

Weronika Kruszelnicka

Zintegrowana inżynieria maszyn i urządzeń procesów rozdrabniania ziaren biomasy



POLITECHNIKA
BYDGOSKA
Wydawnictwa Uczelniane

Weronika Kruszelnicka

Zintegrowana inżynieria maszyn i urządzeń procesów rozdrabniania ziaren biomasy



**POLITECHNIKA
BYDGOSKA**
Wydawnictwa Uczelniane

Recenzent

dr hab. inż. Jacek Feliks, prof. AGH

Opracowanie redakcyjne i techniczne
mgr Grażyna Jarzyna, mgr Daniel Morzyński

Projekt okładki

mgr inż. Daniel Morzyński

Badania naukowe finansowane przez:

Narodowe Centrum Nauki nr projektu:
DEC-2021/05/X/ST8/00114 w latach 2021-2022

Ministerstwo Nauki i Szkolnictwa Wyższego
nr projektu DI2016 001646 w latach 2017-2021

Narodową Agencję Wymiany Akademickiej
nr projektu BPN/BEK/2021/1/00201 w 2022 roku

Weronika Kruszelnicka jest stypendystką
korzystającą ze wsparcia finansowego Fundacji na rzecz Nauki Polskiej

© Copyright

Wydawnictwa Uczelniane Politechniki Bydgoskiej
Bydgoszcz 2023

Utwór w całości ani we fragmentach nie może być powielany
ani rozpowszechniany za pomocą urządzeń elektronicznych,
mechanicznych, kopiujących, nagrywających i innych
bez pisemnej zgody posiadacza praw autorskich.

ISBN 978-83-66530-77-5

Wydawnictwa Uczelniane Politechniki Bydgoskiej

Redaktor Naczelny

prof. dr hab. inż. Stanisław Mroziński

ul. Sucha 9B, 85-796 Bydgoszcz, tel. 52 3749482, 52 3749426

e-mail: wydawucz@pbs.edu.pl <https://wydawnictwa.pbs.edu.pl>

Wyd. I. Ark. aut. 14,5. Ark. druk. 14,2.

Zakład Małej Poligrafii PBS Bydgoszcz, ul. Sucha 9B

Spis treści

PRZEDMOWA	5
1. WPROWADZENIE	7
1.1. Geneza podjętej problematyki.....	7
1.2. Cele pracy.....	10
1.3. Sformułowanie problemu.....	12
1.4. Zakres pracy.....	13
2. INTEGRON – MODEL INŻYNIERII ROZDRABNIANIA	14
3. CELOWOŚĆ I ENERGIA MINIMUM W INŻYNIERII ROZDRABNIANIA	19
3.1. Cel i energia minimum – proces (zjawisko) rozdrabniania.....	19
3.1.1. Cel – rozdrabnianie, a właściwości ziaren biomasy.....	24
3.1.2. Cel podziału, a sposób i warunki obciążenia ziarna.....	35
3.2. Celowość i minimum energii – badania.....	40
3.2.1. Metody badań pojedynczych cząstek.....	42
3.2.2. Metody badań populacji ziaren.....	48
3.2.3. Badania jakościowe i ilościowe procesów podziału ziarna.....	51
4. PIĘTROWOŚĆ STRUKTURY – CZYNNIKI WPLYWAJĄCE NA OCENĘ MASZYNOWEGO ROZDRABNIANIA	58
4.1. Relacje czynników materiałowych i wskaźników rozdrabniania.....	63
4.2. Relacje czynników maszynowych i wskaźników rozdrabniania.....	64
4.3. Relacje czynników procesowych i wskaźników rozdrabniania.....	65
5. MODELE ROZDRABNIANIA – MATEMATYCZNE UJĘCIE ZASADY ENERGII MINIMUM I PIĘTROWEJ STRUKTURY	68
5.1. Modele empiryczne.....	68
5.2. Modele statystyczne.....	71
5.3. Modele populacyjne.....	74
5.4. Modele wyprowadzone na podstawie praw mechaniki.....	75
6. BADANIA FENOMENOLOGICZNE W KIERUNKU MODELOWANIA ZMIAN ENERGII MINIMUM	78
6.1. Metodyka badań.....	79
6.1.1. Wyznaczenie wpływu wielkości ziaren na energię rozdrabniania.....	79
6.1.2. Wyznaczenie wpływu wilgotności i wielkości ziaren na energię rozdrabniania.....	80
6.1.3. Wyznaczenie wpływu krotności obciążeń na energię i prawdopodobieństwo rozdrabniania.....	80
6.1.4. Energia rozdrabniania.....	81
6.1.5. Prawdopodobieństwo rozdrabniania.....	82

6.2. Wpływ postaci geometrycznej ziaren na energię i prawdopodobieństwo rozdrabniania.....	84
6.3. Wpływ wilgotności na energię i prawdopodobieństwo rozdrabniania	89
6.4. Modele energetyczne postaci geometrycznej i wilgotności.....	93
6.5. Wpływ krotności obciążeń na energię i prawdopodobieństwo rozdrabniania.....	95
7. BADANIA RELACJI PIĘTROWEJ STRUKTURY SYSTEMU ROZDRABNIANIA	102
7.1. Materiał i metody	102
7.1.1. Innowacyjne stanowisko badań rozdrabniania.....	102
7.1.2. Plan badań.....	107
7.2. Relacje pomiędzy prędkością kątową tarcz i krotnością rozdrabniania a wybranymi wskaźnikami oceny.....	115
7.3. Relacje pomiędzy intensywnością dozowania wsadu, prędkościami kątowymi tarcz a wskaźnikami rozdrabniania.....	128
7.3.1. Relacje pomiędzy prędkością kątową pierwszej tarczy, intensywnością dozowania a wskaźnikami rozdrabniania	128
7.3.2. Relacje pomiędzy intensywnością dozowania wsadu i prędkością kątową tarcz a wybranymi wskaźnikami oceny	140
7.4. Relacje pomiędzy energią rozdrabniania a granulometrią produktu	151
8. AUTOREGULACJA – ZASTOSOWANIE SZTUCZNEJ INTELIGENCJI W PROJEKTOWANIU I ROZWOJU PROCESÓW ROZDRABNIANIA....	162
8.1. Integracja elementów struktury systemu rozdrabniania jako warunek autoregulacji.....	166
8.2. Algorytm genetyczny dla minimalizacji zużycia energii i emisji rozdrabniania.....	168
8.3. Autoregulacja nastaw procesowych rozdrabniania z wykorzystaniem inteligentnego systemu monitorowania	176
9. PODSUMOWANIE I WNIOSKI	193
LITERATURA	200
STRESZCZENIE	226
SUMMARY	227

PRZEDMOWA

Badania i podstawy rozwoju maszynowego rozdrabniania biomateriałów ziarnistych skierowane są na poznanie fenomenów i procesów mechanicznego obciążania i odkształcania oraz przetwarzania uziarnionych materiałów energetycznych dla zdobycia wiedzy i tworzenia innowacji. Praktycznym celem monografii są lepsze stany postulowane (SP): rozwój jakości produktu, efektywności procesu, nieszkodliwości produktu i procesu rozdrabniania przez innowację, modernizację i optymalizację warunków technicznych (WT): maszyn i urządzeń procesów inżynierii mechanicznej rozdrabniania.

Badania to teoretyczne doświadczanie cyfrowe, symulacyjne, fizyczne, mechaniczne, biologiczne, celowo konfigurowane sekwencje rzeczywistości energetycznej biomasy uziarnionej w przetwarzaniu (przekształcaniu) mechanicznym, według podstaw poznania i rozwoju procesów rozdrabniania.

Rozwój obejmuje tworzenie i weryfikację podstaw inżynierii mechanicznej budowy i eksploatacji maszyn, efektywności procesów, jakości materiałów w rozdrabnianiu. Jest to proces twórczy, mający na celu: zdobywanie wiedzy o biomacie i jej funkcjach; określenie stosunku do innych bytów, źródeł energii, procesów, zjawisk i usytuowanie wśród nich; podjęcie działalności praktycznego i twórczego panowania nad maszynami, procesami, materiałami i instalacjami przetwarzania oraz rozwoju biomasy.

Poruszane w pracy zagadnienia obejmują tematykę wzajemnych relacji własności materiałów rozdrabnianych, cech konstrukcyjnych maszyn rozdrabniających do celowego sterowania jakością produktu, efektywnością, nieszkodliwością środowiskową produktu i procesu. Badania wyjaśniają zależności pomiędzy właściwościami materiałów rozdrabnianych a przebiegiem procesu rozdrabniania w rozdrabniaczach wielotarczowych na potrzeby rozwoju i upowszechnienia tego typu konstrukcji. Rozważania teoretyczne i eksperymentalne stanowią istotny wkład do zrozumienia zjawisk podczas maszynowego rozdrabniania materiałów niekruchych, w tym wpływu typu obciążeń, właściwości materiałów, cech konstrukcyjnych i procesowych młynów w pierwszej kolejności na energię rozdrabniania i skład ziarnowy produktu.

Zawarte w monografii wyniki badań mogą być wykorzystywane przez szerokie grono odbiorców podejmujących problematykę udoskonalania konstrukcji maszyn i procesów przetwórczych ziaren biomasy, m.in. naukowców, studentów, mechaników, inżynierów, projektantów, technologów reprezentujących różne dziedziny naukowe i różne branże przemysłowe. Przede wszystkim zgromadzony materiał może być pomocny w opracowywaniu wysokowydajnych i niskoenergochłonnych konstrukcji rozdrabniających, ale także kontrolowaniu i redukcji niepożądanych, pogarszających jakość uszkodzeń ziaren biomasy podczas zbioru, magazynowania czy transportu.

Wyniki badań i analiz zawartych w monografii powstały w ramach prowadzonych własnych projektów badawczych na temat rozdrabniania biomateriałów,

tj. projektu nr DI2016 001646 pt.: *Inteligentne monitorowanie charakterystyk rozdrabniania biomasy uziarnionej* finansowanego przez Ministerstwo Nauki i Szkolnictwa Wyższego w latach 2017–2021, projektu nr DEC-2021/05/X/ST8/00114 pt.: *Wprowadzenie wilgotności jako parametru funkcji prawdopodobieństwa rozdrabniania biomasy ziarnistej – staż naukowy* w Purdue University w USA finansowanego w konkursie MINIATURA V przez Narodowe Centrum Nauki w latach 2021–2022 oraz projektu nr: BPN/BEK/2021/1/00201 pt.: *Opracowanie modelu do badania prawdopodobieństwa pęknięcia ziaren poddanych wielokrotnym obciążeniom* finansowanego przez Narodową Agencję Wymiany Akademickiej.

*

Składam podziękowania wszystkim osobom wspierającym prowadzone badania, studentom, dyplomantom, a przede wszystkim mentorom i opiekunom naukowym. Pragnę także podziękować pracownikom Uniwersytetu Purdue, w szczególności profesorowi Kingsly Ambrose, za udostępnienie aparatury badawczej, życzliwe przyjęcie i opiekę naukową podczas realizacji części badań w Stanach Zjednoczonych Ameryki. Serdeczne podziękowania przekazuję Szanownym Recenzentom za cenne i wartościowe uwagi ulepszające treść monografii.

I would like to thank all those who supported this research, students, graduate students, and above all, mentors and scientific supervisors. I would also like to thank the staff of Purdue University, in particular Professor Kingsly Ambrose for providing research equipment, kind reception and scientific supervision during the implementation of part of the research in the United States of America. I would like to express my sincere thanks to the Honorable Reviewers for valuable comments improving the content of this monograph.

Weronika Kruszelnicka

1. WPROWADZENIE

1.1. GENEZA PODJĘTEJ PROBLEMATYKI

Zjawisko podziału, przekształcania struktury postaciowej materiałów jest obecne w wielu dziedzinach przemysłowych i naukowych, dotyczy szerokiej gamy materiałów, np.: stali, skał, minerałów, tworzyw sztucznych, materiałów biologicznych itd. Może przybierać formę kontrolowaną w procesach celowego podziału, np. przemiału (rozdrabniania), recyklingu mechanicznego, ekstrakcji, tłoczenia, przecierania, krojenia, gdzie w zamyśle niezbędne jest osiągnięcie konkretnego wymiaru cząstek lub oddzielenie substancji, składników tworzących strukturę materiału [1–3]. Niekontrolowany podział struktury, czyli pęknięcie – jeżeli dotyczy materiałów konstrukcyjnych – jest z kolei efektem ubocznym eksploatacji, przetwarzania i prowadzi z reguły do obniżenia jakości materiałów przetwarzanych lub uszkodzeń elementów. W przypadku biologicznych materiałów ziarnistych typu ziarna zbóż niepożądane uszkodzenia mogą wynikać z operacji transportu, magazynowania, suszenia, pakowania itd. w których ziarna narażone są na występowanie obciążeń zewnętrznych [4]. Przyjmując, że rozdrabnianie obejmuje wszystkie zjawiska od momentu zainicjowania pęknięcia do trwałego podziału materiału, można powiedzieć, że jest jednym z powszechniej występujących procesów.

Rozdrobnienie możliwe jest, jeżeli materiał zostanie poddany obciążeniom zewnętrznym, które będą przekraczać wartość sił wiązań cząsteczkowych, powodując przemieszczenie cząstek a w konsekwencji uszkodzenie struktury wewnętrznej [3, 5, 6]. O ile dla materiałów kruchych (można tu zakwalifikować np. skały, minerały) opisy fenomenu rozdrabniania (mechanizmu podziału) dla pojedynczej cząstki i grupy cząstek podczas rozdrabniania maszynowego są dość obszerne, to dla materiałów biologicznych typu ziarna zbóż tych opisów jest znacznie mniej. W przypadku skał i minerałów struktura wewnętrzna jest mniej zróżnicowana niż w przypadku ziaren zbóż, co pozwala na opis np. związków pomiędzy energią rozdrabniania a wielkością ziaren przed i po rozdrobnieniu. W przypadku ziaren zbóż podział materiału (tj. zapotrzebowanie energetyczne procesu, wielkość i kształt cząstek po rozdrobnieniu) jest silnie zależny od struktury wewnętrznej (m.in. substancji budujących ziarno, stopnia upakowania i uporządkowania komórek), twardości, wilgotności i wytrzymałości poszczególnych warstw materiału, ale także od kształtu i wielkości ziarna [7–9]. Wywiera to istotny wpływ na przebieg rozdrabniania w młynach, a w szczególności zapotrzebowanie na energię, wydajność czy stopień rozdrobnienia [10–13]. Aby poprawić wydajność i efektywność oraz obniżyć zużycie energii maszyn rozdrabniających, kawałkujących materiały ziarniste (np. ziarna zbóż) lub zmniejszyć niechciane uszkodzenia podczas operacji technologicznych, niezbędne jest pogłębienie wiedzy dotyczącej zachowania się materiałów pod wpływem obciążeń o różnym

charakterze, zarówno statycznym, jak i dynamicznym, zmiennej struktury wewnętrznej, wilgotności, temperatury, wielkości ziaren.

Nieustanne poszukiwanie związków i relacji pomiędzy właściwościami materiałów rozdrabnianych, parametrami procesowymi czy cechami konstrukcyjnymi młynów wynika z konieczności doskonalenia procesów i rozwoju technologicznego w celu maksymalizacji korzyści (poprawy wydajności, jakości produktu) a minimalizacji nakładów w postaci zużycia energii, powstających odpadów czy emisji [14–17]. Jest to uwarunkowane m.in. założeniami polityki klimatycznej i rozwoju zrównoważonego.

Osiągnięcie postulowanych, lepszych stanów wysokiej jakości produktu, efektywności i nieszkodliwości realizowane jest poprzez zastosowanie odpowiednich procedur projektowania maszyn i procesów. Znaczącą rolę odgrywa tutaj także czynne monitorowanie parametrów mających istotny wpływ na wartości stanów postulowanych, a ich kontrola i weryfikacja w sprzężeniu zwrotnym przyczynia się do poprawy jakości procesu i udoskonalania konstrukcji maszyny. Zazwyczaj w systemie ciągłym monitoruje się moc pobieraną, zużycie energii, prędkości i temperaturę elementów roboczych, drgania, masę produktu rozdrabniania i wielkości cząstek. Ze względu na cel i wymagania stawiane procesom rozdrabniania ziaren zbóż, różne będą kryteria brane pod uwagę w ocenie i optymalizacji procesu, a te z kolei warunkują powstawanie nowości, innowacyjnych idei i konstrukcji oraz sposobów i procesów [18–20].

Wcześniejsze badania [21] wykazały, że odpowiednio dobrane kryteria efektywnościowe w procesie projektowania rozdrabniaczy przyczyniają się do poprawy parametrów procesu. Stanowią także wyznacznik doboru parametrów rozdrabniania dla danego rodzaju materiału wsadowego [20]. Jak wskazano w [22], podstawą ocen jest właściwie zbudowany model matematyczny wiążący zmienne wejściowe i wyjściowe konstrukcji i procesu. Pierwszym krokiem winna być identyfikacja procesów i podprocesów, na podstawie których dobiera się odpowiednie kryteria oceny [21]. Kluczowe zatem dla udoskonalenia konstrukcji rozdrabniających jest poznanie właściwości ziaren i ich relacji z cechami konstrukcyjnymi oraz ruchowymi podczas rozdrabniania. Istotna z punktu widzenia projektowania, modelowania procesów wydaje się znajomość sił, zakresu energetycznego wywołującego uszkodzenie/pęknięcie ziarna, co z uwagi na różnorodność strukturalną ziaren biomasy jest zagadnieniem złożonym [5]. W rozdrabnianiu ważny jest również związek pomiędzy energią potrzebną do zainicjowania pęknięcia i jego propagacji a efektem w postaci zmniejszenia wymiarów.

Zróznicowanie struktury biomasy pomiędzy gatunkami, ale także w obrębie jednego gatunku sprawia, że do tej pory nie powstały skuteczne teorie pozwalające na opis mechanizmów rozdrabniania pojedynczej cząstki czy ich populacji w procesach maszynowych. Podejmowano, co prawda, próby adaptacji, modyfikacji istniejących teorii rozdrabniania, np. Rittingera, Kicka, Bonda, Charlesa-Walkera dla różnych typów młynów, jednak nie osiągnięto zadowalających rezultatów i modeli, które byłyby uniwersalne dla rozdrabniania różnego typu ziaren lub uwzględniały ich zmienne właściwości m.in. wilgotność.

Podstawą zrozumienia zjawisk i procesów inżynierii mechanicznej, zachodzących w rozdrabniaczach jest określenie związków pomiędzy właściwościami materiału rozdrabnianego a cechami konstrukcyjnymi młyna, parametrami procesu i wskaźnikami oceny, np. wydajności, energochłonności czy stopnia rozdrobnienia. Do tej pory stwierdzono na przykładzie młynów kulowych [23], walcowych [24, 25], młotkowych [26, 27], że wartości tych wskaźników zmieniają się w zależności od parametrów procesowych i konstrukcyjnych młynów, np. wielkości szczeliny rozdrabniającej, prędkości obrotowych, liczby kul w młynach kulowych. Prowadzone są także badania mające na celu opracowanie modeli energii rozdrabniania w zależności od wielkości cząstek produktu na podstawie znanych, wymienionych wcześniej teorii rozdrabniania [28–31], co w szerszej perspektywie ma prowadzić do zrozumienia zjawisk podziału na potrzeby obniżania energochłonności i rozwoju nowych idei, konstrukcji rozdrabniających.

Do rozdrabniania ziaren zbóż wykorzystuje się najczęściej młyny młotkowe [26, 32] oraz walcowe [33–36] oddziałujące na materiał odpowiednio poprzez uderzenia z dużą prędkością oraz zgniatanie. Z uwagi na zawartość włókien w okrywie nasiennej ziaren alternatywę dla tego typu maszyn mogą stanowić młyny wykorzystujące zjawisko cięcia [37]. Wcześniejsze badania wykazały, że charakteryzują się one wysoką skutecznością działania, lecz nie są często używane [38–41]. Przykładem realizacji rozdrabniacza tarczowego jest rozdrabniacz wielotarczowy, wielootworowy [38]. Ze względu na to, że urządzenie to znajduje się na etapie prac przedwdrożeniowych, niewiele jest badań dotyczących zmian energii, stopnia rozdrobnienia, wydajności w zależności od parametrów ruchu, materiału wsadowego i parametrów procesowych. Tematyka związków energii ze stopniem rozdrobnienia dla tego typu konstrukcji rozdrabniających nie została także odpowiednio zgłębiona [38]. Konieczne są zatem badania, które rozszerzą dotychczasowy stan wiedzy i techniki o zagadnienia wpływu właściwości materiałowych, konstrukcyjnych i procesowych na wskaźniki oceny rozdrabniania dla rozdrabniaczy wielotarczowych, wielootworowych. Zawarte w monografii wyniki badań są odpowiedzią na zaistniałą potrzebę.

Jednym ze skutecznych narzędzi w modelowaniu, przewidywaniu przebiegu rozdrabniania, stanowiących uzupełnienie i wspomaganie projektowania maszyn przetwórczych materiałów sypkich jest metoda elementów dyskretnych (DEM), w której obliczenia dokonywane są na podstawie znajomości parametrów materiałowych i charakterystyki kontaktów pomiędzy cząstkami i elementami roboczymi. Metoda ta pozwala na rozwiązywanie problemów eksploatacyjno-konstrukcyjnych już na etapie projektowania. Symulacja i modelowanie rozdrabniania z wykorzystaniem DEM zostało wprowadzone stosunkowo niedawno, pod koniec XX wieku. Głównie ma swoje zastosowanie w odniesieniu do rozdrabniania materiałów kruchych. Do tej pory zaledwie w kilku pracach można znaleźć próby wykorzystania DEM do symulacji rozdrabniania ziaren biomasy. Wynika to z braku danych (parametrów wejściowych) procesu rozdrabniania ziaren biomasy wymaganych do przeprowadzenia obliczeń w modelach DEM pierwotnie

opracowanych dla materiałów kruchych, ale także braku ujednoczonej metodyki wyznaczania tych parametrów dla materiałów sypkich pochodzenia biologicznego. Modele rozdrabniania zaaplikowane w DEM wykorzystują statystyczny opis zjawiska trwałego podziału cząstki. Zasadniczo składają się z dwóch funkcji: funkcji selekcji, inaczej funkcji prawdopodobieństwa, określającej prawdopodobieństwo pęknięcia ziarna przy zadanych wartościach energii [42], oraz funkcji rozdrabniania (ang. *breakage function*), które wskazują związki pomiędzy energią rozdrabniania a wielkością cząstek po rozdrobnieniu [3, 43]. Funkcje selekcji i rozdrabniania wraz z odpowiednimi współczynnikami zostały szeroko opisane w przypadku skał i minerałów [44, 45]. W odniesieniu do ziaren biomasy brak jest odpowiednich danych do prowadzenia symulacji. Konieczna jest także adaptacja istniejących modeli poprzez uwzględnianie, chociażby wilgotności ziaren czy dotąd nieopisanych zjawisk osłabiania ziaren zbóż poddanych wielokrotnym obciążeniom, aby móc precyzyjnie przewidywać przebieg procesu rozdrabniania, w tym energochłonność i stopień rozdrobnienia produktu [5]. Jedną z nielicznych prób weryfikacji możliwości stosowania modeli statystycznych uwzględnionych w DEM podjęła autorka w pracy [46], określając prawdopodobieństwo rozdrabniania ziaren ryżu i kukurydzy. Przedstawione w monografii wyniki badań stanowią kontynuację podjętej problematyki opisu prawdopodobieństwa rozdrabniania i stanowią podstawę do rozwoju modeli DEM, a przede wszystkim rozwoju metod, idei i sposobów rozdrabniania i konstrukcji rozdrabniających.

Zrealizowane badania i przedstawione w monografii wyniki stanowią zatem podstawę kreowania wysokoefektywnych, nieszkodliwych środowiskowo rozwiązań procesowych i konstrukcyjnych w inżynierii mechanicznej rozdrabniania. Uzupełniają obecny stan wiedzy o: opisy mechanizmu rozdrabniania ziaren ryżu i kukurydzy, statystyczne modele rozdrabniania tych ziaren, identyfikację procesu rozdrabniania w rozdrabniaczu tarczowym z uwzględnieniem analizy czynników kształtujących przebieg tego procesu.

1.2. CELE PRACY

Na podstawie aktualnego stanu wiedzy i techniki należy stwierdzić, że problematyka współzależności pomiędzy cechami materiału wsadowego, konstrukcyjnymi rozdrabniaczami i parametrami procesu rozdrabniania nie została dostatecznie rozpoznana i opisana. Wspomniane relacje, a zwłaszcza zależności pomiędzy postacią geometryczną materiału wsadowego, wilgotnością a energią rozdrabniania i prawdopodobieństwem rozdrobnienia, a także relacje pomiędzy parametrami procesu rozdrabniania, np. prędkością kątową, liniową krawędzi elementów rozdrabniających, intensywnością dozowania wsadu, krotnością rozdrabniania a efektami procesu w postaci krzywych uziarnienia i energochłonności jednostkowej nie zostały w pełni zidentyfikowane dla grupy innowacyjnych rozdrabniaczy wielotarczowych. Szczególną uwagę należy zwrócić na niedostateczne opisy prawdopodobieństwa rozdrobnienia w zależności od poziomu

energii odkształcenia oraz statystycznych funkcji rozdrabniania stanowiących odniesienie tych związków do kształtu krzywych uziarnienia w przypadku rozdrabniania biomateriałów. W niniejszej pracy zagadnienia te zostaną poruszone i szerzej opisane na przykładzie rozdrabniania biomasy ziarnistej: ryżu i kukurydzy w procesach rozdrabniania modelowego i procesie rozdrabniania maszynowego dla rozdrabniaczy wielotarczowych.

Opracowanie i realizacja metodyki badań dla poznania i rozwoju maszynowego rozdrabniania biomateriałów ziarnistych są naukowym celem rozprawy. Ponadto pierwszym celem szczegółowym jest (I): usystematyzowanie, uporządkowanie i poszerzenie stanu wiedzy i techniki w zakresie badań i opisów mechanicznej inżynierii rozdrabniania biomateriałów ziarnistych; drugim – (II): eksperymentalne wyznaczenie wpływu wybranych cech materiału rozdrabnianego (wielkości ziarna, wilgotności) oraz warunków obciążenia (różny rodzaj obciążeń: ściskanie i ścinanie, wielokrotność obciążania) na energię i prawdopodobieństwo rozdrabniania; trzecim – (III): eksperymentalne wyznaczenie zależności pomiędzy prędkością elementów rozdrabniających i objętością dozowanego wsadu a wybranymi wskaźnikami oceny rozdrabniania; czwartym – (IV): opracowanie postaci matematycznych modeli prawdopodobieństwa rozdrabniania dla ziaren ryżu i kukurydzy oraz modeli rozdrabniania dla rozdrabniaczy wielotarczowych.

Badawcze usystematyzowanie, wyznaczenie modeli maszyn i urządzeń rozdrabniania pozwoli na poznanie, optymalny, modernizujący i innowacyjny rozwój ich konstrukcji i przetwarzania, przewidywanie efektów rozdrabniania i usprawnienie procesu projektowania rozdrabniaczy, szczególnie symulacji procesu z wykorzystaniem metod numerycznych, w tym popularnej metody elementów dyskretnych (DEM).

Z założenia, badania wypełnią lukę w obecnym stanie wiedzy i techniki, dostarczając nowej wiedzy w inżynierii mechanicznej procesu, fenomenu rozdrabniania, poprzez statystyczne modelowanie sposobów obciążenia z uwzględnieniem wpływu właściwości ziaren, takich jak postać geometryczna, wymiar i wilgotność oraz opisów osłabienia materiałów poddanych wielokrotnym obciążeniom z punktu widzenia energii skumulowanej w kolejnych cyklach obciążenia. Według najlepszej wiedzy autorki i przeprowadzonego przeglądu literatury podobne badania dla ziaren zbóż, dotyczące statystycznych modeli rozdrabniania i osłabiania materiału w wyniku kumulacji uszkodzeń, są bardzo ograniczone. Jak stwierdzono w przeglądzie literatury, tylko nieliczne prace [4, 47–51] opisują rozdrabnianie ziaren ryżu i kukurydzy metodą prawdopodobieństwa. Zrealizowane badania dostarczają także nowej wiedzy w zakresie opisów rozdrabniania jako procesu maszynowego i identyfikacji relacji pomiędzy parametrami procesowymi maszyny a energią rozdrabniania i stopniem rozdrobnienia dla będących w fazie przedwdrożeniowej rozdrabniaczy wielotarczowych, wielootworowych. Jak wskazali Eisenlauer i Teipel [52], brak jest wiedzy opisującej relacje pomiędzy parametrami procesowymi, materiałowymi a wskaźnikami rozdrabniania w młynach wykorzystujących procesy cięcia, co ma miejsce w rozdrabniaczach

wielotarczowych. Głównym efektem badania relacji parametrów procesowych i wskaźników rozdrabniania było opracowanie systemu sterowania i monitorowania z wykorzystaniem algorytmów genetycznych, który umożliwi adaptacyjne sterowanie nastawami rozdrabniacza dla minimalizacji zużycia energii i emisyjności procesu przy zachowaniu dużej wydajności i stopnia rozdrabniania produktu.

1.3. SFORMUŁOWANIE PROBLEMU

Aby osiągnąć cele podstawowe i praktyczne, sformułowano problemy o charakterze ogólnym i szczegółowym w postaci pytań:

1. Jakie obciążenia proste, złożone lub wytężenia materiału, według przyjętej idei (fenomenu), wywołują najkorzystniejsze energetycznie odkształcenia trwałe, mikroodkształcenia w modelach wytrzymałościowych, które podwyższają jakość biomasy, jako wsadu w przeznaczeniu energetycznym?
2. Które z postępowań twórczych innowacji, modernizacji, optymalizacji (inżynierii mechanicznej) i jakie ich zakresy prowadzą do lepszych warunków technicznych (WT): maszyn, urządzeń, instalacji rozdrabniania, niezbędnych do wystąpienia wyższych stanów postulowanych (SP) utożsamianych z: rozwojem jakości produktu, efektywności procesu i nieszkodliwości produktu i procesu rozdrabniania wybranych rodzajów energetycznej i uziarnionej biomasy (ryżu, kukurydzy)?

