powierzchni otworów sąsiadujących tarcz,

 $\Sigma F_{n(i+1)}$  – łączna powierzchnia całkowita otworów w kolejnej tarczy roboczej, m<sup>2</sup>,  $F_{ki}$  – łączna powierzchnia całkowita otworów w poprzedzającej tarczy roboczej, m<sup>2</sup>.

Odpowiednia klasyfikacja charakterystyk ruchowych i energetycznych rozdrabniania ułatwia rozpoznanie niedoskonałości istniejących rozdrabniaczy i poszukiwanie nowych lepszych rozwiązań. Charakterystyki ruchowe dotyczą przede wszystkim właściwości rozdrabniacza związanych z ruchem tarcz i układów napędowych (Tabela 2.2) [59,73]. Ich znajomość umożliwia określenie sprawności i strat energetycznych w układzie napędowym.

W trakcie pracy rozdrabniacza zjawiskiem charakterystycznym, jednak niekorzystnym, jest okresowe występowanie biegu jałowego podczas dozowania wsadu. Materiał sypki pokonując kolejne odcinki drogi w przestrzeni roboczej rozdrabniacza rozkłada się nierównomiernie pomiędzy współpracującymi tarczami tworząc miejsca akumulacji wsadu i jego braku. W miejscach nagromadzenia wsadu pomiędzy krawędziami tnącymi tarcz powstają duże opory tarcia, co w konsekwencji wywołuje zwiększony pobór mocy [94,95,108].

Zależności energetyczne, przepływy energii i jej straty czy rozproszenie stanowią swego rodzaju miarę skuteczności działania rozdrabniacza. Im wyższe straty energetyczne tym układ rozdrabniający ocenia się jako mniej efektywny, użytecznie "gorszy".

Tabela 2.2. Charakterystyki ruchowe rozdrabniaczy wielotarczowych. Opracowanie własne na podstawie [59,95]

Cecha	Model matematyczny	
Opór rozdrabniania	$P_{R} = k_{j} \cdot v_{R} + \sigma_{\max} \cdot F_{R} + \varepsilon \cdot F_{R} \cdot v_{R}^{2}$ $P_{R} - \text{opór rozdrabniania,}$ $kj - \text{współczynnik korekcyjny oporów dla biegu jałowego,}$ $v_{R} - \text{prędkość rozdrabniania,}$ $\sigma_{\max} - \text{naprężenia maksymalne w punkcie działania krawę}$ na materiał wsadowy, $F_{R} - \text{powierzchnia przekroju materiału rozdrabnianego,}$ $\varepsilon - \text{współczynnik proporcjonalności,}$ $F_{R}' - \text{pole powierzchni materiału rozdrabnianego dla o wtórnych po zasadniczym rozdrabnianiu,}$	(2.20) dzi tnących ddziaływań
Prędkość kątowa na wejściu przekładni	$\omega_{we} = \frac{\Delta \alpha}{\Delta t}$ $\omega_{we} - \text{prędkość kątowa na wejściu przekładni,}$ $\Delta \alpha - kąt kreślony przez promień wodzący,$ $\Delta t - czas trwania ruchu.$	(2.21)
Prędkość kątowa na wyjściu przekładni	$\omega_{wy} = \omega \cdot i_c$ $\omega_{wy} - \text{prędkość kątowa na wyjściu przekładni,}$ $i_c - \text{przełożenie przekładni,}$	(2.22)
Moment obrotowy silnika	$M_s = F \cdot r$ $M_s$ – moment obrotowy silnika, F – działająca siła, r – promień działania siły,	(2.23)
Moment obrotowy przekazywany na wał roboczy rozdrabniacza	$M_r = \frac{P_s}{2\pi n}$ $M_r - \text{moment obrotowy na wale roboczym,}$ $P_s - \text{moc silnika,}$ $n - \text{predkość obrotowa wału rozdrabniacza.}$	(2.24)
Moc na rozdrabnianie	$P_r = M_r \cdot \omega_{wy}$ $P_r - \text{moc użyteczna na rozdrabnianie,}$	(2.25)
Moc na wejściu przekładni	$P_s = M_r \cdot \omega_{we}$	(2.26)
Sprawność układu napędowego	$\eta_o = \eta_s \cdot \eta_p \cdot \eta_R$ $\eta_o - \text{sprawność napędu rozdrabniacza,}$ $\eta_s - \text{sprawność silnika,}$ $\eta_p - \text{sprawność przekładni,}$ $\eta_R - \text{względna sprawność procesu rozdrabniania,}$	(2.27)
Nierównomierność dynamiczna	$\omega_{sr}(t) = \lim_{T \to \infty} \frac{1}{T} \int_0^T \omega(t) dt$ $\omega_{sr} - \text{ średnia losowa nierównomierności dynamicznej,}$ T -  okres obserwacji,	(2.28)

Dla innowacyjnych rozwiązań charakterystyki energetyczne takie jak: zużycie energii, energochłonność stanowią wyznacznik zasadności ich wdrożenia w kontekście inteligentnego rozwoju [69,109]. W tabeli 2.3 przedstawiono najważniejsze charakterystyki energetyczne rozdrabniania w ujęciu maszynowym.

Tabela 2.3. Charakterystyki energetyczne rozdrabniaczy wielotarczowych. Opracowanie własne na podstawie [59,82]

Cecha	Model matematyczny
Energia quasi- ścinania	$E_{T\alpha} = E_I + E_{II} + E_{III} + E_{IV} $ (2.29) $E_{T\alpha} - \text{energia quasi-ścinania,}$ $E_I - \text{energia zużyta na zginanie cząstek materiału wsadowego,}$ $E_{II} - \text{energia zużyta podczas przemieszczania nasion pomiędzy tarczami,}$ $E_{IV} - \text{energia wzajemnych oddziaływań tarcz roboczych i materiału wsadowego,}$
Zużycie energii na rozdrobnienie danego strumienia masy	$E_{R\alpha} = \frac{N_R}{W_1} $ (2.30) $E_{r\alpha} - \text{zużycie energii potrzebne do rozdrobnienia strumienia masy,}$ $N_R - \text{moc pobierana przez rozdrabniacz,}$ $W_I - \text{wydajność,}$
Energochłonność rozdrabniania	$E_{R} = \frac{1}{m} \left[ \int_{0}^{\tau} N(\tau) d\tau - N_{j} \cdot \tau_{sr} \right] $ (2.31) $E_{R} - \text{energochlonność rozdrabniania,}$ m - masa materiału wsadowego, $N(\tau) - \text{zapotrzebowanie na moc w danej chwili t,}$ $N_{j} - \text{zapotrzebowanie na moc dla biegu jałowego,}$ $\tau_{sr} - \text{uśredniony czas,}$
Energia pobierana przez rozdrabniacz	$E_{M} = \frac{1}{\eta_{M}} \cdot K \cdot \sum_{i=1}^{n} E_{P_{i}} $ (2.32) $E_{M} - \text{energia sumaryczna pobrana przez maszynę rozdrabniającą,}$ $\eta_{M} - \text{mechaniczna sprawność maszyny rozdrabniającej,}$ $K - \text{współczynnik korekcji energii rozdrabniania, zależny od cech geometrycznych zespołu roboczego, cech fizyko-chemicznych materiału rozdrabnianego, cech dynamicznych procesu, E_{P_{i}} - \text{energia procesu rozdrabniania dla } i\text{-tej frakcji wymiarowej,}$
Energochłonność układu technicznego	$E_{R} = \frac{\left(k_{j}v_{R} + \sigma_{\max}F_{R} + \varepsilon F'_{R}v_{R}^{2}\right)v_{R}t}{\eta_{s} \cdot \eta_{p}} $ (2.33)

#### 2.2.3. Wskaźniki procesu rozdrabniania

obejmuja Wskaźniki procesu rozdrabniania wiele aspektów efektywnościowych, np. skuteczność, jakość produktu, jakość procesu, wydajność, energetyczną skuteczność, koszty itd. Podziału wskaźników dokonał m.in. M. Macko w pracy [110] klasyfikując je na technologiczne, techniczne i ekonomiczne. Nie wspomniano w nim o oddziaływaniach środowiskowych rozdrabniania. Te zaś zostały ujęte w podziale dokonanym przez J. Flizikowskiego [6,24], który wskaźniki procesu rozdrabniania sklasyfikował w trzech grupach: jakości, efektywności, nieszkodliwości, co znacznie poszerza zakres wskaźników istotnych dla rozdrabniania. Próbę analizy wskaźników stosowanych do oceny rozdrabniania podjęła również Autorka rozprawy w pracy [111]. 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.) (Tabela 2.4),

Wskaźnik	Model matematyczny		Ref.
Stopień jakości (rozkład granulometryczny)	$\begin{array}{l} (d_i <\!\!1  mm),  (1 \! < \! d_i <\!\!2  mm),  (2 \! < \! d_i <\!\!3  mm), \\ (3 \! < \! d_i <\!\!5  mm)  i  (5 \! < \! d_i <\!\!7  mm) \\ d_i - wymiar  cząstki,  mm, \end{array}$		[28]
Średnica średniowagowa	$MWD = \sum_{i=1}^{n} \phi_t d_t$ MWD - średnica średniowagowa, mm, $d_t - \text{wymiar cząstki przechodzącej przez otwór o wymiarze, mm,}$ $\phi_t - \text{ułamek masowy frakcji o danym wymiarze, kg·kg}$	(2.34) danym	[28]
Wskaźnik podatności na rozdrabnianie	$GAI = \frac{SEC \cdot \rho \cdot MWD}{6}$ GAI – wskaźnik podatności na rozdrabnianie, kJ·m <sup>-3</sup> , SEC – specyficzne zużycie energii, kJ·kg <sup>-1</sup> , $\rho$ – gęstość nasypowa materiału rozdrabnianego, kg·m	(2.35) - <sup>3</sup> ,	[28]
Powierzchnia właściwa	$S_{w} = \frac{6}{\rho} \cdot \sum_{i=1}^{n} k \cdot \frac{\gamma_{i}}{d_{i}}$ $\rho - \text{gęstość rozdrabnianego materiału,}$ $\gamma_{i} - \text{udział procentowy i-tej frakcji wymiarowej,}$ $k - \text{współczynnik korekcyjny kształtu ziarna,}$ $n - \text{ilość frakcji wymiarowych,}$ $d_{i} - \text{średni wymiar cząstki i-tej frakcji wymiarowej.}$	(2.36)	[112]
Gęstość nasypowa	$\rho = \frac{m}{V}$ $\rho - gęstość nasypowa materiału, kg·m-3,$ $m - masa rozdrobnionego materiału, kg,$ $V - objętość zajmowana przez materiał rozdrobniony n$	(2.37) m <sup>3</sup> ,	[113]

Tabela 2.4. Wskaźniki produktu rozdrabniania

- 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 (tabela 2.5).

Wskaźniki		Model matematyczny	Ref.
	Wskaźnik rozdrobnienia	$GI = \frac{SEC}{\frac{1}{\sqrt{MWD}} - \frac{1}{\sqrt{D}}}$ (2.38) $GI - \text{wskaźnik rozdrobnienia, kJ·mm^{0.5} \cdot kg^{-1},$ MWD - średnica średniowagowa, mm, D - średnia wielkość cząstki materiału przed rozdrobnieniem, mm, $SEC - \text{specyficzne zużycie energii, kJ·kg^{-1},}$	[28]
Energetyczne	Wskaźnik skuteczności energetycznej	$W_{j} = \frac{\Delta S \cdot m_{s}}{P_{sr} \cdot t} $ (2.39) $W_{j} - \text{wskaźnik skuteczności procesu rozdrabniania,}$ $m^{2} \cdot (W \cdot h)^{-1},$ $\Delta S - \text{przyrost powierzchni właściwej, m^{2} \cdot \text{kg}^{-1},$ $m_{s} - \text{masa rozdrabnianej uziarnionej biomasy, kg,}$ $P_{sr} - \text{średnia moc w procesie rozdrabniania nośnika energii,}$ $W,$ $t - \text{czas rozdrabniania masy } m_{s} \text{ podawanego wsadu, h.}$	[110, 111]
	Wskaźnik energochłonności celowej	$E_{Rq} = \frac{P_r}{W_{f_q}} $ (2.40) $P_r - \text{moc w procesie rozdrabniania nośnika energii, kW,}$ $W_{fq} - \text{wydajność rozdrabniania frakcji o zadanym wymiarze,}$ kg·h <sup>-1</sup> .	[110, 111]
logiczne	Skuteczność rozdrabniania	$S_{k} = \frac{A_{n}}{A_{p}}$ $S_{k} - \text{skuteczność rozdrabniania, -,}$ $A_{n} - \text{powierzchnia nadawy, mm}^{2},$ $A_{p} - \text{powierzchnia produktu, mm}^{2},$ (2.41)	[28]
Techno	Wydajność	$Q = \frac{M}{t}$ (2.42) Q – wydajność masowa, kg·s· <sup>1</sup> , M – masa rozdrabnianego ziarna, kg, t – czas rozdrabniania, s,	[82]

Tabela 2.5. Wskaźniki procesu rozdrabniania: energetyczne i technologiczne

cd. tabeli 2.5.

	$k = k_w \cdot k_n \cdot k_R \cdot k_E \tag{2.43}$	
Całkowity wskaźnik efektywności procesu rozdrabniania	$k_w = W_t$ – wydajność efektywna, $k_n = i$ – efektywny stopień rozdrobnienia, $k_R = \frac{1}{R_{\max} s_T}$ – obciążenia maksymalne rozdrabniania, $R_{\max} s_T$ – uśrednione siły maksymalne rozdrabniania, $k_E = \frac{1}{L_T}$ – energia na rozdrabnianie $L_T$ – praca użyteczna (energia) rozdrabniania.	[86, 111]

Wskaźniki energetyczne procesu rozdrabniania informują przede wszystkim o ilości energii potrzebnej do wytworzenia jednostki (objętościowej, masowej, powierzchniowej) produktu, np. jednostkowe zapotrzebowanie na energię, lub ile produktu można wytworzyć zużywając jednostkę energii. Wskaźniki technologiczne zaś dotyczą wydajności, skuteczności, sprawności procesu.

Wskaźniki środowiska obejmują zjawiska podczas rozdrabniania, które mają związek lub bezpośrednie następstwo w otoczeniu. Najczęściej to cechy mierzalne, łatwe do zidentyfikowania, towarzyszące wytwarzaniu produktu. Można do nich zaliczyć:

- poziom hałasu, dB,
- ilość emitowanych odpadów stałych, t,
- ilość emisji gazów (np. CO<sub>2</sub>, SO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub>, pyłów), t,
- poziom wibracji.

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

Wprowadzanie ocen w kategoriach energetycznych i prośrodowiskowych 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 [69,114].

W pracy [86] 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.

Ważnym elementem każdej oceny (efektywności, konstrukcyjnooptymalizacyjnej) jest zbudowanie adekwatnego modelu matematycznego i znalezienie zależności funkcyjnych między zmiennymi [115]. Pierwszym zaś krokiem winna być identyfikacja procesów i podprocesów ocenianych oraz ustalenie kryteriów [86]. Ze względu na charakter technologii, typu jednostki rozdrabniającej, celu rozdrabniania kryteria oceny różnią się. Przykładowe kryteria oceny funkcjonalnej rozdrabniania w postępowaniu konstrukcyjnooptymalizacyjnym przedstawiono na rysunku 2.5.

FUNKCJONAI	LNA OCENA PROCESU WIELOTARCZOWEGO ROZDRABNIANIA
Kryterium stanów, elementów i relacji struktury	Optymalnych obciążeń
	Optymalnej stateczności Optymalnych stosunków wielkości związanych
Kryterium sterowania efektywnością działania	Celowości Minimum energii Autoregulacji Zależności pięter i poziomów
Kryterium sterowania jakością produktu	Optymalnego wzorca Optymalnej zgodności z wzorcem Optymalnej jakości produktu Optymalnych związków jakości
Kryterium działania młyna w środowisku	Zachowania potencjału początkowego Minimalizacji potencjału użytkowego Minimalizacji potencjału nieużytecznego Maksymalizacji potencjału odzyskanego

Rys. 2.5. Kryteria funkcjonalne w ocenie wielotarczowego procesu rozdrabniania

Inny podział kryteriów zbliżony jest do klasyfikacji wskaźników procesu zaproponowanej przez J. Flizikowskiego w pracy [6,24]. I tak wyróżnia się kryteria oceny:

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

Wymienione grupy kryteriów zostaną szerzej omówione w dalszej części rozdziału.

Spełnienie wymagań, kryteriów oceny wymaga zaistnienia określonych, wcześniej ustalonych warunków technicznych [6]:

- metod, technik, idei, sposobów kruszenia, mielenia, cięcia, rozdrabniania,
- cech materiałowych, geometrycznych, wymiarowych, dynamicznych, kinematycznych konstrukcji rozdrabniającej,
- celowo sterowanych charakterystyk użytkowych (ruchowych, energetycznych itd.) rozdrabniania powiązanych we wzajemnych zależnościach.

#### 2.3.1. Kryteria oceny energetycznej

Kryteria oceny energetycznej wskazywane w literaturze (Tabela 2.6) dotyczą głównie maszynowego podejścia do procesu rozdrabniania. Można je zaliczyć do grupy kryteriów efektywnościowych (*efficiency*) zaproponowanych przez M. Bielskiego [116] obrazujących stosunek zysków do poniesionych nakładów [117]. Zależności (2.44)–(2.51) wskazują "produktywność" energetyczną procesu tzn. określają ilość energii potrzebną do rozdrobnienia jednostki (masowej, objętościowej) materiału rozdrabnianego. Proponowana przez J. Flizikowskiego [1] funkcja przystosowania (2.52) ujmuje wiele czynników rozdrabniania jako procesu maszynowego i była dedykowana do oceny globalnej procesu w aspekcie przetwórstwa biomasy na cele żywienia zwierząt. Łączy efekty rozdrabniania materiału – wzrost przyswajalności ziarna po rozdrobnieniu przez organizmy żywe, oraz energetyczne zapotrzebowanie procesu rozdrabniania związane z ruchem zespołu roboczego i sprawności przenoszenia napędu. Efektywność w rozumieniu sprawności (2.53) zamiany energii omówiono w pracy [22].

Kryterium	Model matematyczny	Ref.
Całkowita energia właściwa netto na rozdrabnianie jednostki suchej masy	$E_T = \frac{\int_0^T (P_T - \overline{P}_0) dt}{m_{DM}} = \frac{\int_0^T \Delta P_t dt}{m_{DM}} $ (2.44) $E_T - \text{Całkowita energia netto na rozdrabniania jednostki suchej masy, kJ kgDM-1,  P_T - \text{moc pobrana przez maszynę w czasie } t, W,  \overline{P}_0 - \text{średni pobór mocy biegu jałowego rozdrabniacza, W, }  \Delta P_T - \text{pobór mocy netto na rozdrabnianie biomasy w czasie } t, W,  m_{DM} - \text{masa rozdrabnianej suchej masy wsadu, kg, } $	[11]

Tabela 2.6. Kryteria oceny energetycznej procesu wielotarczowego rozdrabniania przedstawiane w literaturze

cd. tabeli 2.6.

	$E_{spec} = \frac{1}{m} \int_{t_0}^t (P_t - P_l) dt $ (2.45)	
Właściwa energia rozdrabniania	$E_{spec}$ – specyficzna energia rozdrabniania, J·kg <sup>-1</sup> , $P_T$ – całkowita moc pobrana podczas rozdrabniania, W, $P_l$ –pobór mocy przez rozdrabniacz bez obciążenia wsadem, W,	[23]
Właściwe zużycie	$SEC = \frac{E_{tot}}{Q} $ (2.46)	
energii,	SEC – specyficzne zużycie energii, kJ·kg <sup>-1</sup> , $E_{tot}$ – całkowite zużycie energii, kJ, Q – produktywność, kg,	[28]
	$Ed = SEC \cdot \rho \tag{2.47}$	
Gęstość energii	Ed – gęstość energii, kJ·m <sup>-3</sup> , $\rho$ – gęstość nasypowa materiału rozdrabnianego, kg·m <sup>-3</sup> , SEC – specyficzne zużycie energii, kJ·kg <sup>-1</sup> ,	[28]
	$E_r = \frac{E_c - E_s}{2} \tag{2.48}$	
Właściwa energia rozdrabniania,	m $E_r$ – specyficzna energia rozdrabniania, J·kg <sup>-1</sup> , m – masa rozdrobnionej próbki materiału, kg, $E_c$ – całkowite zużycie energii, J, $E_s$ – zużycie energii biegu jałowego, J,	[29]
Inducation	$E_j = \frac{P}{Q} \tag{2.49}$	
zapotrzebowanie na energię	$E_j$ – jednostkowe zapotrzebowanie energii, J, P – moc na wale rozdrabniacza, kW, Q – wydajność masowa, kg·h <sup>-1</sup> ,	[32, 95]
	$EE = \frac{E_m(SP)}{E_m(Mill)} \cdot 100 \tag{2.50}$	
Efektywność energetyczna	EE – efektywność energetyczna, $E_m(SP)$ – energia właściwa użyta do rozdrobnienia pojedynczej cząstki, $E_m(Mill)$ – energia właściwa netto zużyta do wytworzenia określonego produktu powierzchniowego,	[56]
	$EE = \frac{E_m(SP)}{E_m(Mill)X_{50}} \cdot 100 \tag{2.51}$	
Efektywność energetyczna celowa	EE – efektywność energetyczna, $E_m(SP)$ – energia właściwa użyta do wytworzenia produktu o danym średnim wymiarze X <sub>50</sub> , $E_m(Mill)X_{50}$ – energia właściwa netto zużyta do wytworzenia produktu o średnim wymiarze X <sub>50</sub> ,	[56]

cd. tabeli 2.6.

	$e_{RP} = \frac{\left(\eta_{q-s} - \eta_{o}\right) \cdot E_{brutto} \cdot \eta_{s} \cdot \eta_{p}}{\left(k_{j} \cdot v_{r} + \tau_{q-s} \cdot F_{q-s} + \varepsilon \cdot F_{R} \cdot v_{r}^{2}\right) \cdot M_{k} \cdot v_{r} \cdot t}  (2.52)$	
Funkcja przystosowania dla quasi-ścinania	$e_{RP}$ – funkcja przystosowania dla quasi-ścinania, $\eta_{q\cdot s}$ – sprawność spalania rozdrobnionych nośników energii, $\eta_o$ – sprawność spalania całych ziaren wybranych nośników energii, $E_{brutto}$ – energia przetwarzanych ziaren, kJ·kg <sup>-1</sup> , $\eta_s \cdot \eta_p$ – sprawność napędu rozdrabniacza, $\eta_s$ – sprawność silnika, $\eta_p$ – sprawność przekładni, $k_j$ – współczynnik oporów ruchu jałowego, kJ·s <sup>-1</sup> , $v_r$ – prędkość quasi-ścinania, m·s <sup>-1</sup> , $\tau_{q\cdot s}$ – naprężenia podczas quasi-ścinania, N·m <sup>-2</sup> , $F_{q\cdot s}$ – chwilowy przekrój quasi-ścinania, m², $F_R$ – przekrój wtórnych oddziaływań podczas quasi- ścinania, m², $\varepsilon$ – współczynnik proporcjonalności, N·s <sup>-2</sup> ·m <sup>-4</sup> , $M_k$ – wskaźnik krotności,	[1, 110]
Efektywność zamiany energii	$Ef_{ze} = 100 \cdot \frac{E_{roz}}{E_{w}} $ (2.53) $Ef_{ze} - \text{efektywność zamiany energii, \%,}$ $E_{roz} - \text{energia rozdrabniania, J,}$ $E_{w} - \text{energia wejściowa, J,}$	[22]

Często jako miarą energetyczną posługuje się kryterium jednostkowego zapotrzebowania na energię (zależność (2.49)). W zależności od właściwości materiału i docelowego wymiaru ziaren produktu zapotrzebowanie na energię może wynosić: od 20 kWh·Mg<sup>-1</sup> do 130 kWh·Mg<sup>-1</sup> dla rozdrabniania zgrubnego i średniego oraz do 800 kWh·Mg<sup>-1</sup> dla mikro- i nanorozdrabniania. Na rysunku 2.6 przedstawiono przedziały zmienności zapotrzebowania na energię podczas rozdrabniania dla wybranych materiałów [118].

Z analizy wykresu przedstawionego na rysunku 2.6 wynika, że dla materiałów kruchych typu szkło, cement, klinkier energia potrzebna do bardzo drobnego rozdrabniania jest dużo niższa aniżeli dla materiałów polimerowych i biologicznych materiałów włóknistych. Dla tych zapotrzebowanie energetyczne do rozdrobnienia jest ok. 2 razy wyższe, a uzyskiwane cząstki od 10 do 100 razy większe. Efektywność rozdrabniania dla materiałów włóknistych jest zatem niższa niż dla materiałów kruchych.



Rys. 2.6. Przedziały zmienności zapotrzebowania na energię podczas rozdrabniania wybranych materiałów [118]

#### 2.3.2. Kryteria oceny środowiskowej

Konieczność prowadzenia ocen wpływów środowiskowych działania maszyn i urządzeń wynika bezpośrednio z przedstawianych przez Komisję Europejską idei zrównoważonego i inteligentnego rozwoju. Dlatego oceny te nie powinny być pomijane przez inżynierów mechaników podczas projektowania elementów maszyn a także przez technologów projektujących procesy technologiczne, procesy produkcyjne [68,119,120].

Kryteria oceny środowiskowej odnoszą się zasadniczo do pojęcia efektywności ekologicznej, w dwojakiej interpretacji: efektywności podejmowanych działań proinnowacyjnych, prośrodowiskowych oraz efektywności odnoszącej się do oddziaływań środowiskowych maszyn, urządzeń, technologii [119].

Coraz bardziej popularną staje się koncepcja oceny produktów i technologii na podstawie tzw. ekoefektywności i wskaźników z nią związanych (Tabela 2.7, zależności (2.54) - (2.57)).

Przedstawione wskaźniki, kryteria z powodzeniem mogą zostać zaadaptowane do oceny procesów i konstrukcji rozdrabniania poprzez odpowiednie modelowe rozwinięcia. Podstawowym założeniem ekoefektywności jest znalezienie rozwiązań technologicznych (produktowych) o najlepszej relacji uzyskiwanych korzyści do ponoszonych nakładów przy równoczesnym ograniczaniu środowiskowych oddziaływań. Opracowane dla technologii modele oceny ekoefektywności umożliwiają porównanie rozpatrywanych technologii (produktów) w postaci skalarnej oraz wybór technologii najlepszej pod względem produktywności, ekonomii i środowiska [121].

Tabela 2.7. Kryteria oceny środowiskowej procesu wielotarczowego rozdrabniania przedstawiane w literaturze

Kryterium	Model matematyczny	Ref.
Wydajność środowiskowa	$EE_{EP} = \frac{\text{wartość produkcji}}{\text{Wskaźnik środowiskowy}}$ (2.54)	[122]
Środowiskowa intensywność produkcji	$EE_{EIP} = \frac{Wskaźnik środowiskowy}{Wartość produkcji}$ (2.55)	[122]
Kosztypoprawy środowiska	$EE_{EIC} = \frac{\text{Koszt poprawy}}{\text{Poprawa wskaźnika środowiskowego}} (2.56)$	[122]
Efektywność kosztów środowiskowych	$EE_{ECE} = \frac{\text{Poprawa wskaźnika środowiskowego}}{\text{Koszt poprawy}}$ (2.57)	[122]
Efektywność ekologiczna	$e_{EKO} = \frac{\Delta E_{EKO}}{K_{EKO}} = \frac{E_{ur}}{m_{CO_2}}$ (2.58) $e_{EKO} - \text{wskaźnik efektywności ekologicznej,}$ $K_{EKO} - \text{wykorzystanie naturalnych źródeł,}$ $\Delta E_{EKO} - \text{przyrost korzyści ekologicznych,}$ $E_{ur} - \text{średnia roczna korzyść ekologiczna (eliminacja emisji), g_{ekw}CO_2 \cdot kg^{-1} mielonego produktu,}$ $m_{CO2} - \text{średnie roczne nakłady emisji, g_{ekw}CO_2 \cdot kg^{-1}}$ mielonego produktu,	[66]
Nieszkodliwość	$D = \frac{f\left(\text{stan konw. ekw}_{\text{CO}_2} - \text{stan alter.ekw}_{\text{CO}_2}\right)}{\text{Energia Elektr. Ekw}_{\text{CO}_2}} \Longrightarrow \min(2.59)$	[31]

#### 2.3.3. Kryteria jakości

Termin "jakość", określony przez Platona jako pewien stopień doskonałości, stosowany jest najczęściej w odniesieniu do produktów i usług w rozumieniu ich stopnia spełniania potrzeb klientów i konsumentów. Kryteria jakości, pozwalające na porównanie i ocenę procesów i produktów są pewnymi określonymi cechami lub zespołami cech o charakterze mierzalnym, porównywalnym lub ocenialnym [123]. W przypadku procesu rozdrabniania mierzalne kryteria jakości zestawiono w tabeli 2.8, a kryteria porównywalne w tabeli 2.9.

Dla procesu rozdrabniania zasadniczym kryterium jakości procesu z uwagi na jego cel jest stopień rozdrobnienia (Tabela 2.8). Mniej istotne z punktu widzenia celu rozdrabniania są kryteria porównywalne jakości, trudne do opisu za pomocą modeli matematycznych, umożliwiające ocenę na podstawie wzorców. Obejmują one m.in. funkcjonalność, niezawodność, ergonomiczność, ekologiczność, estetyczność, technologiczność, zgodność z normami, pracochłonność, materiałochłonność [124–126].

Kryterium	Model matematyczny	Uwarunkowania/ niedoskonałości
Ogólny stopień rozdrobnienia	$S_r = \frac{D}{d}$ (2.60) $S_r - \text{ogólny stopień rozdrobnienia,}$ D - średnica zastępcza ziarna nadawy, mm, mm, d - średnica zastępcza ziarna produktu, mm.	Najlepszy do określania stopnia rozdrobnienia pojedynczego ziarna, w przypadku ziaren o dużej różnorodności wymiarowej wynik stopnia redukcji wymiaru nieoddający rzeczywistości
Graniczny stopień rozdrobnienia	$i_{g} = \frac{D_{\text{max}}}{d_{\text{max}}} $ (2.61) $D_{max} - \text{uśredniona wartość wymiaru}$ średnic największych cząstek wsadu rozdrabniacza, mm, $d_{max} - \text{uśredniona wartość wymiaru}$ średnic największych cząstek produktu rozdrabniania, mm.	Konieczna znajomość wymiaru największych cząstek w nadawie i produkcie rozdrabniania wyznaczany np. metodą fotogrametryczną lub podczas analizy sitowej.
Pozorny stopień rozdrobnienia	$S_{p} = \frac{0.85 \cdot a}{e_{2}}$ (2.62) $S_{p} - \text{pozorny stopień rozdrobnienia,}$ a - maksymalna szerokość rozwarcia paszczy kruszarki, mm, $e_{2} - \text{szerokość szczeliny dla wyjścia}$ produktu kruszenia w momencie rozwarcia szczęk kruszarki, mm.	Znajduje zastosowanie podczas rozdrabniania kruszarkami szczękowymi do porównania z danymi katalogowymi. Najmniej dokładny spośród wymienionych stopni rozdrobnienia.
Średni stopień rozdrobnienia	$S_{sr} = \frac{D_{sr}}{d_{sr}}$ (2.63) $S_{sr} - \text{średni stopień rozdrobnienia,}$ $D_{sr} - \text{wymiar średni wyznaczany na}$ podstawie średniej ważonej dla średnich ziaren nadawy, mm, $d_{sr} - \text{wymiar średni wyznaczany na}$ podstawie średniej ważonej dla średnich ziaren produktu, mm.	Charakteryzuje się dużą dokładnością. Wykorzystywany do określania zdolności produkcyjnej młynów.
80% stopień rozdrobnienia	$i_{80} = \frac{D_{80}}{d_{80}}$ (2.64) $D_{80}$ - wymiar otworu sita, przez które przechodzi 80% ziaren nadawy, mm, $d_{80}$ - wymiar otworu sita, przez które przechodzi 80% ziaren produktu rozdrabniania, mm.	Konieczne wykonanie analizy sitowej. Odrzuca się największe ziarna, których długość jest znacznie większa od pozostałych wymiarów.

Tabela 2.8. Mierzalne kryteria jakości procesu rozdrabniania. Opracowanie własne na podstawie [28,127,128]

cd. tabeli 2.8

Równomierność rozdrabniania	$\delta_{d} = \frac{A(\Delta I_{\max} - \Delta I_{\min})}{(M_{c})_{sr}}  (2.65)$ $A - \text{współczynnik jednostkowych}$ oporów rozdrabniania i tarcia, $\Delta I_{\max, (\min)} - \text{chwilowa maksymalna}$ (minimalna) długość cięcia, mm, $(M_{c})_{sr} - \text{średnia wartość momentu}$ obrotowego, Nm.	Wyznaczenie tego parametru jest możliwe, gdy monitorowane i archiwizowane są w trybie ciągłym wielkości takie jak: moc, wydajność.
--------------------------------	--	--

Tabela 2.9. Porównywalne kryteria jakości procesu rozdrabniania. Opracowanie własne na podstawie [125]

Kryterium	Opis/interpretacja		
Funkcjonalność	Stopień przystosowania do realizacji określonego celu;		
Niezawodność	Zdolność do realizacji celu w określonych warunkach i określonym czasie;		
Ergonomiczność	Stopień adaptacji do kooperacji z człowiekiem (operatorem);		
Ekologiczność	Stopień adaptacji do ograniczania wprowadzanych obciążań środowiskowych;		
Estetyczność	Stopień adaptacji do obowiązujących norm i potrzeb estetycznych;		
Technologiczność	Stopień adaptacji do możliwości i warunków produkcyjnych i technologicznych;		
Zgodność z normami	Stopień przystosowania do obowiązujących aktów prawnych, przepisów i norm;		
Pracochłonność	Ilość nakładów pracy poniesiona na produkcję jednostki produktu;		
Materiałochłonność	Ilość materiałów potrzebnych do wytworzenia produktu;		

#### 2.3.4. Kryteria oceny technologicznej

Kryteria oceny technologicznej związane są głównie z technologią procesu. Przykładowe kryteria oceny technologicznej procesu wielotarczowego rozdrabniania przedstawiono w tabeli 2.10. Szczegółowe opisanie kryteriów technologiczno-procesowych układów roboczych prowadzi do powstawania innowacji technologiczno-konstrukcyjnych [129].

W przypadku procesu wielotarczowego rozdrabniania jako kryteria technologiczne można wskazać m.in. zużycie elementów konstrukcyjnych, łatwość wymiany elementów, krotność rozdrabniania, czas przemiału będący wypadkową prędkości kątowych oraz cech konstrukcyjnych tarcz, wydajność.
Tabela 2.10. Kryteria oceny technologicznej procesu wielotarczowego rozdrabniania przedstawiane w literaturze

Kryterium	Model matematyczny	
Zużycie elementów konstrukcyjnych	$Z = f(c_e, c_k, c_t, t)$ Z – zużycie elementu konstrukcyjnego, $c_e$ – czynniki eksploatacyjne, $c_k$ – czynniki konstrukcyjne, $c_t$ – czynniki technologiczne, t – czas życia,	(2.66)
Łatwość wymiany elementów	$WE = f(C_k, n_m, n_d, c_z, t)$ WE - łatwość wymiany elementów, $C_k - \text{cechy konstrukcyjne,}$ $n_m - \text{ilość operacji podczas montażu,}$ $n_d - \text{ilość operacji podczas demontażu,}$ $c_z - \text{czynniki zewnętrzne,}$ t - czas wymiany,	(2.67)
Krotność rozdrabniania		
Czas przemiału	$t_p = f(n, \omega_n, c_{kt})$ <i>n</i> – liczba tarcz, $\omega_n$ – prędkość kątowa tarcz, rad·s <sup>-1</sup> , $c_{kt}$ – cechy konstrukcyjne tarcz,	(2.68)
Wydajność	$Q_r = f\left(n, \omega_n, D_n, l_n, d_n, V_p, M_p, t_p\right)$ $D_n - \text{średnica tarczy, mm,}$ $l_n - \text{liczba otworów w n-tej tarczy, -,}$ $d_n - \text{średnica otworów w n-tej tarczy, mm,}$ $V_n - \text{prędkość dozowania wsadu, g \cdot s^{-1},}$ $M_p - \text{właściwości materiału rozdrabnianego,}$	(2.69)

#### 2.3.5. Podsumowanie i 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 ekologicznośrodowiskowych systemów rozdrabniania dla spalania biomasy oraz adekwatny opis zależności zmiennych w procesie rozdrabniania.

## 3. CEL I PROBLEM BADAŃ

U podstaw rozprawy leżą aspekty budowy i eksploatacji rozdrabniaczy wielotarczowych w zakresie analizy parametrów procesu w kierunku obniżania energochłonności i emisji CO<sub>2</sub>. Poznawczy charakter skierowany jest na uzupełnienie i rozszerzenie znanych dotąd opisów efektywności energetycznej i ekologicznej technologicznego quasi-ścinania biomasy uziarnionej w rozdrabniaczach wielotarczowych, wielootworowych. Praktyczne znaczenie pracy polega na wspomaganiu kształtowania energochłonności i emisji procesu oraz wskazaniu kierunków rozwoju rozdrabniania wielotarczowego.

## **3.1. CELE PRACY**

Biorąc pod uwagę stwierdzenia ze stanu wiedzy i praktyki zagadnienia należy uznać, że istnieje pilna potrzeba wyjaśnienia istoty inżynierii systemu, konstrukcji i sterowania quasi-ścinaniem uziarnionej biomasy za pomocą wielootworowego zespołu rozdrabniającego z uwzględnieniem energochłonności i emisyjności procesu.

W świetle powyższych ustaleń za cele 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;
- 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.

## **3.2. SFORMUŁOWANIE PROBLEMU**

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

- 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 quasiścinania, 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 (innowacyjne) cechy i relacje ruchu elementów tego zespołu?

Jeżeli zostaną uzyskane odpowiedzi, rozwiązania sformułowanych problemów i zadań badawczych, będzie można uznać, że cele pracy doktorskiej na temat: Analiza procesu wielotarczowego rozdrabniania biomasy w ujęciu energochłonności i emisji CO<sub>2</sub>, zostały osiągnięte.

## 4. METODYKA BADAŃ

## 4.1. MODEL OBIEKTU BADAŃ

W systemie budowy i eksploatacji maszyn przetwórczych, na parametry procesu wielotarczowego rozdrabniania wpływ wywierają czynniki zmienne: właściwości materiału, cechy konstrukcyjne rozdrabniacza czy parametry robocze, procesowe. Poprzez rozpoznanie stałych i zmiennych w procesie rozdrabniania, możliwe jest wyznaczenie modeli, zależności matematycznych opisujących zmienne zależne, stanowiących swego rodzaju wskaźniki, kryteria, funkcje celu dla regulacji i sterowania systemem rozdrabniania uziarnionej biomasy. Schemat wzajemnych relacji zmiennych zależnych i niezależnych w procesie rozdrabniania przedstawia rysunek 4.1.



Rys. 4.1 Zmienne zależne i niezależne i ich wzajemne relacje w procesie wielotarczowego, wielokrawędziowego rozdrabniania

W postaci ogólnej, model matematyczny procesu wielotarczowego, wielootworowego rozdrabniania bio-materiałów uziarnionych  $F_z$  obejmuje czynniki i zmienne zależne, stałe i niezależne oraz ich relacje, zgodnie z równaniem:

$$F_{z} = f\left(n_{1}, n_{2}, \dots, n_{i}, z_{1}, z_{2}, \dots, z_{i}, c_{s1}, c_{s2}, \dots, c_{si}, c_{z1}, c_{z2}, \dots, c_{zi}\right)$$
(4.1)

gdzie:

 $n_1, n_2, ..., n_i$  – sterujące zmienne niezależne, dobierane w celu realizacji badań własnych,

 $z_1, z_2, ..., z_i$  – zmienne zależne (wyjścia procesu rozdrabniania), będące wynikowymi wielkościami mierzonymi, zależnymi od sterujących zmiennych niezależnych,

 $c_{s1}, c_{s2}, ..., c_{si}$  – stałe, wielkości niezmieniane celowo lub bez możliwości zmiany,  $c_{z1}, c_{z2}, ..., c_{zi}$  – czynniki zakłócające, do których zalicza się wielkości znane i nieznane oraz o pomijalnym wpływie na przebieg procesu.

W procesie rozdrabniania z monitorowaniem stanów i przemian procesu wraz z adaptacyjnym systemem sterowania, tworzenie modeli, kryteriów energetyczno-środowiskowych i efektywnościowych ma sens jedynie wówczas, jeżeli możliwa jest identyfikacja procesów i zmiennych składowych. Umożliwia to optymalizację procesu i otoczenia w sposób niezależny. W analizowanym przypadku młyna pięciotarczowego, otworowego modele energetycznośrodowiskowe w ogólności można przedstawić jako zbiór charakterystyk wzajemnie powiązanych:

 $M_{E-S} = f(\omega_1, ..., \omega_5, R_m, \Delta\omega, W_w, D_{80}, P_r, Q_r, i_{sr}, E_j, E_{zint}, e_{zrow}, V_{pi}, J_{KCO_2}, J_{ACO_2}, W_m, s_p)$ (4.2)

gdzie:

• sterujące zmienne niezależne:

 $\omega_1, \ldots, \omega_5$  – prędkości kątowe tarcz rozdrabniacza,

R<sub>m</sub>-właściwości wytrzymałościowe materiału wsadowego,

 $\Delta \omega$  – gradient prędkości kątowych rozdrabniacza,

 $W_w$  – wilgotność materiału wsadowego,

 $D_{80}$  – maksymalny wymiar ziaren materiału wsadowego stanowiącego 80% jego objętości,

• zmienne zależne:

Pr – pobór mocy na rozdrabnianie,

 $Q_r$  – wydajność rozdrabniania,

 $i_{\rm sr}$  – średni stopień rozdrobnienia,

 $E_j$  – jednostkowe zapotrzebowanie na energię,

 $E_{\text{zint}}$  – energochłonność zintegrowana,

ezrów – emisyjność zrównoważona,

• stałe:

 $v_{pi}$  – strumień masowy dozowania wsadu w przestrzeń roboczą rozdrabniacza,

 $C_k$  – cechy konstrukcyjne zespołu rozdrabniającego,

 $C_m$  – cechy materiałowe zespołu rozdrabniającego,

 $J_{KCO2}$  – jednostkowy wskaźnik emisji dwutlenku węgla w przypadku pozyskania energii z paliw kopalnych,

 $J_{ACO2}$  – jednostkowy wskaźnik emisji dwutlenku węgla w przypadku pozyskania energii z paliw alternatywnych, np. biomasy,

• czynniki zakłócające:

 $W_m$  – właściwości chemiczne materiału wsadowego,

 $s_p$  – straty przesyłu sygnałów.

Stany energetyczno-środowiskowe maszyny rozdrabniającej  $S_{E-S}$  w danej chwili czasu *t* można opisać ogólną zależnością:

$$S_{E-S} = f(t, \Omega, \delta K, \delta N, E_x, E_y, S, O)$$
(4.3)

gdzie:

t - czas,  $\Omega - czas$  trwania cyklu życia,

 $\delta K$  – korzyści,

 $\delta N$  – nakłady,  $E_x$  – energia na wejściu,  $E_y$  – energia na wyjściu, S – straty potencjału (energetycznego, materiałowego, ludzkiego, środowiskowego), O – nieużytki.

## 4.2. PRZYJĘTE KRYTERIA OCENY ROZDRABNIANIA

### 4.2.1. 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:

$$Q_r = f\left(V_{otwT1}, \omega_1, \delta, t\right) \tag{4.4}$$

gdzie:

 $V_{otwT1}$  – objętość masy ziaren wprowadzanej do otworu w tarczy pierwszej, m<sup>3</sup>,  $\omega_1$  – prędkość kątowa tarczy pierwszej, rad s<sup>-1</sup>

 $\delta-{\rm współczynnik}$ wypełnienia otworów, –,

t - czas, s.

Na potrzeby prowadzonej analizy założono, że otwory quasi-ścinające wypełniane wsadem mają geometryczną postać walców o promieniach podstawy r i wysokości równej grubości tarcz  $h_0$ . Zgodnie z przyjętym schematem (Rys. 4.2) ich środki są rozmieszczone w równych odstępach na okręgu i promieniu R, gdzie R > r, którego środek znajduje się w początku układu współrzędnych. Przyjęto również, że powierzchniową strefą dozowania masy ziaren jest kwadrat o bokach 2r, którego przekątne przecinają się w punkcie (0,R).

Proces dozowania, podawania ziaren do każdego otworu przebiega w ten sam sposób, przy czym procesy te są niezależne. W takim przypadku maksymalna całkowita objętość dozowanej masy ziaren dla jednego pełnego obrotu tarczy jest *n* razy większa od objętości masy ziaren dozowanej do jednego otworu, gdzie *n* to liczba wszystkich otworów roboczych.

Jeżeli tarcza porusza się ruchem obrotowym z częstotliwością f, to położenie osi symetrii otworu na ziarno w płaszczyźnie xOy opisywane jest przez układ równań:

$$\begin{cases} x_0(t) = R\cos(2\pi ft + \varphi_0) \\ y_0(t) = R\sin(2\pi ft + \varphi_0) \end{cases}$$

$$(4.5)$$

gdzie:

 $\varphi_0$  – kąt jaki tworzy wektor ( $x_0(0)$ ,  $y_0(0)$ ) z osią Ox.



Rys. 4.2. Schemat ideowy rozmieszczenia otworów roboczych i strefy zasilania pierwszej tarczy

Zgodnie z przyjętymi założeniami dla każdego t zachodzi relacja:

$$x_0^2(t) + y_0^2(t) = R^2$$
(4.6)

Z punktu widzenia wydajności procesu rozdrabniania, w szczególe zaś objętości masy wsadu dozowanego do otworu istotną jest zależność pola przekroju obszaru dozowania i otworu roboczego (podstawy walca) od czasu. Koniecznym zatem jest wyznaczenie relacji dla jakich wartości  $x_0$  i  $y_0$  przekrój otworu i strefy dozowania posiadają części wspólne. Można tego dokonać sprawdzając dla jakich wartości  $x_0$  i  $y_0$  krawędź otworu na ziarno przecina się z charakterystycznymi dla przyjętego schematu prostymi y = -2r i y = 2r(Rys. 4.2). Dla ustalonych  $x_0$  i  $y_0$  krawędź otworu jest dana równaniem okręgu:

$$(x - x_0)^2 + (y + y_0)^2 = r^2.$$
(4.7)

W postępowaniu rozpatrzono tylko te punkty dla których  $x_0 > 0$ . Po rozpisaniu zależności (4.7) otrzymano:

$$x^{2} - 2x_{0}x + x_{0}^{2} + y^{2} - 2y_{0}y + y_{0}^{2} = r^{2}.$$
 (4.8)

Po uwzględnieniu zależności (4.6) równanie (4.8) przyjmuje postać:

$$x^{2} - 2x_{0}x + y^{2} - 2y_{0}y + (R^{2} - r^{2}) = 0.$$
(4.9)

#### Przypadek I – otwór wchodzi w strefę dozowania

Podstawiając y = -2r do równania (4.9), otrzymuje się równanie kwadratowe postaci:

$$x^{2} - 2x_{0}x + (4ry_{0} + R^{2} + 3r^{2}) = 0, \qquad (4.10)$$

które posiada rozwiązania, gdy jego wyróżnik  $\Delta_x$  jest nieujemny ( $\Delta_x = 0$  jedno rozwiązanie,  $\Delta_x > 0$  dwa rozwiązania):

$$\Delta_x = 4x^2 - 4(4ry_0 + R^2 + 3r^2) \ge 0.$$
(4.11)

Dzieląc stronami przez 4 i podstawiając  $x_0^2 = R^2 - y_0^2$  do zależności (4.11), otrzymuje się nierówność kwadratową zmiennej  $y_0$ :

$$-y_0^2 - 4ry_0 - 3r^2 \ge 0.$$
 (4.12)

Wyróżnik dla trójmianu kwadratowego z zależności (4.12) wynosi:

$$\Delta_{x0} = 16r^2 - 4 \cdot (-1) \cdot (3r)^2 = 4r^2$$
(4.13)

stąd:

$$y_{0,1} = \frac{4r - 2r}{-2} = -r, \quad y_{0,2} = \frac{4r + 2r}{-2} = -3r.$$
 (4.14)

Ostatecznie:

$$\Delta_x = -(y_0 + r)(y_0 + 3r).$$
(4.15)

Rozwiązaniem są następujące wartości:

$$\begin{cases} \Delta_x > 0, \text{ gdy } y_0 \in (-3r, -r) \\ \Delta_x = 0, \text{ gdy } y_0 = -3r \text{ lub } y_0 = -r \end{cases}$$
(4.16)

W praktyce oznacza to, że dla  $y_0 < -3r$  przekrój otworu i strefa dozowania nie będą miały punktów wspólnych (otwór znajduje się, poza strefą dozowania), gdy  $-3r < y_0 < -r$  pole powierzchni wspólnej przekroju otworu i strefy dozowania będzie niepełnym kołem i będzie rosło w wyniku ruchu obrotowego tarczy, natomiast dla  $y_0 = -r$  cały otwór znajdzie się w strefie dozowania.

Pole powierzchni wspólnej przekroju otworu i strefy dozowania dla  $y_0 \in (-3r, -2r]$  można wyznaczyć odejmując od pola wycinka o kącie  $\alpha$  (cały zakreskowany obszar (Rys. 4.3)) pole trójkąta równoramiennego o bokach r, wysokości h i podstawie a (pole zakreskowane krzyżowo (Rys. 4.3)). Ponieważ

$$\cos\!\left(\frac{\alpha}{2}\right) = \frac{h}{r},\tag{4.17}$$

to:

$$\alpha = 2\arccos\left(\frac{h}{r}\right). \tag{4.18}$$



Rys. 4.3. Zależności geometryczne pola powierzchni wspólnej przekroju otworu i strefy dozowania dla  $y_0 \in (-3r, -2r]$ 

Pole wycinka koła P1 w takim przypadku opisane jest równaniem:

$$P_1 = \frac{\alpha}{2\pi} \cdot \pi r^2 = \frac{1}{2} \alpha r^2, \qquad (4.19)$$

które po przeliczeniach otrzymuje postać:

$$h^2 + \left(\frac{\alpha}{2}\right)^2 = r^2. \tag{4.20}$$

Stąd kąt  $\alpha$  wynosi:

$$\alpha = 2\sqrt{r^2 - h^2} \,. \tag{4.21}$$

Pole trójkąta P<sub>2</sub>, opisuje równanie:

$$P_2 = \frac{1}{2}ah. (4.22)$$

Poszukiwane pole powierzchni wspólnej przekroju otworu i strefy dozowania opisuje zależność:

$$P = P_1 - P_2 = \frac{1}{2}\alpha r^2 - \frac{1}{2ah} = r^2 \arccos\left(\frac{h}{r}\right) - h\sqrt{r^2 - h^2}.$$
 (4.23)

Po przekształceniu:

$$P = r^{2} \arccos\left(\frac{h}{r}\right) - \frac{h}{r} \sqrt{1 - \left(\frac{h}{r}\right)^{2}} .$$
(4.24)

Podstawiając  $h = -2r - y_0$  do równania (4.24) otrzymuje się następującą zależność matematyczną:

$$P(y_0) = r^2 \arccos\left(\frac{-2r - y_0}{r}\right) - \frac{-2r - y_0}{r} \sqrt{1 - \left(\frac{-2r - y_0}{r}\right)^2} .$$
(4.25)

Dla  $y_0 \in (-2r, -r]$  poszukiwane pole powierzchni wspólnej przekroju otworu i strefy dozowania jest równe polu koła o promieniu *r* (obszar zakreskowany linią ukośną pochyloną w prawą stronę (Rys. 4.4)) pomniejszonym o pole wycinka koła o kącie  $\alpha$  (obszar zakreskowany linią ukośną pochyloną w lewą stronę (Rys. 4.4)) bez trójkąta równoramiennego o bokach *r*, podstawie *a* i wysokości *h* (obszar zakreskowany krzyżowo (Rys. 4.4)). Korzystając z zależności (4.17) – (4.24) otrzymujemy:

$$P = \pi r^2 - \left(P_1 - P_2\right) = r^2 \left(\pi - \arccos\left(\frac{h}{r}\right)\right) + \frac{h}{r} \sqrt{1 - \left(\frac{h}{r}\right)^2} .$$
(4.26)

Dla  $h = y_0 - (-2r) = 2r + y_0 > 0$  równanie (4.26) przyjmuje postać:



Rys. 4.4. Pole powierzchni wspólnej przekroju otworu i strefy dozowania dla  $y_0 \in (-2r, -r]$ 

Ponieważ zachodzi równość:

$$\arccos(-x) = \pi - \arccos(x)$$
 (4.28)

to wyrażenie (4.25) można sprowadzić do postaci (4.27) i odwrotnie.

#### Przypadek II – otwór opuszcza strefę dozowania

Postępując analogicznie jak w przypadku I, tym razem jednak podstawiając y = 2r do zależności (4.10) otrzymuje się  $\Delta_x$  w postaci:

$$\Delta_x = -(y_0 - r)(y_0 - 3r)$$
(4.29)

dla otworu opuszczającego strefę dozowania. W tym przypadku istnieją rozwiązania w postaci:

$$\begin{cases} \Delta_x > 0, \text{ gdy } y_0 \in (r, 3r) \\ \Delta_x = 0, \text{ gdy } y_0 = r \text{ lub } y_0 = 3r \end{cases}$$
(4.30)

Na podstawie zależności (4.30) stwierdza się, że dla  $r < y_0 < 3r$  pole powierzchni wspólnej przekroju otworu i strefy dozowania jest niepełnym kołem, którego pole maleje wraz ze wzrostem  $y_0$ , natomiast dla  $y_0 = 3r$  przekrój otworu i strefy dozowania nie mają części wspólnej (otwór znajduje się poza strefą dozowania).

Dla  $y_0 \in (r,2r]$  pole powierzchni wspólnej przekroju otworu i strefy dozowania wyraża się wzorem (4.26), przy czym:  $h = 2r - y_0 > 0$  (Rys. 4.5). Wtedy:



Rys. 4.5. Pole powierzchni wspólnej przekroju otworu i strefy dozowania dla  $y_0 \in (r, 2r]$ 

Dla  $y_0 \in (2r, 3r]$  zachodzi sytuacja podobna jak ta przedstawiona na rysunku 4.3, stąd pole powierzchni wspólnej przekroju otworu i strefy dozowania

opisuje zależność (4.24). Podstawiając  $h = y_0 - 2r > 0$  (Rys. 4.6), otrzymuje się zależność:



Rys. 4.6. Pole powierzchni wspólnej przekroju otworu i strefy dozowania dla  $y_0 \in (2r, 3r]$ 

Uwzględniając, że dla  $y_0 \in (-r, r]$  otwór w całości znajduje się w strefie dozowania, ostatecznie otrzymuje się:

$$\begin{cases} r^{2} \arccos\left(\frac{-2r-y_{0}}{r}\right) - \frac{-2r-y_{0}}{r}\sqrt{1-\left(\frac{-2r-y_{0}}{r}\right)^{2}}, \ \text{gdy} \ y_{0} \in [-3r, -2r] \\ r^{2}\left(\pi - \arccos\left(\frac{2r+y_{0}}{r}\right)\right) + \frac{2r+y_{0}}{r}\sqrt{1-\left(\frac{2r+y_{0}}{r}\right)^{2}}, \ \text{gdy} \ y_{0} \in (-2r, -r] \\ \pi r^{2}, \ \text{gdy} \ y_{0} \in (-r, r] \\ r^{2}\left(\pi - \arccos\left(\frac{2r-y_{0}}{r}\right)\right) + \frac{2r-y_{0}}{r}\sqrt{1-\left(\frac{2r-y_{0}}{r}\right)^{2}}, \ \text{gdy} \ y_{0} \in (r, 2r] \\ r^{2} \arccos\left(\frac{y_{0}-2r}{r}\right) - \frac{y_{0}-2r}{r}\sqrt{1-\left(\frac{y_{0}-2r}{r}\right)^{2}}, \ \text{gdy} \ y_{0} \in (2r, 3r] \end{cases}$$
(4.33)

co po uproszczeniu daje:

$$P(y_{0}) \begin{cases} r^{2} \left( \pi - \arccos\left(\frac{2r + y_{0}}{r}\right) \right) + \frac{2r + y_{0}}{r} \sqrt{1 - \left(\frac{2r + y_{0}}{r}\right)^{2}}, \text{ gdy } y_{0} \in [-3r, -r] \\ \pi r^{2}, \text{ gdy } y_{0} \in (-r, r] \\ r^{2} \left( \pi - \arccos\left(\frac{2r - y_{0}}{r}\right) \right) + \frac{2r - y_{0}}{r} \sqrt{1 - \left(\frac{2r - y_{0}}{r}\right)^{2}}, \text{ gdy } y_{0} \in [r, 3r] \end{cases}$$
(4.34)

Przedstawione zależności (4.7)–(4.34) pozwalają na wyznaczenie pola powierzchni wspólnej przekroju otworu i powierzchni strefy dozowania dla każdego  $y_0 \in [-3r,3r]$ . Uwzględniając, że położenie otworu zmienia się w czasie ( $y_0$  jest funkcją czasu (zależność (4.5))), pole powierzchni wspólnej przekroju otworu i strefy dozowania wyrażone w funkcji czasu przyjmuje postać:

$$S(t) = (P \circ y_0)(t) = P(R\sin(2\pi ft + \varphi_0)). \qquad (4.35)$$

Zakładając, że cząstki dozowanego materiału poruszają się ze stałą prędkością u, objętość masy wprowadzanej do otworu  $V_{otwTI}$  zmienia się w czasie, co opisuje równanie różniczkowe

$$\frac{dV_{otwT1}}{dt}(t) = uS(t).$$
(4.36)

Przyjmując, że  $V_{otwTI}(0) = 0$  i y(0) = -3r, objętość masy prowadzanej do otworu do chwili *t* jest dana całką

$$V_{otwT1}(t) = u \int_{0}^{t} S(\tau) d\tau , \qquad (4.37)$$

której nie daje się wyrazić przez funkcje elementarne. Należy zatem stosować procedury numeryczne.

Zakładając, że otwory w pierwszej tarczy są napełniane całkowicie podczas jednego pełnego obrotu, całkowita objętość ziarna  $V_c$  dozowanego w czasie jednego obrotu  $t_{obr}$  opisana jest równaniem:

$$V_c = n_{otw} \cdot V_{otwT1}(t). \tag{4.38}$$

gdzie:

*n*<sub>otw</sub> – liczba otworów w pierwszej tarczy.

W takim przypadku maksymalną wydajność wielotarczowego rozdrabniania wyraża zależność:

$$Q_r = \frac{V_c \cdot f}{\rho_n} , \qquad (4.39)$$

gdzie:

f – częstotliwość napełniania otworów, Hz,  $\rho_n$  – gęstość nasypowa ziarna, kg·m<sup>-3</sup>. Uwzględniając, że częstotliwość wynosi:

$$f = \frac{\omega_1}{2\pi} \tag{4.40}$$

wydajność rozdrabniania można zapisać jako:

$$Q_r = \frac{V_c \cdot \omega_1}{2\pi\rho_n}.$$
(4.41)

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

$$\delta = \frac{h_0 - \tilde{h}_0^{T1}}{h_0} A_d V_d + \frac{\tilde{h}_0^{T1}}{h_o} B_m V_m \tag{4.42}$$

gdzie:

h<sub>0</sub> – grubość tarczy, mm,

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

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

V<sub>m</sub> – rozkład objętości ziarna po *m*-tym cięciu,

A<sub>d</sub> – liniowy operator stochastyczny rozkładu ziaren podczas dozowania,

 $V_d$  – rozkład objętości ziaren dozowanych.

Po uwzględnieniu współczynnika wypełniania w zależnościach (4.37) i (4.38) otrzymuje się wzór na całkowitą, rzeczywistą objętość ziarna  $V_{cRWT}$  w pierwszej tarczy:

$$V_{cRWT} = n_{otw} \delta u \int_{0}^{t} S(\tau) d\tau = n_{otw} \cdot \left( \frac{h_0 - \tilde{h}_0^{T1}}{h_0} A_d V_d + \frac{\tilde{h}_0^{T1}}{h_o} B_m V_m \right) \cdot u \int_{0}^{t} S(\tau) d\tau . \quad (4.43)$$

Rzeczywista wydajność maszynowego, wielotarczowego rozdrabniania przyjmuje wówczas postać:

$$Q_{r} = \frac{V_{cRWT} \cdot \omega_{1}}{2\pi\rho_{n}} = \frac{n_{otw} \cdot \left(\frac{h_{0} - h_{0}^{T1}}{h_{0}} A_{d} V_{d} + \frac{h_{0}^{T1}}{h_{o}} B_{m} V_{m}\right) \cdot u_{0}^{t} S(\tau) d\tau \cdot \omega_{1}}{2\pi\rho_{n}}.$$
(4.44)

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

$$Q_r = \frac{\Delta m}{\Delta t}.$$
(4.45)

#### 4.2.2. Model energochłonności

Stany energetyczne procesu rozdrabniania należą do zagadnień trudnych do opisu ze względu na złożoność zjawisk zachodzących w komorze rozdrabniania, np. wzajemne oddziaływania materiału i elementów/krawędzi roboczych, złożone stany naprężeń w materiale rozdrabnianym, przemieszczanie się materiału w przestrzeni rozdrabniania czy stopień wypełnienia przestrzeni rozdrabniającej. Teoretyczne wyznaczenie zapotrzebowania energetycznego maszyny bez przewymiarowania mocy staje się bardzo skomplikowane i prowadzi do błędnych szacunków z uwagi na stosowane uproszczenia i niedokładności modeli. Wynika stąd potrzeba prowadzenia eksperymentów i badań doświadczalnych na rzeczywistych obiektach w celu identyfikacji składowych energii maszynowej wykorzystywanej w procesie rozdrabniania, tak aby możliwe było ustalenie wytycznych dla modelowania i obniżania energochłonności rozdrabniaczy biomasy.

W ujęciu sprawnościowym energochłonność rozdrabniania  $E_{R\eta}$  może być traktowana jako funkcja energii elektrycznej oraz sprawności jej przetwarzania przez elementy układu rozdrabniającego, co można zapisać jako:

$$E_{R\eta} = E_E \cdot \eta_{sil} \cdot \eta_p \cdot \eta_{sp} \cdot \eta_R \tag{4.46}$$

gdzie:

 $E_E$  – pobierana energia elektryczna, kWh,

 $\eta_{sil}$  – sprawność silnika,

 $\eta_p$  – sprawność przekładni,

 $\eta_{sp}$  – sprawność sprzęgła,

 $\eta_R$  – sprawność rozdrabniania.

Dla układu rzeczywistego, maszynowego energochłonność procesu rozdrabniania w ujęciu czasowym  $E_{Rt}$  uzależniona jest od całkowitego poboru mocy  $P_R$  i czasu trwania rozdrabniania  $t_R$ .

$$E_{Rt} = P_R \cdot t_R \,. \tag{4.47}$$

Zatem, aby obniżyć energochłonność należy minimalizować pobór mocy i czas trwania procesu. Dla danej konstrukcji racjonalnym wydaje się być sterowanie poborem mocy, gdyż skracanie czasu trwania procesu nie mogłoby wystąpić bez wyraźniej ingerencji w wydajność procesu.

Całkowity pobór mocy maszyny  $P_{cM}$  dziali się na dwie składowe: składową poboru mocy na bieg jałowy  $P_{bj}$  maszyny oraz składową mocy rozdrabniania  $P_{pr}$ :  $P_{-} = P_{-} + P_{-}$  (4.48)

$$P_{Rt} = P_{bj} + P_{pr} \tag{4.48}$$

przy czym moc biegu jałowego jest równa:

$$P_{bi} = M \cdot \omega \tag{4.49}$$

gdzie:

M – moment obrotowy przekazywany na wał rozdrabniacza,  $\omega$  – prędkość kątowa wału. Dla przypadku rozdrabniacza wielotarczowego z osobnymi układami napędowymi dla każdego elementu roboczego moc biegu jałowego można opisać zależnością:

$$P_{bj} = \sum_{i=1}^{n} M_i \cdot \omega_i \tag{4.50}$$

gdzie:

 $M_i$  – moment obrotowy przekazywany na i-ty wał rozdrabniacza,

 $\omega_i$  – prędkość kątowa i-tego wału,

 $\eta_{si}$  – sprawność i-tego silnika,

 $\eta_{pi}$  – sprawność i-tej przekładni.

Przy ustalonych cechach materiałowych i konstrukcyjnych minimalizowanie poboru mocy biegu jałowego  $P_{bj}$  jest ograniczone. Minimalizowanie poboru w warunkach maszynowych sprowadzać się będzie więc do minimalizowania mocy procesu rozdrabniania  $P_{pr}$ .

Moc rozdrabniania wynika z mocy potrzebnej do zniszczenia materiału wsadowego, mocy na transport materiału wewnątrz komory rozdrabniania, moc na zwyżkę aerodynamiczną oraz straty mocy na skutek tarcia wzajemnego cząstek materiału oraz materiału o elementy maszyny, co można zapisać następująco:

$$P_{pr} = P_{Rt} - P_{bj} = P_{qs} + P_{TWK} + P_{ZA} + P_{TM/M} = P_U$$
(4.51)

gdzie:

 $P_{qs}$  – zapotrzebowanie mocy na quasi-ścinanie,

 $P_{TWK}$  – moc na transport wewnętrzny materiału w przestrzeni roboczej,

 $P_{ZA}$  – moc zwyżki aerodynamicznej,

 $P_{TM/M}$  – moc na pokonanie oporów tarcia materiału o elementy rozdrabniacza.  $P_U$  – moc użyteczna.

Dla takiej interpretacji poboru mocy energochłonność rozdrabniania będzie określona jako (Rys. 4.7):

$$E_{PR} = (P_{cM} - P_{bj})(t_2 - t_1) = P_U \cdot \Delta t = (P_{qs} + P_{TWK} + P_{ZA} + P_{TM/M}) \cdot \Delta t =$$
  
=  $E_{qs} + E_{TWK} + E_{ZA} + E_{TM/M}$  (4.52)

a energochłonność całkowita procesu, uwzględniając zależności (4.51) i (4.52), będzie równa:

$$E_{Rt} = E_{bj} + E_{PR} = E_{bj} + E_{qs} + E_{TWK} + E_{ZA} + E_{TM/M} .$$
(4.53)

W celu obniżenia energochłonności całkowitej  $E_{Rt}$  należy minimalizować poszczególne jej składowe. Składowa energii biegu jałowego zależy od prędkości kątowej elementów rozdrabniających, momentu obrotowego i czasu rozdrabniania:

$$E_{bj} = P_{bj} \cdot t = \sum_{i=1}^{n} M_{bji} \cdot \omega_i \cdot t .$$
(4.54)



Rys. 4.7. Interpretacja graficzna modelu energochłonności rozdrabniania

Identyfikacja energii quasi-ścinania wymaga przyjęcia odpowiedniego modelu degradacji struktury postaciowej materiału rozdrabnianego. W rozdrabniaczu wielotarczowym materiał rozdrabniany wielokrotnie poddawany jest oddziaływaniom elementów roboczych, jego rozdrobnienie następuje w kilku przejściach przez elementy rozdrabniające. Wynika z tego fakt, podział materiału i uzyskany produkt o pewnym rozkładzie że granulometrycznym nie powstaje w wyniku jednorazowego niszczenia, a w wyniku wielokrotności oddziaływań. W materiale podczas rozdrabniania występuje także złożony stan naprężeń i niejednakowy udział poszczególnych sił składowych powodujących niszczenie. Energia potrzebna do podziału ziarna obejmuje energię odkształceń sprężystych, plastycznych oraz energię rozpadu. Na tej podstawie stwierdza się, że znane i stosowane teorie Kicka (jednorazowe kruszenie), Rittingera (energia proporcjonalna jest do przyrostu powierzchni), Bonda, Rebindera nie znajdują zastosowania i nie ujmują jednocześnie energii odkształceń plastycznych, sprężystych, rozpadu dla pożądanego stopnia rozdrobnienia produktu. Stąd za odpowiednia dla rozważań energii rozdrabniania w zespole wielotarczowym przyjęto hipotezę Bracha, a w zasadzie jej modyfikację wykonaną przez F. Molendowskiego [72]:

$$E_{RM} = \sum_{k=1}^{k=n} \frac{b_k}{100} \left( \frac{D_e}{d_k} - 1 \right) \frac{\sigma_r^2}{2E_r \cdot \rho_r \cdot \alpha_r}$$
(4.55)

gdzie:

 $E_{RM}$  – energia rozdrabniania masy rozdrabnianych ziaren, MJ·kg<sup>-1</sup>,  $b_k$  – procentowy udział k-tej klasy wymiarowej materiału po rozdrobnieniu, %,  $D_e$  – średni wymiar cząstek nadawy,  $d_k$  – zastępczy wymiar klasy wymiarowej, mm.