Uznano, że rozwiązanie problemów pozwoli na osiągnięcie celów szczegółowych (I), (II), (III) i (IV), celu naukowego rozprawy i na hipotetyczne odpowiedzi na szczegółowe zadania badawcze, zarówno o charakterze podstawowym (zadanie nr 1 do 3), jak i praktycznym (zadania nr 4 do 5), co będzie istotą celowego rozwiązania naukowego i rozwoju inżynierii mechanicznej, maszynowego rozdrabniania biomasy uziarnionej.

Realizowane postępowanie badawcze doprowadziło do znalezienia odpowiedzi na sformułowane zadania szczegółowe:

1. Jakie jest prawdopodobieństwo rozdrabniania ziaren ryżu i kukurydzy w zależności od poziomu energii odkształcenia?
2. Jak wielkość ziaren, wilgotność i krotność obciążania wpływa na prawdopodobieństwo rozdrabniania ziaren ryżu i kukurydzy?
3. Czy możliwe jest opisanie empirycznych funkcji prawdopodobieństwa rozdrabniania dla ziaren biomasy za pomocą znanych statystycznych rozkładów prawdopodobieństwa, np. Weibulla, Gamma, log-normalnego?
4. Jaki wpływ na wybrane wskaźniki rozdrabniania będą wywierały zmiany prędkości elementów rozdrabniających oraz wielkości strumienia dozowania wsadu i krotności przejścia materiału przez zespół rozdrabniający?
5. Jaki jest związek pomiędzy kształtem krzywej rozdrabniania w wielotarczowym zespole roboczym a energią rozdrabniania maszynowego?

Wiedza ta pozwoli na bardziej precyzyjne modelowanie procesów rozdrabniania i niekontrolowanego pęknięcia w maszynach przetwórczych biomasy, np. przenośnikach, przesiewaczach, sorterach, dzięki czemu możliwe będzie ograniczenie niepożądanych uszkodzeń ziaren, a także poprawa działania maszyn rozdrabniających w aspekcie ich energochłonności i wydajności.

1.4. ZAKRES PRACY

Przedstawione w pracy zagadnienia obejmują: teoretyczny opis mechanizmu rozdrabniania na przykładzie ziaren biomasy wykazujących, w odróżnieniu od materiałów kruchych, właściwości sprężysto-plastyczne, analizę wpływu wybranych właściwości materiałów na przebieg procesu rozdrabniania, a także charakterystykę współzależności właściwości materiałów i parametrów konstrukcyjno-procesowych młynów jako czynników kształtujących wartości wskaźników oceny rozdrabniania. Dokonano przeglądu dotychczasowego stanu wiedzy i techniki w zakresie opisu mechanizmu rozdrabniania, badań i metod badawczych stosowanych do oznaczania energii rozdrabniania w skali pojedynczej cząstki oraz badań stanowiskowych w młynach i rozdrabniaczach na pewnej ich populacji. Omówiono również wpływ najistotniejszych parametrów materiałowych oraz procesowo-konstrukcyjnych na przebieg procesu rozdrabniania wskazywanych dotąd w literaturze. Badania eksperymentalne dotyczyły zarówno rozdrabniania w ujęciu fenomenologicznym, jak i procesowym – maszynowym. Z uwagi na typ obciążeń (głównie ścinanie, ściskanie udarowe) występujących w wielootworowych, wielotarczowych rozdrabniaczach, badania fenomenologiczne ograniczono do energetycznych aspektów modelowych procesów ściskania i ścinania pojedynczych ziaren ryżu i kukurydzy. Badano wpływ wilgotności i wielkości cząstek jako najistotniejszych, weryfikowalnych i sterowalnych właściwości materiałowych, a także krotności obciążenia z uwagi na występującą wielokrotność skutecznych obciążeń, jakim poddawany jest materiał w rozdrabniaczach tarczowych na energię oraz statystyczne prawdopodobieństwo rozdrobnienia. W badaniach maszynowych dla konstrukcji rozdrabniacza wielotarczowego analizowano wpływ wielkości strumienia dozowania wsadu, prędkości elementów rozdrabniających oraz krotności przejścia materiału przez współpracujące tarcze robocze na wybrane wskaźniki procesu rozdrabniania, co doprowadziło do sformułowania wniosków ogólnych w zakresie doskonalenia konstrukcji rozdrabniaczy wielotarczowych, wielootworowych i wyboru warunków procesu zapewniających wystąpienie stanów postulowanych niskiej energochłonności, wysokiej jakości produktu i środowiskowej nieszkodliwości. W efekcie prowadzonych badań własnych i analiz zaproponowano inteligentny system monitorowania i sterowania rozdrabniaczem wielotarczowym wykorzystujący algorytmy genetyczne do poszukiwania najlepszych nastaw parametrów procesowych ze względu na kryterium energetyczno-środowiskowe.

2. INTEGRON – MODEL INŻYNIERII ROZDRABNIANIA

Tylko niektóre opracowania naukowe stosują wartości systematyzujące i rozwojowe Integronu. Należy do nich zaliczyć prace [38, 40, 53–61]. W tworzeniu naukowych podstaw inżynierii mechanicznej, obejmujących badania i rozwój maszyn i urządzeń procesów rozdrabniania biomateriałów ziarnistych, przyjęto założenia i model ewolucyjny INTEGRONU wprowadzony przez Jacoba [54, 56, 62], którego filarami poznania i rozwoju są:

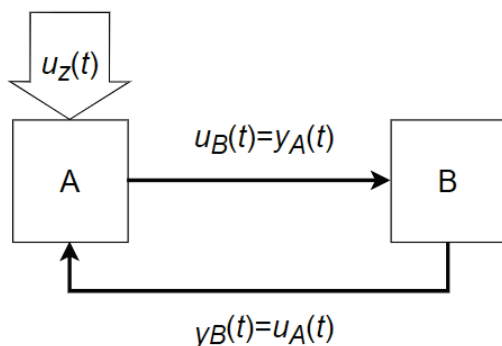
1. **Celowość**, którą wykazuje nie tylko proces – maszyna, inżynier, produkt, cały organizm, ale każda część wypełniająca pewną funkcję w dynamicznym układzie zdolnym do rozwoju [54, 56].
2. **Zasada energii minimum**, która wyraża się w tym, że wszystkie reakcje zachodzące w przetwórstwie przebiegają zawsze w kierunku zmniejszenia energii swobodnej [54, 56].
3. **Autoregulacja (trwanie)**, które dokonuje się poprzez zmiany szybkości wzajemnych oddziaływań, wyrównywania potencjałów, reakcji chemicznych (homeostaza) [54, 56].
4. **Piętrowa struktura**, która polega na tym, że każdy układ maszynowy zbudowany jest z elementów (jednostek), które połączone są w jednostki następnego rzędu itd. od molekuł, elementów, po populacje obiektów technologicznych, np. maszyn i urządzeń procesów rozdrabniania. Zatem każda jednostka zbudowana jest z podjednostek, podjednostki te ze swych podjednostek itd. [54, 56].

Celowość w odniesieniu do procesów rozdrabniania może być rozumiana jako ukierunkowanie na osiągnięcie konkretnych efektów procesu, np. uzyskiwania zakładanej wydajności, minimalizacji zużycia energii, otrzymania produktu o ustalonym składzie granulometrycznym. Związana jest z tym celowość wykorzystania produktu rozdrabniania. Inne wymagania pod względem homogeniczności i wielkości cząstek po rozdrobnieniu będą stawiane dla materiałów rozdrabnianych w przemyśle spożywczym i paszowym, inne dla mieszanek w przemyśle chemicznym, kosmetycznym czy na potrzeby przygotowania pelletów. Np. w produkcji bioetanolu wykorzystuje się cząstki słomy kukurydzianej o wielkości w zakresie od 0,50 do 3,00 mm, natomiast w procesach fermentacji metabolicznej będą to cząstki o wielkości od 0,03 do 10,00 mm [63]. Wskazuje to na konieczność postrzegania procesu rozdrabniania nie tylko przez pryzmat redukcji wymiarów, ale właśnie jako całego ‘organizmu’ wspomnianej piętrowej struktury, gdzie poszczególne działania, procesy i podprocesy są ze sobą logicznie powiązane. Stąd wynika potrzeba rozpoznania relacji, jakie zachodzą pomiędzy właściwościami materiału rozdrabnianego i sposobem jego podziału, cechami konstrukcyjnymi maszyn rozdrabniających i parametrami, wskaźnikami rozdrabniania jako procesu. Celowość procesu będzie warunkowała stopień przemiału materiału. Właściwości materiałów rozdrabnianych z kolei będą oddziaływały na wielkość zużycia energii czy rodzaj zastosowanego rozdrabniacza i typu obciążeń.

Zasada energii minimum wynika wprost z zasad zachowania energii i przebiegu procesów podziału w skali mikro, na poziomie molekularnym. W szerszym ujęciu procesów przemysłowych zasada energii minimum nabiera znaczenia użytkowego i ekonomicznego, uwarunkowanego oddziaływaniami zewnętrznymi polityki ekonomiczno-energetyczno-gospodarczej kraju, kontynentu czy świata. Efektywność energetyczna i zrównoważone wykorzystanie energii jest obecnie jednym z celów polityki energetycznej państw Unii Europejskiej, co przekłada się na potrzebę minimalizacji zużycia energii w procesach przemysłowych. Szacuje się, że zużycie energii na potrzeby rozdrabniania materiałów różnego typu wynosi ok. 4% światowego jej zużycia [64]. Ograniczanie energochłonności może być realizowane na etapie projektowania maszyn i procesów rozdrabniania, ale także podczas użytkowania, realizacji procesu. Minimalizacja zużycia energii na etapie użytkowania może być osiągnięta w wyniku ciągłej kontroli i monitorowania parametrów procesu i maszyny (np. prędkości elementów roboczych, wielkości strumienia dozowania wsadu, poboru mocy) i sterowania nimi w taki sposób, aby pobór energii był jak najmniejszy. Możliwości minimalizowania zużycia energii są w tym wypadku ograniczone przez konfigurację procesu i cechy konstrukcyjne maszyny, dlatego to etap projektowania ma duże znaczenie dla minimalizowania energochłonności. Dla odpowiedniego skonfigurowania projektu maszyny rozdrabniającej z kolei istotna jest znajomość właściwości materiałów rozdrabnianych (np. rodzaj materiału, twardość, wytrzymałość,) które będą warunkowały pobór mocy na rozdrabnianie. Sytuacją idealną byłoby, gdyby cała energia mechaniczna elementów rozdrabniających była wykorzystana do podziału ziarna, co w praktyce nie występuje z uwagi na straty oporów ruchu, rozpraszanie energii na skutek ciepła itd. Możliwe jest jednak określenie energii minimum potrzebnej do podziału ziarna, co zostanie przedstawione w kolejnych rozdziałach.

Autoregulacja przejawia się w samoistnej zdolności do kompensowania strat i zachowania równowagi systemu. W przyrodzie zjawisko to występuje powszechnie, czego przykładem może być chociażby utrzymywanie stałej temperatury przez organizm czy wyrównywanie ciśnienia atmosferycznego, w wyniku czego przemieszczają się masy powietrza. W systemach technicznych autoregulacja odbywa się najczęściej z wykorzystaniem zaawansowanych technologii monitorowania stanu, sterowania i kompensacji zakłóceń, które mogą korzystać np. z rozwiązań sztucznej inteligencji i systemów uczących się [58, 65]. Autoregulowanie jest niezbędne w realizacji, np. zasady energii minimum, jeżeli dla systemów sterowania opracowana zostanie odpowiednia funkcja celu ($v_A(t)$) minimalizująca zużycie energii na podstawie przekazywanych (monitorowanych) danych wejściowych ($u_B(t)$, rys. 2.1). Wartości funkcji celu uzależnione są od czynników procesowych, materiałowych i maszynowych [66]. Osiągnięcie założonych wartości funkcji celu odbywa się na zasadzie sprzężenia zwrotnego i reakcji systemu na wprowadzane zakłócenia $u_c(t)$ procesu (np. zmiana właściwości materiału rozdrabnianego). W układzie z autoregulacją każda zmiana stanów początkowych przez zakłócenia będzie więc automatycznie korygowana poprzez

zmianę odpowiednich parametrów wejściowych (np. prędkości elementów roboczych, strumienia dozowania wsadu itd.), w taki sposób aby wartości funkcji wyjścia pozostawały na założonym poziomie [66]. Opracowanie odpowiedniej funkcji celu dla systemów rozdrabniania wymaga więc poznania i opracowania zależności opisujących związki parametrów sterujących (materiałowych, procesowych) ze wskaźnikami procesu, tj. wydajnością, zużyciem energii czy stopniem rozdrobnienia [12]. W kolejnych rozdziałach zaprezentowane zostaną zależności opracowane dla rozdrabniacza pięciotarcowego.



Rys. 2.1. Autoregulacja ze sprzężeniem zwrotnym, A – system A, B – system B, $u_A(t)$, $u_B(t)$ – parametry wejściowe, $y_A(t)$, $y_B(t)$ – parametry wyjściowe, $u_z(t)$ – zakłócenia (opracowanie własne na podstawie [58,66])

Piętrowość struktury w odniesieniu do obiektów materialnych i niematerialnych przejawia się w ich budowie hierarchicznej i zachodzących relacjach pomiędzy elementami wyższego i niższego rzędu [67]. Strukturą jest pewna uogólniona charakterystyka właściwości systemu, odzwierciedlająca uporządkowanie (hierarchię) i organizację systemu wraz ze wzajemnymi relacjami i sprzężeniami [67, 68]. W eksploatacji maszyn można wyróżnić strukturę procesu funkcjonalną, konstrukcyjną i niezawodności, a ze względu na kinetykę strukturę statyczną i dynamiczną (zmienną w czasie) [67]. Według [67] definicję struktury można interpretować jako dążenie układu do stanu stabilności, co można wprost odnieść do wspomnianej wyżej zasady autoregulacji. Piętrowa struktura systemu rozdrabniania (SR) będzie odnosić się więc do pewnego uporządkowania, organizacji i wzajemnych relacji w łańcuchu: otoczenie (O), materiał (M), maszyna (R), proces (P), cel (C) (rys. 2.2). W takim ujęciu ogólny model struktury systemu rozdrabniania (SR) przedstawia się następująco:

$$\Omega(SR) = \langle SR, A, Z \rangle \quad (2.1)$$

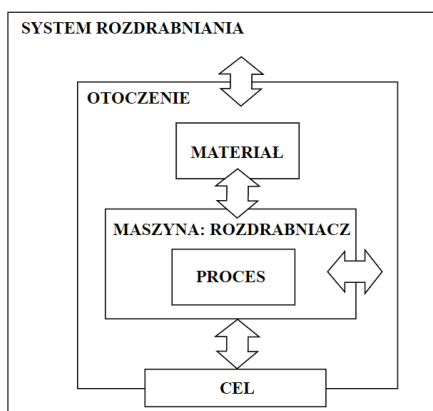
gdzie: $\Omega(SR)$ – struktura systemu rozdrabniania SR , przy czym

$$SR = \{O, M, R, P, C\} \quad (2.2)$$

- a O – otoczenie, M – materiał, R – maszyna, P – proces, C – cel stanowią elementy składowe systemu,
 $A = \{A_1, A_2, \dots, A_i\}$ – zbiór cech, właściwości struktury systemu rozdrabniania SR ,
 $Z = \{Z_1, Z_2, \dots, Z_j\}$ – zbiór związków i relacji pomiędzy elementami systemu.

Relacja Z_j pomiędzy poszczególnymi elementami systemu wyrażana jest natomiast za pomocą iloczynu kartezjańskiego:

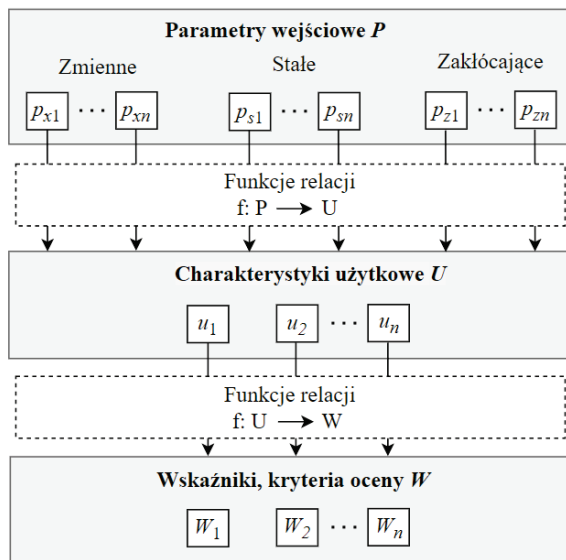
$$Z_j \subseteq (A_1 \times A_2 \times \dots \times A_j) \quad (2.3)$$



Rys. 2.2. Uproszczona struktura systemu rozdrabniania (SR)

Analiza relacji (struktury) systemu rozdrabniania w efekcie prowadzi do identyfikacji zależności i modeli opisujących zachodzące zjawiska w kontekście stawianych konkretnych problemów konstrukcyjno-eksploatacyjnych maszyn rozdrabniających. Znając wartości początkowe danych wejściowych (parametrów, cech – zbiór P) p_1, p_2, \dots, p_n oraz odpowiadające im wartości wyjściowe (charakterystyki użytkowe, zbiór U) u_1, u_2, \dots, u_n możliwe jest podejmowanie decyzji (oparte na modelach matematycznych – funkcjach relacji f) w zakresie działania, eksploatacji systemu rozdrabniania na podstawie zdefiniowanych wskaźników, kryteriów oceny W_1, W_2, \dots, W_n (rys. 2.3), co pozwala m.in. na tworzenie systemów autoregulujących, opartych na ciągłym monitorowaniu zmian wartości wejściowych i wyjściowych. Zbiór parametrów P zawiera zarówno parametry zmienne p_x (prędkości obrotowe, liniowe elementów roboczych, wartości strumienia dozowania wsadu, kształt i wielkość cząstek wsadu itd.), stałe p_s (np. temperatura otoczenia), jak i zakłócające p_z (np. struktura wewnętrzna wsadu, dokładność urządzeń pomiarowych). Na podstawie obserwacji zmian wartości parametrów wyjściowych identyfikowane są relacje w postaci modeli matematycznych opisujące charakterystyki użytkowe U (np. pobór mocy, sprawność, wydajność, zużycie energii itd.) za pomocą zmiennych wejściowych P , a w następstwie tworzone modele matematyczne wskaźników, kryteriów

oceny W (jednostkowe zużycie energii, wielkość emisji szkodliwych substancji, zawartość frakcji celowej we wsadzie itd.) jako wartości warunkujące procesy decyzyjne. W kolejnych rozdziałach przedstawione zostaną m.in. oryginalne modele matematyczne identyfikujące relacje zachodzące pomiędzy wybranymi zmiennymi materiałowymi, konstrukcyjnymi, procesowymi a charakterystykami użytkowymi i wskaźnikami oceny.



Rys. 2.3. Interpretacja graficzna relacji parametrów wejściowych, charakterystyk użytkowych i wskaźników oceny procesu rozdrabniania

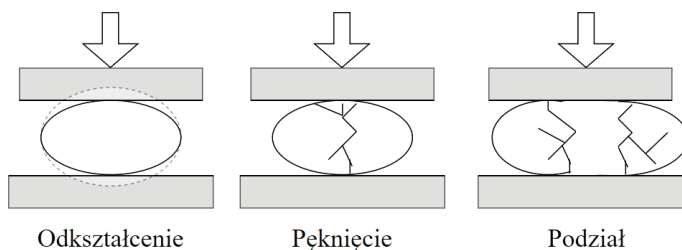
Założono, że istnieją przesłanki i możliwości twórcze do podjęcia pracy naukowej związanej z badaniami i tworzeniem podstaw rozwoju rozdrabniania biomateriałów ziarnistych na podstawie teorii Integronu. Wykorzystując stan wiedzy inżynierii mechanicznej, zawartej w pracach dotychczas realizowanych metodycznie wg Integronu, można przedstawić propozycję i wytyczne do całościowego opracowania.

3. CELOWOŚĆ I ENERGIA MINIMUM W INŻYNIERII ROZDRABNIANIA

3.1. CEL I ENERGIA MINIMUM – PROCES (ZJAWISKO) ROZDRABNIANIA

Celowość wykazują przede wszystkim maszyny i urządzenia procesu rozdrabniania a w nich każda część wypełniająca pewną funkcję w dynamicznym układzie zdolnym do działania oraz rozwoju. Celem nadrzędnym maszyn i urządzeń procesu inżynierii rozdrabniania będzie uzyskanie i doskonalenie zjawiska (fenomenu) trwałego podziału ziarna, którego przebieg i kryteria oceny podporządkowane będą celom przetwórczym, dotyczącym m.in. granulometrii produktu, homogeniczności wsadu, minimum zużycia energii, racjonalnej wydajności itd. – zależnych od przeznaczenia rozdrobnionego produktu.

Według [69] rozdrabnianie można zdefiniować jako proces, zmierzający do celowego rozdziału, przekształcania (rozpadu) ciał stałych pod wpływem przyłożonych obciążeń (naprężeń). Jak wykazały badania dla różnych materiałów, potwierdzające teorię Griffitha, podział materiału rozpoczyna się w momencie, kiedy naprężenia skuteczne przekraczają lokalną wytrzymałość materiału [70]. Rozwój pęknięcia w maszynowych procesach rozdrabniania następuje stopniowo od początkowego odkształcenia, zainicjowania pęknięcia, aż do całkowitego podziału ciała wraz ze wzrostem przyłożonych naprężeń (obciążeń) [71] (rys. 3.1).



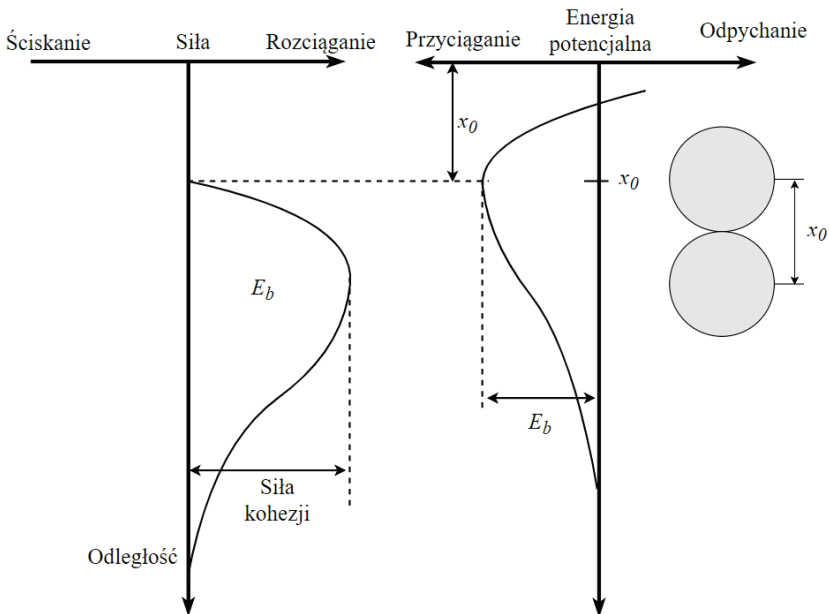
Rys. 3.1. Fazy podziału materiału podczas rozdrabniania (opracowanie własne na podstawie [71])

Rozpatrując podział materiału w skali molekularnej, rozdrobnienie możliwe jest, gdy oddziałujące naprężenia i praca przekraczają wartość naprężeń i pracy potrzebnych do przerwania wiązań pomiędzy cząsteczkami tworzącymi strukturę materiału. Wytrzymałość wiązań pomiędzy cząsteczkami wynika z sił przyciągania międzycząsteczkowego. Natomiast zgodnie z zasadą energii minimum, która wyraża się w tym, że wszystkie reakcje zachodzące w celowym przetwórstwie przebiegają zawsze w kierunku zmniejszenia energii swobodnej, minimalna energia potencjalna jest rezultatem utrzymania cząstek w odległościach zapewniających stan równowagi i dana jest równaniem [72]:

$$E_b = \int_{x_0}^{\infty} P dx \quad (3.1)$$

gdzie: E_b – energia wiązań atomowych, x_0 – odległość w stanie równowagi, P – przyłożona siła.

Przyłożenie sił zewnętrznych powoduje zwiększenie odległości pomiędzy cząsteczkami i odchylenie od stanu równowagi energetycznej, jednak aby całkowite zerwanie połączeń międzycząsteczkowych było możliwe, siła ta musi być większa niż siła kohezji (rys. 3.2) [73].



Rys. 3.2. Interpretacja graficzna sił potrzebnych do separacji wiązań atomowych (opracowanie własne na podstawie [72])

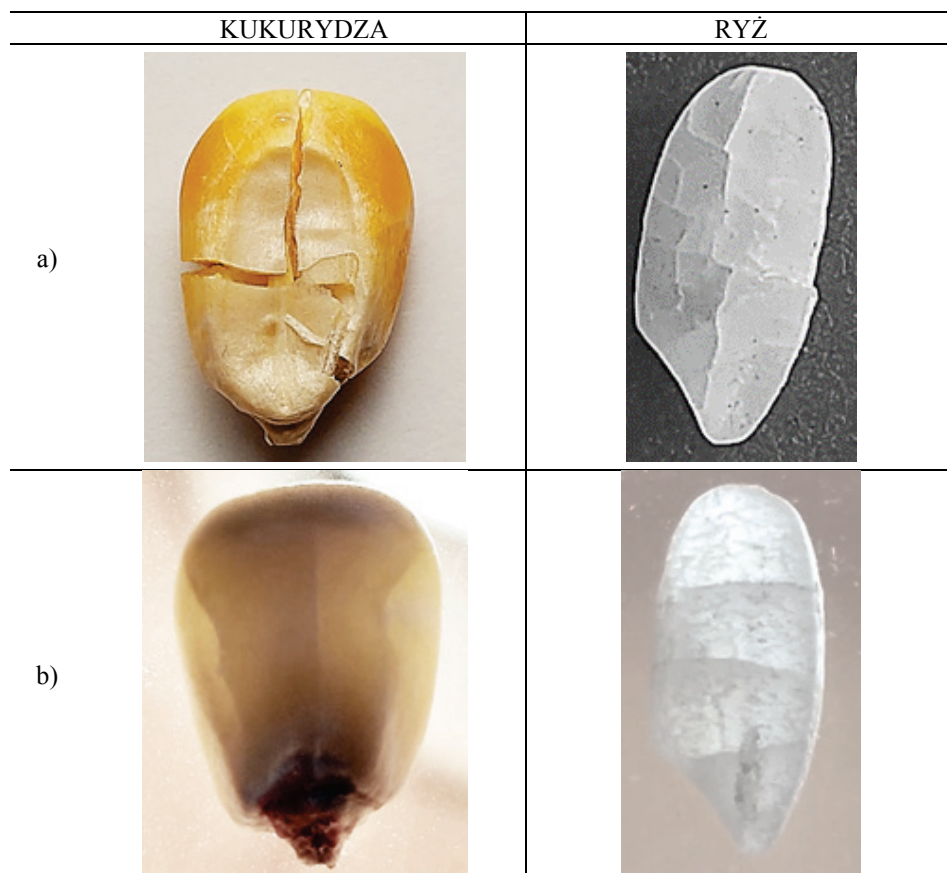
Teoretyczna wartość naprężeń kohezji jest równa [72]:

$$\sigma_c = \sqrt{\frac{E\gamma_s}{x_0}} \quad (3.2)$$

gdzie: γ_s – energia przypadająca na jednostkę powierzchni, J/m^2 ,
 E – moduł Younga, MPa.

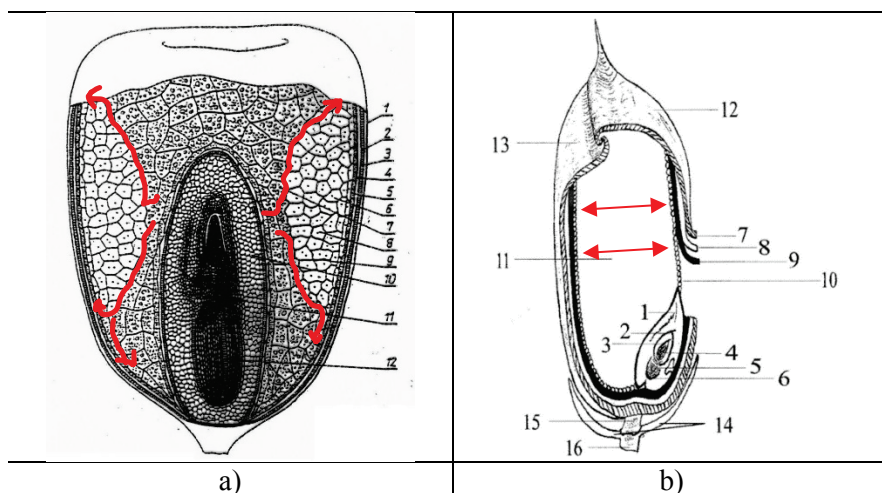
W rzeczywistości, jak wskazują badania prowadzone dla materiałów kruchych [72], wartość naprężeń pęknięcia jest kilkakrotnie niższa ze względu na występowanie mikropęknięć i mikrodefektów struktury wewnętrznej [73]. Mikropęknięcia powstają, gdy naprężenia lokalne przekraczają wartość lokalnej wytrzymałości [74] lub mając na uwadze zasadę energii minimum, gdy dostarczona zostanie

pewna minimalna wartość energii skutkująca zerwaniem wiązań międzycząsteczkowych. W przypadku ziaren biomasy mikropęknięcia mogą być tworzone w różnym stopniu w poszczególnych warstwach struktury wewnętrznej charakteryzujących się różną wytrzymałością [75]. Występowanie mikropęknięć powoduje obniżenie wytrzymałości ziaren [76], stanowiąc jednocześnie początek rozwoju pęknięcia. Uszkodzenia ziaren mogą zatem być niewidoczne dla oka w postaci uszkodzeń wewnętrznych (np. mikropęknięć) oraz widocznych rozwiniętych pęknięć na zewnątrz struktury [5, 77, 78]. Rysunek 3.3 przedstawia uszkodzenia wewnętrzne i zewnętrzne dla ziaren ryżu i kukurydzy. Jak wskazano w [5], właśnie te dwa ziarna spośród ziaren biomasy są najbardziej podatne na powstawanie wewnętrznych pęknięć na skutek szybkich zmian temperatury i wilgotności, np. w procesach suszenia i namaczania [77], a także zderzeń mechanicznych, wynikających z operacji przetwarzania, np. podczas zbioru, transportu czy magazynowania [79]. Ziarna, w których występują mikropęknięcia, są bardziej podatne na rozdrobnienie i łatwiej ulegają uszkodzeniom pod wpływem obciążeń [77, 80].

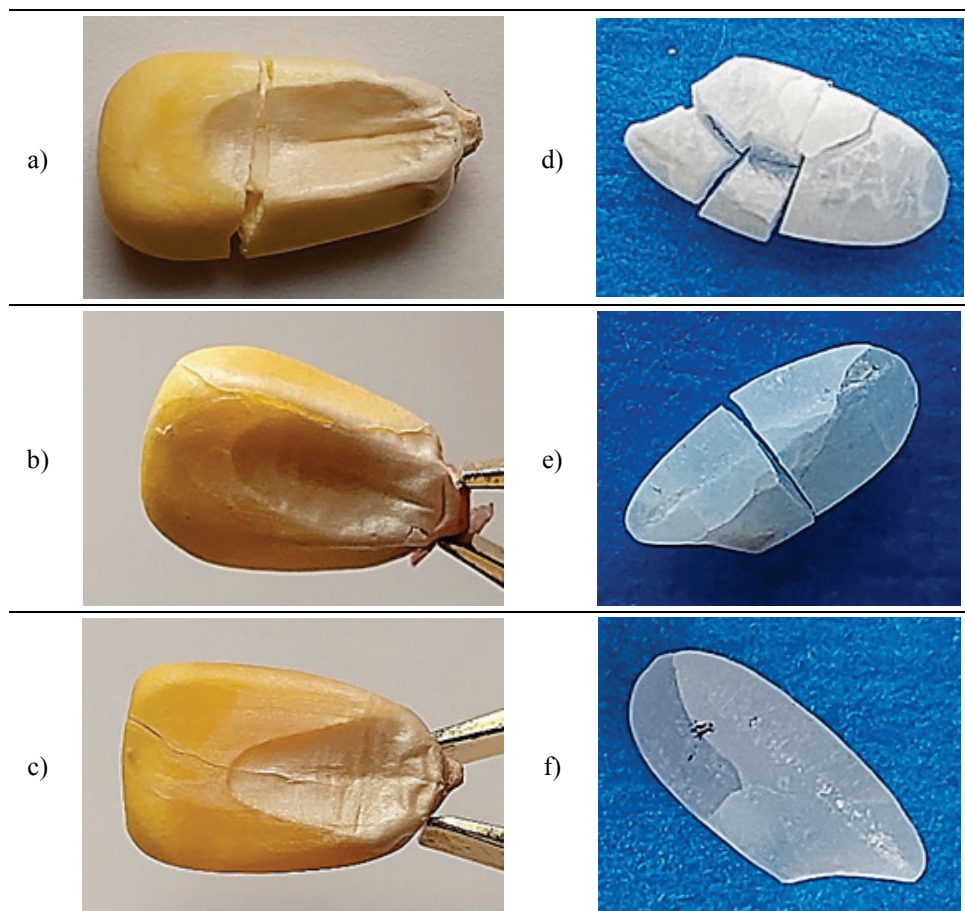


Rys. 3.3. Charakterystyczne pęknięcia ziaren kukurydzy i ryżu poddanych obciążeniom: a) uszkodzenia zewnętrzne, b) uszkodzenia wewnętrzne (badania własne)

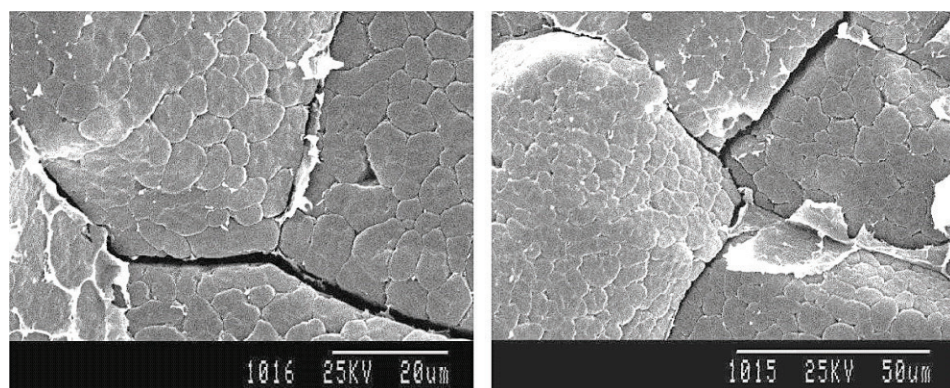
W przypadku ziaren zbóż mikropęknięcia tworzą się wewnątrz bielma miękkiego (mączystego) i mogą propagować na inne warstwy struktury ziarna znajdujące się pod okrywą owocową i nasienną (rys. 3.4 i 3.5) [5]. Dotychczasowe badania dowodzą [81], że obecność i struktura skrobi powoduje łatwą propagację pęknięć i zwiększoną ścieralność ziaren ryżu. Singh et al. [82] stwierdzili, że uszkodzenia łatwo propagują w bielmie mączystym, a pęknięcia zwiększają się wraz ze wzrostem obciążenia lub zmniejszaniem się zawartości bielma zrogowaciałego w ziarnie. Pęknięcia wewnętrzne ziaren kukurydzy propagują wokół cząsteczek skrobi w bielmie mączystym w kierunku bielma zrogowaciałego i warstwy aleuronowej, które charakteryzują się większą wytrzymałością, przez co rozprzestrzenianie się pęknięcia na warstwy zewnętrzne, tj. warstwę nasienną i owocową jest utrudnione i defekt struktury pozostaje niewidoczny [5, 83]. Podobny mechanizm obserwowano u ryżu. Mikrouszkodzenia mają swój początek w miękkim mączystym bielmie i rozprzestrzeniają się na zewnątrz [84,85]. Przebieg pęknięcia następuje wzdłuż krawędzi cząstek skrobi, choć zdarzają się pęknięcia dzielące te cząsteczki na połowę (rys. 3.6) [84]. Zazwyczaj pęknięcia wewnętrzne ziaren ryżu przebiegają prostopadle do osi wzdłużnej ziarna (rys. 3.4 i 3.5) [77, 86].



Rys. 3.4. Budowa ziarna: a) kukurydzy [87]; 1 – naskórek, 2 – komórki poprzeczne, 3 – komórki rurkowe, 4 – warstwa nasienna, 5 – warstwa aleuronowa, 6 – bielmo zrogowaciałe, 7 – bielmo mączyste, 8 – komórki z ziarenkami skrobi, 9 – ścianki komórek, 10 – tarczka, 11 – pączek, 12 – korzonek; b) ryżu [88]; 1 – tarczka, 2 – koleoptyl, 3 – epikotyl, 4 – merystem wierzchołkowy, 5 – korzonek, 6 – koleoryza, 7 – okrywa owocowa, 8 – okrywa nasienna, 9 – warstwa aleuronowa, 10 – warstwa subaleuronowa, 11 – bielmo mączyste, 12 – plewka dolna, 13 – plewka górna, 14 – plewa płonna, 15 – osadka kłosa, 16 – część szypułki; wraz z zaznaczonymi ścieżkami rozwoju wewnętrznego pęknięcia



Rys. 3.5. Typowe pęknięcia ziaren kukurydzy a), b), c) i ryżu d), e), f) poddanych obciążeniom ściskającym występujące w populacji 1000 testowanych ziaren (badania własne)



Rys. 3.6. Mikropęknięcia bielma w ziarnie ryżu [84]

Poznanie mechanizmu rozdrabniania pojedynczych ziaren w procesach modelowych odgrywa istotną rolę w zastosowaniach inżynierskich i rozwoju konstrukcji maszyn przetwórczych. Zgłębienie wiedzy na temat mechanizmu rozdrabniania jest możliwe poprzez dogłębną analizę i opis teoretyczny właściwości mechanicznych i zachowania się materiałów pod wpływem obciążeń [48].

3.1.1. Cel – rozdrabnianie, a właściwości ziaren biomasy

W procesach maszynowego podziału ziaren ich właściwości, szczególnie mechaniczne, mają kluczowe znaczenie dla osiągnięcia celu. Znane są reakcje materiałów wzmacniające i osłabiające osiągnięcie celu pod wpływem różnego typu obciążeń, np. ściskających, ścinających, rozciągających, udarowych [89]. Ich wyznaczenie jest zagadnieniem trudnym, wymagającym wielu eksperymentów i badań, które często nie są znormalizowane [90]. Najczęściej własności mechaniczne wyznacza się na podstawie statycznych i dynamicznych testów wytrzymałościowych, gdzie wyznaczane są siły, naprężenia, odkształcenia oraz moduł sprężystości wzdłużnej i poprzecznej [89–91]. Podstawą działania młynów i rozdrabniaczy są oddziaływania mechaniczne elementów roboczych na materiał w różnej formie (ciąćcia, uderzania, ścierania) i intensywności warunkowanej chociażby poprzez prędkość tych elementów i czas przebywania materiału w komorze rozdrabniania. W projektowaniu konstrukcji rozdrabniających znajomość odpowiedzi materiału na obciążenia jest zatem niezbędna przy ustalaniu cech konstrukcyjnych, charakteru obciążeń czy parametrów ruchowych i zapotrzebowania energii procesu [12, 38, 40].

Mechanizm pękania biomateriałów, takich jak ziarna zbóż różni się od obserwowanego dla materiałów syntetycznych lub materiałów kruchych. Cechami charakterystycznymi materiałów kruchych podczas pękania są małe odkształcenia, niska udatność, duża wytrzymałość na ściskanie i niska na rozciąganie [92]. Takie zachowanie jest typowe dla większości nieorganicznych materiałów niemetalicznych [92]. Ziarna, takie jak kukurydza, ryż, pszenica czy soja są materiałami wykazującymi bardziej elastyczne i plastyczne zachowanie niż nieorganiczne materiały kruche [93,94]. Wykazano, że większość materiałów rolniczych wykazuje zachowanie sprężyste w pierwszej części obciążenia, a przy zwiększonym obciążeniu właściwości te zmieniają się w lepkosprężyste [95]. Badanie ściskania ziaren ryżu przeprowadzone przez Han et al. [48] pokazało, że dla przemieszczeń poniżej 0,08 mm odkształcenia są odkształceniami elastycznymi i w tym obszarze może mieć zastosowanie teoria Hertza dla idealnie sprężystych odkształceń:

$$F = \frac{4}{3} \cdot \left(\frac{1}{\frac{1-v_z^2}{E_z} + \frac{1-v_s^2}{E_s}} \right) \cdot \sqrt{\frac{1}{R_z} + \frac{1}{R_s}} \cdot \delta^{\frac{3}{2}} \quad (3.3)$$

gdzie: F – siła wywołująca odkształcenie, δ – przemieszczenie, E – moduł Younga, ν – moduł Poissona, R – promień krzywizny ciał pozostających w kontakcie, indeksy z i s wskazują odpowiednio wartości dla materiału ziarna (z) i materiału płyty obciążającej podczas ściskania (s).

Ponadto stwierdzono, że region występowania odkształceń sprężystych zmniejsza się wraz ze wzrostem wilgotności [48]. Wzrost zawartości wilgoci w ziarnach powoduje zmiany w ich zachowaniu się pod wpływem obciążeń, powodując, że stają się one bardziej plastyczne, w związku z czym nie będą miały zastosowania modele pęknięcia kruche, np. teoria Griffitha.

Prowadzone dotąd badania pozwoliły na podział ziaren z uwagi na ich zachowanie się pod wpływem obciążeń. I tak wyróżnia się dwa rodzaje materiałów: materiały z wyraźną granicą płynności biologicznej (rys. 3.7a) oraz materiały bez granicy płynności biologicznej (rys. 3.7b) [90]. Granica płynności biologicznej jest punktem, w którym następuje spadek siły lub bardzo mały jej wzrost wraz ze wzrostem odkształceń [91] i często utożsamiana jest z początkiem pęknięcia [94]. Granica sprężystości (rys. 3.7a) i b) jest granicą umowną i zgodnie z normą ASAE [91] odpowiada punktowi przegięcia krzywej siła-odkształcenie. Określenie siły i przemieszczenia poniżej tego punktu pozwala na określenie pozornego modułu Younga, którego sposób wyznaczania uzależniony jest od kształtu i sposobu obciążenia próbki [91]. Dla ściskania całego ziarna pomiędzy dwiema równoległymi płytami pozorny moduł Younga może być wyznaczony z zależności [90]:

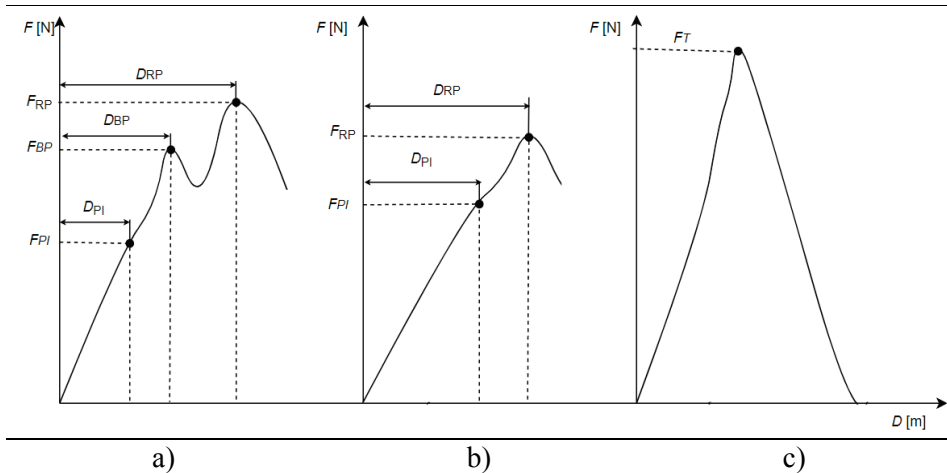
$$E = \frac{0,388 \cdot N \cdot (1 - \nu^2)}{\Delta l^{\frac{3}{2}}} \cdot \left[K_1 \cdot \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_1''} \right)^{\frac{1}{3}} + K_2 \cdot \left(\frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_2''} \right)^{\frac{1}{3}} \right]^{\frac{3}{2}} \quad (3.4)$$

gdzie: N – siła nacisku, N , Δl – odkształcenie, m , ν – współczynnik Poissona, R_1, R_1'' – promienie krzywizny badanego materiału w punkcie styku z górną płytą dociskową, we wzajemnie prostopadłych powierzchniach, m, R_2, R_2'' – promienie krzywizny badanego materiału w punkcie styku z dolną płytą dociskową, we wzajemnie prostopadłych powierzchniach, m, K_1, K_2 – stałe.

Przedstawiona zależność oparta jest na teorii Hertza, jednak jak wskazano w [90], ze względu na rozmaite uproszczenia, dotyczące kształtu ziaren, ich anizotropowości oraz zmiennego punktu styku w trakcie obciążania nie jest to najlepsza metoda określania sprężystości ziaren. Dotąd jednak nie wypracowano ustandaryzowanych rozwiązań dla wyznaczania modułu Younga i właściwości mechanicznych ziaren biomasy, choć podjęto próby wprowadzenia innych wskaźników. W pracy [96] zaproponowano wskaźnik podatności na uszkodzenia wyznaczany jako tangens kąta nachylenia pewnego prostoliniowego odcinka na krzywej siła-odkształcenie względem osi odciętych:

$$W_u = \frac{\Delta F}{\varepsilon_2 - \varepsilon_1} \quad (3.5)$$

gdzie: W_u – wskaźnik podatności na uszkodzenia, N, ΔF – przyrost siły na prostoliniowym odcinku wykresu $F(\varepsilon)$, N, ε_1 – odkształcenia względne odpowiadające sile początku prostoliniowego odcinka, ε_2 – odkształcenia względne odpowiadające sile na końcu prostoliniowego odcinka.



Rys. 3.7. Typowe krzywe siła-odkształcenie dla ziaren biomasy: a) – podczas ściskania dla ziarna z widocznym punktem biologicznego płynięcia, b) – podczas ściskania dla ziarna bez widocznego punktu płynięcia, c) – podczas testu ścinania, PI – umowna granica sprężystości, BP – punkt płynności biologicznej, RP – punkt zniszczenia materiału, $F_{PI, BP, RP, T}$ – siła odpowiadająca odpowiednio granicy sprężystości, punktowi płynności biologicznej, zniszczenia podczas ściskania, ścinania ziarna; $D_{PI, BP, RP, T}$ – odkształcenia odpowiednio dla punktów charakterystycznych na krzywej siła-odkształcenie (opracowanie własne na podstawie [90, 91])

Kształt krzywych siła-odkształcenie, tym samy przebieg rozdrabniania ziarna zmienia się zarówno w zależności od rodzaju materiału i jego właściwości, jak i sposobu obciążenia. Dla ścinania charakterystyczny będzie szybki wzrost siły podczas obciążania (rys. 3.7c).

3.1.1.1. Wpływ różnorodności struktury

Przebieg procesu rozdrabniania ziaren wynikający z właściwości mechanicznych uzależniony jest przede wszystkim od ich właściwości materiałowych, takich jak: struktura wewnętrzna [5] w tym stosunek zawartości bielma twardego do miękkiego i grubości warstw zewnętrznych ziarna [75, 97], skład chemiczny (np. zawartość skrobi i białka) [77], obecność mikropęknięć [78], dojrzałość

[7–9], typ i odmiana [7–9], wielkość i kształt [46, 98], twardość [99, 100], szklistość [101–106] oraz wilgotność [95, 107, 108].

Wcześniejsze badania wykazały, że poszczególne warstwy struktury wewnętrznej ziarna charakteryzują się innymi właściwościami mechanicznymi, a tym samym odpornością na rozdrabnianie [75, 97]. Budowa struktury wewnętrznej powiązana jest ściśle z rodzajem oraz odmianą ziarna [5]. Wang B. i Wang J. [75] dowiedli, że miękkie, mączyste bielmo charakteryzuje się niższą wytrzymałością na obciążenia i większymi odkształceniami niż bielmo zrogowaciała. Zatem przewaga udziału jednego rodzaju bielma nad drugim będzie warunkowała przebieg rozdrabniania. Z badania przeprowadzonego przez Hebde i Frączka wynika, że grubość okrywy nasiennej wpływa na sprężystość ziaren i zdolność do odkształceń, szczególnie dla ziaren wilgotnych grubość okrywy nasiennej wpływa istotnie na podatność na odkształcenia [109]. Badanie to dało im podstawę do twierdzenia, że ziarna można traktować jako cienkościenne naczynia wypełnione materiałem o pewnej lepkości [109]. Obrazuje to także różnice we właściwościach mechanicznych wewnętrznych i zewnętrznych warstw budujących ziarno. Hebda i Frączek [109] stwierdzili także, że okrywa jako bardziej elastyczna przenosi obciążenia podczas ściskania, odpowiada za utrzymanie (spojenie) struktury wewnętrznej i zmienia swój kształt stosunkowo łatwo. Siła adhezji komórek budujących strukturę ziarna oraz napięcie ścian komórkowych mogą powodować zwiększenie odporności na obciążenia i powstawanie pęknięć [110]. W pracach [101–106] wskazano, że wzrost szklistości ziarna powoduje wzrost sił potrzebnych do jego zniszczenia podczas ściskania. Figiel et al. [9] z kolei dowiedli, że siła tnąca oraz wytrzymałość na ściskanie zmniejsza się wraz ze szklistością w przypadku ziaren pszenicy. Szklistość ziaren powiązana jest z ich twardością [99,100]. Ziarna o wyższej szklistości z reguły charakteryzują się większą twardością [99,100]. Wzrost twardości natomiast przyczynia się do zwiększenia wartości sił niszczących podczas ściskania [99, 100]. Dojrzałość ziaren wpływa na ich wielkość i kształt oraz skład chemiczny [111]. Różny okres dojrzwania ziaren powoduje, że w ziarnach mniejszych, niecałkowicie dojrzałych, obserwuje się niższą zawartość bielma, mniejszą zawartość skrobi, a większą składników mineralnych i białka niż w przypadku ziaren większych w pełni wykształconych [111]. To z kolei wpływa na zachowanie się ziaren podczas obciążenia.

Stwierdzono, że ważnym czynnikiem kompozycyjnym, mogącym wpływać na wytrzymałość zbóż i ich podatność na pękanie może być zawartość tłuszczu [112], skrobi i białka [113]. Na podstawie obserwacji mikrostruktury uszkodzonych ziaren kukurydzy Qiao et al. [113] stwierdzili, że wraz ze wzrostem zawartości białka wzrastają właściwości sprężyste, twardość, siła rozrywania i energia, natomiast za właściwości lepkie odpowiada zwiększona zawartość skrobi. Siaw et al. [114] wyjaśnili, że siła pękania (twardość) ziaren ryżu zależy od jakości białka i lipidów oraz ciągłości matrycy białkowo-skrobiowej, ale nie zawsze od porowatości. Ponadto Dong et al. [80] wykazali na podstawie analizy zdjęć z mikrotomografu komputerowego, że powierzchnia ziarna, porowatość zamknięta,

obecność porów zamkniętych oraz ich liczba i powierzchnia są skorelowane z podatnością na rozdrabnianie ziarna kukurydzy. Hou et al. [115] doszli do wniosku, że głównymi czynnikami wpływającymi na pękanie kukurydzy są gęstość i objętość porów. W badaniu opisanym przez Chu et al. [116] zasugerowano, że mikrostruktura ma silny wpływ na zachowanie mechaniczne i aby w pełni zrozumieć takie mechanizmy, jak łuskanie, rozdrabnianie, konieczne jest uwzględnienie mikrostruktury. Chu et al. [116] zwrócili również uwagę, że nadal niewyjaśniony pozostaje mechanizm odpowiedzialny za pękanie ziaren ryżu podczas obróbki, a eksperymentalne badania dotyczące ilościowego oznaczenia ziaren uszkodzonych nie dostarczają informacji o mechanizmie pękania ziaren [116].

3.1.1.2. Wpływ postaci i wymiarów ziarna

Wielkość ziaren jest ich parametrem charakterystycznym, łatwym do wyznaczenia i eksperymentalnego określenia zależności pomiędzy tym parametrem a właściwościami mechanicznymi i przebiegiem pęknięcia w próbach statycznych i dynamicznych dla pojedynczych ziaren. W przypadku materiałów kruchych zależności pomiędzy wielkością a przebiegiem procesu rozdrabniania opisano dość szeroko [44, 117, 118]. Wynika to między innymi z podobieństwa struktury i zachowania się tych materiałów pod wpływem obciążeń i niewielkiej zmienności uzyskiwanych rezultatów podczas testów rozdrabniania [48]. W celu przewidywania prawdopodobieństwa rozdrobnienia materiałów kruchych wprowadzono modele statystyczne, pozwalające na opis rozdrabniania w populacji cząstek [117]. Popularnie stosowany jest trójparametrowy model Weibulla [119], opisujący prawdopodobieństwo pęknięcia na podstawie rozkładu wytrzymałości w zależności od objętości materiału [120]:

$$P_V = 1 - \exp \left\{ - \left(\frac{\sigma - \sigma_u}{\sigma_0} \right)^m V \right\} \quad (3.6)$$

gdzie: σ – naprężenia w materiale, σ_u – parametr lokacji, σ_0 – parametr skali, m – parametr kształtu (tzw. wykładnik Weibulla), V – objętość materiału. Z powyższego równania wynika następująca zależność [120]:

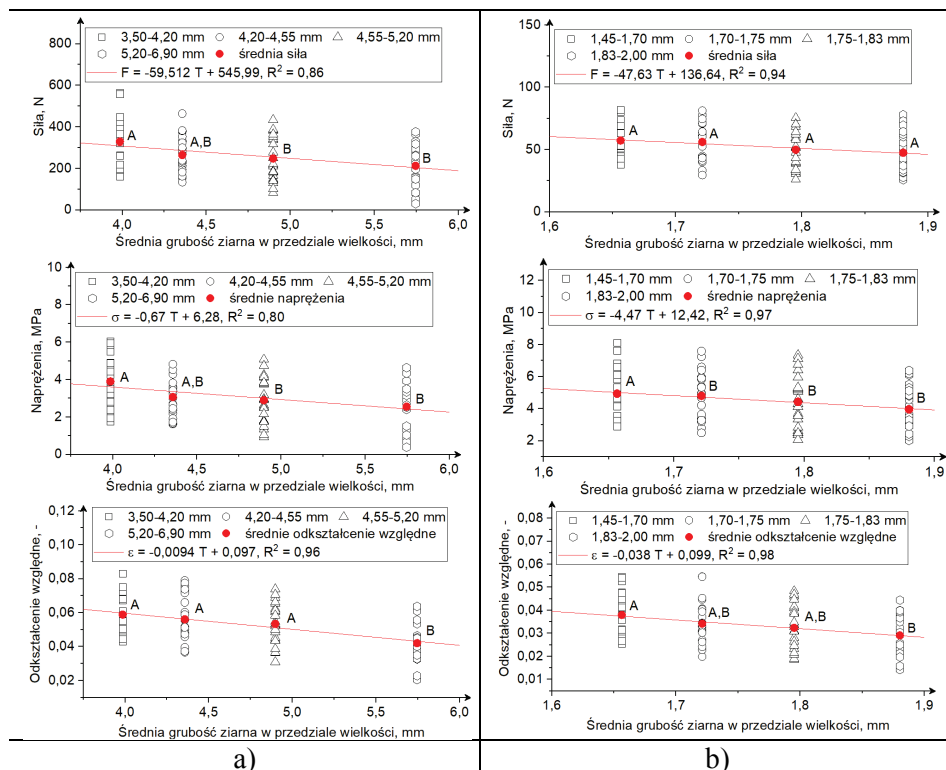
$$\left(\frac{\sigma_1}{\sigma_2} \right) = \left(\frac{V_2}{V_1} \right)^{1/m} \quad (3.7)$$

wskazująca na wyższą wytrzymałość ziaren o mniejszych wymiarach, co ma wpływ także na zapotrzebowanie energetyczne procesu rozdrabniania, tj. do rozdrobnienia mniejszych cząstek potrzebne są większe nakłady energetyczne [121]. Podstawą tego twierdzenia jest teoria najsłabszego ogniwa (ang. *weakest link theory*) mówiąca o tym, że materiał pęka zawsze w najsłabszym punkcie, a zatem jego wytrzymałość zależy w dużej mierze od rozkładu defektów (mikro-pęknięć)

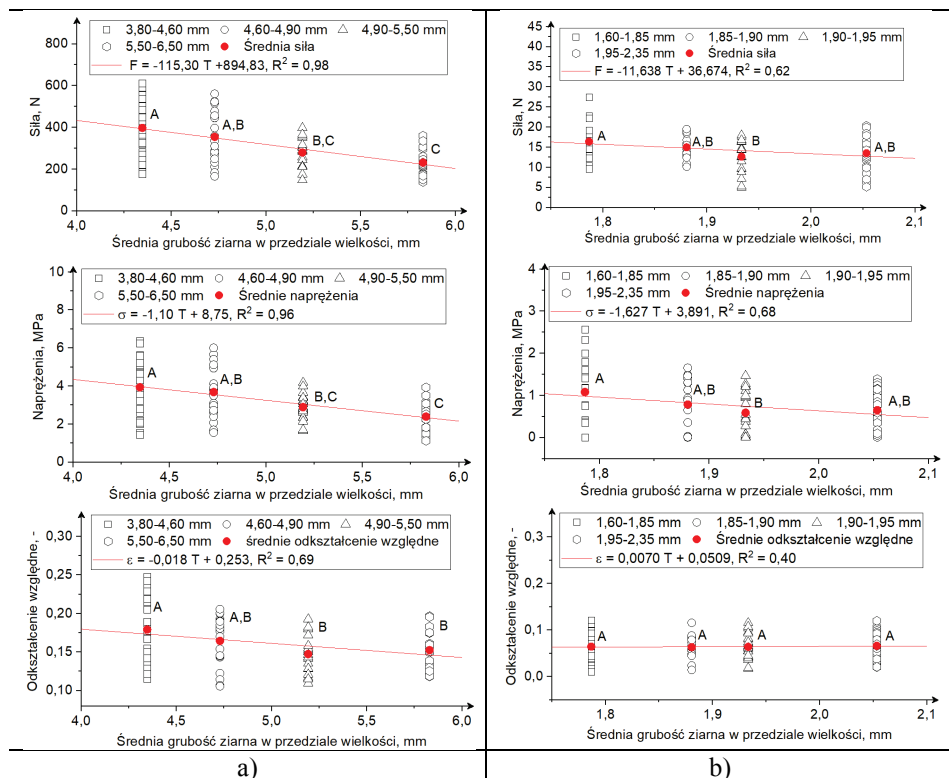
w materiale [122]. W przypadku ziaren zbóż powyższe zależności nie zostały potwierdzone, szczególnie biorąc pod uwagę nieregularność kształtu, anizotropowe właściwości i warstwową strukturę ziaren, w której każda z warstw charakteryzuje się innymi właściwościami mechanicznymi [75]. Aplikacja teorii odpowiednich dla materiałów kruchych (często przy założeniu ich idealnych izotropowych właściwości i walcowego lub sferycznego kształtu [48]) dla materiałów typu ziarna zbóż, wykazujących właściwości elastoplastyczne wymaga modyfikacji istniejących modeli i szczegółowych badań mechanizmów pęknięcia.