 $\sigma_r-$ naprężenia ściskające niszczące ziarno, MPa,

Er – względny moduł sprężystości ziarna, MPa,

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

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

Zależność ta nie uwzględnia jednak złożonego stanu naprężeń występujących w materiale podczas wielotarczowego rozdrabniania. I tak przyjęto, że energia quasi-ścinania przypadająca na jednostkę masy wsadu dla przejścia przez jedną współpracującą parę tarcz  $E_{qsj}$  wynosi :

$$E_{qsj} = \sum_{k=1}^{k=n} \frac{b_k}{100} \left( \frac{D_e}{d_k} - 1 \right) \frac{\sigma_z^2}{2E_r \cdot \rho_r \cdot \alpha_r}$$
(4.56)

gdzie:

 $E_{qsj}$  – energia quasi-ścinania 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.

Naprężenia zastępcze w przypadku rozdrabniania w parze tarcz otworowych są wypadkową naprężeń normalnych i stycznych:

$$\sigma_z = \sqrt{\sigma + 3\tau} \tag{4.57}$$

gdzie:

 $\sigma$  – naprężenia normalne, MPa,

 $\tau$  – naprężenia styczne, MPa.

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

$$E_{qs} = m \sum_{i=1}^{z} E_{qsj} = m \sum_{i=1}^{z} \left( \sum_{k=1}^{k=n} \frac{b_k}{100} \left( \frac{D_e}{d_k} - 1 \right) \frac{\sigma_z^2}{2E_r \cdot \rho_r \cdot \alpha_r} \right)$$
(4.58)

gdzie:

*m* – masa rozdrobnionego materiału, kg,

z – liczba przejść materiału przez pary tarcz otworowych,

Liczbę przejść materiału przez kolejne pary tarcz z można określić jako:

$$z = 2i - 1 \tag{4.59}$$

gdzie:

*i* – liczba tarcz w rozdrabniaczu wielotarczowym.Po podstawieniu otrzymuje się:

$$E_{qs} = m \sum_{i=1}^{2i-1} E_{qsj} = m \sum_{i=1}^{2i-1} \left( \sum_{k=1}^{k=n} \frac{b_k}{100} \left( \frac{D_e}{d_k} - 1 \right) \frac{\sigma_z^2}{2E_r \cdot \rho_r \cdot \alpha_r} \right).$$
(4.60)

Masa rozdrabnianego materiału m zależna jest ściśle od możliwości przemiałowych rozdrabniacza, a dokładniej od jego wydajności. Ponieważ wydajność jest równa:

$$Q = \frac{m}{t} \tag{4.61}$$

gdzie:

Q – wydajność rozdrabniania, kg·s<sup>-1</sup>,

m - masa rozdrobnionego produktu, kg,

*t* – czas rozdrabniania, s,

to masa produktu rozdrabniania wyrażona jest jako:

$$m = Q \cdot t \ . \tag{4.62}$$

Podstawiając zależność (4.62) do równania (4.60) otrzymuje się:

$$E_{qs} = Q \cdot t \sum_{i=1}^{2i-1} \left( \sum_{k=1}^{k=n} \frac{b_k}{100} \left( \frac{D_e}{d_k} - 1 \right) \frac{\sigma_z^2}{2E_r \cdot \rho_r \cdot \alpha_r} \right).$$
(4.63)

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 [80]:

$$D_e = \tilde{B}_{n,m} \rho_n^m = \left(1 - \frac{x}{\tilde{y}_n^m}\right) \rho_n^m(x) + \frac{1}{\tilde{y}_n^m} \int_x^{l_{\max}} \rho_n(l) dl, \qquad (4.64)$$

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 [80]:

$$d_{k} = A_{n,m}\rho_{n}^{m} = \left(1 - \frac{x}{y_{n+1} - \tilde{y}_{n+1}^{m}}\right)\rho_{n}^{m}(x) + \frac{1}{y_{n+1} - \tilde{y}_{n+1}^{m}}\int_{x}^{l_{\max}}\rho_{n}^{m}(l)dl, \qquad (4.65)$$

gdzie:

 $A_{n.m}$  – operator stochastyczny,

 $\tilde{y}_{n+1}^m$  – wysokość materiału w otworze roboczym następującej tarczy po *m*-tym cięciu.

Po podstawieniu zależności (4.64) i (4.65) do zależności (4.63) wartość energii quasi-ścinania wynosi:

$$E_{qs} = Q \cdot t \sum_{i=1}^{2i-1} \left( \sum_{k=1}^{k=n} \frac{b_k}{100} \left( \frac{\tilde{B}_{n,m} \rho_n^m}{A_{n,m} \rho_n^m} - 1 \right) \frac{\sigma_z^2}{2E_r \cdot \rho_r \cdot \alpha_r} \right),$$
(4.66)

zatem:

$$E_{qs} = Q \cdot t \sum_{i=1}^{2i-1} \left( \sum_{k=1}^{k=n} \frac{b_k}{100} \left( \frac{\left(1 - \frac{x}{\tilde{y}_n^m}\right) \rho_n^m(x) + \frac{1}{\tilde{y}_n^m} \int_x^{l_{\max}} \rho_n(l) dl}{\left(1 - \frac{x}{y_{n+1} - \tilde{y}_{n+1}^m}\right) \rho_n^m(x) + \frac{1}{y_{n+1} - \tilde{y}_{n+1}^m} \int_x^{l_{\max}} \rho_n^m(l) dl} - 1 \right) \frac{\sigma_z^2}{2E_r \cdot \rho_r \cdot \alpha_r} \right).$$
(4.67)

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

$$P_{qs} = \frac{E_{qs}}{t} = Q \cdot \sum_{i=1}^{2i-1} \left( \sum_{k=1}^{k=n} \frac{b_k}{100} \left( \frac{D_e}{d_k} - 1 \right) \frac{\sigma_z^2}{2E_r \cdot \rho_r \cdot \alpha_r} \right).$$
(4.68)

Biorąc po uwagę wzrost zapotrzebowania mocy występujący przy zwiększaniu prędkości obrotowych tarcz roboczych tym samym przy wyższych prędkościach liniowych krawędzi rozdrabniających zapotrzebowanie mocy na quasi-ścinanie winno uwzględniać moc wykorzystywaną na tzw. zwyżkę dynamiczną.

#### 4.2.3. Model jednostkowego zapotrzebowania na energię

Jednostkowe zapotrzebowanie na energię  $E_j$  (kWh·kg<sup>-1</sup>) w ogólności określa ilość energii E przypadającą na jednostkę masy produktu m:

$$E_j = \frac{E}{m}.$$
(4.69)

Uwzględniając, zależność na energochłonność wielotarczowego rozdrabniania  $E_{cM}=P_{cM}$ , otrzymuje się:

$$E_j = \frac{E_{cM}}{m} = \frac{P_{cM} \cdot t}{m} \,. \tag{4.70}$$

Ponieważ

$$Q = \frac{m}{t} \tag{4.71}$$

to

$$\frac{t}{m} = \frac{1}{Q} \tag{4.72}$$

stąd:

$$E_j = \frac{P_{Rt}}{Q} \,. \tag{4.73}$$

Uwzględniając zależność (4.48) wzór na jednostkowe zapotrzebowanie na energię przyjmie postać:

$$E_{j} = \frac{P_{Rt}}{Q} = \frac{P_{bj} + P_{pr}}{Q} = \frac{P_{bj} + P_{qs} + P_{TWK} + P_{ZA} + P_{TM/M}}{Q}.$$
 (4.74)

Dla takiego rozumowania jednostkowe zapotrzebowanie na energię quasiścinania będzie równe:

$$E_{jqs} = \frac{P_{qs}}{Q} = \frac{Q \cdot \sum_{i=1}^{2i-1} \left( \sum_{k=1}^{k=n} \frac{b_k}{100} \left( \frac{D_e}{d_k} - 1 \right) \frac{\sigma_z^2}{2E_r \cdot \rho_r \cdot \alpha_r} \right)}{Q}, \quad (4.75)$$

$$E_{jqs} = \sum_{i=1}^{2i-1} \left( \sum_{k=1}^{k=n} \frac{b_k}{100} \left( \frac{D_e}{d_k} - 1 \right) \frac{\sigma_z^2}{2E_r \cdot \rho_r \cdot \alpha_r} \right).$$
(4.76)

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

$$E_{j} = \frac{\sum_{i=1}^{n} N_{ii}}{Q}.$$
 (4.77)

#### 4.2.4. Model stopnia rozdrobnienia produktu

W celu modelowego opisu stopnia rozdrobnienia materiału w procesie wielotarczowego rozdrabniania przyjęto, że rozdrabniany materiał występuje w postaci uziarnionej (ryż, kukurydza), a jego pojedyncze ziarno ma kształt i objętość kuli  $V_{zi}$  o średnicy  $D_z$  obliczanej na podstawie analizy granulometrycznej i współczynnika kształtu  $k_k$ :

$$V_{zi} = \frac{\pi \left( D_z \cdot k_k \right)^2}{4} \tag{4.78}$$

$$D_{z} = \sum_{i=1}^{n} d_{i} \cdot q_{i} , \qquad (4.79)$$

gdzie:

 $D_{\rm z}$  – średnica zastępcza ziarna wyznaczona na podstawie wyników analizy granulometrycznej, mm,

 $k_k$  – współczynnik kształtu wyznaczany doświadczalnie, dla ryżu  $k_{kr}$  = 1,97, dla kukurydzy  $k_{kk}$  = 2,35,

di – wymiar średni i-tej klasy wymiarowej, mm,

 $q_i$  – udział masowy *i*-tej klasy wymiarowej w nadawie, -.

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

$$D_{zn} = D_z \cdot \beta^n, \qquad (4.80)$$

gdzie:

 $D_{zn}-$ średni wymiar ziarna po przejściu przez n-tą parę współ<br/>pracujących tarcz rozdrabniacza,

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

n -liczba przejść przez tarcze.

Przekształcając zależność (4.80) otrzymujemy, że:

$$\beta^{n} = \frac{D_{zn}}{D_{z}} = \frac{\sum_{i=1}^{n} d_{in} \cdot q_{in}}{\sum_{i=1}^{n} d_{i} \cdot q_{i}},$$
(4.81)

stąd średni stopień rozdrobnienia przyjmuje postać:

$$i_{sr} = \frac{1}{\beta^n} = \frac{D_z}{D_{zn}} = \frac{\sum_{i=1}^{n-1} d_i \cdot q_i}{\sum_{i=1}^{n-1} d_{in} \cdot q_{in}}.$$
(4.82)

#### 4.2.5. 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, zgodnie ze stanami postulowanymi rozdrabniania [24,130], 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  $K_i$ ,  $K_i = i_{80}$ .

Model zintegrowanej energochłonności zbudowano analogicznie do modelu efektywnościowego opisanego w pracy [86]. Dzięki temu uzyskano związek ilościowy pomiędzy najważniejszymi wskaźnikami rozdrabniania w ujęciu energochłonności.

Zintegrowaną energochłonność opisano, w ujęciu kryterialnym zaproponowanym przez J. Zawadę, następująco:

$$E_{zint} = K_{Q_r} \cdot K_P \cdot K_{E_i} \cdot K_i \,. \tag{4.83}$$

Zintegrowana energochłonność zależy zatem wprost proporcjonalnie od wydajności i stopnia rozdrobnienia oraz odwrotnie proporcjonalnie od poboru mocy i jednostkowego zapotrzebowania na energię. Przyjmując, że stanem pożądanym jest stan, w którym  $Q \to \infty$ ,  $i_{sr} \to \infty$ ,  $P_R \to 0$  oraz  $E_j \to 0$ , wtedy  $E_{zint} \to \infty$ . W ujęciu energochłonności lepszym będzie ten proces o większej wartości zintegrowanej energochłonności.

### 4.2.6. Model zrównoważonej emisyjności

Emisja CO<sub>2</sub> ekwiwalentnego w procesie rozdrabniania powiązana jest ściśle z jego energochłonnością. Rozważając system, dla którego celem jest poprawa środowiskowego oddziaływania procesu, produktu, maszyny (np. poprzez eliminację CO<sub>2</sub>), przy zachowaniu innych celów: zwiększenia wydajności oraz uzyskanie produktu o pożądanej jakości i efektywności energetycznej można zidentyfikować zintegrowany energetycznym przeznaczeniem (spaleniem) produktu rozdrabniania zrównoważony wskaźnik emisyjności w postaci funkcji poboru mocy w procesie rozdrabniania, przyrostu korzyści ekologicznych oraz czasu:

$$\boldsymbol{e}_{zrów} = f\left(\boldsymbol{P}_{R}, \Delta \boldsymbol{E}_{eco}, \boldsymbol{t}_{R}\right), \tag{4.84}$$

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:

$$e_{zrów} = P_R \cdot \frac{1}{\Delta E_{eco}} \cdot \frac{1}{t_R} \,. \tag{4.85}$$

W takim ujęciu emisyjność zrównoważona zależy wprost proporcjonalnie od mocy pobranej na rozdrabnianie oraz odwrotnie proporcjonalnie od korzyści ekologicznych i czasu rozdrabniania. Jeżeli zgodnie z postulowanymi stanami rozdrabniania  $P_R \rightarrow 0$ ,  $\Delta E_{eco} \rightarrow \infty$  oraz  $t_R \rightarrow \infty$ , wówczas  $e_{zrów} \rightarrow 0$ . Wynika stąd, że przy postulowanym zmniejszaniu poboru mocy oraz zwiększaniu korzyści ekologicznych i czasu procesu zmniejsza się wartość emisyjności. Przy porównywaniu procesów rozdrabniania pod względem emisyjności lepszym będzie ten o niższej wartości emisyjności zrównoważonej.

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:

$$\Delta E_{eco} = E_{es} - E_{Rt}, \qquad (4.86)$$

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:

$$E_{es} = E_s \cdot k_e = W_i \cdot m_b \cdot k_e , \qquad (4.87)$$

 $E_s$  – energia ze spalania biomasy, kWh,

 $W_i$  – wartość opałowa rozdrobnionej biomasy, kWh·kg<sup>-1</sup>,

*m*<sub>b</sub> - masa rozdrobnionej spalanej biomasy, kg,

*ke* – współczynnik kogeneracji, *k<sub>e</sub>*=0,4 [131].

Uwzględniając, że masa rozdrobnionej spalanej biomasy uzależniona jest od wydajności rozdrabniania, można zapisać:

$$E_{es} = W_i \cdot Q_r \cdot t_R \cdot k_e \,. \tag{4.88}$$

### 4.2.7. 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 energetycznośrodowiskowej w postaci:

$$F_{e-s} = K_E \cdot K_e = \frac{1}{E_{zint}} \cdot \frac{1}{e_{zrów}} \,. \tag{4.89}$$

Wartość funkcji  $F_{e-s}$  jest odwrotnie proporcjonalna do zintegrowanej energochłonności i emisyjności zrównoważonej. Niższa wartość tej funkcji oznacza proces lepszy pod względem energetyczno-środowiskowym, tj. mniej energochłonny z mniejszymi emisjami.

### 4.3. MATERIAŁY ROZDRABNIANIE

#### 4.3.1. Ziarna ryżu i kukurydzy

Ziarno kukurydzy zbudowane jest w 82% z bielma, ok. 12% stanowi zarodek, a pozostałą część inne elementy, tj.: część nasadowa i okrywa owocowo-nasienna [132].

W ziarniaku kukurydzy głównym źródłem węglowodanów (ok. 85% zawartości), w tym skrobi, jest bielmo i zarodek. Dodatkowo w skład ziarna wchodzą białka i tłuszcze, włókno oraz popiół. Udział procentowy poszczególnych składników przedstawiono w tabeli 4.1. Tłuszcze i białka tworzące strukturę ziarniaka są wartościowymi składnikami, jednak podczas niewłaściwego zbierania, przechowywania i przetwarzania ziarna mogą przyczynić się do pogorszenia jego jakości. [132,133].

Do podstawowych elementów budujących ziarno ryżu zalicza się okrywę nasienną, łuskę, wąs kłosa, zarodek i plewę. Składniki, z których zbudowane jest ziarno ryżu to: skrobia (94%), białka (ok. 5%), tłuszcze (ok. 1%) [134–136].

Składnik	Ziarno	Bielmo	Zarodek	Okrywa	Część nasadowa
Sucha masa, %	100	82,0	12,0	4,0	2,0
Skrobia, cukry, %	73,3	85,0	9,0	9,0	10,0
Białko, %	10,0	12,0	28,0	7,0	12,0
Lipidy, %	4,4	1,6	38,0	1,0	4,0
Włókno, %	2,4	1,0	15,0	79,0	60,0
Popiół, %	1,3	0,4	10,0	4,0	14,0

Tabela 4.1. Skład chemiczny ziarna kukurydzy [132]

### 4.3.2. Właściwości analizowanych ziaren

Dla procesów przygotowania i dalszego wykorzystania ziaren ryżu i kukurydzy ważne są właściwości ziaren dotyczące wartości energetycznej, emisji podczas spalania, objętości, kątów zsypu itd. Ziarna kukurydzy są zdecydowanie częściej charakteryzowane pod względem wartości opałowych i ciepła spalania niż ziarna ryżu. W tabeli 4.2 zestawiono najważniejsze właściwości omawianych ziaren dostępne w literaturze.

T 1 1 4 0	TT 71 / · / ·	•		
Tabela /L7	W/ łasciwosci	719ren r	V711 1	kukurudzu
1 a 0 c 1 a + .2	W 10301 W 0301	LIAICHI	yZu I I	Kukui yuzy
			-	

Właściwość	Ryż	Kukurydza
Wartość opałowa, MJ·kg <sup>-1</sup>	16,4 [137]	17,2 [138]
Ciepło spalania, MJ·kg <sup>-1</sup>	17,6 [137]	16,83 [139]
Zawartość popiołu w stanie suchym, %	-	1,9-21,2 [140]
Zawartość węgla w stanie suchym, %	-	40,5-49,5 [140]
Emisja CO <sub>2</sub> podczas spalania, g·kg <sup>-1</sup> spalanego materiału	1262 [141]	1477 [141]
Gęstość, g·cm <sup>-3</sup>	1,11-1,12 [142]	1,19-1,25 [142,143]
Gęstość nasypowa, kg⋅m <sup>-3</sup>	750 [144,145]	600-850 [142,143]
Kąt zsypu w spoczynku, °	25° [146]	35° [147]
Kąt zsypu w ruchu, °	17,5° [146]	28° [147]

## 4.4. METODA OZNACZENIA WILGOTNOŚCI

Wilgotność ziaren poddawanych rozdrabnianiu w każdej konfiguracji prędkości wykonano z zastosowaniem metody wagowej. Metoda ta polega na wyznaczeniu procentowych strat masy podczas suszenia ziaren w temperaturze 105°C. Procentowy ubytek masy wskazuje na zawartość wilgoci w próbie. Próbę materiału o masie ok. 5 g układa się na tacce wagosuszarki i suszy w temperaturze 105°C aż do momentu ustabilizowania masy. Na podstawie różnicy masy próbki przed i po suszeniu wyznacza się wilgotność zgodnie ze wzorem:

$$W_m = \frac{m_1 - m_2}{m_1} \cdot 100\% \tag{4.90}$$

gdzie:

 $W_m$  całkowita wilgotność próbki, %,  $m_1$  – masa próbki przed suszeniem, g,  $m_2$  – masa próbki po suszeniu, g.

### 4.5. METODY BADAŃ ROZDRABNIANIA ZIAREN

#### 4.5.1. Przygotowanie próbek

Próbie ściskania i ścinania poddano po 100 ziaren ryżu i kukurydzy (Rys. 4.8). Przed zniszczeniem ziarna każde z nich zważono i zmierzono trzy wymiary: długość, szerokość, wysokość.



Rys. 4.8. Ziarniaki biomasy przygotowane do próby wytrzymałościowej, a) ryżu, b) kukurydzy

### 4.5.2. Próba statycznego ściskania

Podczas rozdrabniania ziaren w młynie pięciotarczowym w materiale zachodzi złożony stan naprężeń przy czym dominują naprężenia ścinające i ściskające. W przypadku ściskania, aby wyznaczyć siły i naprężenie, a w następstwie pracę (energię) potrzebną do rozdrobnienia jednego ziarna, a dalej kilkunastu ziaren, można przeprowadzić próbę statycznego ściskania. Wyznaczone mogą być w sposób eksperymentalny zakresy prawdopodobnych naprężeń i sił niszczących ziarno, a w następstwie zakresy energetyczne niszczenia jego struktury [148].

Ważną cechą, która charakteryzuje materiały rozdrabniane jest właśnie wytrzymałość na ściskanie ( $R_c$ ):

$$R_c = \frac{F_c}{A_0} \tag{4.91}$$

gdzie:

 $F_c$  – największa wartość obciążenia ściskającego, przy którym następuje rozkruszenie próbki,

A<sub>0</sub> – pole początkowego przekroju próbki.

Próbę ściskania przeprowadzono na maszynie wytrzymałościowej Instron 5966.

#### 4.5.3. Próba ścinania

Próbę ścinania ze stałą prędkością  $v_s=2 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$  dla 100 ziaren ryżu i 100 ziaren kukurydzy przeprowadzono na maszynie wytrzymałościowej Instron 5966. Próbę ścinania ze zmienną prędkością  $v_s$  przeprowadzono na maszynie wytrzymałościowej Instron E3000. W obu przypadkach próbki umieszczano w specjalnie przygotowanym uchwycie ścinającym (Rys. 4.9) i ścinano pojedynczo, przy czym w próbie ścinania z różnymi prędkościami przyjęto  $v_s$  równe 0,05 m·s<sup>-1</sup>, 0,1 m·s<sup>-1</sup>, 0,15 m·s<sup>-1</sup> i 0,2 m·s<sup>-1</sup>.

Naprężenia ścinające τ wyznaczono na podstawie zależności:

$$\tau = \frac{F_T}{A_0} \tag{4.92}$$

gdzie:

 $F_c$  – największa wartość obciążenia ścinającego, przy którym następuje ścięcie ziarna, N,

 $A_0$  – przekrój ścinany, mm<sup>2</sup>.



Rys. 4.9. Przyrząd do ścinania ziaren biomasy - projekt G. Szali

## 4.6. 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 4.10, a na rysunku 4.11 schemat jego budowy i zasady działania.



Rys. 4.10. Stanowisko badawcze: 1- rozdrabniacz pięciotarczowy RWT\_5KZ, 2podajnik 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. 4.11. Schemat budowy i zasady działania stanowiska pomiarowego

### Moduł maszynowy

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. 4.12).



Rys. 4.12. Budowa modułu maszynowego stanowiska inteligentnego monitorowania charakterystyk użytkowych rozdrabniania: 1-, 2-, 3-, 4-, 5- silniki napędowe tarcz rozdrabniających, 6- korpus, 7- kosz zasypowy, 8- zespół tarcz, 9- kosz odbiorczy, 10- obudowa

Zespół rozdrabniający składa się z pięciu tarcz roboczych, zasilanych niezależnie z pięciu silników elektrycznych, co umożliwia sterowanie i monitorowanie charakterystyk oddzielnie dla każdej tarczy. W tabeli 4.3 podano najważniejsze cechy konstrukcyjne tarcz rozdrabniacza.

Parametr	Jednostka	Tarcza	Tarcza	Tarcza	Tarcza	Tarcza
1 arametr		1	2	3	4	5
Średnica tarczy $D_n$	mm	274	274	274	274	274
Liczba otworów $l_n$	szt.	14	22	27	33	39
Średnica otworów $d_n$	mm	30	23	21	17,5	17,5
Promień rozmieszczenia	mm	85	82.4	70.5	70.5	87
otworów w rzędzie 1		02,4	19,5	19,5	62	
Promień rozmieszczenia	mm	101.5	107.4	05.5	00.5	102
otworów w rzędzie 2	111111	101,5	107,4	95,5	99,5	102
Promień rozmieszczenia				110.5	114.5	117
otworów w rzedzie 3	111111	-	-	110,5	114,5	11/

Tabela 4.3. Cechy konstrukcyjne tarcz roboczych rozdrabniacza pięciotarczowego RWT-KZ5

### Moduł sterowniczy

W skład kolejnego z modułów, modułu sterowniczego wchodzą (Rys. 4.13):

- zintegrowany system identyfikacji technik rozdrabniania i podawania wsadu,
- system identyfikacji i pomiaru wielkości cząstek produktu rozdrabniania,
- magistrala i serwer portów: RS485, N-PORT w celu komunikacji z przemiennikami częstotliwości silników napędzających tarcze rozdrabniacza,
- moduł sterowania LabJack 6,0,
- moduł zbierania sygnałów z czujników drgań (Vibdaq 2+), podłączenie czujników zgodnie ze standardem ICP,
- szafa sterownicza, wewnątrz której umieszczono przemienniki częstotliwości.

Głównym zadaniem modułu sterowniczego jest realizacja sterowania rozdrabniaczem pięciotarczowym poprzez adaptacyjną zmianę nastaw prędkości kątowych tarcz i prędkości podawania wsadu, a dodatkowo rejestracja i archiwizacja wartości parametrów pracy takich jak: pobór mocy, wydajność, stopień rozdrobnienia produktu. Sterowanie odbywa się dzięki zastosowaniu pięciu przemienników częstotliwości typu pDrive MX 600 4V2.0 VATECH, każdy połączony z silnikiem elektrycznym dedykowanym dla każdej tarczy rozdrabniacza, oraz modułu sterowania silnikiem krokowym ADP 8084. Możliwa jest praca urządzenia w trybie sterowania ręcznego lub automatycznego z pulpitu sterowniczego.





a) Komora pomiarowa wielkości i kształtu produktu rozdrabniania



b) Pulpit sterowniczy



c) Moduł LabJack U6

d) Szafa sterownicza z falownikami

Rys. 4.13. Elementy systemu sterowniczego monitorowania charakterystyk użytkowych procesu wielotarczowego rozdrabniania

Zintegrowany system identyfikacji parametrów procesu zasilania i rozdrabniania wielokrawędziowego jest częścią modułu sterowniczego. Składa się z następujących elementów (Rys. 4.14):

- modułu sterowania silnikiem krokowym ADP 8084, •
- wagi produktu rozdrabniania (zakres pomiarowy: 0-60 kg), •
  - oprogramowania Młyn 2018, w skład, którego wchodzi:
    - a. oprogramowanie wagi
    - b. oprogramowanie podajnika,
    - wybór materiału w podajniku przeliczana nastawiona wydajność c. w kg/h (przy wolnym wylocie).
- czujników: 2 czujniki temperatury (w komorze rozdrabniacza i w koszu zasypowym), czujnik wilgotności względnej (w koszu zasypowym), 2 czujniki drgań (w obudowie rozdrabniacza).

Za pomocą systemu możliwe jest monitorowanie przyrostu masy produktu w czasie, mocy, prędkości katowych na poszczególnych tarczach rozdrabniacza, wydajności podajnika. Wydajność rzeczywista rozdrabniacza możliwa do obliczenia na podstawie różnicy wskazań wagi pomiędzy odczytami. Wyniki są archiwizowane i dostępne dla użytkownika w postaci arkuszy programu Excel z wynikami odczytów w zadanym czasie próbkowania.



STOP 25 50 75 100 Material Kukurydza S 77 Vydajność kg/h

a) Moduł sterowania silnikiem krokowym ADP 8084



b) Widok bloku oprogramowania podajnika



c) Widok bloku oprogramowania wagi

d) Waga produktu rozdrabniania

Rys. 4.14. Elementy zintegrowanego systemu identyfikacji technik rozdrabniania

Integralną częścią systemu identyfikacji technik rozdrabniania jest specjalistyczne oprogramowanie pomiarowo-sterujące Młyn 2018 wraz z interfejsem komunikacyjnym, działające w środowisku LabView (Rys. 4.15).



Rys. 4.15. Interfejs komunikacyjny oprogramowania Młyn 2018

Dzięki temu możliwe jest sterowanie nastawami rozdrabniacza oraz odczyt wielkości wyjściowych. Parametry na bieżąco monitorowane, stanowiące sygnały wejściowe to:

- temperatura otoczenia,
- względna wilgotność powietrza otoczenia,
- obecność materiału wsadowego w koszu zasypowym,
- pobór mocy przez poszczególne silniki rozdrabniacza,
- momenty obrotowe na wałach przeniesienia napędu na tarcze robocze,
- zarejestrowane cyfrowe obrazy materiału rozdrobnionego.

Operator systemu może sterować prędkościami kątowymi na poszczególnych tarczach rozdrabniacza pięciotarczowego oraz prędkością podawania wsadu do komory rozdrabniania (Rys. 4.16). W wyniku działania oprogramowania po każdorazowym rozdrabnianiu uzyskiwane i archiwizowane są informacje dotyczące rozdrobnienia produktu, nastaw podajnika i prędkości kątowych tarcz. Wszystkie monitorowane wartości dostępne są w postaci arkusza Excel, a dodatkowo chwilowe przebiegi mocy, momentów obrotowych i histogram rozdrobnienia materiału w postaci graficznej wyświetlane są na bieżąco z poziomu interfejsu komunikacyjnego (Rys. 4.17).



Rys. 4.16. Interfejs komunikacyjny – blok sterowania dla operatora systemu

Rys. 4.17. Interfejs komunikacyjny – blok wyników

Uruchomienie i zatrzymanie rozdrabniacza i systemu pomiarowego rozpoczyna się po kliknięciu przycisku NAPĘD, poszczególne tarcze uruchamiane i zatrzymywane są za pomocą przycisków i pokręteł nastawy tarcz roboczych (TARCZA 1 – TARCZA 5), podajnik za pomocą przycisku PODAJNIK (Rys. 4.16). Kończenie pracy aplikacji następuje po wciśnięciu przycisku System STOP. O stanie aplikacji informują diody LED znajdujące się na pasku stanu (Rys. 4.15).

Użytkownik aplikacji posiada również możliwość sterowania prędkością zapisu i wyświetlania wyników za pomocą suwaka Prędkość Aplikacji oraz zapisanie plików pod wskazaną przez siebie nazwą wpisaną w polu Eksperyment/Materiał (Rys. 4.18). Rejestracja wyników rozpoczyna się po naciśnięciu Przycisku REJESTRACJA START. O włączonej rejestracji informuje zapalona na zielono dioda.



Rys. 4.18. Pasek rejestracji/zapisu wyników

### Moduł logistyczny

Moduł logistyczny stanowi kosz zasypowy wraz z podajnikiem ślimakowym, który podaje wsad do komory rozdrabniania oraz kosz odbiorczy. Prędkość dozowania wsadu można zmieniać w zakresie od 0% do 100% maksymalnej wydajności.

## 4.7. PLAN I PROGRAM BADAŃ

W procesie rozdrabniania koniecznym jest ustalenie wielu właściwości dotyczących maszyny (cechy konstrukcyjne, cechy ruchowe: zakresy prędkości tarcz, momenty obrotowe; cechy energetyczne, skuteczność i sprawność przetwarzania, wzajemne relacje oddziaływań elementów tnących z materiałem rozdrabnianym), materiału (wilgotność, struktura postaciowa, geometra, gęstość, gęstość nasypowa, kąt usypu, cechy wytrzymałościowe itd.) oraz procesu (siły tnące, opory, przepływ materiału przez rozdrabniacz, szybkość podawania, itd.).

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

• ETAP I: Wyznaczenie własności wytrzymałościowych ziaren rozdrabnianych

Przewidziano na tym etapie wykonanie badań właściwości wytrzymałościowych materiałów rozdrabnianych, a przede wszystkim wyznaczenie wytrzymałości na ściskanie oraz ścinanie. Próbę ściskania i ścinania ze stałą prędkością  $v_s$ =2 mm·s<sup>-1</sup> przeprowadzono dla 100 ziaren ryżu i 100 ziaren kukurydzy na maszynie wytrzymałościowej Instron 5966. Przed badaniem zasadniczym wykonano pomiar trzech wymiarów charakterystycznych ziaren: długości, wysokości i szerokości oraz wyznaczono masę każdego ziarna.

Próbę ścinania ze zmienną prędkością przeprowadzono na maszynie wytrzymałościowej Instron E3000. Ziarna ścinano z czterema różnymi prędkościami: 0,05 m·s<sup>-1</sup>, 0,1 m·s<sup>-1</sup>, 0,15 m·s<sup>-1</sup> i 0,2 m·s<sup>-1</sup>.

# • ETAP II: Eksperyment maszynowy

Eksperyment maszynowy obejmował badania w warunkach rozdrabniacza wielotarczowego z systemem monitorowania parametrów procesu. Przyjęto stałą wydajność dozowania  $V_p$  za pomocą podajnika ślimakowego na poziomie 100 %. Sterowano wartościami prędkości kątowych tarcz rozdrabniacza w celu określenia, jaki wpływ wywierają one na energochłonność oraz emisje CO<sub>2</sub> procesu rozdrabniania. Nastawy prędkości zmieniano z pewnym określonym gradientem. W planie badawczym uwzględniono pięć różnych programów badań (PB) nastaw prędkości kątowych w zależności od sposobu przyrostu prędkości:

- pierwszy (PB I), ze wzrostem prędkości o  $\Delta \omega$  w stosunku do każdej tarczy ze stałą prędkością  $\omega_1$ , na tarczy 1 (Tabela 4.4),
- drugi (PB II), gdzie prędkości kątowe malały o  $\Delta \omega$  w stosunku do każdej tarczy ze stałą prędkością  $\omega_5$  na tarczy 5, (Tabela 4.5),
- --- trzeci (PB III), gdzie prędkości kątowe naprzemiennie rosły i malały o  $\Delta \omega$  w stosunku do każdej tarczy, a w kolejnych konfiguracjach zwiększano prędkość wyjściową ω<sub>1</sub> (Tabela 4.6),
- czwarty (PB IV), gdzie prędkości kątowe naprzemiennie rosły i malały o  $\Delta \omega$  w stosunku do każdej tarczy, a w kolejnych konfiguracjach zwiększano przyrost prędkości  $\Delta \omega$  (Tabela 4.7),
- piąty (PB V), gdzie prędkości kątowe naprzemiennie malały i rosły o  $\Delta \omega$  w stosunku do każdej tarczy, a w kolejnych konfiguracjach zmniejszano przyrost prędkości  $\Delta \omega$  (Tabela 4.8),

W każdym przypadku rozdrabniano 1 kg wsadu, rejestrowano pobór mocy i momenty obrotowe na poszczególnych tarczach, wilgotność oraz wymiar średni wsadu.

PB Konfiguracja	$\omega_1$	$\omega_2$	ω3	$\omega_4$	ω5	Δω	
	Honinguruoju	rad·s <sup>-1</sup>	$rad \cdot s^{-1}$				
Ι	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 4.4. I	Konfiguracje	ustawień prędkośc	i tarcz roboczych	dla PB I			
---------------	--------------	-------------------	-------------------	----------			
PB	Konfiguracja	$\omega_1$	$\omega_2$	$\omega_3$	$\omega_4$	$\omega_5$	Δω
----	--------------	--------------------	--------------------	--------------------	--------------------	--------------------	---------------------
		$rad \cdot s^{-1}$	rad∙s <sup>-1</sup>				
	1	100	80	60	40	20	20
п	2	80	65	50	35	20	15
11	3	60	50	40	30	20	10
	4	40	35	30	25	20	5

Tabela 4.5. Konfiguracje ustawień prędkości tarcz roboczych dla PB II

Tabela 4.6. Konfiguracje ustawień prędkości tarcz roboczych dla PB III

РВ	Konfiguracia	$\omega_1$	$\omega_2$	$\omega_3$	$\omega_4$	$\omega_5$	Δω
	Ronnguracja	$rad \cdot s^{-1}$	$rad \cdot s^{-1}$	rad∙s <sup>-1</sup>	rad∙s <sup>-1</sup>	rad∙s <sup>-1</sup>	rad∙s <sup>-1</sup>
	1	20	40	20	40	20	20
ш	2	45	25	45	25	45	20
111	3	75	50	75	50	75	25
	4	100	80	100	80	100	20

Tabela 4.7. Konfiguracje ustawień prędkości tarcz roboczych dla PB IV

РВ	Konfiguracja	$\omega_1$	$\omega_2$	$\omega_3$	$\omega_4$	$\omega_5$	Δω
		$rad \cdot s^{-1}$					
	1	20	40	20	40	20	20
117	2	20	60	20	60	20	40
IV	3	20	80	20	80	20	60
	4	20	100	20	100	20	80

Tabela 4.8.	Konfiguracje	ustawień	prędkości	tarcz robo	oczych dla	PB V	V
-------------	--------------	----------	-----------	------------	------------	------	---

PB	Konfiguracja	$\omega_1$	$\omega_2$	$\omega_3$	$\omega_4$	$\omega_5$	$\Delta \omega$
		$rad \cdot s^{-1}$					
	1	100	20	100	20	100	80
V	2	100	40	100	40	100	60
V	3	100	60	100	60	100	40
	4	100	80	100	80	100	20

# • ETAP III: Analiza wyników

Etap ten obejmuje:

- analizę uzyskanych wyników w zakresie wytrzymałości ziaren oraz wpływu prędkości ścinania na energię rozdrabniania.
- Analizę wpływu zmian prędkości kątowych na kryteria oceny rozdrabniania: wydajność, jednostkowe zapotrzebowanie na energię, stopień rozdrobnienia, zintegrowaną energochłonność, emisyjność zrównoważoną oraz funkcję oceny energetycznośrodowiskowej.

W tabeli 4.9 przedstawiono wyszczególnienie planowanych działań i aparatury potrzebnej do realizacji badań.

Działania	Metody	Instrumer	ntarium
Określenie właściwości wytrzymałościowych	Statyczna próba ściskania, próba ścinania ze stałą prędkością vs	Maszyna wytrzymałościowa z napędem śrubowym INSTRON 5966.	
biomasy ziarnistej przyjętej do badań (ryż, kukurydza)	Próba ścinania ze zmienną prędkością vs	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 pięciotarczowy RWT_KZ_5 z systemem monitorowania parametrów procesu	
Analiza wyników	Analizy statystyczne	MS Office Excel, Statistica	-

Tabela 4.9. Zestawienie planowanych działań i wykorzystywanej aparatury

# 5. WYNIKI BADAŃ

# 5.1. WYNIKI BADAŃ LABORATORYJNYCH

Znajomość sił powodujących pęknięcie (zniszczenie) ziarna można uznać za pierwszy krok do wyznaczenia zapotrzebowania na energię w procesie rozdrabniania ziaren.

#### 5.1.1. 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,
- *Rc* granicę wytrzymałości na ściskanie, MPa,
- *W*<sub>I</sub> 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 (Rys. 5.1), a dla kukurydzy w przedziale (110,74-1539,94) N (Rys. 5.2). Naprężenia  $R_c$  dla ryżu zawierały się w przedziale (6,74-42,65) MPa, a dla kukurydzy odpowiednio (2,12-15,06) MPa. Praca  $W_I$  dla ryżu zawierała się w przedziale (0,48-98,93) mJ, a dla kukurydzy (25,02-557,74) mJ.



Rys. 5.1. Wykres sił ściskających  $F_s$ dla poszczególnych ziaren ryżu w odniesieniu do ich objętości



Rys. 5.2. Wykres sił  $F_s$  dla poszczególnych ziaren kukurydzy w odniesieniu do ich objętości

Na podstawie otrzymanych wyników stwierdza się, że wartości sił  $F_s$  oraz pracy  $W_1$  okazały się większe dla kukurydzy niż dla ryżu (Tabela 5.1). Z kolei ziarna ryżu charakteryzowały się większą wartością naprężeń ściskających  $R_c$  niż ziarna kukurydzy (Tabela 5.1).

Tabela 5.1. Analiza statystyczna wyników badań sił, naprężeń i pracy ściskania ziaren ryżu i kukurydzy

Wielkość		Ryż			Kukurydza	
	$\overline{x}$	S	М	$\overline{x}$	S	М
$V(\rho), g \cdot cm^{-3}$	14,82	2,39	14,41	251,17	43,08235	250,00
$F_s$ , N	174,99	80,38	158,12	630,06	267,8477	615,43
$R_c$ , MPa	14,71	7,45	12,72	7,50	3,014632	7,45
W <sub>I</sub> , mJ	28,03	20,36	22,46	211,97	124,4396	187,67

 $F_s$  – maksymalna siła ściskająca, Rc – granica wytrzymałości na ściskanie,  $W_I$  – praca wykonana nad ziarnem do momentu pierwszego pęknięcia,  $\overline{x}$  – wartość średnia, s – odchylenie standardowe, M – mediana

Analiza związków pomiędzy badanymi wielkościami pozwala na stwierdzenie, że istnieje korelacja prawie pewna pomiędzy siłą maksymalną  $F_s$ , a wytrzymałością na ściskanie  $R_c$  dla obu rodzajów ziaren ściskanych (Tabela 5.2., Tabela 5.3.). Wysoką korelację odnotowano pomiędzy pracą  $W_I$ oraz siłą maksymalną  $F_s$  oraz wytrzymałością na ściskanie  $R_c$  zarówno dla ryżu jak i dla kukurydzy. W przypadku ściskania kukurydzy wysoka korelacja wystąpiła pomiędzy siłą maksymalną  $F_s$  oraz wytrzymałością na ściskanie  $R_c$ . Pozostałe wielkości w przypadku obu ziaren korelowały ze sobą w sposób słaby.

Tabela 5.2. Analiza korelacji pomiędzy badanymi wielkościami w próbie ściskania dla ziaren ryżu

	Fs, N	<i>R</i> <sub>c</sub> , MPa	W <sub>I,</sub> mJ
$F_s$ , N	1		
$R_c$ , MPa	0,915	1	
W <sub>I</sub> , mJ	0,532	0,523	1

 $F_s$  – maksymalna siła ściskająca, Rc – granica wytrzymałości na ściskanie,  $W_I$  – praca wykonana nad ziarnem do momentu pierwszego pęknięcia

Tabela 5.3. Analiza korelacji pomiędzy badanymi wielkościami w próbie ściskania dla ziaren kukurydzy

	Fs, N	$R_c$ , MPa	W <sub>I,</sub> mJ
Fs, N	1		
R <sub>c</sub> , MPa	0,921	1	
W <sub>I</sub> , mJ	0,593	0,540	1

 $F_s$  – maksymalna siła ściskająca, Rc – granica wytrzymałości na ściskanie,  $W_I$  – praca wykonana nad ziarnem do momentu pierwszego pęknięcia

## 5.1.2. Wyniki badań dla próby ścinania

## Ścinanie ze stałą prędkością vs

Na podstawie wartości sił i przemieszczeń uzyskanych podczas próby ścinania ze stalą 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 (Rys. 5.3 i Rys. 5.4). 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.



Rys. 5.3. Wykres sił tnących  $F_T$  dla poszczególnych ziaren ryżu w odniesieniu do ich objętości



Rys. 5.4. Wykres sił tnących  $F_T$  dla poszczególnych ziaren kukurydzy w odniesieniu do ich objętości

Na podstawie otrzymanych wyników stwierdza się, że wartości sił  $F_T$  oraz pracy  $W_T$  okazały się większe dla kukurydzy niż dla ryżu (Tabela 5.4). Z kolei

ziarna ryżu charakteryzowały się większą wartością naprężeń tnących  $\tau$  niż ziarna kukurydzy (Tabela 5.4). Otrzymane wartości sił, naprężeń i pracy cięcia (Tabela 5.4) w przypadku obu ziaren były niższe niż wartości sił, naprężeń i pracy ściskania (Tabela 5.1).

Tabela 5.4. Analiza statystyczna wyników badań sił  $F_T$ , naprężeń  $\tau$  i pracy ścinania  $W_T$  ziaren ryżu i kukurydzy

Wielkość		Ryż			Kukurydza	
	$\overline{x}$	S	М	$\overline{x}$	S	М
$V(\rho), g \cdot cm^{-3}$	14,40	2,50	14,50	272,70	46,20	270,30
$F_{T}$ , N	32,16	13,81	33,00	119,76	57,51	109,60
τ, MPa	6,46	2,81	6,40	4,54	2,22	4,10
$W_{\rm T,}~{ m mJ}$	1,04	1,07	0,80	29,34	38,98	2,20

 $\overline{x}$  – wartość średnia, s – odchylenie standardowe, M – mediana,  $V(\rho)$  – objętość ziarna

Analiza związków pomiędzy badanymi wielkościami pozwala na stwierdzenie, że istnieje korelacja prawie pewna pomiędzy siłą tnącą  $F_T$ , a naprężeniami ścinającymi  $\tau$  dla obu rodzajów ziaren (Tabela 5.5, Tabela 5.6). Pozostałe wielkości w przypadku obu ziaren korelowały ze sobą w sposób słaby (*r*-Pearsona<0,4).

Tabela 5.5. Analiza korelacji pomiędzy badanymi wielkościami w próbie ścinania dla ziaren ryżu

	$F_T$ , N	τ, MPa	W <sub>T,</sub> mJ
$F_T$ , N	1		
τ, MPa	0,946	1	
W <sub>T</sub> , mJ	0,355	0,281	1
		***	

 $F_T-$ siła tnąca,  $\tau-$  naprężenia tnące,  $W_T-$  praca cięcia

Tabela 5.6. Analiza korelacji pomiędzy badanymi wielkościami w próbie ścinania dla ziaren kukurydzy

	$F_T$ , N	τ, MPa	W <sub>T</sub> , mJ
$F_T$ , N	1		
τ, MPa	0,961	1	
W <sub>T</sub> , mJ	0,373	0,319	1
		117	• •

 $F_T$  – siła tnąca,  $\tau$  – naprężenia tnące,  $W_T$  – praca cięcia

## Ścinanie z różnymi prędkościami vs

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 (Tabela 5.7, Tabela 5.8). Z kolei ziarna ryżu charakteryzowały się większą wartością naprężeń tnących  $\tau$  niż ziarna kukurydzy (Tabela 5.7, Tabela 5.8). Podobne rezultaty otrzymano w próbie ścinania ze stałą, małą wartością  $v_s=2 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$ .

		$\overline{x}$	S	М	Max	Min	$R_p$	S
0.05	$F_T$ , N	23,12	3,01	23,93	26,33	19,10	7,23	-0,94
$v_s=0.05$ m·s <sup>-1</sup>	τ, MPa	8,02	1,04	8,30	9,13	6,62	2,51	-0,94
111 5	W <sub>T</sub> , mJ	3,27	1,65	2,22	5,60	1,99	3,61	1,71
	$F_T$ , N	27,34	3,74	25,39	32,57	24,05	8,52	1,57
$v_s=0,1$ m·s <sup>-1</sup>	τ, MPa	9,48	1,30	8,80	11,29	8,34	2,95	1,57
III 5	$W_{\mathrm{T},}~\mathrm{mJ}$	2,22	0,86	1,68	3,44	1,55	1,89	1,71
0.1.5	$F_{T}$ , N	26,59	6,85	28,51	33,85	17,40	16,45	-0,98
$v_s=0,15$ m·s <sup>-1</sup>	τ, MPa	9,22	2,38	9,89	11,74	6,03	5,70	-0,98
III 5	$W_{\mathrm{T},}~\mathrm{mJ}$	3,62	0,20	3,57	3,88	3,40	0,48	0,83
0.0	$F_{T}$ , N	17,44	6,15	21,69	21,88	8,75	13,13	-1,73
$v_s=0,2$ m·s <sup>-1</sup>	τ, MPa	6,05	2,13	7,52	7,59	3,03	4,55	-1,73
in b	W <sub>T</sub> , mJ	1,23	0,42	1,35	1,68	0,66	1,02	-0,97

Tabela 5.7. Wyniki analizy statystycznej zmiennych w próbie ścinania ziaren ryżu z różnymi prędkościami  $v_s$ 

 $v_s$  – prędkość ścinania,  $F_T$  – siła tnąca,  $\tau$  – naprężenia tnące,  $W_T$  – praca cięcia,  $\overline{x}$  – wartość średnia, s – odchylenie standardowe, M – mediana, max – wartość maksymalna, min – wartość minimalna,  $R_p$  – rozstęp, S – skośność

Tabela 5.8. Wyniki analizy statystycznej zmiennych w próbie ścinania ziaren kukurydzy z różnymi prędkościami  $v_s$ 

		$\overline{x}$	S	М	Max	Min	$R_p$	S
	$F_T$ , N	139,62	34,57	149,74	175,99	93,14	82,86	-1,01
$v_s=0,05$ m·s <sup>-1</sup>	τ, MPa	3,64	0,90	3,91	4,59	2,43	2,16	-1,01
III 5	$W_{\mathrm{T},}\mathrm{mJ}$	57,92	17,61	52,24	81,75	39,77	41,99	1,10
0.1	$F_{T}$ , N	158,01	22,09	151,65	187,68	134,71	52,97	1,00
$v_s=0,1$ m·s <sup>-1</sup>	τ, MPa	4,12	0,58	3,96	4,90	3,52	1,38	1,00
III 5	W <sub>T</sub> , mJ	80,03	13,07	72,85	98,37	68,87	29,50	1,61
0.1.5	$F_{T}$ , N	115,50	14,04	107,64	135,22	103,64	31,58	1,63
$v_s=0,15$ m·s <sup>-1</sup>	τ, MPa	3,02	0,37	2,81	3,53	2,71	0,82	1,63
III 5	W <sub>T</sub> , mJ	91,29	38,04	81,64	141,96	50,28	91,67	0,89
0.0	$F_{T}$ , N	137,73	19,29	150,82	151,91	110,46	41,45	-1,73
$v_s=0,2$ m·s <sup>-1</sup>	τ, MPa	3,60	0,50	3,94	3,97	2,88	1,08	-1,73
	W <sub>T,</sub> mJ	83,10	60,98	45,22	169,13	34,94	134,19	1,70

 $v_s$  – prędkość ścinania,  $F_T$  – siła tnąca,  $\tau$  – naprężenia tnące,  $W_T$  – praca cięcia,  $\overline{x}$  – wartość średnia, s – odchylenie standardowe, M – mediana, max – wartość maksymalna, min – wartość minimalna,  $R_p$  – rozstęp, S – skośność

W celu ustalenia związków prędkości ścinania z siłą cięcia  $F_T$ , naprężeniami tnącymi  $\tau$  i pracą ścinania  $W_T$  przeprowadzono analizę korelacji związków monotonicznych między zmiennymi metodą Spearmana. 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 (Tabela 5.9).

Tabela 5.9. Wyniki analizy związków pomiędzy prędkością ścinania  $v_s$  a siłą cięcia  $F_T$ , naprężeniami tnącymi  $\tau$  i pracą ścinania  $W_T$ 

			$F_T$ , N	τ, MPa	$W_{\mathrm{T},}~\mathrm{mJ}$
	laulaumudao	Rho-Spearmana	-0,6	-0,6	0,8
	кикигуаza	Istotność	0,4	0,4	0,2
Vs	an tà	Rho-Spearmana	-0,4	-0,4	-0,4
	ryz	Istotność	0,6	0,6	0,6

# 5.1.3. Wyniki badań mocy, wydajności, jednostkowego zapotrzebowania na energię, stopnia rozdrobnienia

Badania rozdrabniania przeprowadzono wg. 5 programów badawczych. W tabeli 5.10 i 5.11 zestawiono najważniejsze uzyskane wyniki, dla których w następstwie wykonano statystykę opisową oraz analizę korelacji z wykorzystaniem oprogramowania MS EXCEL oraz Statistica.

Tabela 5.10. Wyniki badań zmiennych w procesie rozdrabniania kukurydzy dla pięciu programów badawczych

PB	Konf.	$W_m$	$D_{80}$	$P_R$	$P_{bj}$	$P_{qs}$	$E_j$	Q <sub>r</sub>	i <sub>80</sub>
		%	mm	kW	kW	kW	kWh	kg∙h <sup>-1</sup>	-
	1	12,7	8,215	1,088	0,925	0,164	0,072	15,2	2,29
т	2	12,6	7,832	1,513	1,126	0,387	0,081	18,6	4,17
1	3	12,8	8,173	1,894	1,303	0,591	0,096	19,8	4,76
	4	12,5	8,222	2,270	1,494	0,776	0,100	22,8	4,99
	1	12,6	8,104	1,860	1,187	0,673	0,061	30,6	4,31
п	2	12,7	8,206	1,700	1,089	0,611	0,057	29,7	3,85
11	3	12,8	7,944	1,309	0,911	0,398	0,046	28,2	3,69
	4	12,6	8,145	0,971	0,715	0,256	0,037	26,3	3,60
ш	1	12,6	8,223	0,914	0,666	0,248	0,038	24,0	3,41
111	2	12,7	8,136	1,406	0,957	0,449	0,053	26,4	3,67

cd. tabeli 5.10

	3	12,8	8,075	2,519	1,526	0,992	0,085	29,6	3,90
	4	12,7	8,099	3,106	1,903	1,203	0,096	32,4	4,44
	1	12,5	8,167	0,914	0,666	0,248	0,038	24,0	3,41
IV.	2	12,8	8,235	1,348	0,739	0,609	0,102	13,2	3,72
IV	3	12,7	8,217	1,540	0,876	0,664	0,214	7,2	4,08
	4	12,9	8,210	1,815	0,984	0,831	0,422	4,3	4,27
	1	12,7	8,207	2,310	1,487	0,822	0,412	5,6	5,11
V	2	12,6	8,216	2,652	1,539	1,113	0,154	17,2	4,67
v	3	12,5	8,198	2,702	1,679	1,023	0,100	27,0	4,59
	4	12,7	8,203	3,106	1,903	1,203	0,096	32,4	4,44

PB – program badawczy, konf. – konfuguracja,  $W_m$  – wilgotność materiału,  $D_{80}$  – wymiar cząstek, stanowiących 80% objętości nadawy,  $P_R$  – pobór mocy na rozdrabnianie,  $P_{bj}$  – pobór mocy na bieg jałowy,  $P_{qs}$  – pobór mocy na quasi-ścinanie,  $E_j$  – jednostkowe zapotrzebowanie na energię,  $Q_r$  – wydajność,  $i_{80}$  – 80% stopień rozdrobnienia

Tabela 5.11. Wyniki badań zmiennych w procesie rozdrabniania ryżu dla pięciu programów badawczych

PB	Konf.	$W_m$	$D_{80}$	$P_R$	$P_{bj}$	$P_{qs}$	$E_{j}$	$Q_r$	i <sub>80</sub>
	,	%	mm	kW	kW	kW	kWh	kg∙h <sup>-1</sup>	-
	1	13,2	2,142	1,089	0,925	0,164	0,042	26,1	1,05
т	2	13,6	2,153	1,428	1,126	0,302	0,053	27,1	1,11
1	3	13,4	2,139	1,734	1,303	0,430	0,059	29,2	1,15
	4	13,5	2,148	2,056	1,494	0,562	0,067	30,6	1,23
	1	13,4	2,150	1,623	1,187	0,436	0,054	29,8	1,13
п	2	13,3	2,153	1,420	1,089	0,331	0,049	28,7	1,09
11	3	13,6	2,148	1,158	0,911	0,247	0,043	27,2	1,07
	4	13,5	2,163	0,885	0,715	0,170	0,034	26,1	1,06
	1	13,4	2,116	0,838	0,666	0,172	0,033	25,2	1,04
тт	2	13,7	2,123	1,231	0,957	0,274	0,046	27,0	1,06
111	3	13,6	2,128	1,986	1,526	0,460	0,069	28,8	1,16
	4	13,2	2,138	2,482	1,903	0,580	0,081	30,5	1,31
	1	13,4	2,155	0,838	0,666	0,172	0,027	30,6	1,06
117	2	13,5	2,133	1,022	0,739	0,282	0,035	29,6	1,09
1V	3	13,6	2,146	1,206	0,876	0,330	0,042	28,8	1,17
	4	13,5	2,134	1,368	0,984	0,384	0,051	27,0	1,21

cd. tabeli 5.11

	1	12.4	2 1 2 0	1.074	1 407	0.407	0.075	26.2	1.20
	1	15,4	2,129	1,974	1,487	0,487	0,075	20,2	1,20
V	2	13,4	2,147	2,079	1,539	0,540	0,077	27,0	1,22
v	3	13,5	2,142	2,210	1,679	0,531	0,079	27,9	1,26
	4	13,6	2,144	2,482	1,903	0,580	0,083	29,9	1,31

PB – program badawczy, konf. – konfuguracja,  $W_m$  – wilgotność materiału,  $D_{80}$  – wymiar cząstek, stanowiących 80% objętości nadawy,  $P_R$  – pobór mocy na rozdrabnianie,  $P_{bj}$  – pobór mocy na bieg jałowy,  $P_{qs}$  – pobór mocy na quasi-ścinanie,  $E_j$  – jednostkowe zapotrzebowanie na energię,  $Q_r$  – wydajność,  $i_{80}$  – 80% stopień rozdrobnienia

Na podstawie przeprowadzonej analizy statystyk opisowych zmiennych w procesie rozdrabniania kukurydzy, stwierdzono, że wyniki uzyskane dla prędkości kątowych tarczy 2 i 4, wilgotności, średnicy wsadu, poboru mocy na rozdrabnianie, bieg jałowy i quasi-ścinanie, wydajności i stopnia rozdrobnienia charakteryzowały się małą zmiennością (współczynnik zmienności V poniżej 0,5). Dla pozostałych zmiennych współczynnik zmienności wskazywał na dużą różnorodność i zmienność wyników (Tabela 5.12) (V>0,5).

Tabela 5.12. Wyniki analizy statystycznej badanych zmiennych w procesie rozdrabniania ziaren kukurydzy

Zmienna	Jednostka	$\overline{x}$	S	М	max	min	$R_p$	V
$\omega_1$	rad·s <sup>-1</sup>	54,00	35,93	42,50	100,00	20,00	80,00	0,665
$\omega_2$	$rad \cdot s^{-1}$	51,75	22,78	45,00	100,00	20,00	80,00	0,440
$\omega_3$	$rad \cdot s^{-1}$	54,00	31,23	47,50	100,00	20,00	80,00	0,578
$\omega_4$	$rad \cdot s^{-1}$	51,75	22,78	45,00	100,00	20,00	80,00	0,440
$\omega_5$	$rad \cdot s^{-1}$	54,00	35,93	42,50	100,00	20,00	80,00	0,665
$\Delta \omega$	$rad \cdot s^{-1}$	29,25	23,19	20,00	80,00	5,00	75,00	0,793
$W_m$	%	12,68	0,11	12,70	12,90	12,50	0,40	0,009
$D_{80}$	mm	8,15	0,10	8,20	8,24	7,83	0,40	0,013
$P_R$	kW	1,85	0,70	1,76	3,11	0,91	2,19	0,382
$P_{bj}$	kW	1,18	0,40	1,11	1,90	0,67	1,24	0,337
$P_{qs}$	kW	0,66	0,33	0,64	1,20	0,16	1,04	0,496
$E_j$	kWh	0,12	0,11	0,09	0,42	0,04	0,39	0,937
Q	kg·h <sup>-1</sup>	21,73	8,83	24,00	32,40	4,30	28,10	0,406
$i_{80}$	-	4,07	0,66	4,13	5,11	2,29	2,82	0,161

 $\overline{x}$  – wartość średnia, *s* – odchylenie standardowe, M – mediana, max – wartość maksymalna, min – wartość minimalna,  $R_p$  – rozstęp, V – współczynnik zmienności,  $\omega_1$ ,  $\omega_2$ ,  $\omega_3$ ,  $\omega_4$ ,  $\omega_5$ , – prędkości kątowe tarcz,  $\Delta\omega$  – przyrost prędkości kątowych,  $W_m$  – wilgotność materiału,  $D_{80}$  – wymiar cząstek, stanowiących 80% objętości nadawy,  $P_R$  – pobór mocy na rozdrabnianie,  $P_{bj}$  – pobór mocy na bieg jałowy,  $P_{qs}$  – pobór mocy na quasi-ścinanie,  $E_j$  – jednostkowe zapotrzebowanie na energię,  $Q_r$  – wydajność,  $i_{80}$  – 80% stopień rozdrobnienia

Podobną analizę przeprowadzono dla zmiennych podczas rozdrabniania ryżu. W odróżnieniu od testu przeprowadzonego dla kukurydzy do zmiennych o małej zmienności zalicza się jednostkowe zużycie energii. Zaobserwowano także, że zmienność wyników w zakresie średnicy wsadu, poboru mocy na rozdrabnianie, bieg jałowy i quasi-ścinanie, wydajności i stopnia rozdrobnienia była mniejsza w przypadku ryżu (Tabela 5.13).

Zmienna	Jednostka	$\overline{x}$	S	М	max	min	$R_p$	V
$\omega_1$	rad·s <sup>-1</sup>	54,00	35,93	42,50	100,00	20,00	80,00	0,665
$\omega_2$	$rad \cdot s^{-1}$	51,75	22,78	45,00	100,00	20,00	80,00	0,440
ω3	$rad \cdot s^{-1}$	54,00	31,23	47,50	100,00	20,00	80,00	0,578
$\omega_4$	$rad \cdot s^{-1}$	51,75	22,78	45,00	100,00	20,00	80,00	0,440
$\omega_5$	rad·s <sup>-1</sup>	54,00	35,93	42,50	100,00	20,00	80,00	0,665
$\Delta \omega$	rad·s <sup>-1</sup>	29,25	23,19	20,00	80,00	5,00	75,00	0,793
$W_m$	%	13,47	0,13	13,50	13,70	13,20	0,50	0,010
$D_{80}$	mm	2,14	0,01	2,14	2,16	2,12	0,05	0,005
$P_R$	kW	1,56	0,54	1,42	2,48	0,84	1,64	0,346
$P_{bj}$	kW	1,18	0,40	1,11	1,90	0,67	1,24	0,337
$P_{qs}$	kW	0,37	0,15	0,36	0,58	0,16	0,42	0,395
$E_j$	kWh	0,05	0,02	0,05	0,08	0,03	0,06	0,325
Q	kg·h <sup>-1</sup>	28,17	1,70	28,30	30,60	25,20	5,40	0,060
<i>i</i> <sub>80</sub>	-	1,15	0,09	1,14	1,31	1,04	0,27	0,075

Tabela 5.13. Wyniki analizy statystycznej badanych zmiennych w procesie rozdrabniania ziaren ryżu

 $\overline{x}$  – wartość średnia, *s* – odchylenie standardowe, M – mediana, max – wartość maksymalna, min – wartość minimalna,  $R_p$  – rozstęp, V – współczynnik zmienności,  $\omega_1$ ,  $\omega_2$ ,  $\omega_3$ ,  $\omega_4$ ,  $\omega_5$ , – prędkości kątowe tarcz,  $\Delta\omega$  – przyrost prędkości kątowych,  $W_m$  – wilgotność materiału,  $D_{80}$  – wymiar cząstek, stanowiących 80% objętości nadawy,  $P_R$  – pobór mocy na rozdrabnianie,  $P_{bj}$  – pobór mocy na bieg jałowy,  $P_{qs}$  – pobór mocy na quasi-ścinanie,  $E_j$  – jednostkowe zapotrzebowanie na energię,  $Q_r$  – wydajność, *i*<sub>80</sub> – 80% stopień rozdrobnienia

Po wykonaniu analizy statystycznej przeprowadzono analizę zależności pomiędzy zmiennymi wyznaczając dla nich r-Pearsona oraz istotność korelacji, dla poziomu istotności  $\alpha$ =0,05. W interpretacjach za statystycznie istotne przyjęto wyniki testów dla których *p*<0,05.

Analiza korelacji zmiennych podczas rozdrabniania kukurydzy wykazała bardzo wysoką dodatnią zależność pomiędzy prędkością kątową trzeciej tarczy, a poborem mocy w procesie rozdrabniania oraz poborem mocy na bieg jałowy. Równie silną dodatnią zależność ujawniono pomiędzy prędkością kątową a poborem moc na bieg jałowy. Bardzo silnie dodatnio skorelowane są ze sobą wartości poboru mocy na rozdrabnianie oraz bieg jałowy i quasi-ścinanie (Tabela 5.14). Wysoką korelację dodatnią odnotowano pomiędzy jednostkowym zapotrzebowaniem na energię i przyrostem prędkości kątowych tarcz. Z kolei silnie ujemnie skorelowane były ze sobą wydajność i jednostkowe zapotrzebowanie na energię oraz wydajność i gradient prędkości kątowych tarcz. Wysokie korelacje dodatnie wystąpiły pomiędzy 80% stopniem rozdrobnienia oraz poborem mocy na rozdrabnianie i poborem mocy na quasi-ścinanie. Dokładnie siłę korelacji pomiędzy zmiennymi przedstawiono w tabeli 5.14. Współczynniki korelacji umiarkowanych, wysokich i bardzo wysokich okazały się istotne statystycznie dla procesu rozdrabniania kukurydzy, jak i ryżu (p<0,05).

Analiza wykazała różnice w korelacjach zmiennych w procesie rozdrabniania ryżu i kukurydzy. W przypadku ryżu korelowała ze sobą w sposób bardzo silny i silny większa liczba zmiennych. Zasadnicze różnice wystąpiły w korelacjach jednostkowego zapotrzebowania na energię, wydajności i stopnia rozdrobnienia (Tabela 5.15). Jednostkowe zapotrzebowanie na energię okazało się bardzo mocno uzależnione od prędkości kątowej tarczy trzeciej i tarczy piątej oraz poborów mocy: na rozdrabnianie, bieg jałowy i quasi-ścinanie. W odróżnieniu od procesu rozdrabniania kukurydzy, wydajność nie zależała w stopniu wysokim od żadnej z pozostałych zmiennych, istniały jedynie dodatnie korelacje umiarkowane (Tabela 5.15). Dla stopnia rozdrobnienia związek pomiędzy poborem mocy na rozdrabnianie i poborem mocy na quasi-ścinanie był bardzo silny, gdy w przypadku procesu rozdrabniania kukurydzy tylko silny.