Większość modeli opracowanych dla ziaren zbóż opisujących związki pomiędzy wielkością ziarna a przebiegiem procesu podziału to raczej równania regresji niż modele probabilistyczne, które nie pozwalają na tworzenie uogólnień [5, 47]. Dziki et al. [111] wykazali, że wartości sił i pracy ściskania ziarna pszenicy zwiększają się wraz z jego grubością. Kuźniar et al. zaobserwowali zmniejszenie odkształcenia względnego oraz pracy jednostkowej (na jednostkę masy) wraz ze wzrostem grubości podczas ściskania ziaren roślin strączkowych [123]. Han et al. [124] zaobserwowali wzrost sił niszczących ziarna ryżu wraz ze wzrostem średnicy zastępczej oraz brak korelacji pomiędzy wartościami naprężeń a wielkością ziarna, wskazując jako jedną z przyczyn niewielkie różnice w średnicach (rozstęp 0,5 mm), co może powodować brak zauważalnych różnic w rozkładzie mikropęknięć zgodnie z teorią najslabszego ogniwa. Saiedirad et al. [93] wskazali, na przykładzie ziaren kuminu, że zainicjowanie pęknięcia mniejszych ziaren (2,10–2,50 mm) wymaga użycia większych sił, niż ma to miejsce w przypadku ziaren większych (3,10–3,50 mm). W pracy [97] wykazano, że średnia siła niszcząca ziarna w próbie statycznego ściskania piramidalnych i prostokątnych ziaren była większa niż ziaren okrągłych, przy czym największe wartości sił uzyskiwano dla ziaren w pozycji horyzontalnej. LeFord et al. [125] wykazali, że ziarna mniejsze, o mniejszej gęstości i większej wytrzymałości były z reguły bardziej odporne na obciążenia mechaniczne. Wcześniejsze badania autorki [46,98] również dowiodły, że wielkość, a zasadniczo grubość ziaren wpływa na wartość sił i odkształceń podczas ściskania. Rysunek 3.8 przedstawia zmiany wartości sił, naprężeń i odkształceń ziaren wraz ze zmianą grubości ziarna, uzyskane w próbie statycznego ściskania ziaren ryżu i kukurydzy o wilgotności 10%, a rysunek 3.9 – ziaren o wilgotności 26% (warunki eksperymentu opisano we wcześniejszych badaniach autorki [126]). W teście post-hoc Tukeya uzyskano statystycznie istotne różnice pomiędzy średnimi wartościami sił, naprężeń i odkształceń dla ziaren najmniejszych i największych ziaren kukurydzy o wilgotności 10% i 26%. W przypadku ryżu o wilgotności 10% nie zaobserwowano istotnych statystycznie różnic w wartościach sił dla ziaren o różnej wielkości. Odnotowano także nieistotne statystycznie różnice pomiędzy odkształceniami dla ziaren ryżu z różnych przedziałów wielkości i wilgotności 26%. Przedstawione wyniki są zgodne z rezultatami opisanymi przez LeForda [125] czy Saiedirada [93]. Podobnie jak w pracy [111], odnotowano zależności pomiędzy grubością ziarna a jego właściwościami mechanicznymi. Należy wskazać, że wilgotność ziaren także wpłynęła na zmianę właściwości mechanicznych

i odporność na obciążanie. Ma to związek ze strukturą wewnętrzną ziarna i jej wpływem na właściwości mechaniczne (co opisano w wcześniej), a także indywidualną zdolnością ziarna do absorpcji wody (co wiąże się z zawartością skrobi [127]). Przy dużej zawartości wilgoci, w tym przypadku 26% i temperaturach pokojowych możliwe było przejście części skrobi do stanu szklistego [127], co mogło mieć wpływ na wartości sił, naprężeń i odkształceń.



Rys. 3.8. Siły, naprężenia i odkształcenia względne ziaren a) kukurydzy, b) ryżu średnioziarnistego o wilgotności 10% w próbie ściskania z prędkością obciążania 1,25 mm/min w zależności od grubości ziarna. Istotne statystycznie różnice w średnich (dla poziomu istotności $p < 0,05$) oznaczono różnymi literami alfabety na podstawie testu średnich Tukeya (badania własne)



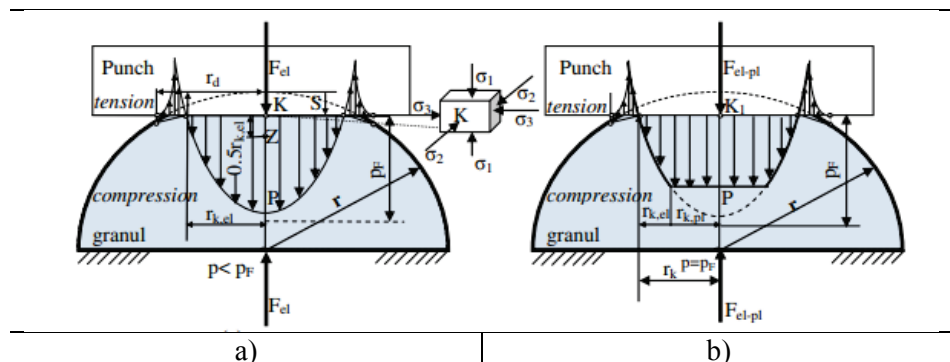
Rys. 3.9. Siły, napężenia i odształcenia względne ziaren a) kukurydzy, b) ryżu średnioziarnistego o wilgotności 26% w próbie ściskania z prędkością obciążania 1,25 mm/min w zależności od grubości ziarna. Istotne statystycznie różnice w średnich (dla poziomu istotności $p < 0,05$) oznaczono różnymi literami alfabetu na podstawie testu średnich Tukeya (badania własne)

Przeprowadzona analiza literatury wskazuje jednoznacznie, że niewiele prac dotyczy wpływu wielkości ziarna na mechanizm rozdrabniania ziaren zbóż, a uzyskane dotychczas wyniki wskazują na rozbieżne zależności pomiędzy wielkością a mechanicznymi właściwościami ziaren, co potwierdza potrzebę dalszych badań w tym zakresie.

3.1.1.3. Mechanizm rozdrabniania a wilgotność ziaren

Istotnym parametrem mającym wpływ na osiągnięcie celu rozdrabniania i właściwości mechaniczne uziarnionej biomasy jest wilgotność. Od wilgotności ziaren zależne są inne ich właściwości, tj. twardość [128], kształt i wielkość [126], a także napięcie ścian komórkowych [110], które z kolei oddziałują na właściwości mechaniczne [129], a w konsekwencji na mechanizm rozdrabniania. Z uwagi na zróżnicowanie ziaren pod względem struktury wewnętrznej i różnic w składzie chemicznym zmiany wilgotności niejednakowo oddziałują na zmianę

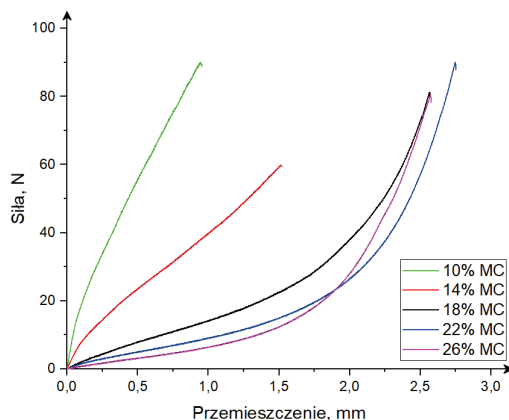
zachowania się materiału pod wpływem obciążeń [126], co związane jest ze zdolnościami absorpcji i wiązania z wodą poszczególnych składników struktury [130], o czym świadczą otrzymywane rozbieżne zależności pomiędzy siłami niszczącymi a wilgotnością dla ziaren tego samego gatunku, lecz o różnych odmianach [131]. Efektem zmian wilgotności jest zmiana masy, kształtu, wielkości i objętości ziaren [126], co wpływa m.in. na możliwości magazynowania i transportu ziaren w liniach rozdrabniających [132] oraz ich przepływu w komorach rozdrabniacza [31], gdyż materiał wilgotny charakteryzuje się gorszymi właściwościami trybologicznymi niż materiał suchy [133]. Dla procesów rozdrabniania najbardziej istotne są zmiany twardości i własności mechanicznych ziaren w zależności od zawartości wilgoci. Wcześniej prowadzone badania w tym zakresie wykazały, że wzrost wilgotności powoduje zmianę właściwości ziaren z bardziej twardych i kruchych w stanie suchym w kierunku miękkich i plastycznych w stanie mokrym [108, 113, 126]. Ziarna o dużej wilgotności charakteryzują się dużymi odkształceniami plastycznymi podczas obciążania [108, 113, 126]. Zmienia się także charakter kontaktu z elastycznego na elastyczno-plastyczny, co wywołuje inny rozkład naprężeń podczas obciążania materiału (rys. 3.10) [134].



Rys. 3.10. Naprężenia $p(r_k)$ podczas obciążania ziarna w punkcie kontaktu sfera-płyta w obszarze odkształceń elastycznych a) i elastyczno-plastycznych b) [134]

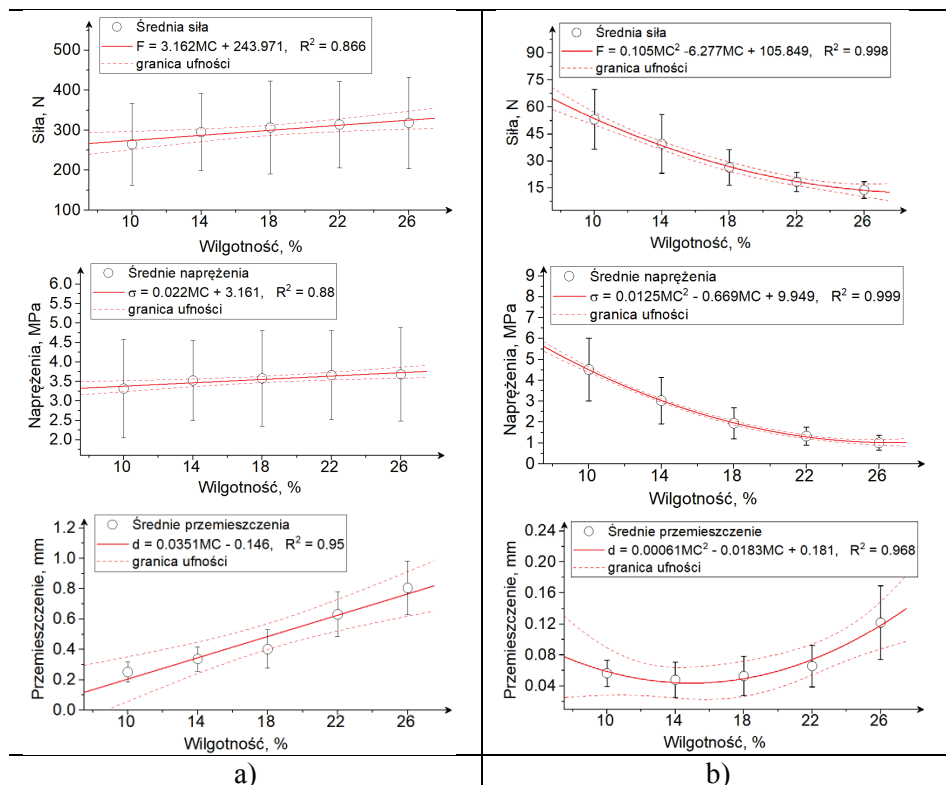
Rysunek 3.11 przedstawia przykładowe krzywe siła-przemieszczenie, które ilustrują zmieniające się relacje pomiędzy siłą inicjującą podział ziarna a przemieszczeniem obserwowanym dla ziaren soi o różnych wilgotnościach. Z uwagi na różnorodność strukturalną (m.in. zmiennej zawartości białek, tłuszczów i skrobi) [113] czy brak lub obecność okrywy nasiennej [135], siły i naprężenia niszczące wywołane obciążeniem mogą rosnąć lub maleć wraz ze wzrostem wilgotności. Wcześniejsze badania autorki [126] wykazały, że w przypadku kukurydzy wraz ze wzrostem wilgotności wzrastały siły i naprężenia powodujące pęknięcie, natomiast w przypadku ziarna ryżu zaobserwowano odwrotną zależność (rys. 3.12). Babic et al. [131] w badaniu kukurydzy obserwowali zarówno zmniejszanie się, jak i zwiększanie się sił niszczących wraz ze wzrostem wilgotności dla kukurydzy tego samego typu (dent), lecz różnej odmiany. Mancera-Rico et al. [136]

opracowali modele odkształceń i wytrzymałości na ściskanie dla pięciu typów ziaren kukurydzy: mączystych (dent), semi-flint, flint, semi-dent oraz dent-flint. Wykazano wprost proporcjonalne liniowe zależności pomiędzy wilgotnością a odkształceniami dla wszystkich badanych typów ziaren [136]. W przypadku naprężeń uzyskano wprost proporcjonalną liniową zależność pomiędzy wilgotnością i wytrzymałością na ściskanie dla kukurydzy typu dent, odwrotnie proporcjonalną dla kukurydzy typu semi-flint i flint oraz zależność kwadratową dla odmian typu semi-dent i dent-flint [136].

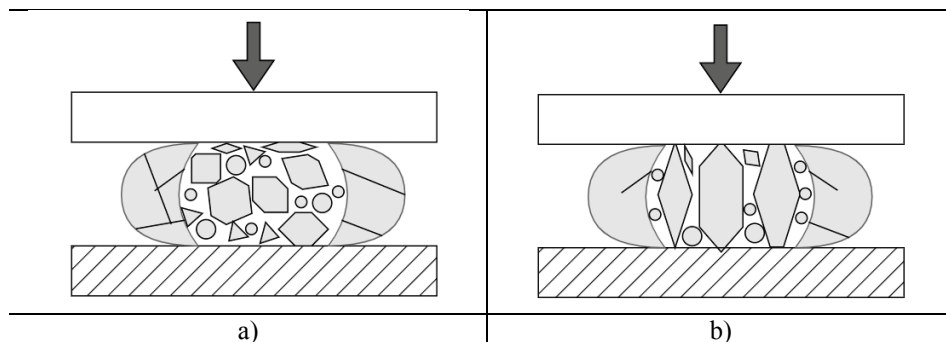


Rys. 3.11. Krzywe siła-przemieszczenie ziaren soi o różnych wilgotnościach uzyskane w próbie statycznego ściskania z prędkością obciążania 1,25 mm/min (badania własne)

Zawartość wilgoci w ziarnach wpływa na mechanizm podziału, a także wielkość i kształt cząstek po rozdrobnieniu [137]. Badania dla ziaren pszenicy [137] dowiodły, że ziarna o małej wilgotności ulegają rozpadowi pod wpływem obciążeń ściskających na większe wielościennie oraz drobne i bardzo drobne cząstki, podczas gdy ziarna o dużej wilgotności rozpadają się na często płaskie, duże cząstki, a udział frakcji pylistych jest niewielki (rys. 3.13). Dla kukurydzy podobnie jak dla pszenicy, zwiększanie wilgotności prowadzi do uzyskiwania większych cząstek po rozdrobnieniu [138]. W przypadku ryżu mielenie w stanie mokrym prowadzi do powstawania produktu o większej zawartości frakcji drobnej niż dla ryżu mielonego w stanie suchym [139]. Ponadto dla biomateriałów twardych o dużej zawartości wilgoci kształt cząstek po rozdrobnieniu jest bardziej nieregularny [139]. Dla ziaren ryżu obserwowano natomiast cząstki o ostrych krawędziach podczas mielenia ziaren o niskiej wilgotności i cząstki okrągłe i gładkie dla ziaren mielonych na mokro [139].



Rys. 3.12. Siły, naprężenia i odkształcenia ziaren a) kukurydzy, b) ryżu średnioziarnistego w próbie ściskania w zależności od wilgotności (opracowanie na podstawie badań własnych opublikowanych w [126])



Rys. 3.13. Przykładowy schemat podziału ziarna pszenicy podczas ściskania a) o niskiej wilgotności, b) o wysokiej wilgotności (opracowanie własne na podstawie [137])

3.1.2. Cel podziału, a sposób i warunki obciążenia ziarna

Cel podziału materiałów osiągnąć jest nie tylko w zależności od właściwości biologicznych, fizycznych i mechanicznych rozdrabnianych ziaren, ale także od warunków i rodzaju obciążeń, jakim są one poddawane. Sposoby obciążania różnią się zarówno kierunkiem oddziaływań, szybkością odkształcenia oraz naprężeniami powstającymi w materiale na skutek przyłożenia obciążenia [73]. Dla biomateriałów, w procesie rozdrabniania najczęściej wykorzystywane są mechanizmy ściskania, ścinania, ścierania i udarowego (dynamicznego) rozbijania [139]. W tabeli 3.1 przedstawiono podstawowe sposoby obciążeń wraz z ilustracją graficzną i przykładami maszyn rozdrabniających, wykorzystujących dany rodzaj obciążeń. Ze względu na typ i kierunek obciążenia sposoby rozdrabniania stosowane w maszynach rozdrabniających można podzielić na ściskanie, rozdrabnianie udarowe i ścinanie materiału [73]. Ze względu na prędkość odkształceń, definiowaną jako przyrost wartości odkształcenia $d\varepsilon$ przypadający na jednostkę czasu dt (przy czym $\varepsilon = \Delta l/l_0$ (Δl – zmiana wymiaru liniowego próbki pod wpływem obciążenia, m, l_0 – początkowy wymiar liniowy próbki, m)), sposoby oddziaływań na ziarna można podzielić na statyczne (poniżej 10^{-6} s^{-1}), quasi-statyczne (10^{-6} - 10^{-1} s^{-1}) i dynamiczne (powyżej 10^{-1} s^{-1}) [140].

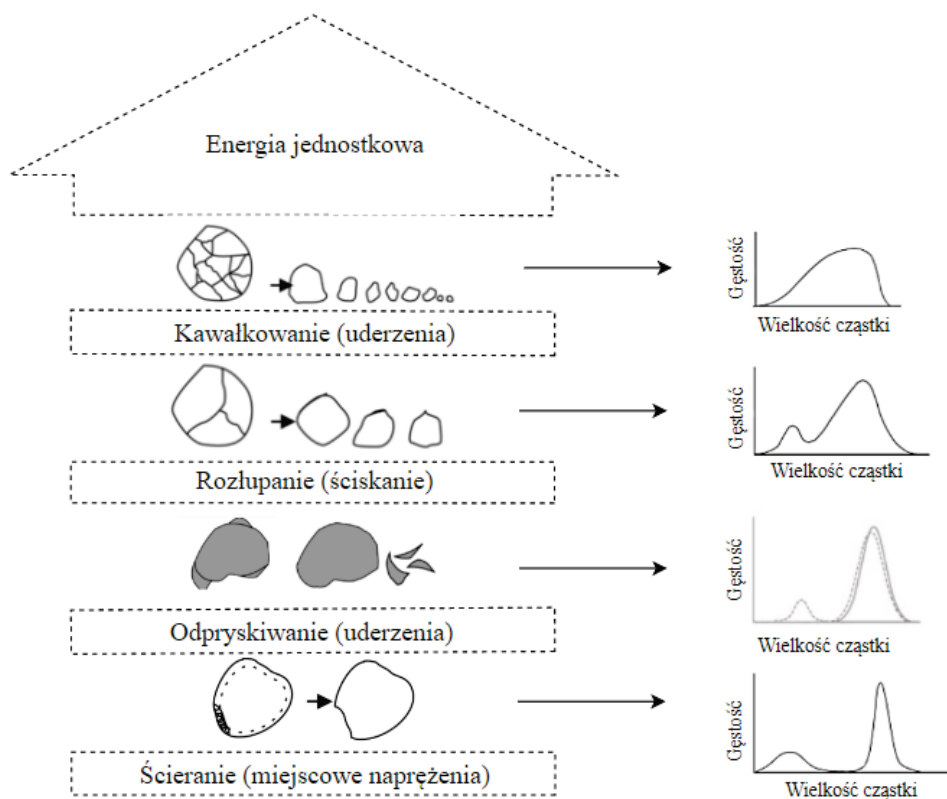
Ściskanie występuje najczęściej w młynach walcowych, rolowo-misowych oraz kruszarkach. Mechanizm obciążenia polega na ściskaniu cząstki z niewielką prędkością pomiędzy dwiema powierzchniami [34]. Rozdrabnianie udarowe następuje w wyniku dynamicznego oddziaływania elementów roboczych i/lub ziaren wprowadzonych w ruch [57]. Wyróżnia się kilka odmian rozdrabniania udarowego, tj. poprzez zderzenia pomiędzy, np. ziarnami, ziarnami wprowadzonymi w ruch i nieruchomymi elementami rozdrabniacza (np. młyny strumieniowe), wprowadzonymi w ruch elementami rozdrabniacza i ziarnami (np. kruszarki bijakowe) oraz poprzez uderzanie w cząstki przez opadającą masę, np. kule w młynach kulowych [73]. Naprężenia tnące mogą powodować ścieranie i cięcie materiału. Ścieranie i cięcie może występować, gdy materiał dociskany jest przez dwie powierzchnie będące w ruchu (np. w rozdrabniaczach tarczowych). Możliwe jest także ścieranie się ziarna o ziarno w wyniku sił tarcia [73].

Ze względu na różnice w sposobie obciążania występują także różnice w mechanizmie podziału ziaren. Mechanizm podziału opisuje pewien sposób, w jaki cząstka ulega rozpadowi pod wpływem obciążeń. Zazwyczaj mechanizm rozdrabniania opisywany jest za pomocą wzorca pęknięcia, kształtu i wielkości cząstek po rozdrobnieniu [73]. Identyfikacja mechanizmu rozdrabniania możliwa jest poprzez badanie i analizę zachowania się materiałów pod wpływem obciążeń. Na rysunku 3.14 przedstawiono opisane dotąd mechanizmy rozdrabniania.

Tabela 3.1. Podstawowe sposoby obciążeń w rozdrabniaczach biomasy ziarnistej (opracowanie własne na podstawie [59, 127])

Typ obciążenia	Ściskanie	Rozdrabnianie udarowe	Ścinanie
Prędkość odkształcenia	mała: do 10^{-6} s^{-1} dla obciążeń statycznych, do 10^{-1} s^{-1} dla obciążeń quasi-statycznych	duża: powyżej 10^{-1} s , zazwyczaj w zakresie $10^{-1} - 10^3 \text{ s}^{-1}$	mała lub duża
Dominujący rodzaj naprężeń/wytężeń materiału	naprężenia normalne	moment siły, grawitacja	naprężenia ścinające, tarcie
Mechanizm obciążania	ściskanie	zderzenia	ścieranie
Przykładowe konstrukcje rozdrabniające	<ul style="list-style-type: none"> • młyny walcowe • młyn rolowo-misowy • kruszarki 	<ul style="list-style-type: none"> • kruszarki młotkowe • kruszarki bijakowe • młyny strumieniowe • młyny kulowe 	<ul style="list-style-type: none"> • młyny tarczowe, • młyny nożowe
Graficzna ilustracja obciążeń			

Ziarna, dla których energia podczas kontaktu nie jest wystarczająca do całkowitego rozpadu, a także kiedy na ziarno działają siły styczne, ulegają zazwyczaj uszkodzeniom powierzchniowym, tj. materiał jest ścierany [73, 141–143]. Dla cząstek o nieregularnym kształcie, poddawanych obciążeniom pod różnym kątem występuje odpryskiwanie ostrych fragmentów [141]. Zarówno ścieranie, jak i odpryskiwanie powodują uszkodzenia powierzchniowe ziarna i charakteryzują się niskimi nakładami energetycznymi [73, 141–143]. Podczas ścierania tworzone są bardzo drobne cząstki a początkowy wymiar ziarna nie zmienia się. Dla odpryskiwania, podobnie jak dla ścierania, rozkład wielkości cząstek jest bimodalny [73, 141–143].



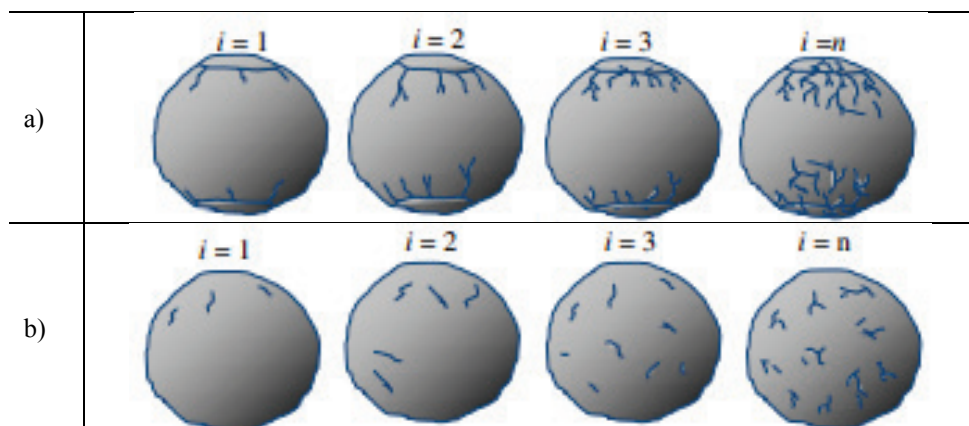
Rys. 3.14. Charakterystyka mechanizmów rozdrabniania. Opracowanie własne na podstawie [73, 141–143]

Gdy energia dostarczona podczas obciążenia jest wystarczająco duża, ziarna mogą być rozłupywane lub kawalkowane. Rozłupywanie charakteryzuje się rozpadem cząstek najczęściej pod wpływem obciążeń ściskających. Podział materiału przebiega wtedy zgodnie z naturalnymi płaszczyznami wyznaczanymi przez elementy strukturalne, dla minerałów są to płaszczyzny wyznaczone przez

strukturę krystalograficzną. Taki podział prowadzi do powstawania kilku dużych cząstek oraz cząstek drobnych powstałych w punkcie kontaktu. Kawałkowanie występuje najczęściej podczas obciążeń udarowych, gdzie elementy rozdrabniające lub cząstki poruszają się z dużą prędkością powodując, że energia kontaktu znacznie przewyższa energię podziału materiału. W tym wypadku tworzone są w pierwszej kolejności duże fragmenty, które pod wpływem dużych porcji dostarczanej energii ulegają wtórnemu rozpadowi [73, 141–143]. Prędkość uderzeń, a w zasadzie porcja energii związana z prędkością w momencie zderzenia wywiera zatem istotny wpływ na mechanizm rozdrabniania, a przede wszystkim na wielkość uzyskiwanych cząstek [124]. Han et al. [124] wskazali na różnice w uszkodzeniach ziaren ryżu podczas ściskania i testów udarowych, gdzie ziarna ryżu wyrzucane były w strumieniu powietrza z zadaną prędkością i uderzały o stalową płytę. Udowodniono, że poniżej pewnej prędkości krytycznej (zależnej od wilgotności) ziarna ryżu nie ulegają rozpadowi, a jedynie uszkodzeniom powierzchni [124]. Z kolei Chen et al. [4, 47] wyznaczyli dla ziaren kukurydzy krytyczną wartość energii pojedynczego kontaktu, poniżej której ziarna kukurydzy nie ulegają fragmentacji.

W rozdrabniaczach zatem nie każdy kontakt ziarno–element rozdrabniający lub ziarno–ziarno będzie prowadził do podziału materiału, a jedynie do jego osłabienia. Podział będzie więc wynikał z wielokrotności obciążeń. Podczas obciążeń o energii poniżej wartości krytycznej rozdrabnianie następuje na skutek zmęczenia materiału [144, 145].

Badania nad osłabieniem materiałów kruchych wykazały, że pęknięcie i jego rozwój zależy od poprzedniego stanu materiału (stanu wad wewnętrznych) oraz historii zdarzeń obciążających, prowadzących do zróżnicowania wytrzymałości cząstek [146]. Zgodnie z koncepcją zaproponowaną przez Tavaresa [147] dla opisu mechanizmu rozdrabniania cząstek w warunkach obciążeń niskoenergetycznych, uszkodzenia i wady materiału z pojedynczych kontaktów kumulują się, przez co następuje osłabienie materiału i w wyniku wielokrotnego obciążania prowadzi do pęknięcia cząstki. Efekt osłabienia powoduje, że ziarna pękają w warunkach obciążenia mniejszego niż pierwotne obciążenie niszczące, wynikające z właściwości wytrzymałościowych [144]. Obciążanie ziaren wielokrotnie w tym samym punkcie powoduje wzrost sztywności sprężysto-plastycznej [148] z uwagi na konsolidację materiału, co wykazali Salman et al. [149] dla lepkosprężystych granул $c\text{-Al}_2\text{O}_3$. Stwierdzili oni ponadto, że istnieje krytyczna liczba cykli, poniżej których granulki ulegają wzmocnieniu, a powyżej której obserwuje się osłabienie. Dodatkowo dowiedziono, że obciążanie granulek w niezmiennym punkcie kontaktu wymaga mniejszej liczby obciążeń do podziału ziarna w porównaniu z obciążaniem punktu kontaktu wybranego losowo w każdym cyklu [149]. Schemat prezentujący rozwój uszkodzeń ziarna poddanego wielokrotnym obciążeniami w tym samym i zmiennym punkcie kontaktu przedstawiono na rysunku 3.15.

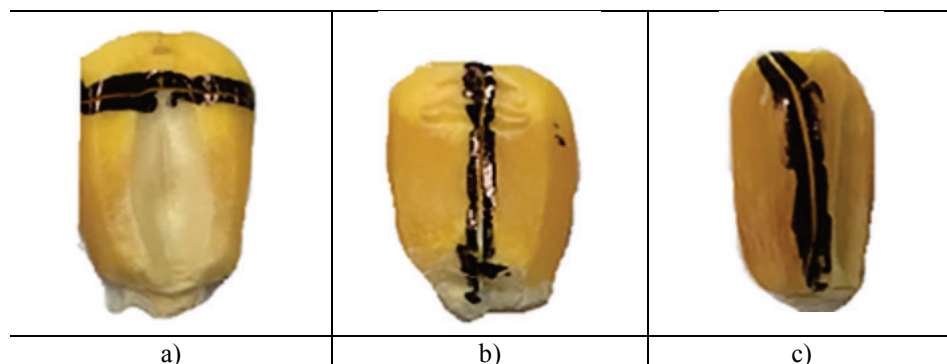


Rys. 3.15. Akumulacja uszkodzeń podczas wielokrotnych obciążeń a) przy stałym punkcie kontaktu, b) przy zmiennym, losowo wybranym punkcie kontaktu [134]

Analiza literatury wykazała, że opisy uszkodzeń ziaren zbóż ograniczają się zazwyczaj do określenia właściwości mechanicznych i czynników wpływających na te właściwości, a nie do opisu ewolucji uszkodzeń i osłabienia struktury materiału w wyniku cyklicznych obciążeń. W pracy [150] stwierdzono, że odkształcenie plastyczne zmniejsza się, gdy ziarno kukurydzy jest obciążane kilkakrotnie, jednakże nie wspomniano o wpływie na stan uszkodzenia i rozwój pęknięcia pod wpływem wielokrotnych obciążeń, gdyż praca koncentrowała się raczej na zmianach modułu sprężystości wraz ze zmianami zawartości wilgoci. Ren et al. [151] przeanalizowali stopień uszkodzeń wewnętrznych ziaren ryżu dla różnej liczby cykli obciążenia i kilku poziomów sił obciążających oraz wyznaczyli wartości krytyczne sił niszczących dla omłotu. Han et al. [48,49] z kolei wykazali, że wytrzymałość cząstek ryżu maleje wraz z liczbą cykli obciążenia. Dotychczasowe badania skupiają się na opisie wpływu wybranego czynnika na właściwości mechaniczne i powstawanie pęknięć, ale nie dają wyjaśnienia zaobserwowanych zależności z mechanistycznego punktu widzenia.

Materiały biologiczne typu ziarna zbóż wykazują właściwości anizotropowe, w związku z tym orientacja ziarna względem kierunku obciążania będzie wywierała wpływ na wartości sił niszczących oraz mechanizm podziału [97]. W badaniach dla różnych ziaren zbóż wykazano, że wytrzymałość ziaren jest najwyższa, gdy ziarno obciążane jest wzdłuż najmniejszego wymiaru charakterystycznego, czyli jego grubości [94, 97, 107]. Su et al. [97] opisali różne formy pęknięć ziaren kukurydzy w zależności od orientacji ziarna względem obciążenia (rys. 3.16). Dla ziaren obciążanych wzdłuż szerokości obserwowano pęknięcia przez całą szerokość [97]. Dla ziaren obciążanych wzdłuż grubości ziarna pękały na całej długości [97]. Podczas obciążania wzdłuż największego wymiaru (długości) pęknięcia penetrowały od połowy grubości lub wzdłuż szerokości ziarna. Badania wykazały również, że nie bez znaczenia dla uszkodzeń ziaren jest kąt zderzenia oraz typ powierzchni, z którą zderzenie wystąpiło [5]. Obserwowano,

że wraz ze zmniejszaniem się kąta uderzenia, zmniejsza się liczba uszkodzonych ziaren, jednak w dużej mierze zależy to od typu powierzchni – zderzenia z bardziej szorstką i mniej sprężystą powierzchnią ulegały zwiększonym uszkodzeniom [5].



Rys. 3.16. Formy pęknięć kukurydzy w zależności od orientacji ziarna względem obciążenia: a) obciążanie wzdłuż szerokości ziarna, b) obciążanie wzdłuż grubości ziarna, c) obciążanie wzdłuż długości ziarna (zaadaptowano z [97])

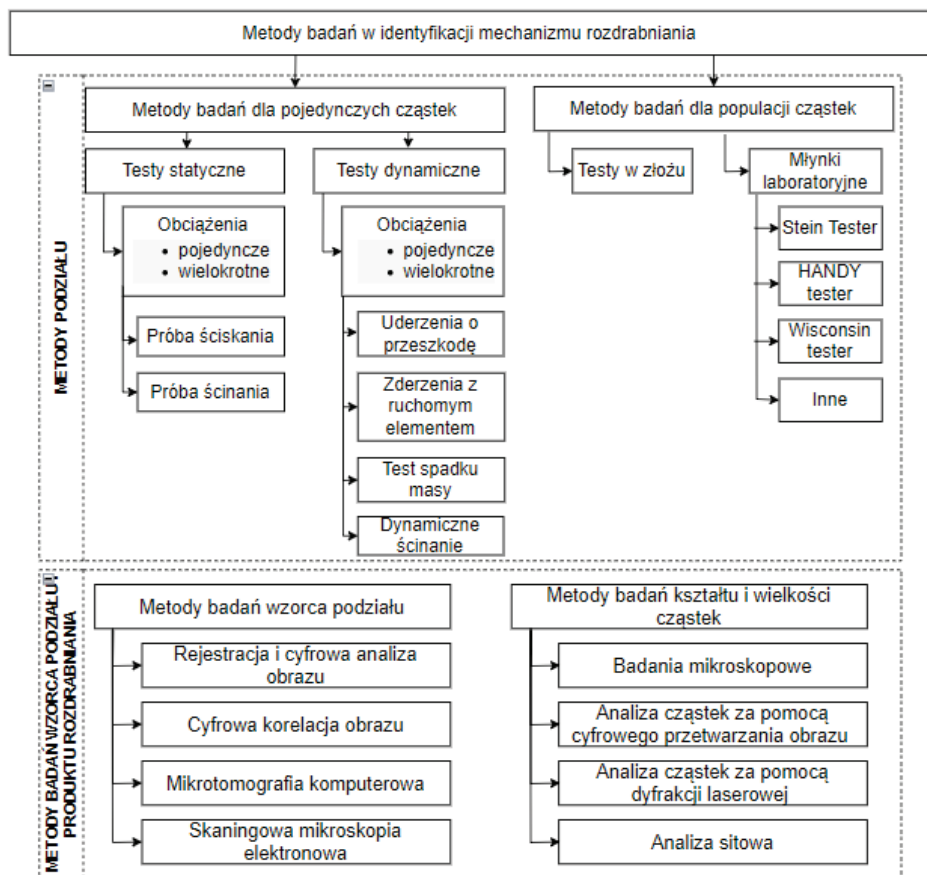
Z uwagi na zawartość wody w ziarnach i jej zmiennych właściwości wraz ze zmianami temperatury, a także zmian właściwości skrobi wraz z temperaturą, dla ziaren pszenicy obserwowano zmiany w wytrzymałości podczas obciążania jej w różnych temperaturach [8, 152]. W niskich temperaturach obserwowano zwiększoną wytrzymałość ziaren w stosunku do ziaren w temperaturze pokojowej, podobnie jak w temperaturach wysokich (powyżej 295 K) [8,152]. Z reguły rozdrabnianie w niskich, ujemnych temperaturach prowadzi do uzyskiwania drobniejszego produktu [153].

W sensie celowości procesów, realizowanych przez maszyny i urządzenia inżynierii mechanicznej rozdrabniania, należy zatem dopełnić i usystematyzować wypełniane funkcje poszczególnych elementów w dynamicznym układzie (systemie rozdrabniania *SR*), zdolnym do działania oraz rozwoju. W szczególności zaś głębszego poznania wymaga proces podziału ziaren biomasy z uwzględnieniem interakcji pomiędzy warunkami procesu (sposobu obciążania, cykliczności obciążeń i zmienności energii oddziaływań) a właściwościami ziaren rozdrabnianych, takimi jak: wilgotność, kształt, struktura wewnętrzna itd. dla utworzenia podstaw mechanicznego, probabilistycznego opisu przemian, zjawisk zachodzących w maszynach i urządzeniach procesów rozdrabniania.

3.2. CELOWOŚĆ I MINIMUM ENERGII – BADANIA

Badania w odniesieniu do celu – procesu (zjawiska) rozdrabniania i energii obciążeń rozdrabniania materiałów ziarnistych dotyczą zazwyczaj testów dla pojedynczych ziaren lub ich populacji (rys. 3.17) [90]. Do podziału cząstek w celu

charakteryzacji procesu dezintegracji powszechnie stosowane są próby statyczne ściskania oraz ścinania pojedynczych ziaren, co pozwala na określenie sił, naprężeń, przemieszczeń, energii jednostkowej rozdrabniania oraz na obserwację propagacji pęknięcia z wykorzystaniem różnego rodzaju rejestratorów obrazu (np. kamer szybkoklatkowych) [8, 90, 154, 155]. Równie często stosowane są metody dynamiczne, w których możliwe jest uzyskanie szybkości obciążeń zbliżonych do warunków panujących w procesach rozdrabniania [156]. Metody stosowane dla pojedynczych cząstek pozwalają na opis podziału materiału jako fenomenu, bez uwzględniania interakcji pomiędzy ziarnami, które w procesach przemysłowych naturalnie występują. Pewną niedogodnością tych testów jest chociażby utrudnione oznaczenie związków pomiędzy energią rozdrabniania a wielkością cząstek dla ziaren o bardzo małym rozmiarze, co często wymaga wykonania wielu eksperymentów na pojedynczych ziarnach, w celu uzyskania próby materiału o masie odpowiedniej do analizy zawartości poszczególnych frakcji wymiarowych, zwiększając tym samym nakłady (czasowe, ludzkie, materiałowe) na wykonanie eksperymentu [157].



Rys. 3.17. Metody badań w identyfikacji mechanizmu rozdrabniania (opracowanie własne)

Metody badań dla populacji cząstek pozwalają na uwzględnienie interakcji pomiędzy ziarnami, ale także na stworzenie warunków rozdrabniania zbliżonych do obecnych w warunkach przemysłowych [5]. Przede wszystkim możliwe jest określenie energii rozdrabniania oraz jej związków ze stanem uszkodzenia ziarna [5]. W tym celu najczęściej wykorzystywane są młynki laboratoryjne [5] lub próby statyczne i dynamiczne ściskania dla masy cząstek [157].

Aby możliwe było opisanie wzorca rozdrabniania, stosuje się rejestrację propagacji pęknięcia podczas obciążania, za pomocą kamer szybkoobrotowych oraz dokonuje się analizy uzyskanych obrazów, np. za pomocą cyfrowej korelacji obrazu [158]. Stosowane są także metody pozwalające na identyfikację mikro-pęknięć i uszkodzeń struktury wewnętrznej, mikrotomografia komputerowa [80, 115, 159–161] czy skaningowa mikroskopia elektronowa [73, 162]. Kształt i wielkość cząstek uzyskanych w wyniku rozdrobnienia ziarna można określić stosując różnego typu mikroskopy optyczne lub bardziej zaawansowane metody, np. analizę kształtu i wielkości cząstek za pomocą cyfrowego przetwarzania obrazu czy dyfrakcji laserowej oraz analizę sitową [57].

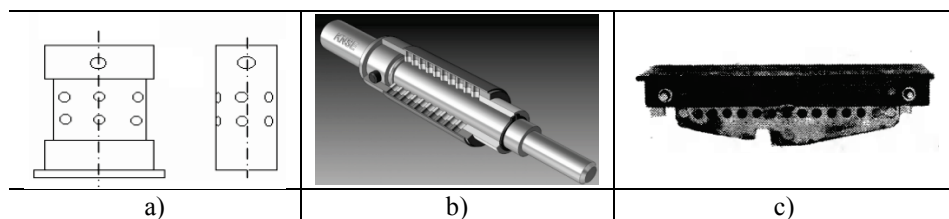
3.2.1. Metody badań pojedynczych cząstek

3.2.1.1. Metody statyczne

Najprostszą i najczęściej stosowaną metodą do identyfikacji mechanizmu rozdrabniania jest próba statycznego ściskania. Dla ziaren biomasy o sferycznym i eliptycznym kształcie badania pozwalające określić wytrzymałość, siłę niszczącą, a przede wszystkim energię rozdrabniania oraz zachowanie się pod wpływem obciążenia przeprowadza się zgodnie z normą ASAE S368.4 (R2017): *Compression test of food materials of convex shape* [91]. Badanie polega na umieszczeniu ziarna pomiędzy dwiema równoległymi płytami i obciążaniu jednej z nich do momentu utraty spójności przez ziarno [5, 91]. Próby ściskania przeprowadzono dla wielu ziaren biomasy i wyniki tych badań są dostępne w literaturze [93, 94, 126, 128, 163].

W przypadku ziarniaków biomasy stosowana jest także metoda statycznego ścinania. W celu przeprowadzenia prób ścinania opracowano kilka przyrządów ścinających, montowanych w maszynach wytrzymałościowych. Na rysunku 3.18 przedstawiono przykładowe rozwiązania konstrukcyjne przyrządów do ścinania przeznaczonych do współpracy z maszynami wytrzymałościowymi. Cechą wspólną przedstawionych przyrządów jest możliwość ścinania pojedynczego ziarna lub kilkunastu ziaren jednocześnie. W przyrządach na rysunku 3.18a) i b) ziarna umieszczane są w specjalnych otworach rozmieszczonych na obwodzie walca i ścinane za pomocą specjalnego tłoka w postaci zewnętrznego cylindra, który przymocowany jest to tłoka maszyny wytrzymałościowej [8]. Przyrząd przedstawiony na rysunku 3.18c) opracowano do jednoczesnego ścinania maksymalnie 15 ziaren [164]. W odróżnieniu od dwóch poprzednich przyrządów składa się on z trzech płaskowników, w których wykonano otwory o średnicach d_1 , d_2 i d_3

[164]. Ścinanie następuje poprzez zadanie obciążeń ścinających bądź ściskających, tak aby zewnętrzne płaskowniki poruszały się w kierunku przeciwnym do płaskownika wewnętrznego. Dodatkowo w przyrządzie możliwa jest regulacja szczeliny pomiędzy płaskownikami [164]. Przyrząd ten pozwala na badanie tzw. quasi-ścinania technologicznego, które definiowane jest jako proces złożonego stanu naprężeń ścinających, gnących i skręcających, występujących podczas rozdrabniania materiału pomiędzy wielootworowymi płytami (tarczami) [164].



Rys. 3.18. Przyrządy do ścinania ziaren biomasy: a) ścinania jednoosiowego – projekt Akademia Rolnicza we Wrocławiu [8], b) przyrząd PTS-100 [165], c) projekt przyrządu do quasi-ścinania technologicznego [164]

Zaletą metod statycznych i quasi-statycznych są niższe koszty ich przeprowadzania w porównaniu z metodami dynamicznymi, które często wymagają stosowania kosztownej, zaawansowanej aparatury pomiarowej do rejestracji sił i przemieszczeń z uwagi na duże prędkości odkształceń [166].

3.2.1.2. Metody dynamiczne

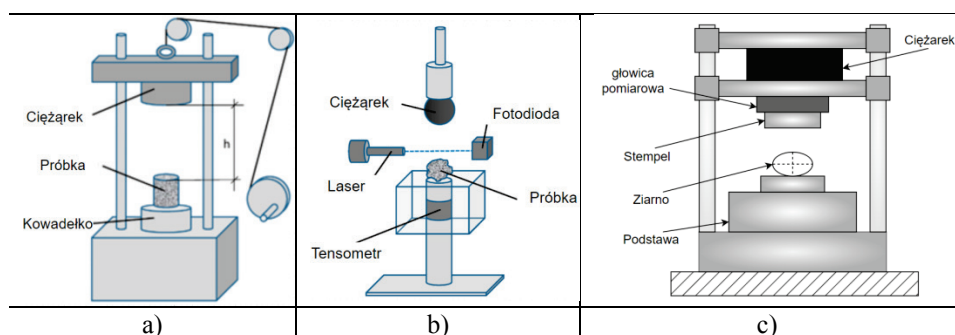
Metody dynamiczne wprowadzono do obserwacji zachowania się materiałów poddawanych obciążeniom z bardzo dużą szybkością odkształceń. Testy te mają za zadanie symulować warunki zbliżone do tych podczas procesów skali przemysłowej [5]. Opracowano kilka różnych metod badań udarowych dla pojedynczych ziaren, np. test opadającego ciężarka [146, 167], test działka pneumatycznego [168], test uderzania wahadłem [169], testy ścinania z wykorzystaniem zmodyfikowanej postaci młota Charpy'ego [39], które mogą być stosowane zarówno przy pojedynczym, jak i wielokrotnym obciążaniu. Testy udarowe stosowane są m.in. do wyznaczenia wpływu prędkości obciążania, kąta uderzenia, średnicy cząstki, grubości ziarna, liczby cykli obciążeń na przebieg podziału ziarna i wielkość cząstek [156].

Jednym z najczęściej stosowanych jest test spadającego ciężarka [146, 167]. Rozdrabnianie w tym przypadku realizowane jest poprzez uderzenie w ziarno rozpędzonej masy spadającej z określonej wysokości (rys. 3.19a). Energia uderzenia jest w tym przypadku kontrolowana przez wagę elementu i wysokość, z jakiej spadał na ziarno [169]:

$$E = m_c \cdot g \cdot h \quad (3.8)$$

gdzie: E – energia uderzenia, J, m_c – masa ciężarka, kg, g – przyspieszenie ziemskie, m/s^2 , h – wysokość, z jakiej opuszczano ciężarek, m.

Regulacja wysokości pozwala także na zmianę prędkości zderzenia. Zmodyfikowane testy spadającego ciężarka zakładają wykorzystanie instrumentarium pomiarowego. Na przykład w metodzie opracowanej w Uniwersytecie w Utah wykorzystywane jest urządzenie z ultraszybką głowicą pomiarową (ang. *ultra-fast load cell device* – UFLC) (rys. 3.19b) [170]. W urządzeniu tym zamiast obliczenia energii potencjalnej wykorzystuje się obliczone odkształcenia i przebiegi siły w czasie do wyznaczenia energii rzeczywistej przekazanej próbce podczas uderzenia [171]. Urządzenie to wyposażone jest w laser i fotodiodę rejestrującą spadek ciężarka, natomiast w stalowym pręcie służącym jako podstawa dla obciążanego materiału umieszczone są tensometry pozwalające na rejestrację fali uderzeniowej [169]. Dostępne są także komercyjne urządzenia, np. Instron Impact Drop Tower 9310 wyposażone w ciężarek z głowicą pomiarową i indukcyjne przetworniki przemieszczenia (rys. 3.19c), pozwalając na rejestrację zmian w czasie sił i przemieszczeń podczas zderzenia, a energia wyznaczana jest jako pole pod wykresem siła–przemieszczenie [169]. Testy spadającego ciężarka były wykorzystywane między innymi do określenia własności mechanicznych ziaren i energii rozdrabniania groszku, pszenicy, kukurydzy, soi [5,172,173].



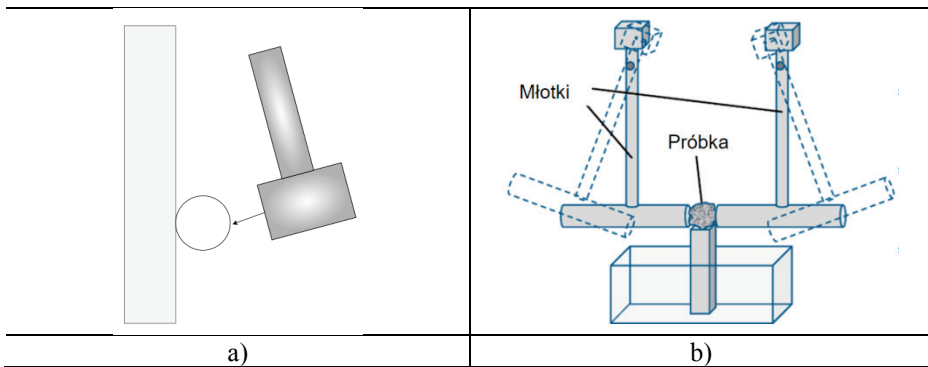
Rys. 3.19. Urządzenia do testu spadającego ciężarka: a) urządzenie bez opomiarowania [169], b) urządzenie z ultraszybką głowicą pomiarową (UFLC) [169], c) komercyjna wieża zrzutowa

Inną metodą wykorzystującą uderzenie w nieruchomą próbkę są testy wahadła pojedynczego i podwójnego (rys. 3.20). W teście pojedynczego wahadła próbka podparta jest z jednej strony (np. przyklejona do pionowej ściany lub położona na poziomej płycie) i obciążana za pomocą młotka wprowadzonego w ruch wahadłowy poprzez opuszczenie z odpowiedniej wysokości [147]. Prędkość i energia uderzenia regulowana jest poprzez uniesienie wahadła na odpowiednią wysokość [147]. W teście podwójnego wahadła, nazywanym także testem Bonda, ziarno umieszczone jest na podeście w specjalnym wgłębieniu i kruszone pomiędzy dwoma młotkami opuszczonymi z pewnej ustalonej wysokości. Powtarzane to jest do momentu pęknięcia ziarna przy zwiększaniu energii uderzenia poprzez odpowiednie odchylenie młotków [169]. Na podstawie testu można wyznaczyć indeks pracy kruszenia Bonda CW_i [169]:

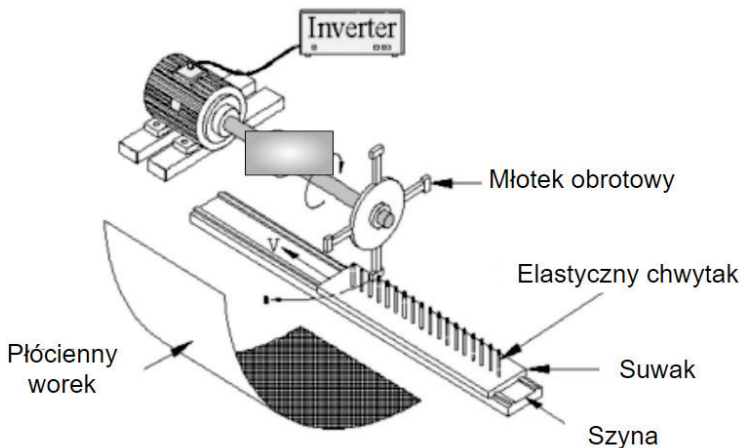
$$CW_i = \frac{53,5 \cdot 117 \cdot (1 - \Theta)}{d_p \cdot \rho_p} \quad (3.9)$$

gdzie: d_p – grubość cząstki, mm, ρ_p – gęstość cząstki, g/cm³, Θ – kąt odchylenia wahadła w stopniach.

Rozwiązaniem często stosowanym w testach ziaren biomasy jest uderowy młot obrotowy (rys. 3.21). Urządzenia to składa się z młotków zamocowanych na tarczy wykonującej ruch obrotowy. Ziarna umieszczane są w specjalnych elastycznych chwytakach i uderzane przez rozpędzony młotek. Chwytki umieszczone są na listwie ślizgowej, wykonującej ruch posuwisto-zwrotny, skorelowany z prędkością obrotową wirnika z młotkami [174, 175].



Rys. 3.20. Schematyczna prezentacja sposobu obciążania próbek w teście wahadła: a) pojedynczego, b) podwójnego [169]



Rys. 3.21. Schemat uderowego młota obrotowego [174, 175]

Testy uderzeniowe realizowane są także poprzez przyspieszenie cząstki i jej uderzenie w nieruchomą geometrię. Może to być realizowane przez mechanizmy pneumatyczne [168], np. w działkach pneumatycznych, wykorzystanie siły elektromagnetycznej [124] lub odśrodkowej [5] do wprowadzenia ziarna w ruch (rys. 3.22). W działkach pneumatycznych cząstki wprowadzane są w ruch za pomocą strumienia sprężonego powietrza i uderzają w przeszkodę umieszczoną na końcu kanału wylotowego [168]. Działka pneumatyczne można podzielić na pionowe i poziome. Przykładowe rozwiązanie konstrukcyjne działka pneumatycznego przedstawia rys. 3.2a). W impaktorze odśrodkowym (rys. 3.22b) cząstki wprowadzane są w ruch przez obrotowy wirnik, w którym umieszczono kanały wylotowe. Cząstki uderzają wówczas w zębate ścianki stojana, co zapewnia uderzenie prostopadłe w powierzchnię stojana [169, 176]. Cechą charakterystyczną tego urządzenia jest, to że energia kinetyczna zderzenia cząstki E_{kin} jest niezależna od jej masy m , a jedynie prędkości v [169, 176]:

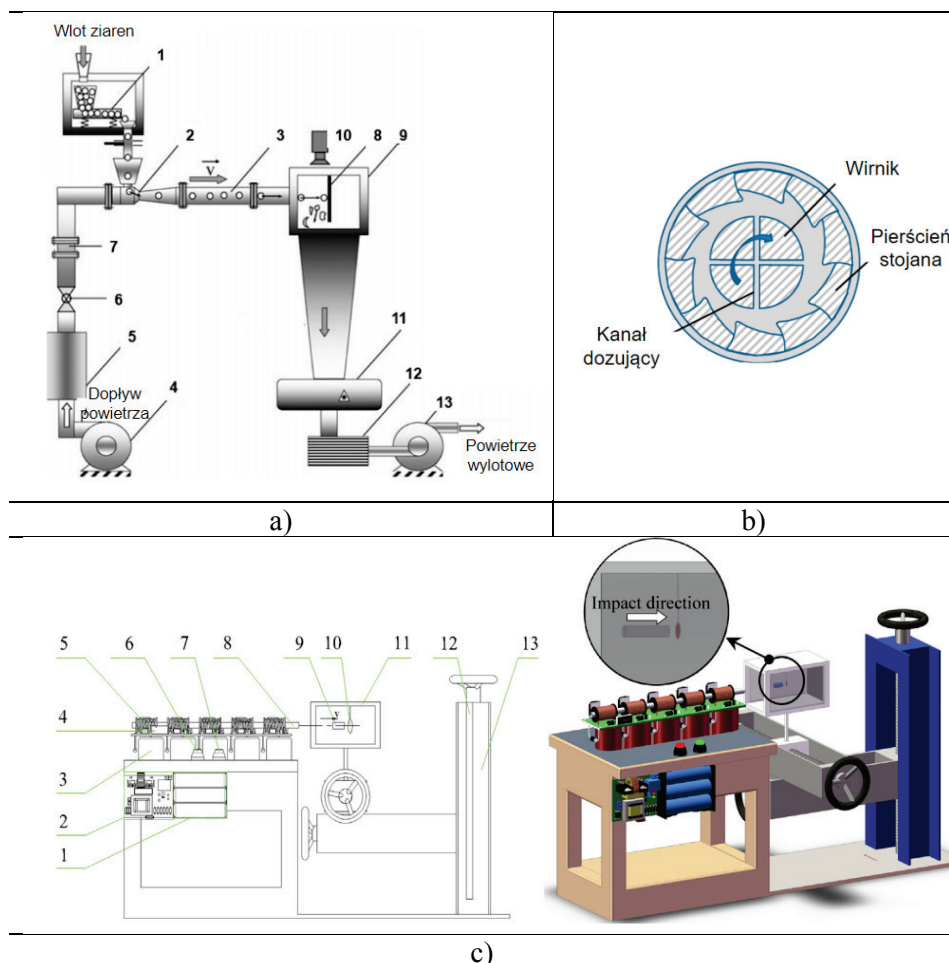
$$E_{kin} = \frac{\frac{m}{2} \cdot v^2}{m} = \frac{1}{2} \cdot v^2 \quad (3.10)$$

W celu symulacji dynamicznych warunków ścinania zaproponowano zmodyfikowane stanowisko badawcze oparte na metodzie Charpy'ego [39]. Zasada działania stanowiska polega na dynamicznym uderzeniu krawędzią narzędzia – zmodyfikowanego młotka, na końcu którego zamocowano wymienne ostrze (2) w ziarno umieszczone w łożu (1) (rys. 3.23) [66]. Znając energię kinetyczną opadającego elementu nożowego, można wyznaczyć odkształcenie próbki zgodnie ze wzorem [39]:

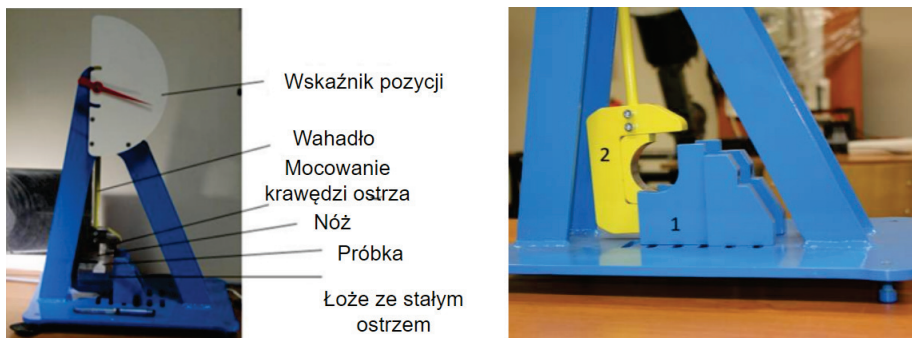
$$W = \frac{m \cdot v^2}{2} = \int_0^{F_{max}} F \cdot df \approx \frac{F_{max} \cdot f}{2} \quad (3.11)$$

gdzie: m – masa młotka, kg, v – prędkość młotka podczas zderzenia z próbką, m/s, F – siła działająca na próbkę, N, f – odkształcenie, m.

Oprócz młota Charpy'ego w próbach udarowych można stosować także narzędzia opisane wcześniej i wykorzystywane w próbie statycznego ściskania (rys. 3.18) [155].