		ωI	$\omega_2$	<i>w</i> <sup>3</sup>	004	ω <sub>5</sub>	$\sqrt{\omega}$	$W_m$	$D_{80}$	$P_R$	$P_{bj}$	$P_{qs}$	$E_{j}$	$Q_r$	$i_{80}$
	r (	0,230	1,000												
$\omega_2^{-1}$	) d	0,328													
	r	0,869	0,043	1,000											
$\omega^{3}$	p = 0	,000	0,856												
;	r	0,155	0,696	0,043	1,000										
€ 84 -	p = 0	,513	0,001	0,856											
	r	0,511	-0,155	0,869	0,230	1,000									
ω <sup>2</sup>	p = 0	0,021	0,513	0,000	0,328										
	r (	0,163	0,287	0,188	0,287	0,163	1,000								
	$\frac{p}{0}$	,491	0,221	0,428	0,221	0,491									
117	r	0,098	0,307	-0,173	0,225	-0,203	0,246	1,000							
M <sup>m</sup>	p = 0	,680	0,187	0,465	0,341	0,391	0,295								
4	- -	0,003	0,149	0,032	0,198	0,059	0,405	-0,041	1,000						
ر 80	p 0	066'	0,530	0,892	0,402	0,804	0,077	0,863							
2	r (	0,728	0,354	0,904	0,444	0,843	0,290	0,017	0,091	1,000					
$\Gamma_R$	p 0	,000	0,126	0,000	0,050	0,000	0,215	0,944	0,704						
2	r (	0,716	0,210	0,930	0,355	0,900	0,142	-0,064	0,008	0,975	1,000				
$\mathbf{r}_{bj}$	p 0	,000	0,374	0,000	0,124	0,000	0,551	0,787	0,974	0,000					
Q	r (	0,693	0,505	0,810	0,522	0,715	0,449	0,114	0,185	0,963	0,878	1,000			
r qs	p 0	,001	0,023	0,000	0,018	0,000	0,047	0,632	0,435	0,000	0,000				
L.	r (	0,070	0,239	0,138	0,317	0,170	0,898	0,390	0,273	0,253	0,159	0,350	1,000		
Ľ.	$p \mid 0$	,769	0,309	0,561	0,171	0,473	0,000	0,089	0,242	0,281	0,502	0,130			
C	r (	0,426	0,060	0,316	-0,179	0,123	-0,729	-0,300	-0,282	0,223	0,297	0,118	-0,774	1,000	
Ŕ	p 0	,061	0,802	0,175	0,451	0,604	0,000	0,199	0,229	0,345	0,204	0,619	0,000		
.,	r (	0,436	0,190	0,632	0,370	0,663	0,469	-0,086	0,044	0,704	0,667	0,701	0,448	-0,081	1,000
180	p 0	,055	0,421	0,003	0,108	0,001	0,037	0,721	0,849	0,001	0,001	0,001	0,047	0,732	
$r - r_{-}P_{0}$	earso	na, <i>p</i> – i	istotność,	ω1, ω2, ω.	3, 004, 005,	- prędkoś	ści kątowe	$z$ tarcz, $\Delta a$	v – przyrc	ost prędko	sci kątow	ych, $W_m$ -	- wilgotn	ość materi	$a_{1}^{1}$ , $D_{80}$ –
wymia	r czą:	stek, sta	mowiącyc	h 80% ot	jętości na	idawy, $P_{k}$	<ul> <li>Pobór</li> </ul>	mocy na r	ozdrabni	anie, P <sub>bj</sub> -	- pobór m	ocy na bi	eg jałowy	$V, P_{qs} - pc$	bór mocy
na qua	si-ści	nanie, E	$z_j - jednos$	stkowe zaj	potrzebow	vanie na e	${ m nergie}, {\it Q}$	r – wydajr	10ść, i <sub>80</sub> –	80% stol	oień rozdr	obnienia			
	1	Korelacj	ia bardzo	wysoka			- Korelac	ja wysoka				- Korela	cja umiar	kowana	

Tabela 5.14. Wartości współczynników korelacji wraz z istotnością pomiędzy zmiennymi procesu rozdrabniania kukurydzy

	8		ω2	<i>ω</i> <sup>3</sup>	$\omega_4$	$\omega_5$	$\Delta \omega$	$W_m$	$D_{80}$	$P_R$	$P_{bj}$	$P_{qs}$	$E_{j}$	$Q_r$	i <sub>80</sub>
	r 0,2	30	1,000												
$\omega_2$	p 0,3	28													
	r = 0,8	69	0,043	1,000											
$\omega_3$	p 0,0	00	0,856												
	r -0,1	155	0,696	0,043	1,000										
α <sup>4</sup>	p = 0.5	13	0,001	0,856											
;	r = 0.5	11	-0,155	0,869	0,230	1,000									
ω <sup>2</sup>	p 0,0	121	0,513	0,000	0,328										
í V	r 0,10	63	0,287	0,188	0,287	0,163	1,000								
	p = 0,4	.91	0,221	0,428	0,221	0,491									
11/	r -0,1	49	0,004	-0,121	0,072	-0,062	0,084	1,000							
$M_m$	p 0,5	31	0,987	0,611	0,762	0,795	0,726								
4	r 0,0	128	0,076	-0,056	-0,044	-0,125	-0,309	-0,087	1,000						
$\nu_{80}$	$p \mid 0,9$	08	0,750	0,814	0,853	0,599	0,185	0,715							
2	r = 0,7	06	0,250	0,920	0,396	0,892	0,200	-0,075	-0,056	1,000					
$\Gamma R$	p 0,0	01	0,288	0,000	0,084	0,000	0,397	0,755	0,816						
2	r = 0,7	16	0,210	0,930	0,356	0,900	0,142	-0,095	-0,052	0,995	1,000				
$F^{bj}$	p 0,0	00	0,374	0,000	0,124	0,000	0,551	0,691	0,827	0,000					
2	r 0,6	46	0,346	0,847	0,488	0,827	0,348	-0,016	-0,062	0,964	0,933	1,000			
$r_{qs}$	p 0,0	02	0,135	0,000	0,029	0,000	0,132	0,945	0,794	0,000	0,000				
L.	r = 0,7	28	0,176	0,942	0,319	0,910	0,273	-0,056	-0,102	0,985	0,983	0,941	1,000		
Ē.	p 0,0	00	0,457	0,000	0,170	0,000	0,244	0,816	0,668	0,000	0,000	0,000			
¢	r 0,1	23	0,437	0,187	0,498	0,201	-0,145	-0,052	0,277	0,389	0,358	0,451	0,235	1,000	
ڋ	p   0,6	04	0,054	0,431	0,025	0,395	0,543	0,829	0,237	0,090	0,121	0,046	0,319		
.,	r 0,5.	53	0,483	0,763	0,656	0,772	0,413	-0,035	-0,020	0,910	0,887	0,927	0,886	0,415	1,000
180	p 0,0	11	0,031	0,000	0,002	0,000	0,071	0,885	0.934	0,000	0,000	0,000	0,000	0,069	
$r - r-P\epsilon$	earsona,	p - is	totność, c	$v_{1}, w_{2}, w_{3}$	, <i>\omega</i> 4, <i>\omega</i> 5, -	– prędkoś	sci kątowe	tarcz, $\Delta a$	o – przyro	st prędko	ści kątow	ych, $W_{m}$ -	- wilgotne	ość materi	ału, $D_{80}$ –
wymia	r cząstek	k, stan	owiącycł	do %08 ل	jętości na	idawy, $P_{\bar{K}}$	- pobór	mocy na 1	ozdrabnia	nnie, P <sub>bj</sub> –	- pobór m	ocy na bi	eg jałowy	$P_{qs} - pc$	bór mocy
na quas	si-ścinan	nie, $E_j$	- jednos	tkowe zaț	otrzebow	/anie na e	nergię, $\mathcal{Q}$	r – wydaji	10ść, i <sub>80</sub> –	80% stop	ień rozdr	obnienia			
	- Kor	relacja	ا bardzo	wysoka		•	- Korelac	ja wysoka				– Korela	cja umiar	kowana	

Tabela 5.15. Wartości współczynników korelacji wraz z istotnością pomiędzy zmiennymi procesu rozdrabniania ryżu

# 5.2. ANALIZA WYNIKÓW BADAŃ LABORATORYJNYCH ROZDRABNIANIA

#### 5.2.1. Analiza wpływu zmiennych na pobór mocy rozdrabniania

Kolejny etap analizy wyników obejmował określenie, które ze zmiennych niezależnych procesu rozdrabniania wyjaśniają w sposób istotny pobór mocy. W tym celu postanowiono w pierwszej kolejności przeanalizować jak zmiany prędkości kątowej wpływają na pobór mocy w obrębie poszczególnych programów badawczych. Analiza korelacji wykazała, że tylko w PB III przyrost prędkości kątowej nie ma związku z poborem mocy. W przypadku PB I prędkości kątowe tarcz od drugiej do piątej były dodatnio związane z poborem mocy, w PB II z kolei prędkości kątowe tarcz od pierwszej do czwartej. Z przeprowadzonej analizy wynika, że w PB III korelacja dodatnia wystąpiła pomiędzy poborem mocy a prędkościami kątowymi tarczy pierwszej, trzeciej i piątej, a w programach badawczych IV i V pomiędzy poborem mocy i prędkościami kątowymi tarczy drugiej i czwartej (Tabela 5.16).

Tabela 5.16. Współczynniki korelacji r-Pearsona pomiędzy prędkościami kątowymi, przyrostem prędkości a poborem mocy

		$\omega_1$	$\omega_2$	ω <sub>3</sub>	$\omega_4$	$\omega_5$	$\Delta \omega$
	$P_R$	-0,736	0,985	0,985	0,985	0,985	0,985
PB I	$P_{bj}$	-0,730	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000
	$P_{qs}$	-0,741	0,999	0,999	0,999	0,999	0,999
	$P_R$	0,944	0,944	0,944	0,944	0,599	0,944
PB II	$P_{bj}$	0,990	0,990	0,990	0,990	0,611	0,990
	$P_{qs}$	0,788	0,788	0,788	0,788	0,518	0,788
	$P_R$	0,958	0,811	0,958	0,811	0,958	0,326
PB III	$P_{bj}$	0,996	0,846	0,996	0,846	0,996	0,315
	$P_{qs}$	0,785	0,661	0,785	0,661	0,785	0,300
	$P_R$	-0,668	0,845	-0,668	0,845	-0,668	0,845
PB IV	$P_{bj}$	-0,642	0,994	-0,642	0,994	-0,642	0,994
	$P_{qs}$	-0,586	0,638	-0,586	0,638	-0,586	0,638
	$P_R$	0,063	0,965	0,063	0,965	0,063	-0,965
PB V	$P_{bj}$	0,025	0,964	0,025	0,964	0,025	-0,964
	P	0.099	0.835	0.099	0.835	0.099	-0.835

PB – program badawczy,  $\omega_1$ ,  $\omega_2$ ,  $\omega_3$ ,  $\omega_4$ ,  $\omega_5$ , – prędkości kątowe tarcz, rad s<sup>-1</sup>,  $\Delta \omega$  – przyrost prędkości kątowych, rad s-1,  $P_R$  – pobór mocy na rozdrabnianie, kW,  $P_{bj}$  – pobór mocy na bieg jałowy, kW,  $P_{qs}$  – pobór mocy na quasi-ścinanie, kW

-

Korelacja bardzo wysoka, istotność <0,05</li>
 Korelacja wysoka, istotność <0,05</li>

Następnie sprawdzono w jaki sposób prędkości kątowe i przyrost prędkości kątowych wyjaśniają pobór mocy na rozdrabnianie, bieg jałowy i quasi-ścinanie.

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. 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 quasiścinanie w PB V dla obu rozdrabnianych ziaren (Rys. 5.5 – Rys. 5.12). 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. 5.13 i Rys. 5.14). 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. 5.5 – Rys. 5.14).



Rys. 5.5. Pobór mocy w funkcji przyrostu prędkości podczas rozdrabniania kukurydzy dla PB I

Rys. 5.6. Pobór mocy w funkcji przyrostu prędkości podczas rozdrabniania ryżu dla PB I



Rys. 5.7. Pobór mocy w funkcji przyrostu prędkości podczas rozdrabniania kukurydzy dla PB II

Rys. 5.8. Pobór mocy w funkcji przyrostu prędkości podczas rozdrabniania ryżu dla PB II



Rys. 5.9. Pobór mocy w funkcji przyrostu prędkości podczas rozdrabniania kukurydzy dla PB IV

Rys. 5.10. Pobór mocy w funkcji przyrostu prędkości podczas rozdrabniania ryżu dla PB IV



Rys. 5.11. Pobór mocy w funkcji przyrostu prędkości podczas rozdrabniania kukurydzy dla PB IV

Rys. 5.12. Pobór mocy w funkcji przyrostu prędkości podczas rozdrabniania ryżu dla PB V

PB III

.27

Konfiguracja

bieg jałowy

1.23

1.99

3

2.48

90

4

🗖 quasi-ścinanie



Rys. 5.13. Zmiany poboru mocy podczas rozdrabniania kukurydzy w PB III



W dalszym etapie sprawdzono jak prędkość kątowa i jej zmiany wpływają na pobór mocy rozdrabniania, biegu jałowego i quasi-ścinania na poszczególnych tarczach rozdrabniacza pięciotarczowego. Na podstawie analizy korelacji stwierdzono bardzo silny związek pomiędzy prędkością kątową a poborem mocy biegu jałowego dla wszystkich tarcz. Całkowity pobór mocy na tarczy na rozdrabnianie wykazywał bardzo wysoką korelację z prędkością kątową dla tarcz 1-5 w przypadku rozdrabniania ryżu i tarcz 1 i 5 w przypadku rozdrabniania kukurydzy. Korelacja poboru mocy i prędkości kątowej na tarczach 2, 3 i 4 podczas rozdrabniania kukurydzy była wysoka. Co ciekawe związek prędkości kątowych i mocy na quasi-ścinanie w przypadku rozdrabniania kukurydzy był bardzo wysoki tylko dla pierwszej tarczy, na pozostałych tarczach 2, 3, i 4 tylko umiarkowany, na tarczy piątej słaby, a otrzymany współczynnik r-Pearsona dla tej tarczy nie był istotny statystycznie (p>0,05). W przypadku rozdrabniania ryżu korelacja prędkości kątowych i poboru mocy na quasi-ścinanie dla poszczególnych tarcz przybierała wyższe wartości. Odnotowano związki bardzo wysokie i umiarkowane (Tabela 5.17). We wszystkich przypadkach zaobserwowano korelacje dodatnie.





k-dza – kukurydza, T 1, T 2, T 3, T 4, T 5 – numer tarczy,  $\omega_1$ ,  $\omega_2$ ,  $\omega_3$ ,  $\omega_4$ ,  $\omega_5$ , – prędkości kątowe tarcz, rad s<sup>-1</sup>,  $P_R$  – pobór mocy na rozdrabnianie, kW,  $P_{bj}$  – pobór mocy na bieg jałowy, kW,  $P_{qs}$  – pobór mocy na quasi-ścinanie, kW



– Korelacja bardzo wysoka, istotność <0,05</li>

Korelacja wysoka, istotność <0,05</li>

– Korelacja umiarkowana, istotność <0,05

W następstwie analizy związków pomiędzy prędkością kątową a poborem mocy na poszczególnych tarczach wykonano analizę regresji. Modele liniowe wyjaśniały zmiany pobory mocy na bieg jałowy w zależności od prędkości kątowych w powyżej 94% dla tarcz: pierwszej, drugiej, trzeciej i piątej (Rys. 5.15 – Rys. 5.20, Rys. 5.23 i Rys. 5.24). Jedynie 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. 5.21 i Rys. 5.22).

Rys. 5.15. Pobór mocy w funkcji prędkości kątowej podczas rozdrabniania kukurydzy na tarczy 1



Rys. 5.17. Pobór mocy funkcji w prędkości katowej podczas rozdrabniania kukurydzy na tarczy 2



kątowej podczas rozdrabniania ryżu na tarczy 1



Rys. 5.18. Pobór mocy funkcji w podczas prędkości kątowej rozdrabniania ryżu na tarczy 2



Rys. 5.19. Pobór mocy w funkcji prędkości katowej podczas rozdrabniania kukurydzy na tarczy 3

Rys. 5.20. Pobór mocy funkcji w prędkości podczas kątowej rozdrabniania ryżu na tarczy 3

Dopasowanie modeli regresji liniowej poboru mocy na rozdrabnianie w przypadku ryżu dla wszystkich tarcz wynosiło powyżej 92% (Rys. 5.16, Rys. 5.18, Rys. 5.20, Rys. 5.22, Rys. 5.24). W przypadku rozdrabniania kukurydzy taki poziom dopasowania wystąpił jedynie dla tarczy pierwszej i piątej



(Rys. 5.16, Rys. 5.23). Na pozostałych tarczach modele liniowe wyjaśniały zmienność w zakresie od 69% –78%.

Rys. 5.21. Pobór mocy w funkcji prędkości kątowej podczas rozdrabniania kukurydzy na tarczy 4





Rys. 5.22. Pobór mocy w funkcji prędkości kątowej podczas rozdrabniania ryżu na tarczy 4



Rys. 5.23. Pobór mocy w funkcji prędkości kątowej podczas rozdrabniania kukurydzy na tarczy 5



W przypadku modeli poboru mocy na quasi-ścinanie ryżu stopień dopasowania był większy niż modeli poboru mocy na quasi-ścinanie kukurydzy. Dla ryżu tylko na tarczy piątej model w słabym stopniu opisywał zależność poboru mocy na quasi-ścinanie od prędkości kątowych ( $R^2<0,6$ ) (Rys. 5.24). Dla pozostałych zależności linowych stopień dopasowania mieścił się w przedziale 0,76-0,83 (Rys. 5.16, Rys. 5.18, Rys. 5.20, Rys. 5.22). W przypadku kukurydzy tylko na tarczy pierwszej model wyjaśniał zmienność w stopniu zadowalającym ( $R^2=0,88$ ) (Rys. 5.15). Pozostałe modele w przypadku rozdrabniania kukurydzy nie były dopasowane (Rys. 5.17, Rys. 5.19, Rys. 5.21, Rys. 5.23), a inne modele nieliniowe także nie opisywały zmienności w sposób zadowalający ( $R^2<0,55$ ).

Ogólna analiza poboru mocy na rozdrabnianie wykazała, że najniższym poborem mocy charakteryzowały się konfiguracje o niskich wartościach prędkości kątowych na wszystkich tarczach dla obu rozdrabnianych materiałów (Tabela 5.18, kolor zielony), najwyższym poborem mocy zaś konfiguracje o wysokich prędkościach kątowych na wszystkich tarczach dla obu rozdrabnianych materiałów (Tabela 5.18, kolor czerwony). Na podstawie wyników badań poboru mocy na rozdrabnianie, bieg jałowy i quasi-ścinanie stwierdzono, że ponad 50% poboru mocy na rozdrabnianie stanowi pobór mocy na bieg jałowy maszyny (Rys. 5.5 – Rys. 5.24).

Ziarniaki kukurydzy Ziarniaki ryżu  $P_R$  $P_R$ PB PB Konfiguracja Konfiguracja kW kW III 0,91 III 0,84 IV 1 0.91 IV 1 0,84 II 4 0,97 Π 4 0,88 2 1,09 IV I 1 1,02 II 1,09 3 1,31 I 1 IV 2 1.35 Π 3 1,16 III 2 1,41 IV 3 1,21 I 2 1,51 III 2 1,23 IV IV 4 3 1,54 1,37 Π 2 1,70 II 2 1,42 IV 4 2 1,43 1,81 I II II 1 1.86 1 1,62 Ι 3 1,89 I 3 1,73 2,27 V Ι 4 1 1.97 V 1 2,31 III 3 1,99 2,52 III 2,06 3 4 I 2 V 2 2,65 V 2,08 V 3 2,70 V 3 2,21 III III 4 3,11 4 2,48 V 4 3,11 V 4 2,48

Tabela 5.18. Uszeregowane rosnąco konfiguracje ustawień tarcz rozdrabniacza względem poboru mocy na rozdrabnianie

PB – program badawczy,  $P_R$  – pobór mocy na rozdrabnianie

– konfiguracje ustawień prędkości kątowych tarcz o najniższym poborze mocy

 konfiguracje ustawień prędkości kątowych tarcz o najwyższym poborze mocy

#### 5.2.2. Analiza wpływu zmiennych na wydajność rozdrabniania

Dalsza analiza obejmowała określenie, które ze zmiennych niezależnych wpływają w sposób istotny na wydajność rozdrabniania. Po pierwsze przeanalizowano jak zmiany prędkości kątowej w poszczególnych programach badawczych wpływają na ten parametr. Podobnie jak w przypadku poboru mocy analiza korelacji wykazała, że tylko w PB III przyrost prędkości kątowej nie ma związku z wydajnością (Tabela 5.19). W przypadku PB I prędkości kątowe tarcz od drugiej do piątej były dodatnio związane z wydajnością, w PB II z kolei

prędkości kątowe tarcz od pierwszej do czwartej. W PB III korelacja dodatnia wystąpiła pomiędzy wydajnością a prędkościami kątowymi tarczy pierwszej, trzeciej i piątej. Z analizy wynika, że w PB IV wydajność była ujemnie związana z prędkościami kątowymi tarczy drugiej i czwartej, a także z przyrostem prędkości  $\Delta \omega$ . Podobnie jak w PB IV, w programie badawczym V wydajność była ujemnie skorelowana z przyrostem prędkości  $\Delta \omega$ , natomiast związek z prędkościami kątowymi tarczy drugiej i czwartej był dodatni w odróżnieniu od PB IV. Wszystkie zaistniałe związki między zmiennymi miały bardzo silny charakter i poziom istotności <0,05.

			$\omega_1$	$\omega_2$	$\omega_3$	$\omega_4$	$\omega_5$	$\Delta \omega$
	kukurydza	$Q_r$	-0,782	0,986	0,986	0,986	0,986	0,986
PBI	ryż	$Q_r$	-0,638	0,992	0,992	0,992	0,992	0,992
	kukurydza	$Q_r$	0,988	0,988	0,988	0,988	0,608	0,988
PBII	ryż	$Q_r$	0,998	0,998	0,998	0,998	0,694	0,998
	kukurydza	$Q_r$	0,999	0,831	0,999	0,831	0,999	0,272
PBIII	ryż	$Q_r$	0,999	0,800	0,999	0,800	0,999	0,270
	kukurydza	$Q_r$	0,861	-0,965	0,861	-0,965	0,861	-0,965
PBIV	ryż	$Q_r$	0,643	-0,983	0,643	-0,983	0,643	-0,983
	kukurydza	$Q_r$	-0,283	0,988	-0,283	0,988	-0,283	-0,988
PBV	ryż	$Q_r$	0,049	0,973	0,049	0,973	0,049	-0,973

Tabela 5.19. Współczynniki korelacji r-Pearsona pomiędzy prędkościami kątowymi, przyrostem prędkości a wydajnością rozdrabniania

PB – program badawczy,  $\omega_1$ ,  $\omega_2$ ,  $\omega_3$ ,  $\omega_4$ ,  $\omega_5$ , – prędkości kątowe tarcz, rad s<sup>-1</sup>,  $\Delta \omega$  – przyrost prędkości kątowych, rad s<sup>-1</sup>,  $Q_r$  – wydajność rozdrabniania, kg h<sup>-1</sup>

– Korelacja bardzo wysoka, istotność <0,05</li>

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. 5.25 – Rys. 5.28). Dodatnia zmiana prędkości kątowej powoduje wzrost wydajności o czym świadczą zależności dla PB I i PB II (Rys. 5.25 i Rys. 5.27), natomiast ujemna zmiana wiąże się ze zmniejszeniem wydajności, co zaobserwowano w przypadku PB V (Rys. 5.26 i Rys. 5.28). Zauważalnym jest fakt, że wzrost prędkości kątowych na tarczach rozdrabniacza wywołuje wzrost wydajności. Dla trzeciego programu badawczego ta zależność również występuje (Rys. 5.29 i Rys. 5.30).

Uzyskane wydajności rozdrabniania ryżu były mniej zróżnicowane niż wydajności rozdrabniania kukurydzy. Korzystniejszymi ustawieniami prędkości kątowych tarcz pod względem wydajności rozdrabniania kukurydzy były te, na których prędkość kątowa pierwszej tarczy była najwyższa np. w PB II i PB V (Rys. 5.25 i Rys. 5.26). Odwrotna sytuacja miała miejsce podczas rozdrabniania ryżu. Ustawieniami zapewniającymi większą wydajność były te, o niskiej



prędkości na pierwszej tarczy, np. w PB I i PB IV (Rys. 5.27 i Rys. 5.28).

Rys. 5.25. Wydajność rozdrabniania kukurydzy w funkcji przyrostu prędkości dla PB I i PB II





Rys. 5.26. Wydajność rozdrabniania kukurydzy w funkcji przyrostu prędkości dla PB IV i PB V



Rys. 5.27. Wydajność rozdrabniania ryżu w funkcji przyrostu prędkości dla PB I i PB II

Rys. 5.28. Wydajność rozdrabniania ryżu w funkcji przyrostu prędkości dla PB IV i PB V



Analizując wydajność rozdrabniania obu ziaren zwraca uwagę fakt, że najniższą wydajnością charakteryzowały się konfiguracje o niskich wartościach prędkości kątowych na wszystkich tarczach (Tabela 5.20, kolor zielony), najwyższą wydajnością zaś konfiguracje o wysokich prędkościach kątowych na

wszystkich tarczach (Tabela 5.20, kolor czerwony). Co ciekawe dla ryżu i dla

kukurydzy ustawienia najlepsze i najgorsze nie były takie same, co może być spowodowane właściwościami tych materiałów szczególnie w zakresie budowy wewnętrznej, masy, wielkości gęstości nasypowej oraz wytrzymałości.

	Ziarniaki kukury	dzy		Ziarniaki ryżu	1
PB	Konfiguracja	$Q_r$ kg·h <sup>-1</sup>	PB	Konfiguracja	$Q_r$ kg·h <sup>-1</sup>
IV	4	4,3	III	1	25,2
V	1	5,6	Ι	1	26,1
IV	3	7,2	II	4	26,1
IV	2	13,2	V	1	26,2
Ι	1	15,2	III	2	27
V	2	17,2	IV	4	27
Ι	2	18,6	V	2	27
Ι	3	19,8	Ι	2	27,1
Ι	4	22,8	II	3	27,2
III	1	24	V	3	27,9
IV	1	24	II	2	28,7
II	4	26,3	III	3	28,8
III	2	26,4	IV	3	28,8
V	3	27	Ι	3	29,2
II	3	28,2	IV	2	29,6
III	3	29,6	II	1	29,8
II	2	29,7	V	4	29,9
II	1	30,6	III	4	30,5
III	4	32,4	Ι	4	30,6
V	4	32,4	IV	1	30,6

Tabela 5.20. Uszeregowane rosnąco konfiguracje ustawień tarcz rozdrabniacza względem wydajności rozdrabniania

PB – program badawczy, Qr – wydajność rozdrabniania

– konfiguracje ustawień prędkości kątowych tarcz skutkujące

najniższą wydajnością

 – konfiguracje ustawień prędkości kątowych tarcz zapewniające najwyższą wydajność

## 5.2.3. Analiza wpływu zmiennych na jednostkowe zużycie energii

Kolejnym etapem analizy było wyznaczenie związków pomiędzy prędkościami kątowymi tarcz rozdrabniacza, przyrostem prędkości  $\Delta \omega$  i jednostkowym zużyciem energii. W tym celu wykonano analizę korelacji zmiennych w poszczególnych programach badawczych. Podobnie jak w przypadku poboru mocy i wydajności analiza korelacji wykazała, że tylko w PB III przyrost prędkości kątowej  $\Delta \omega$  nie jest silnie skorelowany z jednostkowym zapotrzebowaniem na energię (Tabela 5.21).

W przypadku PB I prędkości kątowe tarcz od drugiej do piątej były dodatnio związane z jednostkowym zapotrzebowaniem na energie, w PB II z kolei prędkości kątowe tarcz od pierwszej do czwartej. W PB III korelacja dodatnia wystąpiła, podobnie jak w przypadku wydajności, pomiędzy jednostkowym zapotrzebowaniem na energię a prędkościami kątowymi tarczy pierwszej, trzeciej i piątej. Na podstawie wyników analiz związków pomiędzy zmiennymi stwierdzono, że w PB IV jednostkowe zapotrzebowanie na energię rozdrabniania kukurydzy było ujemnie związane z prędkościami kątowymi tarczy drugiej i czwartej, a także z przyrostem prędkości  $\Delta \omega$ , natomiast w tym samym programie badawczym dla ryżu korelacje te były dodatnie. W PB V jednostkowe zapotrzebowanie na energię korelowało ujemnie z przyrostem prędkości  $\Delta \omega$ , w przypadku obu rozdrabnianych ziaren. Związek z prędkościami kątowymi tarczy drugiej i czwartej był dodatni. Wszystkie istotne statystycznie (p<0,05) związki między zmiennymi miały bardzo silny charakter (Tabela 5.21).

Tabela 5.21. Współczynniki korelacji r-Pearsona pomiędzy prędkościami kątowymi, przyrostem prędkości a jednostkowym zużyciem energii

			$\omega_1$	$\omega_2$	$\omega_3$	$\omega_4$	$\omega_5$	$\Delta \omega$
DDI	kukurydza	$E_j$	-0,734	0,980	0,980	0,980	0,980	0,980
FDI	ryż	$E_j$	-0,785	0,994	0,994	0,994	0,994	0,994
	kukurydza	$E_j$	0,982	0,982	0,982	0,982	0,571	0,982
FDII	ryż	$E_j$	0,993	0,993	0,993	0,993	0,636	0,993
	kukurydza	$E_j$	0,988	0,800	0,988	0,800	0,988	0,421
FD III	ryż	$E_j$	0,996	0,825	0,996	0,825	0,996	0,356
DD IV	kukurydza	$E_j$	0,861	-0,965	0,861	-0,965	0,861	-0,965
FDIV	ryż	$E_j$	-0,691	0,999	-0,691	0,999	-0,691	0,999
DD V	kukurydza	$E_j$	-0,283	0,988	-0,283	0,988	-0,283	-0,988
LD A	ryż	$E_j$	0,000	0,981	0,000	0,981	0,000	-0,981

PB – program badawczy,  $\omega_1$ ,  $\omega_2$ ,  $\omega_3$ ,  $\omega_4$ ,  $\omega_5$ , – prędkości kątowe tarcz, rad s<sup>-1</sup>,  $\Delta \omega$  – przyrost prędkości kątowych, rad s<sup>-1</sup>,  $E_i$  – jednostkowe zużycie energii, kWh kg<sup>-1</sup>

– Korelacja bardzo wysoka, istotność <0,05

Dla jednostkowego zapotrzebowania na energię 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 0,96 (Rys. 5.31 – Rys. 5.34), z wyjątkiem modelu jednostkowego zapotrzebowania na energię w PB V dla kukurydzy, dla którego stopień dopasowania wyniósł 0,74 (Rys. 5.32). Zauważalnym jest fakt, że wzrost prędkości kątowych na tarczach rozdrabniacza wywołuje wzrost zapotrzebowania na energię, co potwierdzają otrzymane wyniki dla analizowany programów badawczych (Rys. 5.31 – Rys. 5.36). Istotne jest, że jednostkowe zapotrzebowanie na energię podczas rozdrabniania kukurydzy było wyższe we wszystkich programach badawczych i konfiguracjach niż



jednostkowe zapotrzebowanie na energię podczas rozdrabniania ryżu.

Rys. 5.31. Jednostkowe zapotrzebowanie na energię rozdrabniania kukurydzy w funkcji przyrostu prędkości dla PB I i PB II



Rys. 5.33. Jednostkowe zapotrzebowanie na energię rozdrabniania ryżu w funkcji przyrostu prędkości dla PB I i PB II





Rys. 5.34. Jednostkowe zapotrzebowanie na energię rozdrabniania ryżu w funkcji przyrostu prędkości dla PB IV i PB V



Rys. 5.35. Zmiany jednostkowego zapotrzebowania energię na rozdrabniania kukurydzy w PB III



4

Po uszeregowaniu wyników jednostkowego zapotrzebowania na energię w porządku rosnącym dla zastosowanych konfiguracji prędkości (Tabela 5.22), stwierdzono, że najniższe wartości jednostkowego zapotrzebowania na energię wystąpiły w przypadku konfiguracji o niskich wartościach prędkości kątowych na wszystkich tarczach (Tabela 5.22, kolor zielony), najwyższe zaś w przypadku konfiguracji o wysokich prędkościach kątowych na wszystkich tarczach (Tabela 5.22, kolor czerwony). Ustawienia prędkości kątowych tarcz zapewniających najniższe zużycie energii na jednostkę materiału w przypadku rozdrabniania ryżu i kukurydzy różniły się, co związane jest przede wszystkim z różnicami w wydajności i poborze mocy na rozdrabnianie tych ziaren dla poszczególnych przypadków.

Tabela	5.22.	Uszeregowane	rosnąco	konfiguracje	ustawień	tarcz	rozdrabniacza
względe	em jedr	nostkowego zapo	trzebowai	nia na energię			

	Ziarniaki kukury	dzy		Ziarniaki ryżu	1
РВ	Konfiguracja	$E_j$ kWh·kg <sup>-1</sup>	PB	Konfiguracja	$E_j$ kWh·kg <sup>-1</sup>
II	4	0,037	IV	1	0,027
III	1	0,038	III	1	0,033
IV	1	0,038	II	4	0,034
II	3	0,046	IV	2	0,035
III	2	0,053	Ι	1	0,042
II	2	0,057	IV	3	0,042
II	1	0,061	II	3	0,043
Ι	1	0,072	III	2	0,046
Ι	2	0,081	II	2	0,049
III	3	0,085	IV	4	0,051
Ι	3	0,096	Ι	2	0,053
III	4	0,096	II	1	0,054
V	4	0,096	Ι	3	0,059
Ι	4	0,100	Ι	4	0,067
V	3	0,100	III	3	0,069
IV	2	0,102	V	1	0,075
V	2	0,154	V	2	0,077
IV	3	0,214	V	3	0,079
V	1	0,412	III	4	0,081
IV	4	0,422	V	4	0,083

PB – program badawczy,  $E_j$  – jednostkowe zapotrzebowanie na energię

 – konfiguracje ustawień prędkości kątowych tarcz zapewniające najniższe zapotrzebowanie na energię
 – konfiguracje ustawień prędkości kątowych tarcz skutkujące

najwyższe zapotrzebowanie na energię

#### 5.2.4. Analiza wpływu zmiennych na stopień rozdrobnienia

Analizie poddano wzajemne związki pomiędzy prędkościami kątowymi tarcz rozdrabniacza, przyrostem prędkości  $\Delta \omega$  i 80% stopniem rozdrobnienia produktu. W tym celu wykonano analizę korelacji zmiennych w poszczególnych

programach badawczych.

Analiza korelacji wykazała, że w PB III przyrost prędkości kątowej  $\Delta \omega$  nie koreluje z 80% stopniem rozdrobnienia (Tabela 5.23). W przypadku PB I prędkości kątowe tarcz od drugiej do piątej były dodatnio związane ze stopniem rozdrobnienia produktu, w PB II z kolei prędkości kątowe tarcz od pierwszej do czwartej. W PB III korelacja dodatnia wystąpiła pomiędzy stopniem rozdrobnienia a prędkościami kątowymi tarczy pierwszej, trzeciej i piątej, podobnie jak dla poprzednich wskaźników. W przypadku PB IV stopień rozdrobnienia produktu był dodatnio związany z prędkościami kątowymi tarczy drugiej i czwartej, a także z przyrostem prędkości  $\Delta \omega$ . Ujemną korelację zaobserwowano pomiędzy przyrostem prędkości  $\Delta \omega$  a stopniem rozdrobnienia ryżu w PB V. Stopień rozdrobnienia kukurydzy w tym programie badawczym z kolei był powiązany dodatnio z przyrostem prędkości  $\Delta \omega$ . Wszystkie istotne statystycznie (p<0,05) związki między zmiennymi miały bardzo silny charakter (Tabela 5.23).

Tabela 5.23. Współczynniki korelacji r-Pearsona pomiędzy prędkościami kątowymi, przyrostem prędkości a stopniem rozdrobnienia produktu

			$\omega_1$	$\omega_2$	ω <sub>3</sub>	$\omega_4$	$\omega_5$	$\Delta \omega$
DD I	kukurydza	i <sub>80</sub>	-0,929	0,916	0,916	0,916	0,916	0,916
<b>FDI</b>	ryż	i80	-0,676	0,991	0,991	0,991	0,991	0,991
	kukurydza	i80	0,939	0,939	0,939	0,939	0,907	0,939
PDII	ryż	i80	0,971	0,971	0,971	0,971	0,857	0,971
	kukurydza	i80	0,973	0,872	0,973	0,872	0,973	0,067
PDIII	ryż	$i_{80}$	0,953	0,943	0,953	0,943	0,953	0,093
	kukurydza	$i_{80}$	-0,745	0,992	-0,745	0,992	-0,745	0,992
PDIV	ryż	$i_{80}$	-0,612	0,987	-0,612	0,987	-0,612	0,987
DD V	kukurydza	$i_{80}$	0,206	-0,936	0,206	-0,936	0,206	0,936
PBV	ryż	$i_{80}$	-0,049	0,978	-0,049	0,978	-0,049	-0,978

PB – program badawczy,  $\omega_1$ ,  $\omega_2$ ,  $\omega_3$ ,  $\omega_4$ ,  $\omega_5$ , – prędkości kątowe tarcz, rad s<sup>-1</sup>,  $\Delta \omega$  – przyrost prędkości kątowych, rad s<sup>-1</sup>,  $i_{80}$  – 80% stopień rozdrobnienia, –

– Korelacja bardzo wysoka, istotność <0,05

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. 5.37 – Rys. 5.40). Zauważalnym jest fakt, że wzrost prędkości kątowych na tarczach rozdrabniacza wywołuje wzrost stopnia rozdrobnienia co potwierdzają otrzymane wyniki dla analizowany programów badawczych (Rys. 5.37 – Rys. 5.42). Zaobserwowano, że lepiej rozdrobnione były ziarna w tych konfiguracjach ustawień prędkości kątowych, gdzie prędkość kątowa pierwszej tarczy była najwyższa np. w PB II i PB V zarówno podczas rozdrabniania ryżu i kukurydzy.



Rys. 5.37. 80% stopień rozdrobnienia kukurydzy w funkcji przyrostu prędkości dla PB I i PB II



Rys. 5.39. 80% stopień rozdrobnienia ryżu w funkcji przyrostu prędkości dla PB I i PB II



Rys. 5.38. 80% stopień rozdrobnienia kukurydzy w funkcji przyrostu prędkości dla PB IV i PB V



Rys. 5.40. 80% stopień rozdrobnienia ryżu w funkcji przyrostu prędkości dla PB IV i PB V

1,31

4



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



Ogólna analiza zależności 80% stopnia rozdrobnienia od prędkości kątowych i ich zmian wykazała prawidłowość występowania niskich wartości stopnia rozdrobnienia dla konfiguracji ustawień o niskich prędkościach kątowych na wszystkich tarczach dla obu rozdrabnianych materiałów (Tabela 5.24, kolor zielony), zaś wysokich wartości stopnia rozdrobnienia dla konfiguracji o wysokich prędkościach kątowych na wszystkich tarczach obu dla

rozdrabnianych materiałów (Tabela 5.24, kolor czerwony). Zauważalnym jest fakt występowania znacznie większego stopnia rozdrobnienia w przypadku rozdrabniania kukurydzy, co związane jest przede wszystkim z początkowym wymiarem ziarna.

	Ziarniaki kukury	dzy		Ziarniaki ryżu	1
PB	Konfiguracja	<i>i</i> <sub>80</sub>	PB	Konfiguracja	i <sub>80</sub>
Ι	1	2,29	III	1	1,04
III	1	3,41	Ι	1	1,05
IV	1	3,41	II	4	1,06
II	4	3,60	IV	1	1,06
III	2	3,67	III	2	1,06
II	3	3,69	II	3	1,07
IV	2	3,72	II	2	1,09
II	2	3,85	IV	2	1,09
III	3	3,90	Ι	2	1,11
IV	3	4,08	II	1	1,13
Ι	2	4,17	Ι	3	1,15
IV	4	4,27	III	3	1,16
II	1	4,31	IV	3	1,17
III	4	4,44	V	1	1,20
V	4	4,44	IV	4	1,21
V	3	4,59	V	2	1,22
V	2	4,67	Ι	4	1,23
Ι	3	4,76	V	3	1,26
Ι	4	4,99	III	4	1,31
V	1	5.11	V	4	1.31

Tabela 5.24. Uszeregowane rosnąco konfiguracje ustawień tarcz rozdrabniacza względem 80% stopnia rozdrobnienia

PB – program badawczy, i80 – 80% stopień rozdrobnienia

– konfiguracje ustawień prędkości kątowych tarcz skutkujące

najniższym stopniem rozdrobnienia produktu

– konfiguracje ustawień prędkości kątowych tarcz zapewniające

najwyższy stopień rozdrobnienia produktu

## 5.2.5. Analiza zintegrowanej energochłonności

Kolejny etap badań stanowiła analiza zintegrowanej energochłonności rozdrabniania ziaren ryżu i kukurydzy. W tabeli 5.25 zestawiono wyniki badań zintegrowanej energochłonności dla obu rozdrabnianych ziaren. Najwyższe wartości zintegrowanej energochłonności w przypadku kukurydzy otrzymano dla ustawienia nr 4 z PB II, następnie ustawienia nr 1 z PB III i ustawienia nr 1 z PB IV. W przypadku rozdrabniania ryżu najwyższe wartości zintegrowanej energochłonności wystąpiły dla ustawienia nr 1 w PB IV, następnie dla

			Ziarni	aki kukı	urydzy			Zia	arniaki ry	źu	
PB	Konf.	$P_R$	$E_{j}$	$Q_r$	$i_{80}$	$E_{zint}$	$P_R$	$E_j$	$Q_r$	i <sub>80</sub>	Ezint
		kW	kWh∙ kg⁻¹	kg·h <sup>-1</sup>	-	-	kW	kWh∙ kg⁻¹	kg∙h <sup>-1</sup>	-	-
	1	1,09	0,07	15,20	2,29	446	1,09	0,04	26,10	1,05	605
т	2	1,51	0,08	18,60	4,17	631	1,43	0,05	27,10	1,11	399
1	3	1,89	0,10	19,80	4,76	520	1,73	0,06	29,20	1,15	326
	4	2,27	0,10	22,80	4,99	503	2,06	0,07	30,60	1,23	272
	1	1,86	0,06	30,60	4,31	1167	1,62	0,05	29,80	1,13	381
п	2	1,70	0,06	29,70	3,85	1176	1,42	0,05	28,70	1,09	445
п	3	1,31	0,05	28,20	3,69	1712	1,16	0,04	27,20	1,07	590
	4	0,97	0,04	26,30	3,60	2639	0,88	0,03	26,10	1,06	919
	1	0,91	0,04	24,00	3,41	2350	0,84	0,03	25,20	1,04	944
ш	2	1,41	0,05	26,40	3,67	1292	1,23	0,05	27,00	1,06	512
	3	2,52	0,09	29,60	3,90	538	1,99	0,07	28,80	1,16	244
	4	3,11	0,10	32,40	4,44	483	2,48	0,08	30,50	1,31	197
	1	0,91	0,04	24,00	3,41	2350	0,84	0,03	30,60	1,06	1417
W	2	1,35	0,10	13,20	3,72	356	1,02	0,03	29,60	1,09	916
1 V	3	1,54	0,21	7,20	4,08	89	1,21	0,04	28,80	1,17	665
	4	1,81	0,42	4,30	4,27	24	1,37	0,05	27,00	1,21	473
	1	2,31	0,41	5,60	5,11	30	1,97	0,08	26,20	1,20	212
V	2	2,65	0,15	17,20	4,67	196	2,08	0,08	27,00	1,22	205
v	3	2,70	0,10	27,00	4,59	458	2,21	0,08	27,90	1,26	201
	4	3,11	0,10	32,40	4,44	483	2,48	0,08	29,90	1,31	190

ustawienia nr 1 w PB III, ustawienia nr 4 w PB II i ustawienia nr 2 w PB IV. Tabela 5.25. Wyniki badań zintegrowanej energochłonności rozdrabniania ziaren ryżu

i kukurydzy

PB – program badawczy, konf. – konfiguracja,  $P_R$  – pobór mocy na rozdrabnianie,  $E_j$  – jednostkowe zapotrzebowanie na energię,  $Q_r$  – wydajność,  $i_{80}$  – 80% stopień rozdrobnienia,  $E_{zint}$  – energochłonność zintegrowana

– konfiguracje ustawień prędkości kątowych tarcz, dla których wystąpiły najwyższe wartości zintegrowanej energochłonności

Następnie wykonano podstawową analizę statystyczną zmiennej. W tabeli 5.26 zestawiono najważniejsze ze statystyk opisujących wyniki zintegrowanej energochłonności. Na podstawie wartości skośności i kurtozy rozkładu wyników stwierdzono, że rozkład zintegrowanej energochłonności odbiega od normalnego, dlatego w analizie korelacji posłużono się współczynnikiem Spearmana dla opisu monotonicznych związków między zmiennymi.

_	$R_p$	М	S	K	V	$\overline{x}$	S	Min.	Max.
k-dza	2615,43	421,89	1,13	0,14	0,93	872,18	807,83	23,95	2639,38
ryż	1227,14	511,44	1,32	1,64	0,65	505,60	328,90	190,23	1417,37

Tabela 5.26. Wyniki analizy statystycznej wartości zintegrowanej energochłonności

k-dza – kukurydza,  $\overline{x}$  – wartość średnia, s – odchylenie standardowe, M – mediana, max – wartość maksymalna, min – wartość minimalna,  $R_p$  – rozstęp, V – współczynnik zmienności, S – skośność, K – kurtoza

W pierwszej kolejności sprawdzono w jaki sposób zintegrowana energochłonność powiązana jest ze zmiennymi niezależnymi. Analiza korelacji wykazała, że zintegrowana energochłonność w przypadku rozdrabniania kukurydzy jest ujemnie skorelowana z przyrostem prędkości  $\Delta \omega$ . W przypadku rozdrabniania ryżu korelacje ujemne wystąpiły pomiędzy zintegrowaną energochłonnością a prędkościami kątowymi na tarczy pierwszej, trzeciej i piątej (Tabela 5.27). Wilgotność i średnica cząstek nadawy nie korelowały ze zintegrowaną energochłonnością.

Tabela 5.27. Analiza korelacji zintegrowanej energochłonności ze zmiennymi niezależnymi

		$\omega_{l}$	$\omega_2$	$\omega_3$	$\omega_4$	$\omega_5$	$\Delta \omega$	$W_m$	$D_{80}$
k-dza	Rho Spearmana	-0,042	-0,238	-0,174	-0,459	-0,286	-0,683	-0,314	-0,474
n uzu	Istotność	0,862	0,313	0,464	0,042	0,222	0,001	0,178	0,035
rvż	Rho Spearmana	-0,637	-0,193	-0,926	-0,322	-0,807	-0,28	0,029	0,143
192	Istotność	0,003	0,416	0,000	0,166	0,000	0,233	0,902	0,547

k-dza – kukurydza,  $\omega_1$ ,  $\omega_2$ ,  $\omega_3$ ,  $\omega_4$ ,  $\omega_5$ , – prędkości kątowe tarcz, rad s<sup>-1</sup>,  $\Delta \omega$  – przyrost prędkości kątowych, rad s<sup>-1</sup>,  $W_m$  – wilgotność materiału, %,  $D_{80}$  – wymiar cząstek, stanowiących 80% objętości nadawy, mm

– korelacje znaczące, istotność <0,05

W pierwszym kroku sprawdzono zależności liniowe i ich stopień dopasowania. Modele liniowe okazały się jednak w niewielkim stopniu wyjaśniać zmienność zintegrowanej energochłonności, o czym świadczyły wartości R<sup>2</sup><0,65 (Tabela 5.28). Sprawdzono, więc inne modele monotoniczne nieliniowe.

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. 5.43), choć jego współczynnik determinancji R<sup>2</sup> wyniósł 0,771. Zaobserwowano, że energochłonność zintegrowana maleje wraz ze zwiększaniem się wartości  $\Delta \omega$ .

		Współczynniki	t – stat.	Wartość-p	F	Istotność F	$\mathbb{R}^2$
lt dae	Stała	1461,812	5,904	0,000	0.057	0.008	0.225
K-dZa	$\Delta \omega$	-20,158	-3,010	0,008	9,057	0,008	0,335
	Stała	809,661	7,378	0,000	10.006	0.004	0 277
	$\omega_1$	-5,637	-3,301	0,004	10,890	0,004	0,577
Duź	Stała	952,356	9,944	0,000	28 6 1 2	0.000	0.614
KyZ	ω <sub>3</sub>	-8,283	-5,352	0,000	28,043	0,000	0,014
	Stała	875,520	9,473	0,000	22 724	0.000	0 559
	$\omega_5$	-6,858	-4,768	0,000	22,754	0,000	0,338

Tabela 5.28. Wyniki analizy regresji liniowej zintegrowanej energochłonności

k-dza – kukurydza,  $\omega_1, \omega_3, \omega_5$ , – prędkości kątowe tarcz, rad s<sup>-1</sup>,  $\Delta \omega$  – przyrost prędkości kątowych



Rys. 5.43. Zintegrowana energochłonność rozdrabniania kukurydzy w funkcji przyrostu prędkości kątowej

W przypadku rozdrabniania ryżu związek zintegrowanej energochłonności i prędkości kątowej na tarczach spośród badanych modeli najlepiej opisywał model potęgowy. Zależność potęgowa zintegrowanej energochłonności od prędkości kątowej trzeciej tarczy rozdrabniacza wyjaśniała prawie 85% zmienności (Rys. 5.44), gdy zależność od prędkości kątowej piątej tarczy już tylko niecałe 74% (Rys. 5.45). Z kolei zależność zintegrowanej energochłonności i prędkości kątowej wyjaśniała zaledwie 45% zmienności analizowanego parametru. Zależności te wskazują, że energochłonność zintegrowana maleje wraz ze wzrostem prędkości kątowych na tarczach rozdrabniacza.



Rys. 5.44. 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. 5.45. 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>

#### 5.2.6. Analiza zrównoważonej emisyjności

Procesy rozdrabniania prowadzone w poszczególnych programach badawczych poddano ocenie emisyjności. W tym celu dla każdego przypadku wyznaczono na podstawie zależności (4.85) wartości zrównoważonej emisyjności (Tabela 5.29, Tabela 5.30).

Tabela 5.29. Zmienne modelu i wyniki badań zrównoważonej emisyjności rozdrabniania kukurydzy,  $t_R = 1$  h,  $W_i^* = 4,50$  kJ·kg<sup>-1</sup>,  $k_e = 0,4$ 

PB	Konf.	$P_R$ , kW	$Q_r$ , kg·h <sup>-1</sup>	<i>E<sub>rt</sub></i> , kWh	<i>E</i> <sub>s</sub> , kWh	$\Delta e_{eco},\ \mathrm{kWh}$	e <sub>zrów</sub>
	1	1,09	15,20	1,09	27,34	26,25	4,15.10-2
т	2	1,51	18,60	1,51	33,46	31,95	4,74.10-2
1	3	1,89	19,80	1,89	35,62	33,72	5,62.10-2
	4	2,27	22,80	2,27	41,01	38,74	5,86.10-2
	1	1,86	30,60	1,86	55,04	53,19	3,50.10-2
т	2	1,70	29,70	1,70	53,43	51,73	3,29.10-2
11	3	1,31	28,20	1,31	50,73	49,42	2,65.10-2
	4	0,97	26,30	0,97	47,31	46,34	2,10.10-2
	1	0,91	24,00	0,91	43,17	42,26	2,16.10-2
TTT	2	1,41	26,40	1,41	47,49	46,08	3,05.10-2
III	3	2,52	29,60	2,52	53,25	50,73	4,97.10-2
	4	3,11	32,40	3,11	58,28	55,18	5,63.10-2
	1	0,91	24,00	0,91	43,17	42,26	2,16.10-2
117	2	1,35	13,20	1,35	23,74	22,40	6,02.10-2
11	3	1,54	7,20	1,54	12,95	11,41	13,50.10-2
	4	1,81	4,30	1,81	7,74	5,92	30,65.10-2
	1	2,31	5,60	2,31	10,07	7,76	29,75.10-2
v	2	2,65	17,20	2,65	30,94	28,29	9,37.10-2
v	3	2,70	27,00	2,70	48,57	45,87	5,89.10-2
	4	3,11	32,40	3,11	58,28	55,18	5,63.10-2

PB – program badawczy, konf. – konfiguracja,  $P_R$  – pobór mocy na rozdrabnianie,  $Q_r$ – wydajność,  $E_{rt}$  – energia elektryczna zużyta w procesie rozdrabniania,  $E_{es}$  – energia elektryczna wytworzona ze spalania rozdrobnionej biomasy,  $W_i$  – wartość opałowa rozdrobnionej biomasy, ke – współczynnik kogeneracji,  $t_R$  – czas rozdrabniania

\* - wartość średnia przyjęta na podstawie badań własnych przedstawionych w [137]

– ustawienia prędkości kątowych tarcz rozdrabniacza zapewniające najniższe emisje  $CO_{2eq}$ 

– ustawienia prędkości kątowych tarcz rozdrabniacza skutkujące najwyższymi emisjami  $\rm CO_{2eq}$
PB	Konf.	$P_R$ , kW	$Q_r$ , kg·h <sup>-1</sup>	<i>E<sub>rt</sub></i> , kWh	<i>E</i> <sub>s</sub> , kWh	$\Delta e_{eco},\ \mathrm{kWh}$	e <sub>zrów</sub>
	1	1,09	26,10	1,09	47,50	46,41	2,35.10-2
т	2	1,43	27,10	1,43	49,32	47,89	2,98.10-2
1	3	1,73	29,20	1,73	53,14	51,41	3,37.10-2
	4	2,06	30,60	2,06	55,69	53,63	3,83.10-2
	1	1,62	29,80	1,62	54,23	52,61	3,08.10-2
ΙΙ	2	1,42	28,70	1,42	52,23	50,81	2,80.10-2
	3	1,16	27,20	1,16	49,50	48,34	2,40.10-2
	4	0,88	26,10	0,88	47,50	46,62	1,90.10-2
	1	0,84	25,20	0,84	45,86	45,02	1,86.10-2
TTT	2	1,23	27,00	1,23	49,14	47,91	2,57.10-2
111	3	1,99	28,80	1,99	52,41	50,43	3,94.10-2
	4	2,48	30,50	2,48	55,51	53,03	4,68.10-2
	1	0,84	30,60	0,84	55,69	54,85	1,53.10-2
w	2	1,02	29,60	1,02	53,87	52,85	1,93.10-2
1 V	3	1,21	28,80	1,21	52,41	51,21	2,36.10-2
	4	1,37	27,00	1,37	49,14	47,77	2,86.10-2
	1	1,97	26,20	1,97	47,68	45,71	4,32.10-2
v	2	2,08	27,00	2,08	49,14	47,06	$4,42 \cdot 10^{-2}$
v	3	2,21	27,90	2,21	50,78	48,57	$4,55 \cdot 10^{-2}$
	4	2,48	29,90	2,48	54,42	51,93	4,78.10-2

Tabela 5.30. Zmienne modelu i wyniki badań zrównoważonej emisyjności rozdrabniania ryżu, dla  $t_R = 1$  h,  $W_i^* = 4,55$  kJ·kg<sup>-1</sup>,  $k_e = 0,4$ 

PB – program badawczy, konf. – konfiguracja,  $P_R$  – pobór mocy na rozdrabnianie,  $Q_r$  – wydajność,  $E_{rt}$  – energia elektryczna zużyta w procesie rozdrabniania,  $E_{es}$  – energia elektryczna wytworzona ze spalania rozdrobnionej biomasy,  $W_i$  – wartość opałowa rozdrobnionej biomasy, ke – współczynnik kogeneracji,  $t_R$  – czas rozdrabniania

\* - wartość średnia przyjęta na podstawie badań własnych przedstawionych w [137]

– ustawienia prędkości kątowych tarcz rozdrabniacza zapewniające najniższe emisje  $CO_{2eq}$ 

– ustawienia prędkości kątowych tarcz rozdrabniacza skutkujące najwyższymi emisjami  $\rm CO_{2eq}$ 

Na podstawie otrzymanych wyników stwierdzono, że najniższą emisyjność zrównoważoną  $(2,10\cdot10^{-2})$  podczas rozdrabniania kukurydzy zapewniało ustawienie nr 4 z PB II, a następnie ustawienie nr 1 z PB III. Najwyższą emisyjnością zrównoważoną z kolei skutkowały ustawienia nr 4 z PB IV  $(30,65\cdot10^{-2})$  oraz nr 1 z PB V  $(29,75\cdot10^{-2})$  (Tabela 5.29).

Najniższą emisyjność zrównoważoną  $(1,53\cdot10^{-2})$  podczas rozdrabniania ryżu zapewniało ustawienie nr 1 z PB IV, a następnie ustawienie nr 1 z PB III.

Najwyższą emisyjnością zrównoważoną z kolei skutkowały ustawienia nr 4 z PB V (4,78·10<sup>-2</sup>) oraz nr 4 z PB III (4,68·10<sup>-2</sup>)

Następnie wykonano podstawową analizę statystyczną badanej zmiennej. W tabeli 5.31 zestawiono najważniejsze ze statystyk opisujących wyniki zrównoważonej emisyjności. Na podstawie wartości skośności i kurtozy rozkładu wyników stwierdzono, że rozkład wyników zrównoważonej emisyjności kukurydzy odbiega od normalnego, dlatego w analizie korelacji posłużono się współczynnikiem Spearmana dla opisu monotonicznych związków między zmiennymi. Dla ryżu przyjęto, że rozkład jest w przybliżeniu normalny.

	$R_p$	М	S	K	V	$\overline{x}$	S	Min.	Max.
kukurydza	0,29	0,05	2,4	5,01	1,08	0,08	0,08	0,02	0,31
ryż	0,03	0,03	0,24	-1,29	0,33	0,03	0,01	0,02	0,05

Tabela 5.31. Wyniki analizy statystycznej wartości zrównoważonej emisyjności

 $\overline{x}$  – wartość średnia, *s* – odchylenie standardowe, M – mediana, max – wartość maksymalna, min – wartość minimalna,  $R_p$  – rozstęp, V – współczynnik zmienności, S – skośność, K – kurtoza

Po pierwsze sprawdzono w jaki sposób zrównoważona emisyjność powiązana jest ze zmiennymi niezależnymi. Analiza korelacji wykazała, że zrównoważona emisyjność w przypadku rozdrabniania kukurydzy jest dodatnio skorelowana z przyrostem prędkości  $\Delta \omega$ . W przypadku rozdrabniania ryżu korelacje dodatnie wystąpiły pomiędzy zrównoważoną emisyjnością a prędkościami kątowymi na tarczy pierwszej, trzeciej i piątej (Tabela 5.32). Wilgotność i średnica cząstek nadawy nie korelowały ze zrównoważoną emisyjnością.

		ωı	ω2	ωз	ω4	ω5	$\Delta \omega$	$W_m$	$D_{80}$
k-dza	Rho Spearmana	0,032	0,302	0,243	0,559	0,350	0,772	0,259	0,432
	Istotność	0,894	0,195	0,302	0,010	0,130	0,000	0,269	0,057
ryż	Rho Spearmana	0,618	0,223	0,908	0,363	0,805	0,326	0,009	-0,157
	Istotność	0,004	0,344	0,000	0,116	0,000	0,161	0,972	0,51

Tabela 5.32. Analiza korelacji zrównoważonej emisyjności ze zmiennymi niezależnymi

k-dza – kukurydza,  $\omega_1$ ,  $\omega_2$ ,  $\omega_3$ ,  $\omega_4$ ,  $\omega_5$ , – prędkości kątowe tarcz, rad s<sup>-1</sup>,  $\Delta \omega$  – przyrost prędkości kątowych, rad s<sup>-1</sup>,  $W_m$  – wilgotność materiału, %,  $D_{80}$  – wymiar cząstek, stanowiących 80% objętości nadawy, mm

– korelacje znaczące, istotność <0,05

Na wstępie sprawdzono zależności liniowe i ich stopień dopasowania. Model liniowy okazał się jednak w średnim stopniu wyjaśniać zmienność zrównoważonej emisyjności (R<sup>2</sup>=0,783, Tabela 5.33) rozdrabniania kukurydzy od przyrostu prędkości  $\Delta \omega$ , a ponieważ rozkład wyników odbiegał od normalnego sprawdzono inne modele monotoniczne nieliniowe. W przypadku ryżu modele liniowe wyjaśniały powyżej 82% zmienności (Tabela 5.33). Inne testowane modele nieliniowe wyjaśniały mniejszy odsetek zmienności, dlatego do opisu w przypadku ryżu przyjęto modele liniowe.

		Współczynniki	t – stat.	Wartość-p	F	Istotność F	R <sup>2</sup>
k dzo	Stała	-0,016	-1,129	0,274	65 024	0.000	0,783
K-uza	Δω	0,003	8,064	0,000	65,024	0,000	
	Stała	0,020	6,536	0,000	20 772	0,000	0,536
	$\omega_1$	0,0002	4,558	0,000	20,772		
Duż	Stała	0,014	8,811	0,000	151 509	0.000	0,894
Kyz	ω <sub>3</sub>	0,0003	12,309	0,000	131,308	0,000	
	Stała	0,017	9,215	0,000	86 707	0.000	0 0 20
	$\omega_5$	0,0003	9,317	0,000	80,191	0,000	0,828

Tabela 5.33. Wyniki analizy regresji liniowej zrównoważonej emisyjności

k-dza – kukurydza,  $\omega_1$ ,  $\omega_3$ ,  $\omega_5$ , – prędkości kątowe tarcz, rad $\cdot s^{-1}$ ,  $\Delta \omega$  – przyrost prędkości kątowych

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. 5.46), i jego współczynnik determinacji R<sup>2</sup> = 0,794, był wyższy niż w przypadku modelu liniowego (Tabela 5.33). Zaobserwowano, że emisyjność zrównoważona rośnie 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 liniowy, dlatego sprawdzono jak będzie zachowywał się model liniowy po dodaniu do niego drugiej zmiennej. Model ten przedstawia się następująco:

$$e_{\text{tráw}} = 0,000212\omega_3 + 0,000106\omega_5 + 0,014091$$
(5.1)

Model liniowy uwzględniający dwie zmienne  $\omega_3$  i  $\omega_5$  charakteryzował się dopasowaniem na poziomie 0,926 i najlepiej opisywał zmienność emisyjność zrównoważonej (p<0,05 dla współczynników, F=106,42, istotność F <0,0001). Dołączenie trzeciej zmiennej tj.  $\omega_1$ , powodowało, że współczynniki modelu liniowego nie były istotne statystycznie, dlatego nie uwzględniono modelu z trzema zmiennymi. Uzyskane zależności liniowe wskazują, że emisyjność zintegrowana rozdrabniania ziaren ryżu rośnie wraz ze wzrostem prędkości kątowych na tarczach rozdrabniacza.



Rys. 5.46. Zrównoważona emisyjność rozdrabniania kukurydzy w funkcji przyrostu prędkości kątowej

#### 5.2.7. Analiza funkcji oceny energetyczno-środowiskowej

W następnym kroku postępowania badawczego przeprowadzono analizę funkcji oceny energetyczno-środowiskowej rozdrabniania ziaren ryżu i kukurydzy. W tabeli 5.34. zestawiono wyniki badań zrównoważonej emisyjności dla obu rozdrabnianych ziaren. Najkorzystniej pod względem energetyczno-środowiskowym w przypadku rozdrabniania kukurydzy oceniono proces dla konfiguracji nr 4 z PB II (1,808 $\cdot$ 10<sup>-2</sup>), a następnie ustawienia nr 1 z PB III (1,968 $\cdot$ 10<sup>-2</sup>) i ustawienia nr 1 z PB IV (1,968 $\cdot$ 10<sup>-2</sup>) (Tabela 5.34). W przypadku rozdrabniania ryżu najniższe, a tym samym najlepsze wartości funkcji energetyczno-środowiskowej wystąpiły dla ustawienia nr 1 w PB IV (4,620 $\cdot$ 10<sup>-2</sup>), następnie dla ustawienia nr 1 w PB III (5,695 $\cdot$ 10<sup>-2</sup>) (Tabela 5.34).

Następnie wykonano analizę statystyczną badanej zmiennej. W tabeli 5.35 zestawiono najważniejsze ze statystyk opisujących wyniki funkcji energetycznośrodowiskowej. Na podstawie wartości skośności i kurtozy rozkładu stwierdzono, że rozkład wyników funkcji oceny energetyczno-środowiskowej rozdrabniania kukurydzy odbiega od normalnego, dlatego w analizie korelacji posłużono się współczynnikiem Spearmana dla opisu monotonicznych związków między zmiennymi. Dla ryżu przyjęto, że rozkład jest w przybliżeniu normalny.

DB	Konf	Z	iarniaki kuk	urydzy		Ziarniaki	ryżu
ГD	Kom.	$E_{zint}$	<b>e</b> zrów	F <sub>e-s</sub>	$E_{zint}$	e <sub>zrów</sub>	$F_{e-s}$
	1	446	4,15.10-2	5,404 10-2	605	2,35.10-2	7,048.10-2
т	2	631	4,74·10 <sup>-2</sup>	3,346.10-2	399	2,98.10-2	8,410.10-2
1	3	520	5,62.10-2	3,426.10-2	326	3,37.10-2	9,098·10 <sup>-2</sup>
	4	503	5,86.10-2	3,391.10-2	272	3,83.10-2	9,584·10 <sup>-2</sup>
	1	1167	3,50.10-2	2,451.10-2	381	3,08.10-2	8,515·10 <sup>-2</sup>
п	2	1176	3,29.10-2	2,588.10-2	445	2,80.10-2	8,041.10-2
11	3	1712	2,65.10-2	2,205.10-2	590	2,40.10-2	7,074.10-2
	4	2639	2,10.10-2	1,808.10-2	919	1,90.10-2	5,734.10-2
	1	2350	2,16.10-2	1,968.10-2	944	1,86.10-2	5,695·10 <sup>-2</sup>
ш	2	1292	3,05.10-2	2,537.10-2	512	2,57.10-2	7,609·10 <sup>-2</sup>
111	3	538	4,97.10-2	3,744.10-2	244	3,94.10-2	10,407.10-2
	4	483	5,63.10-2	3,678.10-2	197	4,68.10-2	10,821 · 10-2
	1	2350	2,16.10-2	1,968.10-2	1417	1,53.10-2	4,620.10-2
137	2	356	6,02.10-2	4,661.10-2	916	1,93.10-2	5,651.10-2
IV	3	89	13,50.10-2	8,309·10 <sup>-2</sup>	665	2,36.10-2	6,388·10 <sup>-2</sup>
	4	24	30,65.10-2	13,622.10-2	473	2,86.10-2	7,384·10 <sup>-2</sup>
	1	30	29,75.10-2	11,190.10-2	212	4,32.10-2	10,939.10-2
V	2	196	9,37.10-2	5,432.10-2	205	4,42.10-2	11,019.10-2
v	3	458	5,89·10 <sup>-2</sup>	3,703.10-2	201	4,55.10-2	10,941 · 10 <sup>-2</sup>
	4	483	5,63.10-2	3,678.10-2	190	4,78.10-2	10,997.10-2

Tabela 5.34. Wartości funkcji oceny energetyczno-środowiskowej rozdrabniania ziaren ryżu i kukurydzy

PB – program badawczy, konf. – konfiguracja,  $E_{zint}$  – energochłonność zintegrowana,  $e_{zrów}$  – emisyjność zrównoważona,  $F_{e\cdot s}$  – funkcja oceny energetyczno-środowiskowej

- konfiguracje ustawień prędkości kątowych tarcz o najkorzystniejszych

wartościach funkcji oceny energetyczno-środowiskowej

- konfiguracje ustawień prędkości kątowych tarcz o najmniej korzystnych

wartościach funkcji oceny energetyczno-środowiskowej

Analiza korelacji wykazała, że funkcja oceny energetyczno-środowiskowej w przypadku rozdrabniania kukurydzy jest dodatnio skorelowana z przyrostem prędkości  $\Delta \omega$ . W przypadku rozdrabniania ryżu korelacje dodatnie wystąpiły pomiędzy wartościami funkcji energetyczno-środowiskowej a prędkościami kątowymi na tarczy pierwszej, trzeciej i piątej (Tabela 5.36). Wilgotność

i średnica cząstek nadawy nie wykazywały związków z wartościami funkcji energetyczno-środowiskowej.

	$R_p$	М	S	K	V	$\overline{x}$	S	Min.	Max.
kukurydza	0,12	0,04	1,98	3,54	0,71	0,04	0,03	0,02	0,14
ryż	0,06	0,08	-0,06	-1,28	0,25	0,08	0,02	0,05	0,11

Tabela 5.35. Wyniki analizy statystycznej wartości funkcji energetyczno-środowiskowej

 $\overline{x}$  – wartość średnia, *s* – odchylenie standardowe, M – mediana, max – wartość maksymalna, min – wartość minimalna,  $R_p$  – rozstęp, V – współczynnik zmienności, S – skośność, K – kurtoza

Tabela 5.36. Analiza korelacji funkcji energetyczno-środowiskowej ze zmiennymi niezależnymi

		$\omega_1$	$\omega_2$	W3	ω4	ω <sub>5</sub>	$\Delta \omega$	$W_m$	$D_{80}$
k-dza	Rho Spearmana	0,03	0,182	0,163	0,394	0,252	0,677	0,414	0,409
	Istotność	0,899	0,442	0,492	0,086	0,284	0,001	0,07	0,073
ryż	Rho Spearmana	0,643	0,080	0,930	0,206	0,808	0,284	-0,019	-0,116
	Istotność	0,002	0,736	0,000	0,384	0,000	0,225	0,938	0,626

k-dza – kukurydza,  $\omega_1$ ,  $\omega_2$ ,  $\omega_3$ ,  $\omega_4$ ,  $\omega_5$ , – prędkości kątowe tarcz, rad·s<sup>-1</sup>,  $\Delta \omega$  – przyrost prędkości kątowych, rad·s<sup>-1</sup>,  $W_m$  – wilgotność materiału, %,  $D_{80}$  – wymiar cząstek, stanowiących 80% objętości nadawy, mm

– korelacje znaczące, istotność <0,05

Na wstępie sprawdzono zależności liniowe i ich stopień dopasowania. Model liniowy okazał się jednak w średnim stopniu wyjaśniać zmienność zrównoważonej emisyjności ( $R^2=0,760$ , Tabela 5.37) rozdrabniania kukurydzy od przyrostu prędkości  $\Delta \omega$ , a ponieważ rozkład wyników odbiegał od normalnego sprawdzono inne modele nieliniowe. W przypadku ryżu model liniowy wyjaśniał powyżej 88% zmienności (Tabela 5.37) funkcji energetycznośrodowiskowej w zależności od prędkości kątowej tarczy 5. W przypadku zależności prędkości funkcji energetyczno-środowiskowej od prędkości kątowej tarczy trzeciej nie udało się wyznaczyć modelu istotnie opisującego tę zależność. Podobnie w przypadku zależności prędkości funkcji energetycznośrodowiskowej od prędkości kątowej tarczy pierwszej – spośród badanych modeli najlepiej dopasowany był model liniowy, który zaledwie w 54% wyjaśniał zmienność funkcji (Tabela 5.37).

Ponieważ modele liniowe nie były dopasowane w stopniu wyższym niż  $R^2=0.9$  postanowiono sprawdzić modele nieliniowe. 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. 5.47), o współczynniku determinacji R<sup>2</sup> = 0,898. Zaobserwowano, że funkcja oceny energetyczno-środowiskowej rośnie wraz ze zwiększaniem się wartości  $\Delta \omega$ .