Rys. 3.22. Schemat budowy a) działka pneumatycznego, 1 – podajnik wibracyjny, 2 – wtryskiwacz, 3 – kanał przyspieszający, 4 – kompresor, 5 – zbiornik powietrza, 6 – zawór kontrolny, 7 – rurka Pitota, 8 – płyta uderzeniowa, 9 – komora uderzeniowa, 10 – kamera szybkołatkowa, 11 – laserowy spektrometr dyfrakcyjny, 12 – filtr, 13 – wsysacz [168]; b) impaktora odśrodkowego z przyspieszeniem elektromagnetycznym, 1 – zasilanie, 2 – jednostka obwodu przyspieszenia, 3 – pojemność, 4 – wyświetlacz napięcia, 5 – cewki elektromagnetyczne, 6 – przycisk przyspieszenia, 7 – przycisk wyzwalacza, 8 – kanał przyspieszający, 9 – kolumna stalowa, 10 – ziarno zawieszane za pomocą cienkiej nici, 11 – komora z okienkiem, 12 – linijka, 13 – urządzenie do pozycjonowania ziaren [124]



Rys. 3.23. Stanowiska badań dynamicznych ścinania – zmodyfikowany młot Charpy’ego [39]

3.2.2. Metody badań populacji ziaren

Procedury badawcze stosowane do identyfikacji i charakterystyki mechanizmów rozdrabniania ziaren biomasy w odniesieniu do populacji cząstek obejmują głównie metody, środki i sposoby wyznaczania podatności ziaren na podział oraz relacji krzywych składu ziarnowego produktu po rozdrobnieniu z parametrami procesowymi i konstrukcyjnymi oraz energii rozdrabniania.

Podatność na rozdrobnienie definiowana jest jako potencjał ziarna do podziału pod wpływem obciążeń uderowych [177]. Do oceny podatności na rozdrabnianie wykorzystywany jest wskaźnik rozdrobnienia (ang. *breakage rate*) przyjmujący postać [178, 179]:

$$BR = \frac{m_2}{m_1 + m_2} \cdot 100\% \quad (3.12)$$

gdzie: m_1 – masa ziaren nierozdrobnionych w próbce, g, m_2 – masa rozdrobnionych (uszkodzonych) ziaren w próbce, g.

W literaturze funkcjonuje także pojęcie odporności na rozdrabnianie, określające zdolność ziarna do zachowania spójności [180] i opisujące zależność pomiędzy przyłożonymi obciążeniami a uszkodzeniem ziarna [181]. Stosowane jest często zamiennie z podatnością na rozdrabnianie i do wyznaczenia odporności na rozdrabnianie stosuje się także wskaźnik rozdrobnienia BR [4].

Eksperymentalnego wyznaczenia wartości wskaźnika rozdrobnienia-dokonyuje się z wykorzystaniem dedykowanych młynków, np. Steina, zmodyfikowanego młynka z Wisconsin czy impaktora odśrodkowego [5, 182]. Stosowane są również inne młynki laboratoryjne, np. kulowe, dyskowe, nożowe, moździerzowe, bębnowe itd. [5, 57].

3.2.2.1. Test z wykorzystaniem młynka Steina

W teście z wykorzystaniem młynka Steina możliwe jest wyznaczenie udziału pękniętych cząstek w przygotowanej próbce i oznaczenie np. zależności pomiędzy parametrami materiałowymi ziaren (np. wilgotnością, rozmiarem) a podatnością na rozdrabnianie. Możliwe jest także określenie wpływu czasu pozostawania w komorze rozdrabniania na udział cząstek pękniętych. W przykładowym wykonaniu młynka przez Fred Stein Laboratories (model CK-2) (rys. 3.24) podstawowym elementem konstrukcyjnym jest wirnik z dwoma ostrzami obracający się z prędkością obrotową $1790 \text{ obr} \cdot \text{min}^{-1}$, który umieszczono w owalnej komorze o średnicy 90 mm i wysokości 92 mm [183]. Próbka ziaren o minimalnej masie 100 g podawana jest do komory przez zasyp. Młynek wyposażono w zegar pozwalający na regulowanie czasu pozostawania materiału w komorze. W trakcie testu cząstki poddawane są wielokrotnym obciążeniom w wyniku działania siły odśrodkowej, doznając przyspieszenia w rezultacie uderzenia przez ostrza wirnika, a następnie uderzenia o ściany komory [115,182]. Rozdrobnienie następuje zatem w wyniku wielokrotnych obciążeń udarowych i częściowego ścierania materiału w łożu komory przy prędkościach obwodowych rzędu $5\text{--}15 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ [184]. Po zakończonym teście cząstki przesiewane są przez sito o określonej wielkości oczek (4,76 mm) w celu oddzielenia i ustalenia masy cząstek pękniętych w całej próbce [182], co posłuży do oznaczenia podatności na rozdrabnianie zgodnie z zależnością (3.12).



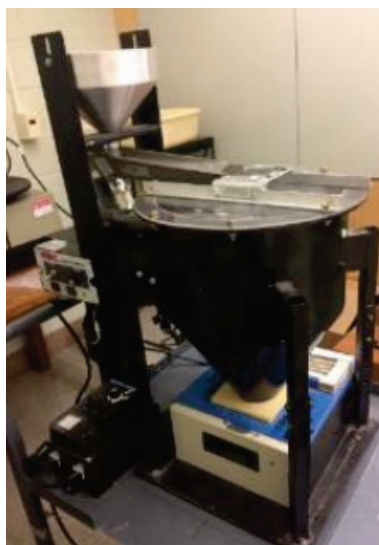
Rys. 3.24. *Stein breakage tester* w laboratorium Physical Properties and Grain Characterization w Uniwersytecie Purdue (materiały własne)

3.2.2.2. Test z wykorzystaniem młynka z Ohio

W wyniku badań prowadzonych dla różnych ziaren biomasy wprowadzono modyfikację oryginalnej konstrukcji testera Steina. Zmiany zostały opracowane przez zespół badaczy z Uniwersytetu w Ohio poprzez ulepszenie konstrukcji wirnika i częściową automatyzację opróżniania komory rozdrabniania [182]. Rezultatem było zwiększenie dokładności i powtarzalności wyników w stosunku do oryginalnej konstrukcji, skróceniu wymaganego minimalnego czasu pozostawiania materiału w komorze z 2 minut do 20 sekund oraz zmniejszeniu błędów wynikających z manualnego opróżniania komory [182].

3.2.2.3. Test z wykorzystaniem młynka z Wisconsin i jego zmodyfikowanej postaci

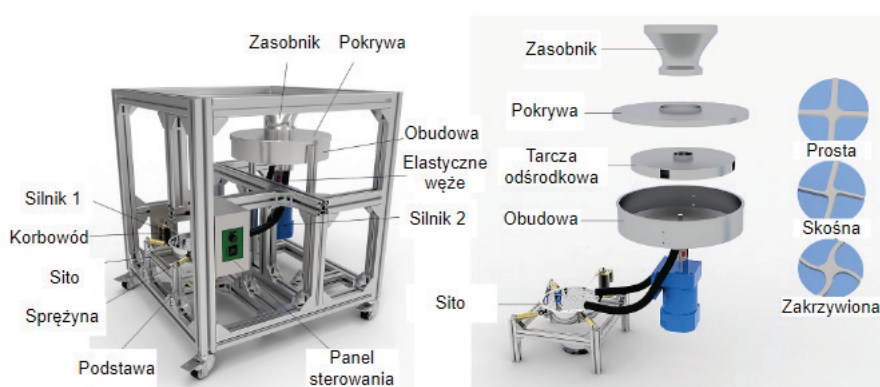
Młynek z Wisconsin został opracowany przez Singha i Finnera z Uniwersytetu w Wisconsin (rys. 3.25) [185]. Badania wykazały, że jest on najlepszą metodą do oznaczania podatności na rozdrabnianie ziaren biomasy, ze względu na uzyskiwaną niewielką wartość wariancji dla kilku powtórzeń oraz najkrótszy czas przeprowadzania procedury [184]. Podczas badania podatności na rozdrabnianie ziarna podawane są do komory rozdrabniania za pomocą podajnika wibracyjnego i wprawiane w ruch poprzez siłę odśrodkową [115, 181]. Wprawione w ruch cząstki uderzają o ściany wirnika i opadają do pojemnika zbiorczego, po czym możliwe jest wykonanie analizy uszkodzeń ziaren oraz analizy wielkości cząstek [181]. W zmodyfikowanej postaci młynka zastosowano napęd ze zmienną częstotliwością, co pozwala na zmianę prędkości obrotowej wirnika i testowanie różnych prędkości uderzeń ziaren, a tym samym różnych wartości energii zderzeń [4].



Rys. 3.25. Młynek z Wisconsin [181]

3.2.2.4. Test z wykorzystaniem mobilnego młynka HANDY

Mobilne stanowiska do badań udarowych HANDY składa się z trzech głównych zespołów (rys. 3.26): zespołu udarowego rozdrabniającego, zespołu sit oraz mobilnej ramy [180]. Materiał (200-gramowe próbki) podawany jest do komory rozdrabniania przez zasobnik. Ziarna opadają do komory rozdrabniania wykorzystując siłę grawitacji, a następnie doznają przyspieszenia (wywołanego siłą odśrodkową) w tarczy odśrodkowej. Ziarna wyrzucane są z kanałów w tarczy odśrodkowej i uderzają w ściany komory, a następnie transportowane są elastycznymi węzami na sita z okrągłymi oczkami i przesiewane z odpowiednio dobraną prędkością przesiewania. Urządzenie wyposażono w wymienne tarcze o różnym ukształtowaniu kanałów wylotowych ziaren: prostym, skośnym i zakrzywionym (rys. 3.26). Urządzenie przeznaczone jest do wyznaczania odporności na rozdrabnianie ziaren kukurydzy [180].



Rys. 3.26. Mobilny młynek HANDY [180]

Uwzględniając zasadę energii minimum, można w badaniach własnych sprawdzić dopełniająco, czy wszystkie reakcje zachodzące w celowym przetwórstwie maszynowego rozdrabniania biomateriałów ziarnistych przebiegają zawsze w kierunku zmniejszenia energii swobodnej. Istotnym dopełnieniem obecnego stanu wiedzy byłoby wyznaczenie energii minimum w zależności od sposobów (ściskanie, ścinanie) i warunków obciążeń (cykliczność) oraz parametrów materiałowych (wilgotność, postać i wymiary) w ujęciu fenomenologicznym procesu rozdrabniania jako podstawowej miary probabilistycznego opisu celowości rozdrabniania.

3.2.3. Badania jakościowe i ilościowe procesów podziału ziarna

W celu identyfikacji i charakterystyki podziału ziarna, w tym analizy propagacji pęknięcia ziaren stosuje się metody analizy obrazu. W tym kontekście, autoregulację (trwanie i przemiany), która dokonuje się poprzez zmiany szybkości wzajemnych oddziaływań, wyrównywania potencjałów, odkształceń, reakcji chemicznych (homeostaza), także można śledzić przez identyfikację i charakterystyki podziału ziaren.

Za pomocą kamer szybkoklatkowych rejestruje się przebieg obciążania ziaren (najczęściej pojedynczych). Następnie otrzymane obrazy poddaje się analizie i dokonuje się opisu wzorca pęknięcia i całkowitego podziału ziarna. W zależności od użytego systemu rejestracji obrazu możliwe jest otrzymanie obrazów zarówno w przestrzeni dwu- jak i trójwymiarowej [158].

Jedną z metod stosowanych w analizie dwu- i trójwymiarowej pęknięć jest cyfrowa korelacja obrazu. To optyczna, nieniszcząca technika pomiaru odkształceń konturów podczas obciążania dowolnego materiału na podstawie obrazów zarejestrowanych przez kamery wideo [158]. Dysponując obrazami kamer wideo i specjalistycznym oprogramowaniem, np. GOM Correlate można śledzić rozwój pęknięć zewnętrznych i siły, przy których proces ten rozpoczyna się, szczególnie w przypadku obciążeń uderowych.

Obserwację stanu uszkodzeń wewnętrznych w ziarnie można wykonać wykorzystując np. mikrotomografię komputerową oraz skaningową mikroskopię elektronową (SEM). Mikrotomografia komputerowa jest nieniszcząca metodą pozwalającą na scharakteryzowanie wewnętrznej struktury materiału na podstawie zdjęć rentgenowskich. Próbkę umieszcza się w komorze rentgenowskiej i wprawia w ruch obrotowy. Zdjęcia rentgenowskie wykonywane są podczas obracania się próbki, co pozwala na rekonstrukcję struktury w trzech wymiarach. Zdjęcia rentgenowskie powstają na podstawie tłumienia energii wiązki, która jest wychwytywana przez detektor [186]. Struktura materiału jest rzutowana na podstawie różnej intensywności wiązki promieniowania rentgenowskiego przechodzącej przez próbkę, reprezentowanej przez różny poziom szarości w projekcji [186]. Aby uzyskać wiarygodne obrazy, konieczne jest utrzymanie odpowiedniego poziomu energii wiązki [186]. Zaletą tej metody jest to, że powstają obrazy 3D, które dostarczają więcej informacji o rozwoju pęknięć wewnątrz ziarna niż obrazy 2D ze skaningowego mikroskopu elektronowego. Mikrotomografię z powodzeniem wykorzystano do identyfikacji pęknięć i przełomów ziaren zbóż [80, 115, 159–161]. Przy pomocy mikrotomografii komputerowej można zrekonstruować uszkodzenia wewnętrzne ziarna [80, 115, 160]. Możliwe jest oszacowanie liczby i długości pęknięć, a także związków struktury wewnętrznej np. porowatości, ułożenia cząstek skrobi, białek i lipidów z preferowaną ścieżką propagacji pęknięcia [80, 115, 160].

Analiza SEM służy do scharakteryzowania cech powierzchni i oceny zmian morfologicznych, takich jak wielkość porów, kształt i rozkład elementów strukturalnych w ziarnie, a także charakteryzowania postaci uszkodzeń wewnętrznych [84, 187]. Analiza zdjęć SEM pozwoliła m.in. na scharakteryzowanie propagacji pęknięcia wewnątrz ziarna i wskazanie ścieżek pęknięcia, np. w ziarnach ryżu, kukurydzy czy pszenicy [84, 188–192]. Wadą tej metody jest konieczność skomplikowanego przygotowania próbki i obserwacji próbek w próżni [191]. Rozwinięciem metody SEM jest ESEM, czyli środowiskowa skaningowa mikroskopia elektronowa umożliwiająca badanie dynamicznych zmian w tkankach biologicznych i syntetycznych polimerach [191]. Do zalet ESEM należy zaliczyć [191]:

- badanie próbek w wysokiej rozdzielczości, zbliżonej do ich naturalnego stanu, przy minimalnym przygotowaniu,
- brak konieczności pokrywania metalem, jak w konwencjonalnych badaniach SEM,
- prostotę wykonania badania.

Charakteryzacja mechanizmu rozdrabniania obejmuje, oprócz charakteryzacji pęknięcia i wzorca podziału, analizę kształtu i wielkości cząstek po zadaniu obciążeń niszczących. Wielkość cząstek uzyskanych po obciążeniu korelowana jest z energią niezbędną do obciążenia próbki i jej trwałej dezintegracji, co umożliwia określenie zapotrzebowania energii jednostkowej (w odniesieniu do wymiaru, objętości, powierzchni czy masy), będącego wskaźnikiem energetycznym, charakterystycznym dla danego materiału [193]. Cząstki uzyskane w wyniku rozdrobnienia charakteryzują się nieregularnym kształtem, stąd do określenia wymiarów przyjmuje się pewien wymiar zastępczy, co w dalszej analizie zbioru cząstek pozwoli na statystyczny opis udziału poszczególnych frakcji wymiarowych w zbiorze [193].

Do opisu wielkości pojedynczych cząstek najczęściej wykorzystuje się wymiary zastępcze, tj.: średnicę arytmetyczną, średnicę geometryczną, średnicę harmoniczną oraz średnicę zastępczą odpowiadającą średnicy kuli o tej samej objętości bądź powierzchni co analizowana cząstka (tabela 3.2) [57, 193]. Wymiary zastępcze oblicza się na podstawie znajomości trzech podstawowych wymiarów cząstki, tj. jej grubości (T), długości (L) i szerokości (W). Wielkość cząstki może być określona za pomocą pomiarów ręcznych, np. suwmiarki, mikrometru, zestawu sit lub metod analizy obrazów pozyskanych z mikroskopów optycznych.

Tabela 3.2. Postaci matematyczne wymiarów zastępczych stosowanych do opisu wielkości produktu rozdrabniania (opracowanie własne na podstawie [57, 193])

Wymiar zastępczy	Postać matematyczna
Średnica arytmetyczna	$d_a = \frac{T + L + W}{3} \quad (3.13)$
Średnica geometryczna	$d_g = \sqrt[3]{T \cdot L \cdot W} \quad (3.14)$
Średnica harmoniczna	$d_h = \frac{1}{\frac{1}{3} \left(\frac{1}{T} + \frac{1}{L} + \frac{1}{W} \right)} \quad (3.15)$
Średnica zastępcza kuli o tej samej objętości	$d_{po} = \sqrt[3]{\frac{6 \cdot V_p}{\pi}} \quad (3.16)$ V_p – objętość elementu,
Średnica zastępcza kuli o tej samej powierzchni	$d_{pp} = \sqrt{\frac{F_p}{\pi}} \quad (3.17)$ F_p – powierzchnia elementu

Kształt cząstek można zdefiniować stosując metody jakościowe i ilościowe [194]. Metoda jakościowa polega przede wszystkim na opisowej analizie kształtu cząstki i jej zaklasyfikowaniu do jednego z typowych kształtów, np.: sferyczny o gładkiej powierzchni, sferyczny o chropowatej powierzchni, równoosiowy nieregularny, iglasty (igielkowy), dendrytyczny, wydłużony nieregularny, odłamkowy, graniasty, zaokrąglony [57, 194]. Metoda ilościowa polega na określeniu kształtu za pomocą wskaźników liczbowych obliczanych na podstawie znajomości wymiarów ziarna, np. sferyczność czy stopień zaokrąglenia/foremności [57, 194]. Sferyczność określa stosunek powierzchni kuli o tej samej objętości co rozpatrywana cząstka do jej powierzchni [193]:

$$\Psi = \left(\frac{F_k}{F_p} \right) \quad (3.18)$$

gdzie: F_k – powierzchnia kuli o tej samej objętości co analizowana cząstka, m^2 ,
 F_p – powierzchnia analizowanej cząstki, m^2 .

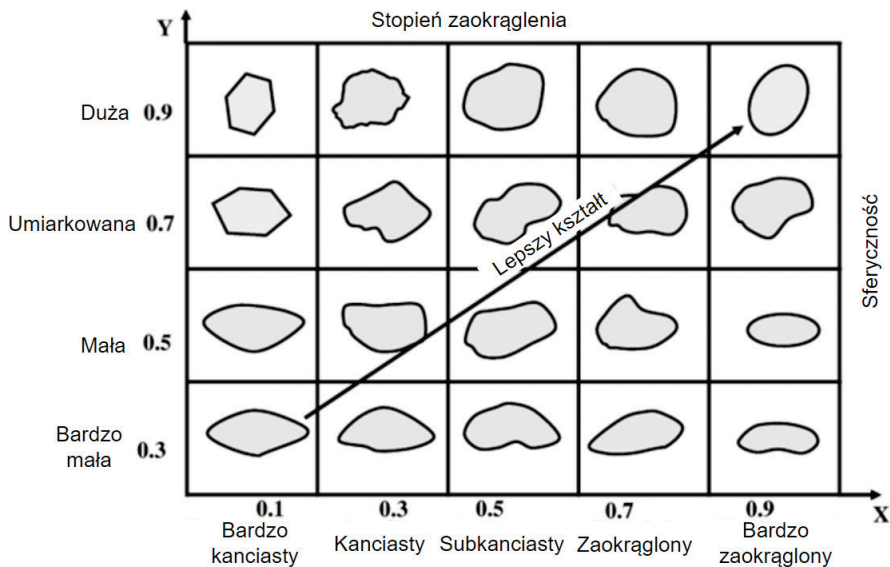
Stosowane są także współczynniki proporcjonalności (AR) i spłaszczenia (FR) [126]:

$$AR = \frac{W}{L} \quad (3.19)$$

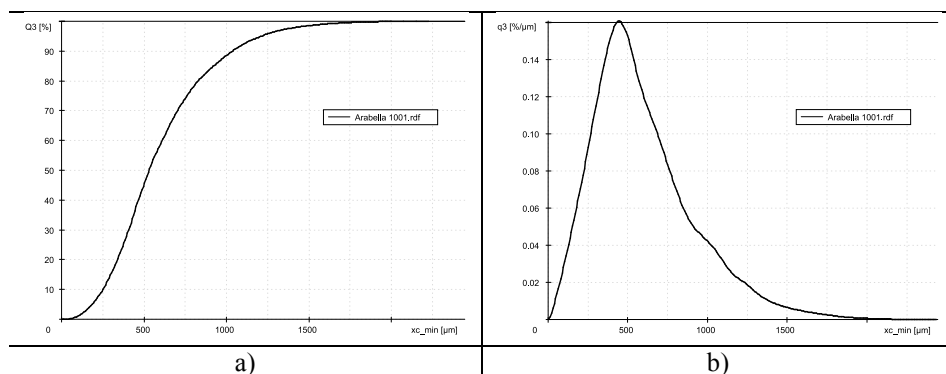
$$FR = \frac{T}{W} \quad (3.20)$$

Dla powyższych trzech wskaźników wartość bliższa jedności sugeruje kształt odpowiednio: bardziej zbliżony do sferycznego, bardziej proporcjonalny, niepłaski. Na rysunku 3.27 przedstawiono kształt cząstek wraz z odpowiadającymi wartościami wskaźników sferyczności i zaokrąglenia. Do oceny kształtu, podobnie jak wymiarów pojedynczych ziaren stosowane są metody ręczne polegające na pomiarze wymiarów za pomocą suwmiarki, mikrometru, miernika kształtu, urządzenia Szadeczky'ego Kardossa, aparatu Lucida [194] oraz metody analizy obrazów wykonanych pod mikroskopem [195–197].

Zazwyczaj analizie kształtu i wielkości cząstek poddaje się ich pewną populację (zbiór). Określa się wówczas statystyczny rozkład danej cechy w zbiorze, np. rozkład wybranego wskaźnika kształtu cząstki, wielkości cząstki itd. Rozkłady te mogą odnosić się zarówno do ilości, masy, jak i objętości cząstek w zależności od przyjętej skali odniesienia [193]. Suma rozkładu, inaczej dystrybuanta, rozkład skumulowany określa sumaryczny udział (ilościowy, masowy, objętościowy) cząstek o średnicy mniejszej niż d_p w zbiorze (rys. 3.28a). Z kolei gęstość rozkładu określa prawdopodobieństwo wystąpienia cząstki o danej wielkości, lub inaczej, udział masowy cząstek z danego przedziału wielkości w zbiorze (rys. 3.28b).



Rys. 3.27. Wykres sferyczności i stopnia zaokrąglenia Krumbeina [194]



Rys. 3.28. Graficzna prezentacja składu ziarnowego produktu rozdrabniania: a) dystrybuanta, b) gęstość rozkładu (badania własne)

Rozkłady wielkości cząstek można opisać za pomocą rozkładów statystycznych, np. rozkładu normalnego (Gaussa), rozkładu logarytmiczno-normalnego [log-normalnego], dwuparametrowego rozkładu Weibulla, a dokładniej rozkładu Rosina-Rammlera-Sperlinga-Benneta (RRSB), rozkładu beta, potęgowego Gatesa-Gaudina-Schumana (GGG) [57, 193] (tabela 3.3).

Tabela 3.3. Postaci matematyczne dystrybuant wielkości cząstek produktu rozdrabniania (opracowanie własne na podstawie [57, 193])

Typ rozkładu	Postać matematyczna
Rozkład normalny	$Q(x) = \int_0^x \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(u-\mu)^2}{2\sigma^2}} du \quad (3.21)$
Rozkład log-normalny	$Q(x) = \frac{1}{2} + \frac{1}{2} \operatorname{erf} \left[\frac{\ln(x) - \mu}{\sigma\sqrt{2}} \right] \quad (3.22)$
Rozkład RRSB	$Q(x) = 1 - \exp \left(- \left(\frac{x_a}{x_o} \right)^k \right) \quad (3.23)$
Rozkład GGS	$Q(x) = 1 - \left(\frac{x}{x_{\max}} \right)^z \quad (3.24)$

Krzywe składu ziarnowego wyznacza się na podstawie wyników analiz składu granulometrycznego, np. analizy sitowej czy analizy wielkości cząstek za pomocą cyfrowego przetwarzania obrazu lub dyfrakcji laserowej [198].

Analiza sitowa polega na rozdzieleniu materiału na odpowiednie frakcje wymiarowe podczas przesiewania przez sита o oczkach różnej wielkości. Analizę przeprowadza się na tzw. wytrząsarkach sitowych. Sita wprowadzane są w ruch wertykalno-kołowy. Cząstki o wymiarze większym od oczka sita pozostają na sicie, a mniejsze przedostają się na sito do niższego poziomu o mniejszych oczkach. Cechą charakterystyczną analizy sitowej jest ułożenie sit jedno na drugim, uszeregowanych pod względem wielkości oczka sita od największego (górne sito) do najmniejszego (dolne sito). W celu określenia udziału masowego poszczególnych frakcji wymiarowych, materiał pozostały na sicie będzie zważony [193, 198].

Metodą pozwalającą na bezpośredni pomiar wielkości (i jednocześnie charakterystyk kształtu) cząstek jest metoda wykorzystująca cyfrowe przetwarzanie obrazu dla reprezentatywnej próby (odpowiednio licznej). W takim przypadku pomiar realizowany jest dla cząstek swobodnie spadających do przestrzeni pomiarowej, co pozwala na pewną automatyzację procesu. Pomiar realizowany jest za pomocą specjalnego systemu optycznego składającego się z dwóch kamer. Cząstki podawane za pomocą podajnika wibracyjnego opadają w przestrzeń pomiarową. Podczas opadania wykonywane są z bardzo dużą częstotliwością zdjęcia (projekcje) cząstek znajdujących się w komorze pomiarowej. Na podstawie otrzymanych obrazów i danych o wielkości cząstek z nich odczytanych wyznaczane są statystyczne rozkłady wielkości cząstek [198]. Przykładem urządzenia realizującego pomiar z wykorzystaniem cyfrowego przetwarzania obrazu jest CAMSIZER (Retsch GmbH).

Jedną z metod najczęściej stosowanych do analizy wielkości cząstek, szczególnie proszków o bardzo drobnym uziarnieniu, jest analiza metodą dyfrakcji

laserowej [198]. Jest to analiza zaliczana do metod pośrednich, ponieważ wielkość cząstki wyznaczana jest nie na podstawie bezpośrednich pomiarów wymiarów, lecz na podstawie rozproszenia wiązki laserowej [198]. Wielkość cząstki rozpoznawana jest na podstawie pewnego wzoru rozproszenia wiązki laserowej. Pomiar wielkości polega na dostarczeniu materiału do celki pomiarowej, w której jest on rozpraszany i obserwowane jest ugięcie wiązki laserowej przechodzącej przez celę pomiarową. Wielkość ugięcia wiązki laserowej jest odwrotnie proporcjonalna do wielkości cząstek. Informacje o wzorze ugięcia światła w rozproszonej próbce są dalej przesyłane do oprogramowania analizującego i na podstawie teorii rozproszenia światła wyznaczone są rozkłady wielkości cząstek [198]. Przykładem urządzenia pomiarowego wykorzystującego metodę dyfrakcji laserowej jest Analysette 22 marki Fritsch.

Czy autoregulacje dokonują się poprzez zmiany szybkości wzajemnych oddziaływań, wyrównywania potencjałów, odkształceń, reakcji chemicznych (biologicznych), oraz czy można śledzić je przez identyfikację i charakterystyki podziału ziaren, czy też inne zjawiska, procesy – to pytania wymagające badań dopełniających tworzenie podstaw maszynowego rozdrabniania biomateriałów ziarnistych.

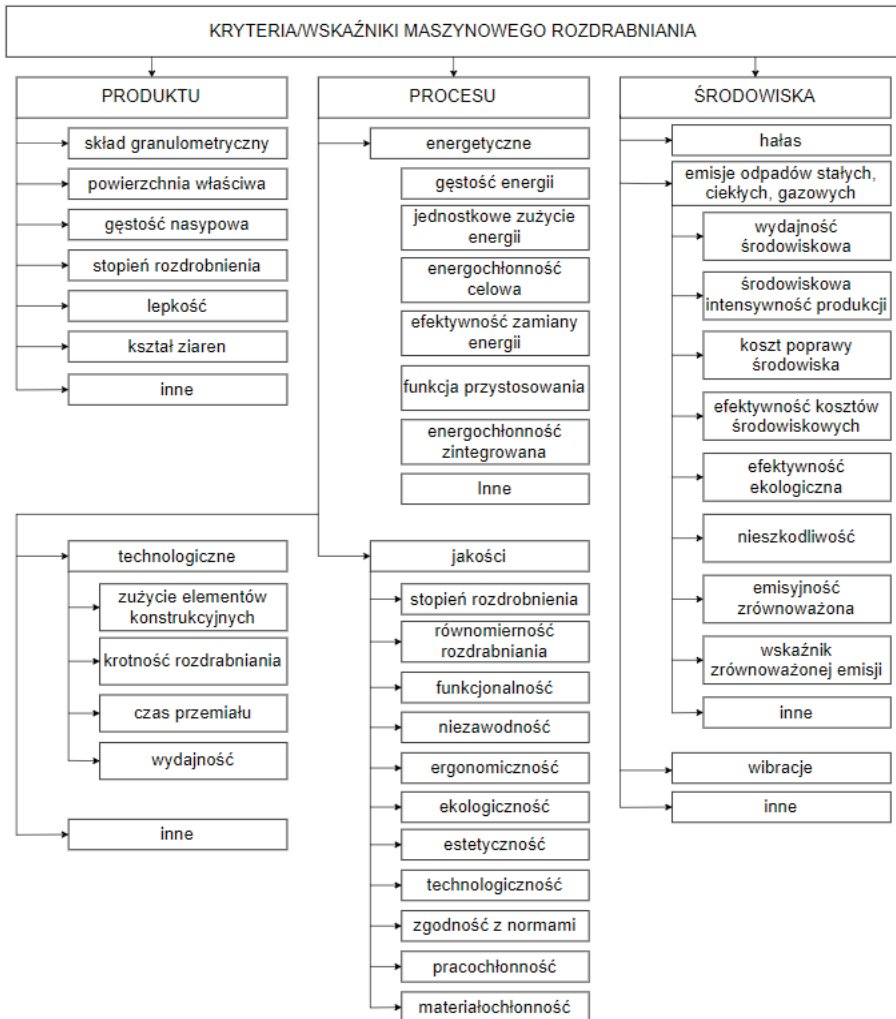
4. PIĘTROWOŚĆ STRUKTURY – CZYNNIKI WPLYWAJĄCE NA OCENĘ MASZYNOWEGO ROZDRABNIANIA

Piętrowa struktura systemu rozdrabniania oznacza, że każdy zespół, podsystem zbudowany jest z elementów (jednostek), które połączone są w jednostki następnego rzędu itd., a produkt rozdrabniany stanowią kawałki, od molekuł po populacje, aglomeraty, np. produktów rozdrabniania. Zatem każda jednostka zbudowana jest z podjednostek, podjednostki te ze swych podjednostek itd., a zmiana stanu jednego z elementów wywołuje reakcję (zmianę stanu) elementów odpowiednio wyższego i niższego rzędu z uwagi na zachodzące interakcje i współzależności.