		Współczynniki	t – stat.	Wartość-p	F	Istotność F	$\mathbb{R}^2$
k-dza	Stała	0,010	1,731	0,101	57.016	0.000	0,760
	$\Delta \omega$	0,001	7,551	0,000	57,016	0,000	
	Stała	0,060	9,951	0,000	21 426	0.000	0,544
	$\omega_{I}$	0,0004	4,630	0,000	21,430	0,000	
Dent	Stała	0,079	6,494	0,000	0.115	0.720	0,006
Kyz	ωз	0,0001	0,339	0,738	0,115	0,738	
	Stała	0,049	14,644	0,000	120 499	0.000	0,886
	$\omega_5$	0,001	11,810	0,000	139,488	0,000	

Tabela 5.37. Wyniki analizy regresji liniowej funkcji energetyczno-środowiskowej

k-dza – kukurydza,  $\omega_1$ ,  $\omega_3$ ,  $\omega_5$ , – prędkości kątowe tarcz, rad s<sup>-1</sup>,  $\Delta\omega$  – przyrost prędkości kątowych



Rys. 5.47. Funkcja oceny energetyczno-środowiskowej rozdrabniania kukurydzy w funkcji przyrostu prędkości kątowej

W przypadku rozdrabniania ryżu związek funkcji oceny energetycznośrodowiskowej i prędkości kątowej na tarczy piątej, spośród badanych modeli innych niż liniowe, najlepiej opisywał model kwadratowy. Zależność ta wyjaśniała ponad 90% zmienności (Rys. 5.48). Zależność wskazuje, że funkcja oceny energetyczno-środowiskowej zwiększa swoje wartości wraz ze wzrostem prędkości kątowych na tarczach rozdrabniacza.



Rys. 5.48. 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>

Dodatkowo sprawdzono jak będzie zachowywał się model liniowy wielu zmiennych w przypadku rozdrabniania ryżu. Przeprowadzona analiza regresji metodą krokową wykazała, że najlepiej zmienność funkcji opisywał model trzech zmiennych (ponad 92%). Dobrym dopasowaniem (R<sup>2</sup>=0,887) charakteryzował się także model dwóch zmiennych  $\omega_3$  i  $\omega_5$  (Tabela 5.38).

Tabela 5.38. Wyniki analizy regresji liniowej funkcji energetyczno-środowiskowej dla wielu zmiennych w przypadku rozdrabniania ryżu

		Współczynniki	t – stat.	Wartość-p	F	Istotność F	R <sup>2</sup>
	Stała	0,064	6,983	0,000			
1	$\omega_1$	0,0004	4,552	0,000	10,481	0,001	0,552
	$\omega_3$	-0,0001	-0,572	0,575			
	Stała	0,047	9,254	0,000		0,000	0,887
2	$\omega_3$	0,00004	0,481	0,637	66,882		
	$\omega_5$	0,001	11,524	0,000			
	Stała	0,043	4,630	0,000			0,924
2	$\omega_1$	-0,0002	9,600	0,000	61 9 1 2	0.000	
3	ω <sub>3</sub>	0,0001	-2,782	0,013	04,845	0,000	
	$\omega_5$	0,001	1,609	0,127`			

 $\omega_1, \omega_3, \omega_5, -$  prędkości kątowe tarcz, rad s<sup>-1</sup>,  $\Delta \omega$  – przyrost prędkości kątowych

### 6. PODSUMOWANIE

Na postawie analizy stanu wiedzy i techniki w zakresie tematyki rozprawy można stwierdzić, że w dorobku budowy i eksploatacji maszyn, procesy rozdrabniania stanowią jedne z podstawowych procesów przetwarzania materiałów biologicznych, mineralnych i chemicznych, a problematyka ich energochłonności i emisyjności z tym związanych podejmowana jest w literaturze. Dotąd jednak nie opracowano skutecznych metod zmniejszania energochłonności oraz modeli oceny uwzględniającej aspekty energetyczne i środowiskowe.

Zjawiska i procesy zachodzące w rozdrabniaczach wielotarczowych, w szczególności dotyczące ruchu materiału rozdrabnianego w przestrzeni międzytarczowej są trudne do opisu, sformułowanie modeli przewidujących wydajność, stopień rozdrobnienia, energochłonność nie jest możliwe bez prowadzenia eksperymentów i badań doświadczalnych.

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

Realizacja badań sił i pracy niszczenia ziaren biomasy a także badań laboratoryjnych rozdrabniania doprowadziły do osiągnięcia celów rozprawy polegających na: opracowaniu modelu matematycznego energochłonności i emisji CO<sub>2</sub> technologicznego quasi-ścinania uziarnionej biomasy dla potrzeb projektowania wielootworowych (tarczowych) zespołów rozdrabniających; eksperymentalnym 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.

Przedstawiono autorskie modele zintegrowanej energochłonności, zrównoważonej emisyjności i funkcji oceny energetyczno-środowiskowej wraz z ich weryfikacją na rzeczywistym obiekcie – rozdrabniaczu pięciotarczowym. Uzyskane wyniki badań wskazują na możliwości aplikacyjne modeli w ocenie projektowej i przedwdrożeniowej rozdrabniaczy w aspekcie spełniania przez nich kryteriów energochłonności i emisyjności.

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 zmniejszaniem 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.

### 7. WNIOSKI

Z przeprowadzonych analiz stanu wiedzy i techniki w zakresie tematu rozprawy uzasadnienie znalazła potrzeba modelowego opisu zintegrowanej energochłonności, emisyjności zrównoważonej i funkcji oceny energetycznośrodowiskowej rozdrabniania oraz znalezienie i opisanie ich związku z prędkością kątową tarcz.

Wvkonane analizv W zakresie własnych prac badawczvch i doświadczalnych zgodnie z przyjętymi programami badań wielotarczowego rozdrabniania pozwalają na stwierdzenie, że możliwe jest wykonanie badań studialnych, zintegrowanej energochłonności, opisów emisyjności zrównoważonej i funkcji oceny energetyczno-środowiskowej i ich celowego sterowania za pomoca parametrów pracy rozdrabniacza.

#### 7.1. WNIOSKI POZNAWCZE

Osiagnieto cel pracy polegajacy na opracowaniu modelu matematycznego energochłonności i emisji CO2 technologicznego quasi-ścinania uziarnionej biomasy dla potrzeb projektowania wielootworowych (tarczowych) zespołów rozdrabniających. Opracowana w niniejszej pracy metodyka oceny energetyczno-środowiskowej rozdrabniania pozwoliła na wymierną ocenę procesu z uwzględnieniem jego energochłonności i emisyjności. Na podstawie przeprowadzonego postępowania badawczego wykazano, że za pomoca autorskich modeli zintegrowanej energochłonności (zależność (4.83)), zrównoważonej emisyjności (zależność (4.85)) i funkcji oceny energetycznośrodowiskowej (zależność (4.89)) można porównać procesy rozdrabniania i wskazać spośród nich ten najmniej energochłonny i emisyjny. Ponadto przeprowadzone w pracy rozważania teoretyczne pozwoliły na wyznaczenie matematycznych istotnych krvteriów modeli modelu zintegrowanei energochłonności i zrównoważonej emisyjności, tj. wydajności (zależność (4.44)), poboru mocy quasi-ścinania (zależność (4.68)), jednostkowego zapotrzebowania na energię (zależność (4.76)) i stopnia rozdrobnienia (zależność (4.82)). Na uwagę zasługuje fakt, że zależności: (4.44), (4.68), (4.76), (4.82), (4.83), (4.85), (4.89) są oryginalnym osiągnięciem tej pracy. W ten sposób uzyskano rozwiązanie pierwszego problemu badawczego.

Osiągnięcie drugiego celu pracy i sformułowanie odpowiedzi na drugi cel badawczy było możliwe poprzez przeprowadzenie eksperymentu na rozdrabniaczu pięciotarczowym w pięciu programach badawczych i analizę wpływu prędkości kątowych tarcz rozdrabniacza na pobór mocy rozdrabniania, wydajność, jednostkowe zapotrzebowanie na energię, stopień rozdrobnienia, zintegrowaną energochłonność, emisyjność zrównoważoną i funkcję oceny energetyczno-środowiskowej. Na podstawie wyników badań i analiz stwierdzono, że celowo zmieniane prędkości kątowe wpływają na powyższe kryteria oceny. Przeprowadzona analiza własności wytrzymałościowych ziaren pozwoliła na wyznaczenie zakresów sił, naprężeń, pracy, podczas cięcia i ściskania ziaren ryżu i kukurydzy. 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 (Tabela 5.1, Tabela 5.4). Z kolei ziarna ryżu charakteryzują się większą wartością naprężeń ściskających  $R_c$  i ścinających  $\tau$  niż ziarna kukurydzy (Tabela 5.1, Tabela 5.4). Powyższe stwierdzenia wynikają z odmiennej okrywy zewnętrznej badanych ziaren. Ponadto wykazano, że wartości sił, naprężeń i pracy cięcia (Tabela 5.4) w przypadku obu ziaren były niższe niż wartości sił, naprężeń i pracy ściskania (Tabela 5.1), 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 (Tabela 5.9).

Szczegółowa analiza związków pomiędzy prędkościami kątowymi, przyrostem prędkości  $\Delta \omega$  a poborem mocy wykazała, że:

- pobór mocy na rozdrabnianie, (bieg jałowy i quasi-ścinanie) na poszczególnych tarczach rozdrabniacza zmienia się liniowo w zależności od prędkości kątowych (Rys. 5.15 – Rys. 5.24),
- pobór mocy na quasi-ścinanie ziaren ryżu we wszystkich analizowanych/badanych przypadkach był niższy niż pobór mocy na quasi-ścinanie ziaren kukurydzy (Rys. 6.3 Rys. 6.12),
- najniższym poborem mocy charakteryzowały się konfiguracje o niskich wartościach prędkości kątowych na wszystkich tarczach dla obu rozdrabnianych materiałów (Tabela 5.18, kolor zielony), najwyższym poborem mocy zaś konfiguracje o wysokich prędkościach kątowych na wszystkich tarczach dla obu rozdrabnianych materiałów (Tabela 5.18, kolor czerwony),
- wraz ze wzrostem prędkości kątowych wzrastał pobór mocy rozdrabniania, biegu jałowego i quasi-ścinania (Rys. 5.15 Rys. 5.24).

Analizy związków pomiędzy prędkościami kątowymi a wydajnością pozwoliła na stwierdzenie, że:

- w analizowanych programach badawczych dla obu rozdrabnianych ziaren wydajność zmieniała się w sposób liniowy w zależności od prędkości kątowych (Rys. 5.25 – Rys. 5.28),
- dodatnia zmiana prędkości kątowej powoduje wzrost wydajności o czym świadczą zależności dla PB I i PB II (Rys. 5.25 i Rys. 5.27), natomiast ujemna zmiana wiąże się ze zmniejszeniem wydajności, co zaobserwowano w przypadku PB V (Rys. 5.26 i Rys. 5.28).

- wzrost prędkości kątowych na tarczach rozdrabniacza wywołuje wzrost wydajności,
- korzystniejszymi ustawieniami prędkości kątowych tarcz pod względem wydajności rozdrabniania kukurydzy były te, na których prędkość kątowa pierwszej tarczy była najwyższa np. w PB II i PB V (Rys. 5.25 i Rys. 5.26),
- dla ryżu ustawieniami zapewniającymi większą wydajność były te, o niskiej prędkości na pierwszej tarczy, np. w PB I i PB IV (Rys. 5.27 i Rys. 5.28).

Na podstawie wyników badań i analiz związków pomiędzy prędkościami kątowymi a jednostkowym zapotrzebowaniem na energię wykazano, że:

- w analizowanych programach badawczych dla obu rozdrabnianych ziaren jednostkowe zapotrzebowanie na energię zmieniało się w sposób liniowy w zależności od prędkości kątowych (Rys. 5.31 – Rys. 5.34),
- wzrost prędkości kątowych na tarczach rozdrabniacza wywołuje wzrost zapotrzebowania na energię (Rys. 5.31 Rys. 5.36),
- jednostkowe zapotrzebowanie na energię podczas rozdrabniania kukurydzy było wyższe we wszystkich programach badawczych i konfiguracjach niż jednostkowe zapotrzebowanie na energię podczas rozdrabniania ryżu,
- najniższe wartości jednostkowego zapotrzebowania na energię wystąpiły w przypadku konfiguracji o niskich wartościach prędkości kątowych na wszystkich tarczach (Tabela 6.16, kolor zielony), najwyższe zaś w przypadku konfiguracji o wysokich prędkościach kątowych na wszystkich tarczach (Tabela 6.16, kolor czerwony).

W przypadku stopnia rozdrobnienia stwierdzono, że:

- zmienia się on w sposób liniowy w funkcji przyrostu prędkości  $\Delta \omega$  (Rys. 6.35 Rys. 6.38).
- wzrost prędkości kątowych na tarczach rozdrabniacza wywołuje jego wzrost (Rys. 6.35 Rys. 6.40),
- przyjmuje on wyższe wartości w tych konfiguracjach ustawień prędkości kątowych, gdzie prędkość kątowa pierwszej tarczy była najwyższa np. w PB II i PB V zarówno podczas rozdrabniania ryżu i kukurydzy.

Na podstawie analiz zależności pomiędzy zmiennymi niezależnymi a zintegrowaną energochłonnością, wykazano, że:

- modelem 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. 5.43),
- 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. 5.44 i Rys. 5.45). Zależności te wskazują, że energochłonność zintegrowana maleje wraz ze wzrostem prędkości kątowych na tarczach rozdrabniacza.

Z kolei analizy emisyjności zrównoważonej pozwalają na stwierdzenie, że:

- modelem najlepiej opisującym zmiany zrównoważonej emisyjności rozdrabniania kukurydzy na rozdrabniaczu pięciotarczowym w zależności od przyrostu prędkości kątowej na tarczach Δω, okazał się model wykładniczy (Rys. 6.44),
- zaobserwowano, że emisyjność zrównoważona rośnie wraz ze zwiększaniem się wartości  $\Delta \omega$ ,
- model liniowy uwzględniający dwie zmienne  $\omega_3$  i  $\omega_5$  charakteryzuje się dopasowaniem na poziomie 0,926 i najlepiej opisuje zmienność emisyjności zrównoważonej (zależność (5.1)). Uzyskane zależności liniowe (Tabela 5.33) wskazują, że emisyjność zintegrowana rozdrabniania ziaren ryżu rośnie wraz ze wzrostem prędkości kątowych na tarczach rozdrabniacza.

Szczegółowa analiza funkcji oceny energetyczno-środowiskowej pozwoliła na sformułowanie następujących wniosków:

- model kwadratowy (Rys. 5.47) najlepiej opisywał zmiany funkcji energetyczno-środowiskowej rozdrabniania kukurydzy na rozdrabniaczu pięciotarczowym w zależności od przyrostu prędkości kątowej na tarczach  $\Delta \omega$ ,
- funkcja oceny energetyczno-środowiskowej rośnie wraz ze zwiększaniem się wartości  $\Delta \omega$ ,
- funkcja oceny energetyczno-środowiskowej zwiększa swoje wartości wraz ze wzrostem prędkości kątowych na tarczach rozdrabniacza (Rys. 5.48),
- najlepiej zmienność funkcji w przypadku rozdrabniania ryżu opisuje model liniowy trzech zmiennych  $\omega_1$ ,  $\omega_3$  i  $\omega_5$  (Tabela 5.38).

### 7.2. WNIOSKI APLIKACYJNE

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.

Przeprowadzone badania i analizy pięciotarczowego rozdrabniania materiałów ziarnistych wykazały, że znaczną cześć poboru mocy rozdrabniacza stanowi pobór mocy na bieg jałowy maszyny, co bezpośrednio wiąże się ze zużyciem energii. Wartym 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. 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. Taka modyfikacja konstrukcyjno-procesowa zapewni najwyższą efektywność wydajnościową procesu wielotarczowego rozdrabniania ziaren biomasy.

W celu obniżania energochłonności i emisyjności rozdrabniania rozpatrując energochłonność w ujęciu sprawnościowym (zależność (4.46)) należy zwiększać sprawność poszczególnych elementów układu napędowego: silnika, przekładni, sprzęgła. Takie działania pozwolą na obniżenie strat energii oraz zwiększenie wykorzystania pobieranej energii elektrycznej w sposób użyteczny.

### 7.3. WNIOSKI DO DALSZYCH BADAŃ

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.

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 opisania związku przyczynowo-skutkowego przepustowości pierwszej tarczy rozdrabniacza z prędkością dozowania wsadu i wyznaczenia takich jej wartości, przy których wydajność pracy rozdrabniacza determinowana będzie sumaryczną powierzchnią przestrzeni otworowych pierwszej tarczy.

## SPIS PIŚMIENNICTWA

- 1. Flizikowski, J. Metodyka inteligentnego rozwoju procesów rozdrabniania. *Inż. Apar. Chem.* **2016**, *55*, 90–92.
- 2. Jaszczuk, J. Inteligentny rozwój Polski i Unii Europejskiej. *Optim. Stud. Ekon.* **2014**, *72*, 170–183.
- 3. Niedzwiecki, L. *Guide to biomass comminution. Material properties, machinery, principles of the process and fundamentals of process modelling*; Bachelor+Master Publishing: Hamburg, 2012;
- Miu, P.I.; Woma, A.R.; Cannayen, I.; Sokhansanj, S. Analysis of Biomass Comminution and Separation Processes in Rotary Equipment -A Review.; American Society of Agricultural and Biological Engineers: Portland, Oregon, 2006; pp. 1–17.
- 5. Bergman, P. Optimisation of fragmentation and comminution at Boliden Mineral, Aitik Operation, Luleå University of Technology: Skellefteå, Szwecja, 2005.
- 6. Flizikowski, J.; Sadkiewicz, J. Inżynieria innowacji rozdrabniaczy ziarnistej biomasy. *Inż. Apar. Chem.* **2013**, *52*, 36–37.
- 7. Brożek, M.; Naziemiec, Z. Analiza mechaniki procesu rozdrabniania surowców mineralnych w kruszarkach i wysokociśnieniowych prasach walcowych. *Gospod. Surowcami Miner.* **2012**, *T.* 28, z. 3, 139–153.
- Austin, L.G.; Trass, O. Size Reduction of Solids Crushing and Grinding Equipment. W: *Handbook of Powder Science & Technology*; Springer, Boston, MA, 1997; pp. 586–634 ISBN 978-0-412-99621-4.
- 9. Loh, Z.H.; Samanta, A.K.; Sia Heng, P.W. Overview of milling techniques for improving the solubility of poorly water-soluble drugs. *Asian J. Pharm. Sci.* **2015**, *10*, 255–274.
- Proceedings of XXIV International Mineral Processing Congress: Beijing, China, 24 - 28 September 2008/Edited by Dian Zuo Wang; Wang, D.Z., Ed.; Science Press: Beijing, 2008; ISBN 978-7-03-022711-9.
- Miao, Z.; Grift, T.E.; Hansen, A.C.; Ting, K.C. Energy requirement for comminution of biomass in relation to particle physical properties. *Ind. Crops Prod.* 2011, *33*, 504–513.
- 12. Tomporowski, A.; Flizikowski, J.; Kruszelnicka, W. A new concept of roller-plate mills. *Przem. Chem.* **2017**, *96*, 1750–1755.
- 13. Liu, X.; Zhang, M.; Hu, N.; Yang, H.; Lu, J. Calculation model of coal comminution energy consumption. *Miner. Eng.* **2016**, *92*, 21–27.
- 14. Liu, X.; Liu, S.; Tang, P. Coal fragment size model in cutting process. *Powder Technol.* **2015**, *272*, 282–289.
- 15. Johnson, N.W. Review of Existing Eco-efficient Comminution Devices. *Coalit. Eco-Effic. Comminution CEEC Rev. Pap.* **2006**.
- Gil, M.V.; García, R.; Pevida, C.; Rubiera, F. Grindability and combustion behavior of coal and torrefied biomass blends. *Bioresour. Technol.* 2015, 191, 205–212.

- 17. Tamura, M.; Watanabe, S.; Kotake, N.; Hasegawa, M. Grinding and combustion characteristics of woody biomass for co-firing with coal in pulverised coal boilers. *Fuel* **2014**, *134*, 544–553.
- 18. Forssberg, K.S.E.; Schönert, K. *Comminution 1994*; Elsevier: Amsterdam, 1996; ISBN 978-0-444-59865-3.
- 19. Cocker-Maciejwska, A. Obróbka wstępna biomasy na potrzeby systemów energetycznych. *Ochr. Srodowiska Zasobów Nat.* **2007**, 133–141.
- 20. Popiel, P. Wpływ współspalania biomasy z pyłem węglowym na stratę niedopału. *Pr. Inst. Elektrotechniki* **2011**, *249*, 69–80.
- 21. **Kruszelnicka, W.** Multi-disc comminution product quality analysis. *Ekol. Tech.* **2018**, *28*, 41–48.
- 22. Salman, A.D.; Ghadiri, M.; Hounslow, M. *Particle Breakage*; Elsevier, 2007; ISBN 978-0-08-055346-7.
- 23. Eisenlauer, M.; Teipel, U. Comminution of biogenic materials. *Can. J. Chem. Eng.* **2017**, *95*, 1236–1244.
- 24. Flizikowski, J. *Rozdrabnianie tworzyw sztucznych*; Wydawnictwa Akademii Techniczno-Rolniczej: Bydgoszcz, 1998;
- Song, S.-H.; Lee, M.-G.; Lee, H.-J.; Yoon, W.-B. Analysis of grinding kinetics to control the effect of rice flour particle size on the yield of alcohol and glucose during fermentation. *Int. J. Food Sci. Technol.* 2014, 49, 2703–2710.
- 26. Mohd Rozalli, N.H.; Chin, N.L.; Yusof, Y.A. Grinding characteristics of Asian originated peanuts (Arachishypogaea L.) and specific energy consumption during ultra-high speed grinding for natural peanut butter production. *J. Food Eng.* **2015**, *152*, 1–7.
- 27. Shashidhar, M.G.; Murthy, T.P.K.; Girish, K.G.; Manohar, B. Grinding of Coriander Seeds: Modeling of Particle Size Distribution and Energy Studies. *Part. Sci. Technol.* **2013**, *31*, 449–457.
- Mi, D.; A, B.; S, A.; Z, E.-H. Grinding Parameters and their Effects on the Quality of Corn for Feed Processing. *J. Food Process. Technol.* 2015, 6, 1–7.
- 29. Dziki, D.; Laskowski, J. Influence of selected factors on wheat grinding energy requirements. *TEKA Kom Mot Energ Roln* **2005**, *5*, 56–64.
- 30. Tavares, L.M. Optimum routes for particle breakage by impact. *Powder Technol.* **2004**, *142*, 81–91.
- 31. Mroziński, A.; Flizikowski, J.; Macko, M. *Inżynieria rozdrabniania biomasy*; Grafpol: Wrocław, 2016; ISBN 978-83-64423-35-2.
- 32. Steyn, C.W. Optimisation of a fully autogenous comminution circuit, University of Pretoria: Pretoria, RPA, 2013.
- 33. Kawatra, S.K. *Advances in Comminution*; Society for Mining, Metallurgy, and Exploration: Littleton, Colorado, 2006; ISBN 978-0-87335-246-8.
- Masuda, H.; Higashitani, K.; Yoshida, H. Powder Technology Handbook, Third Edition; Taylor & Francis Group, LLC: Boca, Raton, London, New York, 2006; ISBN 978-1-4398-3188-5.

- Sidor, J.; Froszcz, D.; Tomach, P.; Krawczykowski, D. Młyny wysokoenergetyczne do mielenia rud i surowców mineralnych. *CUPRUM Czas. Nauk.-Tech. Gór. Rud* 2015, 75, 71–85.
- 36. U.S. Energy Information Administration *International Energy Outlook* 2016; EIA: Waszyngton, USA, 2016;
- 37. Toklu, E. Biomass energy potential and utilization in Turkey. *Renew. Energy* **2017**, *107*, 235–244.
- 38. Suzuki, K.; Tsuji, N.; Shirai, Y.; Hassan, M.A.; Osaki, M. Evaluation of biomass energy potential towards achieving sustainability in biomass energy utilization in Sabah, Malaysia. *Biomass Bioenergy* **2017**, *97*, 149–154.
- Girones, V.C.; Moret, S.; Peduzzi, E.; Nasato, M.; Marechal, F. Optimal use of biomass in large-scale energy systems: insights for energy policy. *Energy* 2017, 137, 789–797.
- 40. Joselin Herbert, G.M.; Unni Krishnan, A. Quantifying environmental performance of biomass energy. *Renew. Sustain. Energy Rev.* **2016**, *59*, 292–308.
- 41. Voloshin, R.A.; Rodionova, M.V.; Zharmukhamedov, S.K.; Nejat Veziroglu, T.; Allakhverdiev, S.I. Review: Biofuel production from plant and algal biomass. *Int. J. Hydrog. Energy* **2016**, *41*, 17257–17273.
- Kruszelnicka, W.; Bałdowska-Witos, P.; Flizikowski, J.; Tomporowski, A.; Kasner, R. Energy balance of wood biomass utilization. Part I – characteristics of the problem and research methodology. *TEKA Kom Mot Energ Roln* 2017, *17*, 55–60.
- 43. Dzikuć, M.; Piwowar, A. Ecological and economic aspects of electric energy production using the biomass co-firing method: The case of Poland. *Renew. Sustain. Energy Rev.* **2016**, *55*, 856–862.
- 44. Yılmaz, S.; Selim, H. A review on the methods for biomass to energy conversion systems design. *Renew. Sustain. Energy Rev.* **2013**, *25*, 420–430.
- 45. Nnaemeka, N.; MacManus, N. Measurement of energy requirements for size reduction of palm kernel and groundnut shells for downstream bioenergy generation. *J. Eng. Technol. Res.* **2016**, *8*, 47–57.
- 46. Hess, J.R.; Wright, C.T.; Kenney, K.L.; Searcy, E.M. Uniform-Format Solid Feedstock Supply System: A Commodity-Scale Design to Produce an Infrastructure-Compatible Bulk Solid from Lignocellulosic Biomass– Executive Summary; Idaho National Laboratory (INL): Idaho, USA, 2009;
- 47. Cundiff, J.S.; Grisso, R.D. Containerized handling to minimize hauling cost of herbaceous biomass. *Biomass Bioenergy* **2008**, *32*, 308–313.
- 48. **Kruszelnicka, W.**; Bałdowska, P.; Tomporowski, A.; Piasecka, I.; Mroziński, A. Analiza korzyści energetycznych rozdrabniania nośników energii. *Inż. Apar. Chem.* **2018**, *57*, 7–8.
- 49. Al-Hamamre, Z.; Saidan, M.; Hararah, M.; Rawajfeh, K.; Alkhasawneh, H.E.; Al-Shannag, M. Wastes and biomass materials as sustainable-

renewable energy resources for Jordan. *Renew. Sustain. Energy Rev.* **2017**, 67, 295–314.

- Buytaert, V.; Muys, B.; Devriendt, N.; Pelkmans, L.; Kretzschmar, J.G.; Samson, R. Towards integrated sustainability assessment for energetic use of biomass: A state of the art evaluation of assessment tools. *Renew. Sustain. Energy Rev.* 2011, *15*, 3918–3933.
- Zhu, J.Y.; Pan, X.; Zalesny, R.S. Pretreatment of woody biomass for biofuel production: energy efficiency, technologies, and recalcitrance. *Appl. Microbiol. Biotechnol.* 2010, 87, 847–857.
- 52. Adapa, P.; Tabil, L.; Schoenau, G. Compaction characteristics of barley, canola, oat and wheat straw. *Biosyst. Eng.* **2009**, *104*, 335–344.
- 53. Tomporowski, A. *Rozdrabnianie alternatywnych nośników energii*; Wydawnictwa Uczelniane Uniwersytetu Technologiczno-Przyrodniczego w Bydgoszczy: Bydgoszcz, 2018;
- 54. Wołosiewicz-Głąb, M.; Foszcz, D.; Saramak, D.; Gawenda, T.; Krawczykowski, D. Analysis of a grinding efficiency in the electromagnetic mill for variable process and feed parameters. W: Proceedings of the E3S Web of Conferences; EDP Sciences, 2017; Vol. 18, p. 01012.
- 55. Wang, Y.; Forsberg, E. *International overview and outlook on comminution technology*; Lulea Tekniska Universitet: Lulea, Sweden;
- 56. Fuerstenau, D.W.; Abouzeid, A.-Z.M. The energy efficiency of ball milling in comminution. *Int. J. Miner. Process.* **2002**, *67*, 161–185.
- 57. Haffez, G.S.A. Correlation between Bond work index and mechanical properties of some Saudi ores. *J Eng Sci* **2012**, *40*, 271–280.
- 58. Comminution and Laws of Comminution, online: http://www.thecementgrindingoffice.com/lawsofcomminution.html (dostep: 06.01.2018).
- Flizikowski, J.; Bieliński, K.; Bieliński, M. Podwyższanie energetycznej efektywności wielotarczowego rozdrabniania nasion zbóż na paszę; Wydawnictwa Akademii Techniczno-Rolniczej: Bydgoszcz, 1994;
- 60. Zawada, J.; Chochoł, K. Doświadczalne badania energii kruszenia (na przykładzie modelowej kruszarki dźwigniowej Blake'a). *Gór. Geoinżynieria* **2009**, *33*, 317–326.
- 61. Zawada, J. *Wstęp do mechaniki procesów kruszenia*; Wydawnictwo Technologii Eksploatacji: Radom, 1998;
- 62. Malewski, J. Analiza układu kruszenia rudy w ZWR Lubin. *Min. Sci.* **2015**, *Vol. 22*, *Special Issue 1*.
- 63. Krzemińska, M.; Malewski, J. Energochłonność operacji przygotowania rud do wzbogacania w kopalniach LGOM. *Przegląd Gór.* **2011**, *67*, 143–147.
- 64. Brach, I. *Podstawowe problemy w procesach rozdrabniania minerałów*; Ośrodek Wydawnictw IOMB: Warszawa, 1963;

- 65. Sidor, J. Modelowanie procesu rozdrabniania materiału w młynach wibracyjnych. *Inż. Apar. Chem.* **2006**, *Nr 4s*, 129–130.
- 66. Flizikowski, J.; Wełnowski, J.; Dudziak, P. Analysis end ecotechnological evaluation of micro-grain supersonic milling. Part I. Models and indicators. *Inz. Apar. Chem.* **2017**, *56*, 161–163.
- 67. Flizikowski, J.; Wełnowski, J.; Dudziak, P. Analysis and ecotechnological evaluation of micro grain supersonic milling. Part II.: Results and discussion. *Inż. Apar. Chem.* **2017**, *56*, 164–165.
- 68. Kłos, Z. *Elementy inżynierii jakości i ekologii maszyn*; Wydawnictwo Politechniki Poznańskiej: Poznań, 1998;
- 69. Kłos, Z. Classification and measurement of innovations. *J. Mech. Transp. Eng.* **2016**, *68*, 27–42.
- 70. Feliks, J.; Filipowicz, A. Zastosowanie teorii rozdrabniania do doboru mocy w kruszarce węgla. *Inż. Apar. Chem.* **2009**, *48*, 42–43.
- 71. Selenta, A.; Ciężkowski, P. Kruszenie skał. Instrukcja do laboratorium MRC, Politechnika Warszawska: Warszawa, 2005.
- 72. Molendowski, F. Energochłonność procesu rozdrabniania surowców roślinnych na przykładzie rdzeni kolb kukurydzy; Wydawnictwo Akademii Rolniczej we Wrocławiu: Wrocław, 2005;
- Sadkiewicz, J.; Flizikowski, J. Konstrukcyjne podwyższanie wydajności wielotarczowych rozdrabniaczy ziaren zbóż. *Inż. Przetwórstwa Spoż.* 2014, 3, 20–24.
- 74. Flizikowski, J.; Tomporowski, A.; Mroziński, A. Patent UPRP nr P.221397: Zespół napędowy i sterujący wielotarczowego wielootworowego rozdrabniacza materiałów kawałkowych, 2011.
- 75. Bayram, M.; Öner, M.D. Bulgur milling using roller, double disc and vertical disc mills. *J. Food Eng.* **2007**, *79*, 181–187.
- 76. Pieper, M.; Kutelova, Z.; Aman, S.; Tomas, J. Modeling of baryte batch grinding in a vibratory disc mill. *Adv. Powder Technol.* **2013**, *24*, 229–234.
- Yıldırım, A.; Bayram, M.; Öner, M.D. Bulgur milling using a helical disc mill. J. Food Eng. 2008, 87, 564–570.
- Al-Zubiedy, A.A.A. Rozdrabniacze wielotarczowe: badania i stabilizacja produktu; Wydawnictwo Politechniki Częstochowskiej: Częstochowa, 2006;
- 79. Adamski, M.; Wtorek, K.; Adamczak, W.; Mioduszewska, N.; Osuch, E.; Osuch, A.; Dworecki, Z.; Niedbała, G.; Szaferski, W.; Mitkowski, P. Analiza możliwości zastosowania rozdrabniacza wielotarczowego do przetwarzania ubocznych produktów z produkcji roślinnej. W: *Aktualne problemy inżynierii biosystemów*; 2016; pp. 241–258 ISBN 978-83-7160-827-8.
- 80. Tomporowski, A. *Studium efektywności napędu i rozwiązań innowacyjnych konstrukcji wielotarczowych rozdrabniaczy ziaren biomasy*; Lubelskie Towarzystwo Naukowe: Lublin, 2011;

- 81. Zuñiga, J.M.; Mantari, J.L. A computational methodology to calculate the required power in disc crushers. *J. Comput. Des. Eng.* **2017**, *4*, 14–20.
- 82. Ligaj, B.; Szala, G. Obliczanie zapotrzebowania energii w procesach rozdrabniania materiałów ziarnistych na przykładzie ziaren zbóż. *Acta Mech. Autom.* **2009**, *3*, 97–99.
- 83. Domek, G. Pasowo-zębaty napęd rozdrabniacza wielotarczowego. *Inż. Apar. Chem.* **2005**, *Nr 1-2*, 35–36.
- 84. Tomporowski, A.; Sykut, B.; Kowalik, K.; Antczak, M. Badanie i analiza energochłonności wielotarczowego rozdrabniacza nowej generacji. *Inż. Apar. Chem.* **2012**, *51*, 256–258.
- 85. Flizikowski, J.; Świetlicki, A. Wydajność wielotarczowego rozdrabniania ziaren. *Inż. Apar. Chem.* **2009**, *48*, 45–47.
- 86. Flizikowski, J.; Kamyk, W. Efektywność energetyczna specjalnego systemu rozdrabniania. *Teka Kom Bud Ekspl Masz Elektrotech. Bud* **2008**, 17–22.
- Flizikowski, J.B. Intelligent grinding system. *Inż Ap Chem* 2011, 50, 22–23.
- Flizikowski, J.B.; Mrozinski, A.; Tomporowski, A. Active monitoring as cognitive control of grinders design.; AIP Conference proceedings: Melville, New York, 2017; Vol. 1822, p. 020006.
- 89. Flizikowski, J.; Mroziński, A.; Macko, M. Computer aided design of multi-disc grinders. *Logistyka* **2010**, *nr* 6, 813–822.
- Tomporowski, A.; Flizikowski, J.; Wełnowski, J.; Najzarek, Z.; Topoliński, T.; Kruszelnicka, W.; Piasecka, I.; Śmigiel, S. Regeneracja odpadów gumowych z zastosowaniem inteligentnego systemu rozdrabniania. *Przem. Chem.* 2018, 1, 61–67.
- 91. Opielak, M.; Tomporowski, A. Structural features versus multi-hole grinding efficiency. *Eksploat. Niezawodn. Maint. Reliab.* **2012**, *14*, 222–227.
- 92. Tomporowski, A. Stream of efficiency of rice grains multi-disc grinding. *Eksploat. Niezawodn. Maint. Reliab.* **2012**, *14*.
- 93. Opielak, M. Investigation on the dependence oa a quern mill output on the size of grinding slot and grain moisture. *Int. Agrophysics* **1999**, *13*, 487–491.
- 94. Opielak, M.; Jankowski, M.; Piasecka, I.; Tomporowski, A. Analiza nierównomierności rozdrabniania biomasy. Cz. 2. Badania maszynowe. *Inż. Apar. Chem.* **2013**, *52*, 44–46.
- 95. Tomporowski, A.; Opielak, M.; Kowalik, K.; Sykut, B. Analiza nierównomierności rozdrabniania biomasy. Część I: podstawy teoretyczne. *Inż. Apar. Chem.* **2013**, *52*, 42–43.
- 96. Opielak, M. Rozdrabnianie materiałów w przemyśle rolno-spożywczym: Badanie wpływu konstrukcji rozdrabniacza i cech materiału rozdrabnianego na jakość i energochłonność procesu; Wydawnictwa Uczelniane PL, 1996; ISBN 978-83-86333-53-0.

- 97. Dudziak, P. Badania zintegrowanej efektywności procesu rozdrabniania materiałów uziarnionych naddźwiękowym młynem tarczowym; Uniwersytet Technologiczno-Przyrodniczy w Bydgoszczy: Bydgoszcz, 2017;
- 98. Radziszewski, P. Energy recovery potential in comminution processes. *Miner. Eng.* **2013**, *46*–*47*, 83–88.
- Dikici, T.; Sutcu, M. Effects of disc milling parameters on the physical properties and microstructural characteristics of Ti6Al4V powders. *J. Alloys Compd.* 2017, 723, 395–400.
- 100. Baláž, P. High-energy milling. In *Mechanochemistry in Nanoscience and Minerals Engineering*; Springer, 2008; pp. 103–132.
- 101. Zhu, J.Y.; Wang, G.S.; Pan, X.J.; Gleisner, R. Specific surface to evaluate the efficiencies of milling and pretreatment of wood for enzymatic saccharification. *Chem. Eng. Sci.* **2009**, *64*, 474–485.
- 102. Ghorbani, Z.; Masoumi, A.A.; Hemmat, A.; Seifi, M.R. Prediction of specific energy consumption in milling process using some physical and mechanical properties of Ifalfa grind. *Aust. J. Crop Sci.* **2013**, *7*, 1449.
- Goyal, S.K.; Jogdand, S.V.; Agrawal, A.K. Energy use pattern in rice milling industries—a critical appraisal. J. Food Sci. Technol. 2014, 51, 2907–2916.
- 104. Frączek, J.; Mudryk, K. Metoda pomiaru energochłonności procesu zrębkowania pędów wierzby. *Inż. Rol.* **2007**, *R.* 11, nr 7 (95), 47–53.
- 105. Bridgeman, T.G.; Jones, J.M.; Williams, A.; Waldron, D.J. An investigation of the grindability of two torrefied energy crops. *Fuel* 2010, 89, 3911–3918.
- 106. Mani, S.; Tabil, L.G.; Sokhansanj, S. Grinding Performance and Physical Properties of Selected Biomass.; American Society of Agricultural and Biological Engineers: Michigan, USA, 2002; p. 026175.
- 107. Kumar, P.; Barrett, D.M.; Delwiche, M.J.; Stroeve, P. Methods for Pretreatment of Lignocellulosic Biomass for Efficient Hydrolysis and Biofuel Production. *Ind. Eng. Chem. Res.* 2009, 48, 3713–3729.
- Kruszelnicka, W.; Flizikowski, J.; Tomporowski, A. Auto-monitoring system of grainy biomass comminution technology. *IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng.* 2018, 393, 012076.
- 109. **Kruszelnicka, W.**; Mroziński, A. Analiza wpływu modyfikacji konstrukcji zespołu roboczego młyna walcowego na wybrane parametry procesu rozdrabniania. *Probl. Inż. Rol.* **2017**, *R.* 25, nr 3.
- 110. Macko, M. Konstrukcja rozdrabniaczy do biomasy.; Pan Stanford Pub, 2015.
- 111. Kruszelnicka, W. Analiza wskaźników stosowanych do oceny rozdrabniania. *Inzynieria Apar. Chem.* **2017**, *56*, 208–210.
- 112. Radomski, P.; Jarosiński, A. Wyznaczanie powierzchni właściwej materiałów ziarnistych w aspekcie stosowania jej wielkości w wybranych procesach technologicznych. *Chem. Czas. Tech.* **2010**, *107*, 267–276.

- 113. Malińska, K. Laboratoryjne wyznaczanie porowatości powietrznej materiałów przeznaczonych do kompostowania. *Inż. Ochr. Śr.* **2012**, *15*, 155–167.
- Kłos, Z. O kształtowaniu proinnowacyjnych i projakościowych postaw. J. Mech. Transp. Eng. 2013, 65, 53–63.
- 115. Fuerstenau, D.W.; Kapur, P.C.; Gutsche, O. Comminution of single particles in a rigidly-mounted roll mill part 1: mill torque model and energy investment. *Powder Technol.* **1993**, *76*, 253–262.
- 116. Bielski, M. *Podstawy teorii organizacji i zarządzania*; Wydawnictwo C. H. Beck: Warszawa, 2002;
- 117. **Kruszelnicka, W**. Efektywność wielotarczowego rozdrabniania biomasy ziarnistej. *Ekol. Tech.* **2018**, *28*, 24–26.
- Macko, M. Size reduction by grinding as an important stage in recycling. In *Post-Consumer Waste Recycling and Optimal Production*; InTech, 2012; pp. 273–294.
- 119. Szymańska, E. Efektywność przedsiębiorstwa-definiowanie i pomiar. *Rocz. Nauk Rol.* **2010**, *97*, 152–164.
- 120. Kłos, Z.; Koper, K. Proposal of environmental aspects assessment of products. *Izv. J. Varna Univ. Econ.* **2017**, *61*, 36–48.
- 121. Burchart-Korol, D.; Kruczek, M.; Czaplicka-Kolarz, K. Wykorzystanie ekoefektywności w ocenie poziomu ekoinnowacyjności. *Monogr. Innow. W Zarządzaniu Inż. Prod. Oficyna Wydawnicza Pol. Tow. Zarządzania Prod.* **2013**.
- Kleiber, M.; Czaplicka-Kolarz, K. *Ekoefektywność technologii: praca zbiorowa*; Wydawnictwo Naukowe Instytutu Technologii Eksploatacji Państwowego Instytutu Badawczego: Radom, 2011; ISBN 978-83-7789-050-9.
- 123. Kolman, R. *Różne odmiany jakości i ich praktyczne wykorzystanie*; PLACET: Warszawa, 2003;
- 124. Przystupa, F.W.; Stryczek, J.; Sokolski, P. Ocena jakości eksploatacji systemu koparko-kruszarki. *Gór. Odkryw.* **2013**, *R.* 54, nr 3–4.
- 125. Łunarski, J. Zarządzanie jakością. Standardy i zasady; WNT: Warszawa, 2012;
- 126. Przystupa, F.W. *Diagnozer w systemie technicznym : od ontologii i ksjologii do praktyki*; Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej: Wrocław, 2010; ISBN 978-83-7493-525-8.
- 127. Tomporowski, A. Badanie użyteczności rozdrabniania ziaren ryżu. Część I-model badawczy. *Inż. Apar. Chem.* **2010**, 119–120.
- 128. Stopień rozdrobienia, online: http://home.agh.edu.pl/~pwok/pliki/stopien%20rozdrobienia.pdf (dostęp: 28.01.2018).
- Hejft, R.; Obidziński, S. Ciśnieniowa aglomeracja materiałów roślinnychinnowacje technologiczno-techniczne. Część 1. J. Res. Appl. Agric. Eng. 2012, 57, 63–65.

- Kruszelnicka, W. Basis of intelligent monitoring system in biomass comminution process. In *Actual problems of modern science*; Khmelnytsky National University: Chmielnicki, Ukraina, 2017; pp. 736– 747.
- Dańko, R.; Szymała, K.; Holtzer, M.; Holtzer, G. Skojarzone wytwarzanie energii elektrycznej i ciepła w systemie kogeneracji. *Arch. Foundry Eng.* 2012, 12, 6.
- 132. Niedziółka, I.; Szymanek, M. Utilization of maize grain for industrial and energetistics purposes. *Mot. Energ Rol* **2003**, *5*, 119–125.
- Singh, N.; Kaur, A.; Shevkani, K. Maize: Grain Structure, Composition, Milling, and Starch Characteristics. In *Maize: Nutrition Dynamics and Novel Uses*; Springer, New Delhi, 2014; pp. 65–76 ISBN 978-81-322-1622-3.
- 134. 1 Quality. Program Evaluation of Physical Quality Understanding bits of Cooking Quality Discussion and questions Eyes vs Instruments Associating. Online: http://slideplayer.com/slide/7745747/ (dostęp: 22.03.2018).
- 135. vandermarkj Cereals- classification. Online: https://vandermarkj.wikispaces.com/Cereals-+classification (dostęp: 21.03.2018).
- 136. Kushwaha, U.K.S. *Black Rice: Research, History and Development*; Springer: Szwajcaria, 2016; ISBN 978-3-319-30153-2.
- Kruszelnicka, W.; Bałdowska-Witos, P.; Flizikowski, J.; Tomporowski, A. Investigation of grain biomass properties as an alternative fuel. *Int. Sci. J. Trans Motauto World* 2018, *3*, 45–48.
- 138. Kaszkowiak, E.; Kaszkowiak, J. Use of corn grains for energy purposes. *Inż Ap Chem* **2011**, *50*, 35–36.
- Kaszkowiak, E.; Kaszkowiak, J.; Szymczak, M. Burning of maize corn, triticale and rye grown at limited nitrogen fertilization. *Inż. Apar. Chem.* 2013, 58–59.
- 140. Jagustyn, B.; Bątorek-Giesa, N.; Wilk, B. Evaluation of properties of biomass used for energy purposes. *Chemik* **2011**, *65*, 557–563.
- 141. Fang, Z.; Deng, W.; Zhang, Y.; Ding, X.; Tang, M.; Liu, T.; Hu, Q.; Zhu, M.; Wang, Z.; Yang, W.; et al. Open burning of rice, corn and wheat straws: primary emissions, photochemical aging, and secondary organic aerosol formation. *Atmospheric Chem. Phys.* 2017, *17*, 14821–14839.
- 142. Gudaczewski, W.; Konopka, I.; Kozirok, W.; Tańska, M. Produkcja i Przechowalnictwo. Ziarna zbóż i nasion oleistych; Uniwersytet Warmińsko-Mazurski w Olsztynie: Olsztyn;
- Gąsiorowski, H. Kukurydza. Część 1. Właściwości fizyczne. Przegląd Zbożowo-Młyn. 2007, 6–7.
- 144. Food Products Bulk Densities. Online: https://www.engineeringtoolbox.com/foods-materials-bulk-densityd\_1819.html (dostęp: 23.03.2018).

- 145. Fan, J.; Siebenmorgen, T.J.; Gartman, T.R.; Gardisser, D.R. Bulk Density of Long- and Medium-Grain Rice Varieties as Affected by Harvest and Conditioned Moisture Contents. *Cereal Chem. J.* **1998**, *75*, 254–258.
- 146. Sobczak, P.; Zawiślak, K.; Panasiewicz, M. The impact of coating process on selected physical properties of obtained products. *Inż. Rol.* **2009**, *111*, 161–168.
- Tomporowski, A.; Opielak, K. The effect of degree of material fineness on the process of transportation and storage of loose materials. *Logistyka* 2014, 10668–10671.
- 148. Kruszelnicka, W.; Shchur, T. Study of rice and maize grains grinding energy. *TEKA Comm. Mot. Energ. Agric.* 2018, *18*, 71–74.

## **SPIS TABEL**

Tabela 2.1. Wybrane badania prowadzone nad procesem wielotarczowego	
rozdrabniania w okresie ostatnich 25 lat	20
Tabela 2.2. Charakterystyki ruchowe rozdrabniaczy wielotarczowych.	
Opracowanie własne na podstawie [59,95]	24
Tabela 2.3. Charakterystyki energetyczne rozdrabniaczy wielotarczowych.	
Opracowanie własne na podstawie [59,82]	25
Tabela 2.4. Wskaźniki produktu rozdrabniania	26
Tabela 2.5. Wskaźniki procesu rozdrabniania: energetyczne i technologiczne	
Tabela 2.6. Kryteria oceny energetycznej procesu wielotarczowego	
rozdrabniania przedstawiane w literaturze	30
Tabela 2.7 Kryteria oceny środowiskowej procesu wielotarczowego	
rozdrahnjanja przedstawiane w literaturze	3/
Tabela 2.8 Mierzalne kryteria jakości procesu rozdrabniania Opracowanie	
where no podetowie [28 127 128]	35
Tabala 2.0. Darávna valna krateria jakości procesu rozdrabnienia. Oprocevanja	55
rabela 2.9. Folowiływanie Kryteria jakości procesu rozurabiliania. Opracowanie	26
wiashe na podstawie $[125]$	30
labela 2.10. Kryteria oceny technologicznej procesu wielotarczowego	27
rozdrabniania przedstawiane w literaturze	37
Tabela 4.1. Skład chemiczny ziarna kukurydzy [132]	62
Tabela 4.2. Właściwości ziaren ryżu i kukurydzy	62
Tabela 4.3. Cechy konstrukcyjne tarcz roboczych rozdrabniacza	
pięciotarczowego RWT-KZ5	67
Tabela 4.4. Konfiguracje ustawień prędkości tarcz roboczych dla PB I	72
Tabela 4.5. Konfiguracje ustawień prędkości tarcz roboczych dla PB II	73
Tabela 4.6. Konfiguracje ustawień prędkości tarcz roboczych dla PB III	73
Tabela 4.7. Konfiguracje ustawień prędkości tarcz roboczych dla PB IV	73
Tabela 4.8. Konfiguracje ustawień prędkości tarcz roboczych dla PB V	73
Tabela 4.9. Zestawienie planowanych działań i wykorzystywanej aparatury	74
Tabela 5.1. Analiza statystyczna wyników badań sił, naprężeń i pracy ściskania	
ziaren ryżu i kukurydzy	76
Tabela 5.2. Analiza korelacji pomiedzy badanymi wielkościami w próbie	
ściskania dla ziaren ryżu	77
Tabela 5.3. Analiza korelacii pomiedzy badanymi wielkościami w próbie	
ściskania dla zjaren kukurydzy	77
Tabela 5.4 Analiza statystyczna wyników badań sił $F_{\tau}$ napreżeń $\tau$ i pracy	
ścinania $W_r$ ziaren ryżu i kukurydzy	79
Tabela 5.5 Analiza korelacij nomiedzy hadanymi wielkościami w próbie	/ )
ścinania dla ziaren ryżu	79
Tabela 5.6 Analiza korelacii nomiedzy badanymi wielkościami w próbie	/ )
fainania dla ziaran kukurudzu	70
Tobolo 5.7. Wymilei opolizy stotystycznoj zmionnych w próbio ścinonio zjaron	19
rationa 5.7. wymiki analizy statystycznej ziniennych w proble schiania zlafen	00
Tyzu z tożnymi pręukościami $v_s$	80
abela 5.6. wyniki analizy statystycznej Zmiennych w proble scinania Ziaren	00
kukurydzy z roznymi prędkosciami $v_s$	80
i abela 5.9. Wyniki analizy związkow pomiędzy prędkoscią scinania $v_s$ a siłą	<b>C</b> 1
cięcia $F_T$ , napręzeniami tnącymi $\tau$ i pracą scinania $W_T$	81

Tabela 5.10. Wyniki badań zmiennych w procesie rozdrabniania kukurydzy dla	
pięciu programów badawczych	81
Tabela 5.11. Wyniki badań zmiennych w procesie rozdrabniania ryżu dla pięciu	
programów badawczych	82
Tabela 5.12. Wyniki analizy statystycznej badanych zmiennych w procesie	
rozdrabniania ziaren kukurydzy.	83
Tabela 5.13. Wyniki analizy statystycznej badanych zmiennych w procesie	
rozdrabnjanja zjaren rvžu	
Tabela 5 14 Wartości współczynników korelacji wraz z istotnościa nomiedzy	
zmiennymi procesu rozdrabniania kukurydzy	86
Tabela 5 15 Wartości współczynników korelacji wraz z istotnościa nomiedzy	
zmiennymi procesu rozdrabnjanja ryžu	87
Tabela 5 16 Współczynniki korelacji r-Pearsona nomiedzy predkościami	
katowymi przyrostem predkości a pohorem mocy	88
Tabela 5.17 Współczynniki korelacji r-Pearsona pomiedzy predkościami a	00
noborem mocy dla noszczególnych tarcz rozdrabniacza pieciotarczowago	01
Tobela 5.18. Uszeregowane rospaco konfiguracia ustawiań tarcz rozdrabniacza	91
wzgladam nahoru magy na rozdrahniania	04
Tabala 5 10. Wanółazymiliej koralacji z Doarcona nomiodzy prodkościomi	94
kotounimi nezurostom neodkości o undoinościa rozdrobnionia	05
Tabala 5 20. Llazaragowana ragrago kanfiguragia watawiać taraz razdrahniagza	93
Tadeta 5.20. Oszeregowane rosnąco konfiguracje ustawien tarcz rozdradniacza	07
T-h-l- 5 21 Way (h-manile) h-m-l-ii n D-m-m-m-minil-	97
Tabela 5.21. wspołczynniki korelacji r-Pearsona pomiędzy prędkościami	00
kątowymi, przyrostem prędkości a jednostkowym zużyciem energii	98
l abela 5.22. Uszeregowane rosnąco konfiguracje ustawien tarcz rozdrabniacza	100
względem jednostkowego zapotrzebowania na energię	. 100
Tabela 5.23. Wspołczynniki korelacji r-Pearsona pomiędzy prędkosciami	101
kątowymi, przyrostem prędkości a stopniem rozdrobnienia produktu	. 101
l abela 5.24. Uszeregowane rosnąco konfiguracje ustawien tarcz rozdrabniacza	100
względem 80% stopnia rozdrobnienia	. 103
Tabela 5.25. Wyniki badań zintegrowanej energochłonności rozdrabniania	101
ziaren ryżu i kukurydzy	. 104
Tabela 5.26. Wyniki analizy statystycznej wartości zintegrowanej	
energochłonności	. 105
Tabela 5.27. Analiza korelacji zintegrowanej energochłonności ze zmiennymi	
niezależnymi	. 105
Tabela 5.28. Wyniki analizy regresji liniowej zintegrowanej energochłonności	. 106
Tabela 5.29. Zmienne modelu i wyniki badań zrównoważonej emisyjności	
rozdrabniania kukurydzy, $t_R = 1$ h, $W_i^* = 4,50$ kJ·kg <sup>-1</sup> , $k_e = 0,4$	. 108
Tabela 5.30. Zmienne modelu i wyniki badań zrównoważonej emisyjności	
rozdrabniania ryżu, dla $t_R = 1$ h, $W_i^* = 4,55$ kJ·kg <sup>-1</sup> , $k_e = 0,4$	. 109
Tabela 5.31. Wyniki analizy statystycznej wartości zrównoważonej emisyjności	
	. 110
Tabela 5.32. Analiza korelacji zrównoważonej emisyjności ze zmiennymi	
niezależnymi	. 110
Tabela 5.33. Wyniki analizy regresji liniowej zrównoważonej emisyjności	. 111
Tabela 5.34. Wartości funkcji oceny energetyczno-środowiskowej rozdrabniania	
ziaren ryżu i kukurydzy	. 113

14
14
15
16

# SPIS RYSUNKÓW

Rys.	2.1. Schemat obciążeń i naprężeń podczas quasi-ściskania; F - siła	
	obciążająca. Opracowanie własne na podstawie [80]	19
Rys.	2.2. Model quasi-ścinania materiału w rozdrabniaczu wielotarczowym, d <sub>1</sub> ,	
	$d_2$ , $d_3$ – średnice otworów, $h_1$ , $h_2$ , $h_3$ – grubości tarcz, $s_1$ – wymiar szczeliny	
	międzytarczowej, F – siła wymuszająca, $\omega_1$ , $\omega_2$ , $\omega_3$ – prędkości kątowe	
	tarcz	19
Rys.	2.3. Czynniki mające wpływ na proces wielotarczowego rozdrabniania.	
	Opracowanie własne na podstawie [100]	21
Rys.	2.4. Schemat przepływu masy w rozdrabniaczu wielotarczowym	
	z oznaczeniem efektywnych pól (powierzchni) rozdrabniania.	
	Opracowanie własne na podstawie [85]	22
Rys.	2.5. Kryteria funkcjonalne w ocenie wielotarczowego procesu	
	rozdrabniania	29
Rys.	2.6. Przedziały zmienności zapotrzebowania na energię podczas	
	rozdrabniania wybranych materiałów [118]	33
Rys.	4.1 Zmienne zależne i niezależne i ich wzajemne relacje w procesie	
	wielotarczowego, wielokrawędziowego rozdrabniania	41
Rys.	4.2. Schemat ideowy rozmieszczenia otworów roboczych i strefy zasilania	
	pierwszej tarczy	44
Rys.	4.3. Zależności geometryczne pola powierzchni wspólnej przekroju otworu	
	i strefy dozowania dla $y_0 \in (-3r, -2r]$	46
Rys.	4.4. Pole powierzchni wspólnej przekroju otworu i strefy dozowania dla	
	$y_0 \in (-2r, -r].$	47
Rys.	4.5. Pole powierzchni wspólnej przekroju otworu i strefy dozowania dla	
	$y_0 \in (r, 2r]$	48
Rys.	4.6. Pole powierzchni wspólnej przekroju otworu i strefy dozowania dla	
	$y_0 \in (2r, 3r]$	49
Rys.	4.7. Interpretacja graficzna modelu energochłonności rozdrabniania	54
Rys.	4.8. Ziarniaki biomasy przygotowane do próby wytrzymałościowej,	
	a) ryżu, b) kukurydzy	63
Rys.	4.9. Przyrząd do ścinania ziaren biomasy – projekt G. Szali	64
Rys.	4.10. 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	65
Rys.	4.11. Schemat budowy i zasady działania stanowiska pomiarowego	66
Rys.	4.12. Budowa modułu maszynowego stanowiska inteligentnego	
	monitorowania charakterystyk użytkowych rozdrabniania: 1-, 2-, 3-, 4-, 5-	
	silniki napędowe tarcz rozdrabniających, 6- korpus, 7- kosz zasypowy, 8-	
	zespół tarcz, 9- kosz odbiorczy, 10- obudowa	66
Rys.	4.13. Elementy systemu sterowniczego monitorowania charakterystyk	
	użytkowych procesu wielotarczowego rozdrabniania	68
Rys.	4.14. Elementy zintegrowanego systemu identyfikacji technik	
	rozdrabniania	69

Rys.	4.15. Interfejs komunikacyjny oprogramowania Młyn 2018	69
Rys.	4.16. Interfejs komunikacyjny - blok sterowania dla operatora systemu	70
Rys.	4.17. Interfejs komunikacyjny – blok wyników	70
Rys.	4.18. Pasek rejestracji/zapisu wyników	71
Rys.	5.1. Wykres sił ściskających $F_{max}$ dla poszczególnych ziaren ryżu w odniesieniu do ich objętości.	75
Rys.	5.2. Wykres sił $F_{max}$ dla poszczególnych ziaren kukurydzy w odniesieniu do ich objętości	76
Rys.	5.3. Wykres sił tnących $F_T$ dla poszczególnych ziaren ryżu w odniesieniu do ich objętości	78
Rys.	5.4. Wykres sił tnących $F_T$ dla poszczególnych ziaren kukurydzy w odniesieniu do ich objętości	78
Rys.	5.5. Pobór mocy w funkcji przyrostu prędkości podczas rozdrabniania kukurydzy dla PB I	89
Rys.	5.6. Pobór mocy w funkcji przyrostu prędkości podczas rozdrabniania ryżu dla PB I	89
Rys.	5.7. Pobór mocy w funkcji przyrostu prędkości podczas rozdrabniania kukurydzy dla PB II	89
Rys.	5.8. Pobór mocy w funkcji przyrostu prędkości podczas rozdrabniania ryżu dla PB II	89
Rys.	5.9. Pobór mocy w funkcji przyrostu prędkości podczas rozdrabniania kukurydzy dla PB IV	90
Rys.	5.10. Pobór mocy w funkcji przyrostu prędkości podczas rozdrabniania ryżu dla PB IV	90
Rys.	5.11. Pobór mocy w funkcji przyrostu prędkości podczas rozdrabniania kukurydzy dla PB IV	90
Rys.	5.12. Pobór mocy w funkcji przyrostu prędkości podczas rozdrabniania ryżu dla PB V	90
Rys.	5.13. Zmiany poboru mocy podczas rozdrabniania kukurydzy w PB III	90
Rys.	5.14. Zmiany poboru mocy podczas rozdrabniania ryżu w PB III	90
Rys.	5.15. Pobór mocy w funkcji prędkości kątowej podczas rozdrabniania kukurydzy na tarczy 1	92
Rys.	5.16. Pobor mocy w funkcji prędkości kątowej podczas rozdrabniania ryżu na tarczy 1	92
куs. D	5.17. Pobor mocy w funkcji prędkości kątowej podczas rozdrabniania kukurydzy na tarczy 2	92
Rys.	5.18. Pobor mocy w lunkcji prędkości kątowej podczas rozdrabniania ryżu na tarczy 2	92
Rys.	5.19. Podor mocy w funkcji prędkości katowej podczas rozdrabniania kukurydzy na tarczy 3	92
Rys.	na tarczy 3	92
куs.	5.21. Pobor mocy w lunkcji prędkości kątowej podczas rozdrabniania kukurydzy na tarczy 4	93
KYS.	na tarczy 4	93
куs.	s.25. robor mocy w lunkcji prędkości kątowej podczas rozdrabniania kukurydzy na tarczy 5	93

Rys.	5.24. Pobór mocy w funkcji prędkości kątowej podczas rozdrabniania ryżu	
	na tarczy 5	93
Rys.	5.25. Wydajność rozdrabniania kukurydzy w funkcji przyrostu prędkości	
	dla PB I i PB II	96
Rys.	5.26. Wydajność rozdrabniania kukurydzy w funkcji przyrostu prędkości	
•	dla PB IV i PB V	96
Rys.	5.27. Wydajność rozdrabniania ryżu w funkcji przyrostu prędkości dla PB	
	I i PB II	96
Rvs.	5.28. Wydainość rozdrabniania ryżu w funkcji przyrostu predkości dla PB	
5	IV i PB V	96
Rvs.	5.29. Zmiany wydainości rozdrabniania kukurydzy w PB III	96
Rvs.	5.30. Zmiany wydainości rozdrabniania ryżu w PB III.	
Rvs	5 31 Jednostkowe zapotrzebowanie na energie rozdrabniania kukurydzy	
11,50	w funkcji przyrostu predkości dla PB Li PB II	99
Rvs	5 32 Jednostkowe zapotrzebowanie na energie rozdrabniania kukurydzy	) )
itys.	w funkcji przyrostu predkości dla PB IV i PB V	99
Rvs	5 33 Jednostkowe zapotrzebowanie na energie rozdrabniania ryżu	))
itys.	w funkcji przyrostu predkości dla PR Li PR II	00
<b>D</b> <sub>VC</sub>	5 34 Jednostkowe zapotrzebowanie na energie rozdrabniania ryżu	))
itys.	w funkcji przyrostu predkości dla DP IV i DP V	00
Duc	5 35. Zmiany jednostkowego zapotrzebowania na energie rozdrobnionia	77
Kys.	kukurudzu w DR III	00
Duc	5.26 Zmiany inducetkowana zanatrzehowania na anarria rozdrehniania	77
Kys.	5.50. Zhilany jeunosikowego zapolizebowania na energię tozurabilania	00
Drug	1920 w FD III	99
Kys.	<i>J. DD L: DD L</i>	102
D	$\begin{array}{c} \text{UIA PD II PD II} \\ \text{5.29} & 800( -4 - \pi \frac{1}{2} + \frac{1}{2$	. 102
Kys.	3.56. 80% stopien rozarodnienia kukuryazy w funkcji przyrostu prędkości dlo DD IV : DD V	102
D	$\begin{array}{c} \text{Ula PD IV IPD V} \\ \text{5.20}  800\%  \text{starting}  \text{starting} $	. 102
Kys.	5.59. 80% stopien rozdrodnienia ryzu w lunkcji przyrosiu prędkości dla	100
ъ	PB I1 PB II	. 102
Kys.	5.40. 80% stopien rozdrobnienia ryzu w runkcji przyrostu prędkości dla	100
D	PB IV 1PB V	. 102
Rys.	5.41. Zmiany 80% stopnia rozdrobnienia kukurydzy w PB III	. 102
Kys.	5.42. Zmiany 80% stopnia rozdrobnienia ryzu w PB III	. 102
Kys.	5.43. Zintegrowana energochłonność rozdrabniania kukurydzy w funkcji	100
-	przyrostu prędkości kątowej	. 106
Rys.	5.44. 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>	. 107
Rys.	5.45. 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>	. 107
Rys.	5.46. Zrównoważona emisyjność rozdrabniania kukurydzy w funkcji	
	przyrostu prędkości kątowej	. 112
Rys.	5.47. Funkcja oceny energetyczno-środowiskowej rozdrabniania	
	kukurydzy w funkcji przyrostu prędkości kątowej	. 115

Rys. 5.48. Funkcja oceny energetyczno-środowiskowej ryżu w funkcji prędkości	
kątowej piątej tarczy rozdrabniacza pięciotarczowego, gdy $\omega_4$ zawierała	
się w przedziale (20-100) rad $\cdot$ s <sup>-1</sup>	116

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

#### STRESZCZENIE

W pracy opisano, analizowano, badano i oceniano zagadnienia inżynierii mechanicznej, w zakresie budowy i eksploatacji rozdrabniaczy, oceny energochłonności i emisyjności systemów rozdrabniania biomasy uziarnionej przeznaczonej do dalszego energetycznego wykorzystania. W rozprawie zawarto analizy dotyczące: właściwości materiału rozdrabnianego, relacji: maszyna - materiał - proces - cel energetyczny użytkowych rozdrabniania oraz zintegrowanej środowisko. charakterystyk energochłonności, zrównoważonej emisyjności i funkcji oceny energetycznośrodowiskowej. Opracowano metodykę badań oraz kryterialnej oceny energochłonności i emisji CO<sub>2</sub> w kierunku poprawy parametrów procesu wielotarczowego rozdrabniania tj. obniżenia zużycia energii, poboru mocy, poprawy granulometrii produktu i wydajności procesu; opracowano autorskie modele zintegrowanej energochłonności, zrównoważonej emisyjności oraz funkcję oceny energetyczno-środowiskowej będaca wyznacznikiem efektywności procesu. Dokonano uporządkowania i usystematyzowania stanu wiedzy i techniki w zakresie ocen energetyczno-środowiskowych rozdrabniania. Badania przeprowadzono na rozdrabniaczu pięciotarczowym w pięciu programach badawczych testując programowane prędkości kątowe tarcz rozdrabniających. Dla każdego z programów badawczych wyznaczono wartości wydajności, jednostkowego zapotrzebowania na energię, stopnia rozdrobnienia, zrównoważonej emisyjności, zintegrowanej energochłonności i funkcji oceny energetyczno-środowiskowej. Wyniki badań poddano analizie statystycznej. Na podstawie przeprowadzony badań własnych stwierdzono, że prędkość katowa tarcz, a w konsekwencji prędkość liniowa krawędzi rozdrabniających, wywiera istotny wpływ na wartości zintegrowanej energochłonności i zrównoważonej emisyjności, co zostało ujęte w oryginalnym wskaźniku oceny energetyczno-środowiskowej. W ostatniej części opracowania przedstawiono najważniejsze wnioski poznawcze, aplikacyjne oraz kierunki dalszych badań budowy i eksploatacji rozdrabniaczy (młynów) i-procesu rozdrabniania.

### Analysis of the multi-disc grinding process of biomass in terms of energy consumption and CO<sub>2</sub> emissions

### SUMMARY

In this work, the issues of mechanical engineering involved in the design, operation, energy consumption of grinders and emission intensity of grainy biomass grinding systems intended for further energy use, have been described, analyzed and assessed. The dissertation contains analyses regarding: properties of the material to be grinded, the relation between a machine - material - process - energy goal - environment, functional characteristics of grinding and integrated energy consumption, sustainable emissivity and the function of energy and environmental assessment. A research methodology and a criteria-based assessment method of energy consumption and CO<sub>2</sub> emissions to be used for improvement of the multi-disc grinding process parameters, i.e. reduction of energy consumption, power consumption, improvement of the product granulometry and the process efficiency, has been developed; original models of integrated energy consumption, sustainable emissivity and the function of energy and environmental assessment, that is, the process efficiency determinants, have been developed. The knowledge and technologies in the field of energy and environmental assessment of grinding have been systematized. The research was carried out on a fivedisk mill, in five research programs to test the programmed angular speed of grinding discs. The values of efficiency, unit energy demand, degree of fragmentation, sustainable emissivity, integrated energy consumption and the function of energy and environmental assessment were determined for each setting. The results of the study were subjected to statistical analysis. The results of the author's own research, have proved that the disc angular velocity, and subsequently, the linear velocity of the grinding edges, exerts a significant influence on the values of integrated energy consumption and sustainable emissivity which has been included in the original indicator of energy and environmental assessment. The last part of the study presents the most important cognitive and practical conclusions as well as the directions of further research on the grinders (mills) design and operation and the grinding process.