Jak wskazano we wcześniejszych rozdziałach, zarówno właściwości materiałów, jak i warunki obciążania ziaren wywierają istotny wpływ na mechanizm podziału cząstek. Ma to swoje konsekwencje także w odniesieniu do procesów maszynowych i zjawisk występujących w komorach rozdrabniania młynów. Oprócz właściwości materiałów i warunków obciążania istotny wpływ na ocenę procesu rozdrabniania w ujęciu maszynowym obserwowano dla zmiennych cech konstrukcyjnych [38, 155]. We wcześniejszych pracach [155, 199] autorka dokonała klasyfikacji czynników wpływających na ocenę rozdrabniania na trzy grupy (rys. 4.1): materiałowe, maszynowe i procesowe, a także sklasyfikowała i uporządkowała wskaźniki oceny rozdrabniania w przestrzeniach produktu, procesu i środowiska rozdrabniania, wyróżniając jako najważniejsze wskaźniki procesu te natury energetycznej, technologicznej, jakości i środowiskowej (rys. 4.2).



Rys. 4.1. Klasyfikacja czynników wpływających na ocenę maszynowego rozdrabniania ziaren biomasy (opracowanie własne na podstawie [155, 199])



Rys. 4.2. Klasyfikacja kryteriów/wskaźników oceny procesu rozdrabniania (opracowanie własne na podstawie [155,199])

Z punktu widzenia zastosowań przemysłowych najważniejsze są wskaźniki dotyczące efektywności procesu, zużycia energii i jakości produktu rozdrabniania, ponieważ to one wywierają największy wpływ na ekonomię prowadzonych procesów [64, 200, 201]. Do tych wskaźników można zaliczyć wydajność masową, jednostkowe zużycie energii, stopień rozdrobnienia oraz charakterystyki składu granulometrycznego produktu rozdrabniania [64, 200, 201].

Wydajność masowa (Q_r) określa masę (m) materiału rozdrobnionego w danym przedziale czasu (t) [155]:

$$Q_r = \int_0^t m dt \quad (4.1)$$

W wielkoskalowych maszynowych procesach przemysłowych wyrażana jest najczęściej w tonach na godzinę lub kilogramach na godzinę. Z punktu widzenia ekonomii pożądane jest zwiększanie procesowej wydajności młynów przy zachowaniu nakładów energetycznych lub ich niewielkim wzroście.

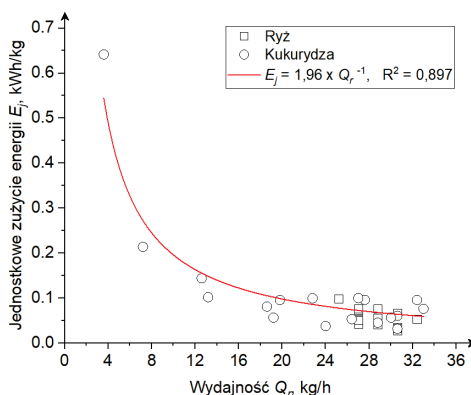
Procesy rozdrabniania na ogół charakteryzują się wysoką energochłonnością [64, 200, 201], a zużycie energii stanowi największy udział w nakładach ponoszonych na rozdrabnianie [202]. Ponadto zużycie energii powiązane jest ściśle z innymi wskaźnikami oceny, np. wydajnością i stopniem rozdrobnienia. Ocena zużycia energii jest zatem ważnym aspektem kontroli i bilansowania procesów rozdrabniania ziaren biomasy. Popularnie stosowany wskaźnik oceny energochłonności to jednostkowe zużycie energii określane jako stosunek poboru mocy (P_T) i masy rozdrobnionego produktu (m) w danym przedziale czasu (t) [26]:

$$E_j = \frac{1}{m} \int_{t_0}^t P_T dt \quad (4.2)$$

Jednostkowe zużycie energii określane jest także jako stosunek pobieranej mocy i wydajności masowej [155,203,204]:

$$E_j = \frac{P_T}{Q_r}, \text{ [kWh/kg]} \quad (4.3)$$

Zależność (4.3) jednoznacznie wskazuje, że aby możliwe było obniżenie jednostkowego zużycia energii, dynamika wzrostu wydajności musi być większa niż dynamika wzrostu poboru mocy związanego ze zwiększeniem wydajności. Badania eksperymentalne i analiza wyników poboru mocy i wydajności, przedstawionych we wcześniejszych pracach autorki, dla młyna walcowego z płytą [203,205] oraz rozdrabniacza pięciotarczowego [31, 155] potwierdzają powyższą zależność. Na rysunku 4.3 przedstawiono zależność jednostkowego zużycia energii od wydajności dla rozdrabniacza pięciotarczowego RWT-KZ5.



Rys. 4.3. Zależność pomiędzy jednostkowym zużyciem energii i wydajnością dla rozdrabniacza pięciotarczowego RWT-KZ5 (badania własne)

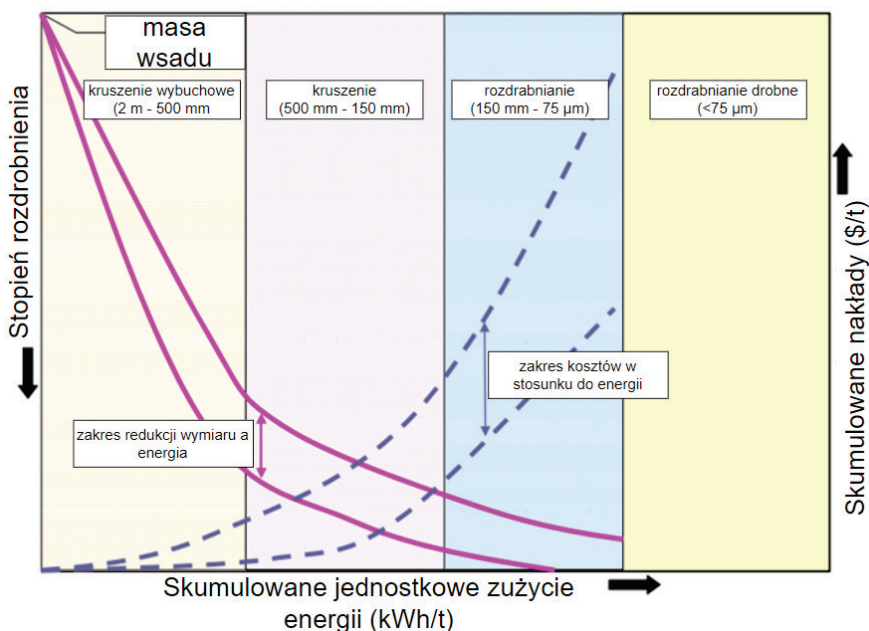
Jedną z najczęściej stosowanych miar jakości procesu rozdrabniania, będącą jednocześnie wskaźnikiem oceny produktu rozdrabniania, jest stopień rozdrobnienia [12, 203]. Stopień rozdrobnienia definiowany jest jako iloraz wymiaru charakterystycznego ziaren przed i po rozdrobnieniu [12, 203]. W zależności od przyjętego wymiaru odniesienia wyróżnia się liniowy stopień rozdrobnienia λ_l , graniczny stopień rozdrobnienia λ_{max} , średni stopień rozdrobnienia λ_{sr} , osiemdziesięcioprocentowy stopień rozdrobnienia λ_{80} , pozorny stopień rozdrobnienia λ_p [57, 155, 193, 199]_{pro}. Pozorny stopień rozdrobnienia ma zastosowanie do oceny procesu kruszenia w kruszarkach szczękowych [193].

$$\lambda_l = \frac{D_l}{d_l} \text{ lub } \lambda_{max} = \frac{D_{max}}{d_{max}} \text{ lub } \lambda_{sr} = \frac{D_{sr}}{d_{sr}} \text{ lub} \quad (4.4)$$

$$\lambda_{80} = \frac{D_{80}}{d_{80}} \text{ lub } \lambda_p = \frac{0,85 \cdot B}{b_2}$$

gdzie: D_{max} – średni wymiar największych ziaren nadawy, D_{sr} – średnia ważona średnicy zastępczej ziaren nadawy, D_{80} – wymiar otworu sita, przez który przechodzi 80% materiału wsadowego, mm, d_{max} – średni wymiar największych ziaren produktu rozdrabniania, d_{sr} – średnia ważona średnicy zastępczej ziaren produktu rozdrabniania, d_{80} – wymiar otworu sita, przez który przechodzi 80% produktu rozdrabniania, mm, B maksymalna szerokość rozwarcia szczęk kruszarki szczękowej, mm, b_2 – szerokość szczeliny dla rozwartych szczęk kruszarki szczękowej.

Poznanie relacji pomiędzy czynnikami mającymi wpływ na proces rozdrabniania a wskaźnikami procesu jest niezbędnym elementem procesu projektowania rozdrabniaczy, jak również optymalizacji procesu [206]. Mimo wielu badań mających na celu znalezienie adekwatnych postaci matematycznych opisujących relacje w procesie rozdrabniania [27, 118, 207–210], do tej pory nie wypracowano uogólnień pozwalających na dokładne oszacowanie efektów rozdrabniania, wielkości cząstek po rozdrobnieniu, jednostkowego zużycia energii, wydajności itd. [211, 212]. Ustalenie relacji pomiędzy właściwościami materiału, maszyny i charakterystykami procesu ułatwia dobór odpowiedniego typu rozdrabniacza do konkretnego materiału, tym samym pozwala osiągnąć zadowalający stopień rozdrobnienia, wydajność i zużycie energii przy ponoszeniu jak najniższych nakładów finansowych (rys. 4.4) [206, 213]. W tabeli 4.1 przedstawiono przykładową charakterystykę urządzeń rozdrabniających wraz z określeniem, do jakiego rodzaju materiałów mogą być stosowane.



Rys. 4.4. Zależność pomiędzy stopniem rozdrobienia, skumulowanym jednostkowym zużyciem energii oraz skumulowanymi nakładami finansowymi [213]

Tabela 4.1. Charakterystyka urządzeń rozdrabniających wraz z określeniem zakresów ich stosowalności [214]

Rodzaj urządzenia rozdrabniającego	Maksymalna wydajność (t·h ⁻¹)	Maksymalny wymiar nadawy (mm)	Stopień rozdrobienia	Twardość materiału i umiarkowanie twarde	Właściwości adhezyjne	
Kruszarka szczękowa	1000	1350–1500	4–10	twarde i umiarkowanie twarde	lekko lepki	
Kruszarka walcowa o gładkich walcach	o jednakowej prędkości obrotowej	100	90	4–10	twarde i umiarkowanie twarde	bardzo lepkie
	o różnej prędkości obrotowej	300	300	2–4	kruche i umiarkowanie twarde	lepkie
Młyn młotkowy	1500	1300	10–30	miękkie i umiarkowanie twarde	lepkie	
Młyn kulowy	500	35	5–300	od miękkich do twardych	–	
Młyn kulowy wibracyjny	6	25	500	od miękkich do twardych	–	

4.1. RELACJE CZYNNIKÓW MATERIAŁOWYCH I WSKAŹNIKÓW ROZDRABNIANIA

Z punktu widzenia maszynowego rozdrabniania materiałów pochodzenia biologicznego najbardziej istotnym parametrem materiałowym oddziałującym w szczególności na zapotrzebowanie energii i finalny stopień rozdrobnienia jest rodzaj materiału, z którym ściśle związane są właściwości mechaniczne (co omówiono w rozdziale 3.1), wielkość początkowa oraz wilgotność, modyfikująca te właściwości [52, 215, 216].

Badania rozdrabniania celulozowej biomasy wykazały, że zwiększanie wilgotności materiału wsadowego prowadzi z reguły do otrzymywania produktu o większych cząstkach oraz zwiększonego jednostkowego zużycia energii [52, 217, 218]. Wpływ wilgotności na wielkość i kształt cząstek może być jednak zależne od typu zastosowanego młyna i rodzaju materiału, na co wskazuje badanie przeprowadzone przez Eisenlauera i Teipela [26], gdzie dla młyna tnącego nie zaobserwowano istotnych zmian w uziarnieniu produktu o różnej wilgotności. Podczas rozdrabniania ziaren zbóż, takich jak: żyto, pszenica czy kukurydza maleje stopień rozdrobnienia i wydajność procesu, a wzrasta zapotrzebowanie energetyczne [219]. Probst et al. [220] ustalili, że wzrost wilgotności podczas rozdrabniania kukurydzy w młynie młotkowym powodował wzrost jednostkowego zużycia energii oraz spadek wydajności i stopnia rozdrobnienia. W przypadku rozdrabniania ryżu na rozdrabniaczu pięciotarczowym obserwowano wzrost jednostkowego zużycia energii i stopnia rozdrobnienia wraz ze wzrostem wilgotności oraz zmniejszanie się wydajności [221]. O ile podczas ściskania pojedynczego ziarna ryżu obserwowano spadek energii potrzebnej do rozdrabniania [126], o tyle w przypadku rozdrabniania w młynie obserwowano wzrost energii wraz ze wzrostem wilgotności [221]. Może to być spowodowane większym przyrostem energii na skutek tarcia ziaren ryżu między sobą oraz pomiędzy elementami mielącymi w stosunku do obniżenia energii rozdrabniania pojedynczego ziarna wynikającego ze zmian wilgotności [126]. Dla wielu ziaren zbóż obserwowano nieliniowe zależności pomiędzy wilgotnością a energią rozdrabniania [126, 222, 223]. W przeciwieństwie do wcześniej wymienionych prac, badania rozdrabniania pelletów drzewnych, eukaliptusowych, z oliwek oraz makuch hiszpańskich oliwek w laboratoryjnym młynie kulowym wykazały większe zużycie energii rozdrabniania próbek suchych niż mokrych [224]. Dowiedziono, że wzrost szklistości powoduje wzrost siły i zapotrzebowania energetycznego w procesie rozdrabniania ziarna [101–106].

W badaniach Rajaonarivony'ego et al. [215] wykazano, że rozdrabnianie materiałów kruchych przebiega szybciej i jest mniej energochłonne niż rozdrabnianie materiałów wykazujących właściwości wiskoplastyczne. W ogólności dla materiałów twardych energochłonność rozdrabniania jest niższa niż dla materiałów miękkich. Ponadto materiały twarde wymagają stosowania młynów o większych mocach, a materiały miękkie wymagają dłuższego czasu rozdrabniania [225]. Stwierdzono, że rozdrabnianie cząstek o mniejszym rozmiarze jest

bardziej energochłonne, jednak zależy także od stopnia redukcji wymiarów – im większy stopień rozdrobnienia, tym większe nakłady energetyczne [29, 226–228]. Williams et al. [226] wskazali, że dla materiałów kruchych wyznaczono wielkość graniczną cząstek, poniżej której rozdrabnianie przestaje być efektywne (cząstki nie rozdrabniają się, następuje gwałtowny wzrost zużycia energii i spadek wydajności) i obserwuje się dławienie. Dla biomasy wielkość graniczna cząstek nie została ustalona.

4.2. RELACJE CZYNNIKÓW MASZYNOWYCH I WSKAŹNIKÓW ROZDRABNIANIA

Wśród parametrów maszynowych, wywierających największy wpływ na efektywność energetyczną i skład granulometryczny produktu rozdrabniania należy wskazać rodzaj młyna i co z tym związane, jego cechy konstrukcyjne warunkujące zdolność do redukcji wymiarowej materiału wsadowego [52]. Typ maszyny i jej cechy konstrukcyjne decydują o dominujących naprężeniach, które będą powodowały dezintegrację materiału [215]. Do rozdrabniania biomasy najczęściej wykorzystywane są młyny młotkowe, nożowe, kulowe, igłowe, walcowe i tarczowe [229]. W większości dostępne analizy dotyczą rozdrabniania ziół, przypraw, słomy, pszenicy w młynach młotkowych i walcowych [42], niewiele prac dotyczy rozdrabniania w młynach tarczowych i wykorzystujących mechanizm ścinania [37, 52].

Porównania młynów tnących i młotkowych wykazały, że produkt rozdrabniania otrzymywany z młynów młotkowych charakteryzuje się większym zróżnicowaniem w wielkości cząstek i większą zawartością frakcji pylistych niż produkt pochodzący z młyna tnącego [26, 52]. Ponadto wykazano, że jednostkowe zużycie energii jest wyższe podczas rozdrabniania w młynie młotkowym niż w młynie tnącym [26, 52, 230]. Przyczyną występowania różnic jest inny rodzaj naprężeń występujący w obu wspomnianych konstrukcjach rozdrabniaczy [26, 52]. Co istotne, zasugerowano, że młyny wykorzystujące naprężenia ścinające są bardziej odpowiednie do rozdrabniania biomasy włóknistej oraz w stanie wilgotnym, natomiast młyny wykorzystujące obciążenia udarowe (np. młyny młotkowe) – dla materiałów kruchych [26, 52, 230]. Istnieją także przesłanki, że młyny wykorzystujące obciążenia udarowe lepiej stosować we wstępnej fazie rozdrabniania (zgrubnego, gdy materiał wsadowy ma względnie duże wymiary), natomiast młyny wykorzystujące ścieranie w kolejnych etapach rozdrabniania, gdy materiał wsadowy ma bardzo małe wymiary początkowe [215].

Wśród cech konstrukcyjnych oddziałujących na wskaźniki procesu rozdrabniania należy wskazać ilość elementów rozdrabniających oraz ich cechy geometryczne (np. kąt ostrzy, średnicę, cechy powierzchni itd.). Analiza przedstawiona w pracach [229, 231] ujawniła silną zależność pomiędzy wielkością oczek sit stosowanych w młynach młotkowych a jednostkowym zużyciem energii – zwiększanie oczek sit powodowało zmniejszanie jednostkowego zużycia energii.

Zmniejszanie grubości bijaków (młotków) prowadzi z kolei do obniżenia zużycia energii i wzrostu wydajności dla młynów [232], a zwiększenie kąta natarcia do zmniejszenia całkowitego jednostkowego zużycia energii [233]. Istotnym parametrem wpływającym m.in. na wydajność i jednostkowe zużycie energii jest wielkość szczeliny (np. między walcami, tarczami czy wielkość otworów sit dla rozdrabniaczy młotkowych i bijakowych), przez którą rozdrobnione ziarna opuszczają komorę rozdrabniania. Wielkość szczeliny warunkuje czas przebywania materiału w komorze roboczej i jednocześnie wymiar docelowy [227]. Zwiększanie szczeliny powoduje zmniejszanie energochłonności procesu rozdrabniania i jednocześnie zwiększenie wydajności [203, 234, 235]. Ważnym aspektem, mającym wpływ na wartości energii rozdrabniania, wydajności i stopnia rozdrobnienia produktu, jest także stosunek średnicy cząstek nadawy do wielkości szczeliny [236, 237]. W przypadku młynów kulowych istotną rolę odgrywa wielkość i ilość kul rozdrabniających – mniejsze kule preferowane są dla materiałów o mniejszych rozmiarach, natomiast większe kule mają zastosowanie do rozdrabniania materiałów o większych wymiarach [238]. Badania prowadzone dla pras walcowych wykazały, że przebieg procesu rozdrabniania zależy od ukształtowania przestrzeni roboczej i elementów roboczych (np. powierzchni i konstrukcji walców rozdrabniających) [236]. Udowodniono również, że tarcie występujące wewnątrz komory rozdrabniacza powoduje duże straty energii [1]. Badania dla rozdrabniaczy wielotarczowych dowiodły, że ustawienie tarcz względem płaszczyzny poziomej, sposób podawania materiału wsadowego do komory rozdrabniania, liczba tarcz stałych i obrotowych, geometria tarcz i otworów w tarczach, kolejność ustawienia tarcz o różnej geometrii czy wielkość szczeliny międzycieczowej wpływają istotnie na wydajność, stopień rozdrobnienia czy energochłonność [155, 239].

4.3. RELACJE CZYNNIKÓW PROCESOWYCH I WSKAŹNIKÓW ROZDRABNIANIA

Czynniki procesowe, takie jak prędkość wpływają m.in. na typ, intensywność i krotkość zderzeń występujących w komorze rozdrabniania [227]. Intensywność obciążenia jest proporcjonalna do prędkości liniowej elementów rozdrabniających, natomiast liczba kontaktów wprost proporcjonalna do częstotliwości obrotów wirnika [227, 240]. Wydłużanie czasu przebywania materiałów w komorze rozdrabniania zwiększa ilość kontaktów materiału z elementami roboczymi oraz rozdrobnienie produktu [238], jednak znacząco podwyższa zużycie energii [1, 225]. Dla młyna młotkowego stwierdzono, że zwiększanie prędkości obrotowej wirnika powoduje zmniejszanie wielkości cząstek uzyskanych po rozdrobnieniu [217, 233, 241], niestety kosztem wzrostu jednostkowego zużycia energii [232]. Wzrost prędkości rozdrabniania skutkuje także zwiększeniem jednorodności wymiarowej produktu [217].

Badania przeprowadzone przez autorkę monografii wykazały, że pobór mocy rozdrabniania, stopień rozdrobnienia i jednostkowe zużycie energii wra- stają wraz ze wzrostem prędkości kątowych elementów rozdrabniających, a wzrost natężenia dozowania wsadu powoduje wzrost wydajności [12]. W pracy [233] udowodniono, że wzrost intensywności dozowania wsadu powoduje obni- żenie jednostkowego zużycia energii (zależność wielomianowa drugiego rzędu). Inne badanie pokazało także, że zmiany jednostkowego zużycia energii w zależ- ności od strumienia dozowania wsadu uwarunkowane są rodzajem i wielkością początkową cząstek i prędkością obrotową zespołu rozdrabniającego [242]. Goswami i Singh dla kminku stwierdzili, że stopień rozdrobnienia i temperatura wzrastały wraz ze wzrostem intensywności dozowania wsadu w młynie ścier- nym, natomiast jednostkowe zużycie energii i wskaźnik pracy Bonda początkowo zmniejszały się a następnie rosły wraz ze wzrostem intensywności dozowania wsadu. Liu et al. [243] zasugerowali, że zastosowanie natężenia dozowania wsadu, które pozwala maszynie osiągnąć moc znamionową, może skutkować najniższym całkowitym jednostkowym zużyciem energii. Analiza źródeł litera- tury wskazuje, że wpływ wydatku dozowania wsadu na efektywność energetyczną młynów związany jest z energią zużywaną na bieg jałowy, kiedy materiał nie znajduje się w przestrzeni roboczej [10, 228].

Badania dla biomasy drzewnej wykazały, że rozdrabnianie na mokro z udział- łem medium (wody) jest bardziej efektywne niż rozdrabnianie na sucho [244]. Wskazano, że obecność nieściśliwego płynu pomiędzy cząstkami podczas roz- drabniania poprzez ściskanie może obniżać energochłonność procesu [244]. Rozdrabnianie na mokro często stosowane jest w przypadku ziaren zbóż, gdyż wówczas zmniejsza się ilość zniszczonych cząstek skrobi, co wpływa na jej jakość [245]. W wyniku rozdrabniania na mokro otrąb pszennych uzyskiwano produkt o mniejszych wymiarach cząstek i bardziej jednorodny w porównaniu z rozdrabnianiem na sucho [246]. Zatem posiadanie nieściśliwego płynu pomię- dzy cząstkami, które są ścispane przez elementy mielące, wydaje się korzystne. Zaletami rozdrabniania na mokro ponadto są mniejszy hałas, większa efektyw- ność oraz brak pyłów [247]. Niekorzystne jest z kolei powstawanie wody odpa- dowej oraz utrudnione pozyskiwanie cząstek o bardzo małych rozmiarach [247].

Zmniejszenie zużycia energii i poprawę wydajności uzyskiwano poprzez tworzenie tzw. układów kaskadowych, np. w młynach wielowalcowych, gdzie materiał wsadowy poddawano kilkukrotnemu przejściu przez pary walców umieszczonych jedna nad drugą [34, 248, 249].

W procesach maszynowych wykorzystano zależność właściwości materia- łów od temperatury stosując metody rozdrabniania kriogenicznego (w obniżonej temperaturze -196° i obecności ciekłego azotu). Badania rozdrabniania krioge- nicznego materiałów biologicznych prowadzono głównie dla przypraw [139]. Mielenie otrąb pszennych w temperaturach kriogenicznych wykazało, że niskie temperatury sprzyjają szybkiemu rozdrobnieniu cząstek w porównaniu z miele- niem w temperaturach otoczenia [250]. Jest to związane ze zmianą właściwości mechanicznych poniżej temperatury zeszklenia skrobi [250]. Hemery et al. [251]

dowiedli, że podczas rozdrabniania w temperaturach poniżej temperatury zeszklenia materiał staje się bardziej kruchy, co sprzyja uzyskiwaniu mniejszych cząstek o węższym i jednorodnym rozkładzie. Badania rozdrabniania kurkumy, nasion kminku i goździków wykazały, że oprócz uzyskiwania drobniejszego produktu obserwuje się także obniżenie jednostkowego zużycia energii dzięki zastosowaniu metody kriogenicznej [251, 252].

Na podstawie analizy obecnego stanu wiedzy i techniki należy stwierdzić zatem, że najbardziej rozległą przestrzenią, konieczną do dopełnienia podejścia do badań i podstaw rozdrabniania wg Integronu jest piętrowa struktura. Wynika to przede wszystkim z omówionej różnorodności rozdrabnianych ziaren biomasy i postaci konstrukcyjnych młynów, co sprawia, że systemy rozdrabniania charakteryzują się pewnymi wspólnymi i indywidualnymi zależnościami pomiędzy elementami struktury. Pewnym ułatwieniem jest teoria budowy i eksploatacji maszyn, która umożliwia klasyfikację opartą na zasadzie, że każdy zespół maszynowy zbudowany jest z elementów (jednostek) połączonych w jednostki następnego rzędu itd., a całe ziarno w procesie rozdrabniania zbudowane jest ze wszystkich cząstek stanowiących wysokiej jakości produkt rozdrabniany, od molekuł po populacje, aglomeraty. Zatem każda jednostka maszyny i urządzenia, wsadu, procesu rozdrabniania zbudowana jest z podjednostek, podjednostki te ze swych podjednostek itd.

W odniesieniu do rozdrabniaczy wielootworowych, wielotarczowych wyjaśnienia wymagają wciąż wzajemne relacje pomiędzy parametrami materiałowymi, maszynowymi i procesowymi a wskaźnikami oceny oraz zjawiska zachodzące w komorze rozdrabniania związane z jednoczesnym przepływem i cięciem materiału z uwzględnieniem cech materiału i cech konstrukcyjnych. Eisenlauer i Teipel [52] zwrócili uwagę, że brak jest wiedzy opisującej relacje pomiędzy parametrami procesowymi, materiałowymi a wskaźnikami rozdrabniania w młynach wykorzystujących procesy cięcia, co ma miejsce m.in. w rozdrabniaczach wielotarczowych.

5. MODELE ROZDRABNIANIA – MATEMATYCZNE UJĘCIE ZASADY ENERGII MINIMUM I PIĘTROWEJ STRUKTURY

Badania nad relacjami pomiędzy właściwościami materiałów, czynnikami procesowymi i maszynowymi doprowadziły do opracowania modeli rozdrabniania jako pewnych matematycznych form uogólnień zasady energii minimum i relacji wynikających z piętrowości struktury systemu rozdrabniania, słusznych pod warunkiem wzięcia pod uwagę zdefiniowanych założeń upraszczających. Analizując modele rozdrabniania przedstawione w literaturze wyróżnić można cztery podstawowe kategorie modeli: empiryczne, statystyczne, populacyjne oraz wyprowadzone na podstawie mechaniki pękania.

5.1. MODELE EMPIRYCZNE

Modele empiryczne rozdrabniania to modele utworzone na podstawie badań eksperymentalnych w wyniku analizy regresji [168, 253]. Modele te przede wszystkim przedstawiają relację pomiędzy wielkością cząstki (lub stopniem rozdrobnienia) i energią rozdrabniania [211]. W tabeli 5.1 zestawiono najważniejsze modele empiryczne stosowane do określenia energetycznego zapotrzebowania procesu rozdrabniania i wymiarowania młynów.

Tabela 5.1. Modele empiryczne rozdrabniania przedstawiane w literaturze (opracowanie własne)

Model	Postać matematyczna
Model Bonda [211]	$E = K_{BO} \left[\frac{1}{\sqrt{d_{80}}} - \frac{1}{\sqrt{D_{80}}} \right] \quad (5.1)$ <p>E – jednostkowa energia rozdrabniania, kWh·Mg⁻¹, D_{80} – rozmiar otworu sita, przez które przechodzi 80% ziaren nadawy, μm, d_{80} – rozmiar otworu sita, przez które przechodzi 80% produktu rozdrabniania, μm, K_{BO} – współczynnik proporcjonalności Bonda, kWh·Mg⁻¹</p>
Model Kicka [211]	$E_m = k \cdot \ln \frac{x_1}{x_2} \quad (5.2)$ <p>E_m – jednostkowa energia rozdrabniania, J·kg⁻¹, k – współczynnik proporcjonalności, J·mm·kg⁻¹, x_1 – wymiar liniowy ziarna przed rozdrobnieniem, mm, x_2 – wymiar liniowy ziarna po rozdrobnieniu, mm</p>

cd. tabeli 5.1.

<p>Model Rittingera [199]</p>	$E_m = k \cdot \left(\frac{1}{x_2} - \frac{1}{x_1} \right) \quad (5.3)$
<p>E_m – jednostkowa energia rozdrabniania, $J \cdot kg^{-1}$, k – współczynnik proporcjonalności, $J \cdot mm \cdot kg^{-1}$, x_1 – wymiar liniowy ziarna przed rozdrobieniem, mm, x_2 – wymiar liniowy ziarna po rozdrobieniu, mm</p>	
<p>Model Rebindera [199]</p>	$E_m = \sigma \cdot \Delta S + k \cdot \Delta V \quad (5.4)$
<p>E_m – energia rozdrabniania, J, σ – względna energia przypadająca na jednostkę powierzchni ciała, $J \cdot m^{-2}$, ΔS – przyrost powierzchni właściwej sumy cząstek ciała w procesie rozdrabniania, m^2, k – względna energia odkształceń plastycznych i sprężystych przypadająca na jednostkę objętości, $J \cdot m^{-3}$, ΔV – przyrost objętości sumy cząstek w procesie rozdrabniania, m^3</p>	
<p>Model Bracha [254]</p>	$E = K_B \left(\frac{1}{d^m} - \frac{1}{D^m} \right) \quad (5.5)$
<p>E – energia rozdrabniania wg Bracha, J, d – wymiar cząstki po rozdrobieniu, m, D – wymiar cząstki po rozdrobieniu, m, K_B – stała Bracha, $J \cdot m^{-2}$, m – wykładnik wyznaczany doświadczalnie</p>	
<p>Model Walkera-Charlesa [255]</p>	$dE = -C \frac{dx}{x^a} \quad (5.6)$
<p>E – energia przypadająca na jednostkę masy, $J \cdot kg^{-1}$, x – wymiar charakterystyczny ziarna, m, C, a – stałe charakterystyczne dla danego typu materiału i młyna</p>	
<p>Model Tavaresa i Kinga [170]</p>	$E_{m50} = \frac{E_{m,\infty}}{1 + \frac{k_p}{k_{st}}} \left[1 + \left(\frac{d_{p,0}}{d_p} \right)^\varphi \right] \quad (5.7)$
<p>$E_{m,50}$ – mediana rozkładu log-normalnego energii rozdrabniania, $J \cdot kg^{-1}$, k_p – sztywność ziarna, GPa, k_{st} – sztywność stali, GPa, d_p – zastępczy wymiar ziarna, m, $E_{m,\infty}$, $d_{p,0}$, φ – parametry wyznaczane doświadczalnie</p>	
<p>Model Cho i Austina [256]</p>	$\bar{m}_i = \bar{A} \ln \left(\frac{E}{K_i} \right), \quad E_{\min} \leq E \leq E_{\max} \quad (5.8)$
<p>\bar{m}_i – skumulowany udział procentowy rozdrobnionych cząstek, %, E – energia jednostkowa potrzebna do rozdrobienia cząstek w przedziale wielkości i, $J \cdot kg^{-1}$, E_{\min} – minimalna energia jednostkowa potrzebna do rozdrobienia cząstek w przedziale wielkości i, $J \cdot kg^{-1}$, E_{\max} – maksymalna energia jednostkowa niezbędna do rozdrobienia wszystkich cząstek w przedziale wielkości i, $J \cdot kg^{-1}$, \bar{A}, K_i – stałe zależne od rodzaju materiału</p>	

cd. tabeli 5.1.

$$\xi = \xi_f + \frac{\xi_i - \xi_f}{1 + \left(\frac{v}{v_{50}}\right)^p} \quad (5.9)$$

Model
Petukhova
i Kalmana
[257]

ξ – udział procentowy ziaren rozdrobnionych, %, ξ_i – początkowy udział procentowy cząstek rozdrobnionych, %, ξ_f – końcowy udział procentowy cząstek rozdrobnionych, %, v – prędkość zderzenia, $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$, v_{50} – prędkość zderzenia, przy której 50% ziaren ulega rozdrobnieniu, $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$, p – współczynnik rozkładu

Wśród modeli empirycznych znajdują się podstawowe, klasyczne modele rozdrabniania, tj. równania opracowane przez Rittingera (tzw. teoria powierzchniowa), Kicka (tzw. teoria objętościowa) i Bonda, będące podstawą rozwoju bardziej zaawansowanych modeli [211]. Uogólnieniem tych trzech modeli jest równanie wyprowadzone przez Walkera (tabela 5.1) [255]. Po scałkowaniu równania Walkera, dla a równego 1 otrzymuje się postać modelu zaproponowanego przez Kicka, dla a równego 2 oraz 1,5 otrzymuje się odpowiednio równania zaproponowane przez Rittingera i Bonda [253]. Model Rebindera traktuje energię rozdrabniania jako sumę energii odkształcenia ziarna oraz energii tworzenia nowej powierzchni [199]. Model zaproponowany przez Bracha [254] z kolei opiera się na założeniu stałego współczynnika zmiany wymiaru ziarna w kolejnych cyklach obciążania. Zupełnie inne podejście przedstawili Tavares i King [170], którzy powiązali mediany rozkładów log-normalnych energii rozdrabniania cząstek o różnej wielkości za pomocą prawa potęgowego (tabela 5.1). Modele opracowane przez Cho i Austina [256] oraz Petukhova i Kalmana [257] pozwalają na przewidywanie udziału procentowego rozdrobnionych ziaren. Cho i Austin [256] założyli, że skumulowany udział procentowy cząstek zmienia się logarytmicznie w zależności od jednostkowej energii rozdrabniania i rodzaju materiału. Model opracowany przez Petukhova i Kalmana [257] uwzględnia prędkość zderzenia jako zmienną wpływającą na udział procentowy rozdrobnionych cząstek.

W literaturze dostępne są także inne modele empiryczne opisujące zależności pomiędzy wielkością cząstek i energią rozdrabniania biomasy opracowane dla konkretnego rodzaju materiału i konstrukcji młyna, niepozwalające na uogólnienia, m.in. z uwagi na zmienne właściwości materiałów pochodzenia roślinnego [26, 29, 30, 258, 259]. Najczęściej uzyskiwano modele liniowe i potęgowe w zależności od typu materiału i konstrukcji młyna [26, 29, 30, 258, 259]. Podejmowano także próby weryfikacji słuszności istniejących modeli dla różnego typu biomasy [216, 260]. Jiang et al. [29] wykazali, że model Rittingera dobrze opisuje relację pomiędzy wielkością cząstki a jednostkowym zużyciem energii podczas rozdrabniania drewna w wibracyjnym młynie dyskowym. Stwierdzono, także że model Rittingera może być zastosowany do opisu jednostkowego

zapotrzebowania energetycznego w procesie rozdrabniania słomy pszennej w młynie nożowym [258]. Ghorbani et al. [259] testowali hipotezy Kicka, Bonda i Rittingera dla rozdrabniania lucerny w młynie młotkowym, wskazując na hipotezę Rittingera, jako tę najbardziej dopasowaną do danych eksperymentalnych. W pracy [261] natomiast wyznaczono wartości indeksu Bonda dla rozdrabniania cynamonu, kolendry i kurkumy w młynie młotkowym i kołkowym. Tymoszuć et al. [262] stwierdzili, że klasyczne teorie rozdrabniania weryfikowane z reguły dla materiałów kruchych, niekoniecznie sprawdzają się w odniesieniu do rozdrabniania biomasy, dlatego zaproponowali wskaźnik podatności na rozdrabnianie wyrażony jako stosunek zużycia energii podczas badania do ilości określonej frakcji ziarnowej produktu.

Modele empiryczne bazują na wielu założeniach upraszczających, dlatego ich stosowanie jest ograniczone uzyskiwanym stopniem rozdrobnienia i wielkością cząstek, np. model Kicka lepiej sprawdza się do przewidywania zapotrzebowania energetycznego rozdrabniania grubego, a teorie Rittingera i Bonda, odpowiednio, dla rozdrabniania drobnego i średniego [253].

5.2. MODELE STATYSTYCZNE

Modele statystyczne rozdrabniania formułowane są w odniesieniu do pewnego określonego zbioru cząstek. Do opisu zachodzących zależności stosowane są wówczas metody analizy statystycznej, a w szczególności modele rozkładów prawdopodobieństwa – zarówno dystrybuanty rozkładów, jak i funkcje gęstości. Modele statystyczne mogą odnosić się do opisu prawdopodobieństwa rozdrobnienia ziarna w zależności od np. poziomu energii, prędkości zderzeń czy ich krotności lub do opisu składu granulometrycznego produktu (co zostało omówione w rozdziale 3). Modele prawdopodobieństwa rozdrobnienia nazywane są funkcjami selekcji (ang. *selection function*) lub funkcjami przeżycia, natomiast modele odnoszące się do składu granulometrycznego noszą miano funkcji rozdrobnienia (ang. *breakage function*) [253].

Opracowano wiele modeli do opisu prawdopodobieństwa rozdrabniania kruchych materiałów ziarnistych (tabela 5.2) [5]. Weichert [263] wprowadził model rozkładu prawdopodobieństwa rozdrobnienia w zależności od energii rozdrabniania i rozmiaru cząstki, oparty na rozkładzie Weibulla i teorii najsłabszego ogniwa. Późniejsze modele również wykorzystują rozkład Weibulla do opisu prawdopodobieństwa rozdrobnienia. Voguel i Puekert [264] zaproponowali uniwersalny model prawdopodobieństwa, który uwzględnia właściwości materiału, wartości energii obciążenia, wielkość cząstek i krotność występowania zderzeń [265]. Salman et al. [145] interpretowali prawdopodobieństwo rozdrobnienia jako funkcję liczby rozdrobnionych cząstek w zależności od prędkości zderzenia. Salman et al. [145] opisali również prawdopodobieństwo w funkcji liczby zderzeń oparte na teorii najsłabszego ogniwa za pomocą parametru degradacji q opisującego zmiany właściwości mechanicznych podczas wielokrotnych obciążeń.

Aman et al. [266] zaproponowali rozkład Weibulla jako funkcję energii kinetycznej, wielkości cząstek i krotności obciążeń. W przeciwieństwie do wcześniej wspomnianych modeli Tavares et al. [121] zaproponowali model prawdopodobieństwa oparty na górno-obciążonym rozkładzie logarymiczno-normalnym z uwzględnieniem zmęczenia materiału poprzez powiązanie energii w poszczególnych cyklach obciążenia za pomocą stopnia uszkodzenia. Modele te mają potencjał zastosowania do ziaren zbóż, jednak wyprowadzone zostały na podstawie teorii właściwych dla materiałów kruchych, dlatego konieczna jest ich weryfikacja i modyfikacja.

Tabela 5.2. Modele statystyczne rozdrabniania przedstawiane w literaturze (opracowanie własne)

Model	Postać matematyczna
Model Weicherta [263]	$P = 1 - \exp(-cd^2W_m^z) \quad (5.10)$ <p>P – prawdopodobieństwo rozdrabniania, -, W_m – jednostkowa energia rozdrabniania (w odniesieniu do masy), $J \cdot kg^{-1}$, d – wymiar charakterystyczny ziarna, m, c, z – parametry rozkładu Weibulla</p>
Model Voguela i Puekerta [264]	$P = 1 - \exp(-f_{mat}kd(W_{m,kin} - W_{m,min})) \quad (5.11)$ <p>P – prawdopodobieństwo rozdrabniania, -, f_{mat} – stała materiałowa, $(kg \cdot J^{-1} \cdot m^{-1})$, k – liczba kontaktów (zderzeń), d – wymiar ziarna, m, $W_{m,kin}$ – energia pojedynczego kontaktu (zderzenia), $J \cdot kg^{-1}$, $W_{m,min}$ – energia graniczna (minimalna energia wywołująca pęknięcie), $J \cdot kg^{-1}$</p>
Model Salmana i in. [145]	$P = 1 - \exp\left(-\left(\frac{v}{v_0}\right)^m\right) \quad (5.12)$ <p>P – prawdopodobieństwo rozdrabniania, -, v – prędkość zderzenia, $m \cdot s^{-1}$, v_0, m – parametry rozkładu wyznaczone na podstawie badań eksperymentalnych</p>
Model Salmana i in. [145]	$P = 1 - \prod_{j=1}^k (1 - w_0 q^j) \quad (5.13)$ <p>P – prawdopodobieństwo rozdrabniania, -, w_0 – prawdopodobieństwo rozdrabniania podczas pierwszego kontaktu, -, q – parametr degradacji, -, j – te obciążenie, -, k – całkowita liczba obciążeń, -</p>
Model Amana i in. [266]	$P(E_k) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N 1 - \exp\left(-\left(0.9 \frac{E_k d^3}{E_{mean} d_{r,1}^3}\right)^e\right) \quad (5.14)$ <p>$P(E_k)$ – prawdopodobieństwo jako funkcja energii kinetycznej, -, E_k – energia kinetyczna, J, E_{mean} – średnia arytmetyczna energii kinetycznej, J, N – liczba cykli obciążenia, -, $d_{r,i}$ – wielkość ziarna wewnętrznej struktury, mm, d – wielkość ziarna, mm, e – wykładnik Weibulla, -</p>

cd. tabeli 5.2.

		$P_0(E) = \frac{1}{2} \left[1 + \operatorname{erf} \left(\frac{\ln E^* - \ln E_{50}}{\sqrt{2\sigma^2}} \right) \right] \quad (5.15)$
Model Tavaresa i in. [121]		$E^* = \frac{E_{\max} E}{E_{\max} - E} \quad (5.16)$ <p>$P_0(E)$ – prawdopodobieństwo rozdrabniania, -, E – energia jednostkowa rozdrabniania, $J \cdot \text{kg}^{-1}$, E_{\max} – górna wartość odcięcia rozkładu energii jednostkowej, $J \cdot \text{kg}^{-1}$, σ^2 – wariancja rozkładu, $J \cdot \text{kg}^{-1}$, E_{50} – mediana rozkładu jednostkowej energii rozdrabniania, $J \cdot \text{kg}^{-1}$, E^* – względna energia jednostkowa rozdrabniania, $J \cdot \text{kg}^{-1}$</p>
		$P = 1 - \frac{1}{1 + \left(\frac{v}{z \cdot \left(\frac{\sigma_0}{a} \right)^{\frac{u}{b}}} \right)^{a1 \left(\frac{\sigma_0}{a} \right)^{\frac{2}{b}} + a2 \left(\frac{\sigma_0}{a} \right)^{\frac{1}{b}} + a3}} \quad (5.17)$
Model Hana i in. [48]		<p>P – prawdopodobieństwo rozdrabniania, -, v – prędkość zderzenia powyżej prędkości granicznej wywołującej uszkodzenie materiału, $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$, $a, b, u, z, a1, a2, a3$, – parametry modelu wyznaczone doświadczalnie, σ_0 – charakterystyczna wytrzymałość, MPa</p>
		$P = 1 - \exp \left\{ - \left[f_{mat} k d \left(e_{imp,i} - e_{min} \right) \right]^{\alpha} \right\} \quad (5.18)$
Model Chena i in. [47]		<p>f_{mat} – stała materiałowa, $\text{kg} \cdot \text{J}^{-1}$, k – liczba kontaktów (zderzeń), d – wymiar ziarna, mm, $e_{imp,i}$ – jednostkowa energia i-tego kontaktu (zderzenia), $J \cdot \text{kg}^{-1}$, e_{min} – parametr skali rozkładu Weibulla, $J \cdot \text{kg}^{-1}$, α – parametr kształtu rozkładu Weibulla, -</p>

Niewiele prac podejmuje tematykę prawdopodobieństwa rozdrabniania ziaren zbóż. Większość modeli dostępnych w literaturze to raczej równania regresji opisujące zależność między udziałem procentowym rozdrobnionych ziaren a ich wilgotnością, wielkością, prędkością zderzeń, prędkością obrotową elementów rozdrabniających niż modele prawdopodobieństwa, z reguły słuszne dla określonego rodzaju ziarna, przy braku możliwości uogólnienia [5, 47]. Tylko nieliczne badania opisywały prawdopodobieństwo rozdrabniania ziaren zbóż w sposób podobny do materiałów kruchych [4, 47–51]. Han et al. [48, 49] badali zachowanie i prawdopodobieństwo rozdrabniania ziaren ryżu podczas ściskania i uderzenia. Zmodyfikowali model Petukhova i Kalmana [257], wprowadzając do modelu wytrzymałość ziarna [48, 49]. Z kolei Chen et al. [4, 47] zaproponowali modyfikację modelu Voguela i Peukerta do badania prawdopodobieństwa rozdrabniania ziaren kukurydzy. Zeng et al. [50] wykorzystali model Tavaresa do wykonania

symulacji DEM mielenia ziarna ryżu. Zeng et al. [51] badali również wpływ prędkości zderzeń i wilgotności ziaren ryżu na podatność na rozdrabnianie i uzyskiwaną wielkość cząstek. W jednych ze swoich ostatnich badań autorka monografii wskazała, że prawdopodobieństwo rozdrabniania ziaren ryżu i kukurydzy można opisać za pomocą rozkładu logarytmiczno-normalnego jako funkcję jednostkowej energii rozdrabniania, jednocześnie udowadniając, że mediany tych rozkładów są funkcjami wielkości cząstek i zawartości wilgoci [46, 267]. Autorka udowodniła, także że rozkłady prawdopodobieństwa rozdrobnienia zmieniają się w zależności od wilgotności [267]. Należy zaznaczyć, że wspomniane badania opisujące prawdopodobieństwo rozdrabniania ziaren ryżu i kukurydzy zostały opublikowane niedawno (w ostatnich 4–5 latach), gdyż zainteresowanie opisem i prawdopodobieństwem rozdrabniania ziaren zbóż wywołane zostało opracowaniem i upowszechnieniem modeli rozdrabniania zaimplementowanych w metodzie DEM, która pozwala do przeprowadzanie symulacji zbliżonych do rzeczywistego zachowania materiałów w procesach przemysłowych. W omówionych badaniach modelowanie ogranicza się jednak do ilościowego określenia cząstek uszkodzonych podczas przetwórstwa, nie uwzględniono natomiast analizy wielkości cząstek po rozdrobnieniu. Dodatkowo modele wykorzystane w przytoczonych pracach nie uwzględniają tak ważnych właściwości materiałowych zbóż, jak wilgotność i nie dostarczają szczegółowego opisu mechanizmu osłabienia materiału pod wpływem wielokrotnych obciążeń.

Z przeglądu literatury jasno wynika, że nadal brak jest wiedzy na temat mechanizmów rozdrabniania i modeli rozdrabniania ziaren zbóż, zwłaszcza bardzo ograniczona jest liczba badań podejmujących problematykę osłabiania ziarna pod wpływem wielokrotnych obciążeń z uwzględnieniem takich czynników, jak struktura wewnętrzna i skład chemiczny. Jak stwierdzono w [268], konieczne jest zbadanie przyczyn i mechanizmów rozdrabniania ziarna oraz wpływu jego struktury i warunków obciążania na ten mechanizm od strony mikroskopowej, aby w pełni zrozumieć i stworzyć podstawy do doskonalenia procesów przetwórczych i rozwiązań konstrukcyjnych maszyn.

5.3. MODELE POPULACYJNE

W celu opisu zjawisk zachodzących podczas rozdrabniania, w tym związków pomiędzy energią rozdrabniania a wielkością cząstek, wprowadzono modele populacyjne (ang. *Population balance model*), za pomocą których możliwe jest określenie energochłonności rozdrabniania i przewidywanego stopnia rozdrobnienia produktu [253]. Modele populacyjne zasadniczo składają się z dwóch funkcji: funkcji selekcji, inaczej funkcji prawdopodobieństwa, określającej prawdopodobieństwo pęknięcia ziarna przy zadanych wartościach energii (omówionych w poprzednim rozdziale) [42], oraz funkcji rozdrabniania (ang. *breakage function*), które ilustrują związki pomiędzy energią rozdrabniania a wielkością cząstek po rozdrobnieniu [3, 43]. Ze względu na wysoką zgodność wyników

uzyskiwanych za pomocą modeli populacyjnych a wynikami badań eksperymentalnych modele populacyjne są powszechnie wykorzystywane w modelowaniu rozdrabniania [269]. Modele populacyjne uwzględniają zmiany wielkości cząstek i ich udziałów masowych w danej klasie wielkości zachodzące w czasie. Ogólne równanie modelu populacyjnego przyjmuje postać [253]:

$$\frac{dw_i(t)}{dt} = -S_i w_i(t) + \sum_{j=1}^{i-1} b_{i,j} S_j w_j(t) \quad (5.19)$$

gdzie: i, j oznaczenia klas wielkości dążące do pewnej liczby N , w_i – udział masy frakcji w i -tej klasie wielkości, S_i – wskaźnik rozdrobnienia w i -tej klasie wielkości, $b_{i,j}$ – parametr rozkładu.

W przeważającej mierze modele populacyjne wykorzystywane są w odniesieniu do materiałów kruchych (skał i innych, np. minerałów), dla których funkcje selekcji i rozdrabniania wraz z odpowiednimi współczynnikami zostały szeroko opisane [44, 45, 270]. W przypadku ziaren biomasy w niewielu pracach modele populacyjne zostały wykorzystane czy opracowane na potrzeby modelowania rozdrabniania. Cotabarren et al. [271] opracowali model populacyjny dla rozdrabniania kukurydzy w młynie młotkowym, w którym funkcje selekcji i funkcje rozdrabniania uzależniono od prędkości obrotowej wirnika i wielkości otworu sita zastosowanego w młynie. Gil et al. [270] zaproponowali model populacyjny, oparty na fizyce procesu rozdrabniania i obliczeniu liczby zderzenia dla cząstki, zweryfikowany podczas rozdrabniania łodyg i liści kukurydzy i zmiennych parametrów pracy młyna, tj. prędkości obrotowej wirnika, wielkości oczek sita i intensywności dozowania wsadu. W pracy [272] przedstawiono model populacyjny dla rozdrabniania prosa różgowego w młynie nożowym. Zaletą stosowania modeli populacyjnych jest możliwość przewidywania wydajności, uziarnienia produktu i optymalizacji pracy młynów zmniejszając potrzebę przeprowadzania kosztownych i czasochłonnych badań eksperymentalnych [271].

5.4. MODELE WYPROWADZONE NA PODSTAWIE PRAW MECHANIKI

W przypadku materiałów biologicznych, ziarnistych można wyróżnić dwa różne podejścia do opisu mechanizmu rozdrabniania i rozwoju pęknięcia, tj. wykorzystujące prawa mechaniki pęknięcia i mechaniki uszkodzeń [18]. Mechanika pęknięcia traktuje podział materiału jako efekt niestabilnego wzrostu pęknięcia (zgodnie z kryterium Griffitha) i przyjmuje, że dla niestabilnie rosnącego pęknięcia uwolniona energia musi przekraczać odporność na pęknięcie równą dwukrotnej powierzchniowej energii pęknięcia [12]. Jednak, zwłaszcza w warunkach cyklicznego obciążania (które występuje w maszynach przetwórczych), nie zawsze możliwe jest przewidzenie uszkodzenia ziarna na podstawie analizy istniejących pęknięć [273]. Statystyczne podejście do określania prawdopodobieństwa

rozdrobienia materiału zaproponowane przez Weibulla i zastosowanie teorii najsłabszego ogniwa przyczyniło się z kolei do powstania wcześniej wspomnianych modeli statystycznych Weicherta [263], Voguela i Puekerta [264] czy Salmana et al. [145].

Mechanika uszkodzeń w odróżnieniu od mechaniki pęknięcia zakłada ewolucję (degradację) właściwości mechanicznych materiału poddawanego wielokrotnym obciążeniami prowadzącym do pęknięcia, a w konsekwencji do całkowitego zniszczenia [18]. Modele w mechanice uszkodzeń zakładają zmiany sztywności pod wpływem wielokrotnych obciążeń, gdzie sztywność zredukowana jest o współczynnik uszkodzeń D , zależny od odkształcenia [148]. Model statystyczny Salmana et al. [145] bazuje między innymi na założeniu degradacji właściwości mechanicznych, co odzwierciedlono poprzez wprowadzenie parametru degradacji q . Tavares et al. [121] zaproponowali jako rozwinięcie modelu statystycznego prawdopodobieństwa (logarytmiczno-normalnego) rozdrobnienia podczas pojedynczego obciążania, model dla obciążeń wielokrotnych korzystając z założeń mechaniki uszkodzeń. Dowiedli oni, że energia w kolejnych cyklach obciążania E_n zmienia się zgodnie z zależnością [121]:

$$E_n = E_{n-1} (1 - D_n^*) \quad (5.20)$$

$$D_n^* = \left[\frac{2\gamma}{2\gamma - 5D_n^* + 5} \frac{E_{k,n}}{E_{n-1}} \right]^{\frac{2\gamma}{5}} \quad (5.21)$$

gdzie: D_n^* to stopień uszkodzenia zaindukowany w cząstce na końcu n -tego uderzenia, γ – stała akumulacji uszkodzeń, $E_{k,n}$ – jednostkowa energia kinetyczna przy n -tym uderzeniu, E_{n-1} – energia potrzebna do rozdrobnienia cząstki.

W celu powiązania energii zderzenia i wielkości cząstek Tavares [121] zaproponował modyfikację zależności opracowanej przez Napier-Munna [274]:

$$t_{10} = A \left[1 - \exp \left(-b' \frac{E_{k,n}}{E_{50b}} \right) \right] \quad (5.22)$$

gdzie: t_{10} – parametr, który odpowiada skumulowanemu przejściu przez sito o oczkach 1/10 pierwotnej wielkości cząstki, A , b' – parametry wyznaczone eksperymentalnie, E_{50b} – mediana jednostkowej energii rozdrabniania (w odniesieniu do masy) cząstek, które pękły w wyniku zderzeń o energii równej $E_{k,n}$.

W modelu symulacyjnym DEM rozdrabniania, wyprowadzonym przez Zenga [50], oprócz modelu Tavaresa zastosowano równanie degradacji sztywności ziarna ryżu oparte na zmianach jednostkowej energii dyssypacji:

$$\tilde{k} = k \left(1 - \left(\frac{E_{dis}}{E_{dis,tot}} \right)^\gamma \right) \quad (5.23)$$

gdzie: E_{dis} – jednostkowa energia dyssypacji odpowiadająca energii zdyssypowanej podczas zderzenia, $E_{dis,tot}$ – całkowita jednostkowa energia dyssypacji, \tilde{k} – sztywność cząstki, która maleje, ponieważ ulega deformacji, k – początkowa sztywność cząstki.

W związku z tym, korzystając z powyższej zależności po jednym zderzeniu, ale bez pęknięcia, sztywność cząstek ulega zmianie (zgodnie z zależnością 5.23), co pozwala modelować osłabianie ziaren ryżu w wyniku wielokrotnych obciążeń [50]. Wówczas reszkowa zdyssypowana energia jednostkowa $E_{res,dis,tot}$ wyrażona jest zależnością [50]:

$$E_{res,dis,tot} = E_{dis,tot} \left(1 - \left(\frac{E_{dis}}{E_{dis,tot}} \right)^\gamma \right) \quad (5.24)$$

Modele wyprowadzone na podstawie mechaniki uszkodzeń są szczególnie przydatne do analizowania osłabiania materiału w wyniku obciążeń o energii niższej niż energia podziału [50], co ma znaczenia dla zgodności wyników eksperymentalnych i symulacyjnych.

Uzupełnieniem matematycznych modeli rozdrabniania dla rozwoju maszyn i urządzeń procesów w myśl zasad Integronu byłoby opracowanie statystycznych modeli prawdopodobieństwa rozdrabniania z uwzględnieniem sposobów obciążenia i wpływu właściwości ziaren, takich jak postać geometryczna, wymiar i wilgotność oraz opisów osłabienia materiałów poddanych wielokrotnym obciążeniom z punktu widzenia energii odkształceń skumulowanej w kolejnych cyklach obciążenia. Z przeglądu literatury wynika, że tylko nieliczne prace [4, 47–51] opisują zjawisko rozdrabniania w ujęciu probabilistycznym. Niezbędna jest również identyfikacja relacji pomiędzy parametrami procesowymi maszyny i energią rozdrabniania a stopniem rozdrobnienia i granulometrią produktu dla będących w fazie przedwdrożeniowej rozdrabniaczy wielotarczowych, wielootworowych.

6. BADANIA FENOMENOLOGICZNE W KIERUNKU MODELOWANIA ZMIAN ENERGII MINIMUM

Podstawą rozwoju konstrukcji rozdrabniających oraz opracowania teoretycznych modeli procesu rozdrabniania wg zasad Integronu jest pogłębienie wiedzy w zakresie fenomenów, modelowych zjawisk podziału materiału w wyniku oddziaływań sił zewnętrznych. Rozważania te są niezbędne do identyfikacji celu przebiegu procesu rozdrabniania w aspekcie zachowania się materiału pod wpływem różnego rodzaju obciążeń, a w szczególności związków wydatkowanej energii podziału z postacią geometryczną materiałów biologicznych i ich wilgotnością. Istotne dla modelowania procesów rozdrabniania, a tym samym tworzenia podstaw inżynierii innowacji konstrukcji rozdrabniających poprzez poszerzenie wiedzy o procesach podziału materiałów, oprócz opisu fenomenów i energii procesów modelowych, jednostkowych jest określenie efektów podziału materiału w postaci związków energii i wielkości cząstek po rozdrobnieniu, co zostanie przedstawione w dalszej części pracy.

Podczas rozdrabniania maszynowego materiały ziarniste, jak wspomniano wcześniej, poddawane mogą być różnego rodzaju obciążeniom: ściskającym, ścinającym, udarowym itd. [57, 193]. W konstrukcjach wielotarczowych materiał znajdujący się w szczelinie roboczej wprowadzany jest w stan złożonych naprężeń, w których dominującą rolę odgrywają naprężenia tnące, ale także ściskające [39, 40]. Zarówno ściskanie, jak i cięcie materiału spotykane jest również w innych konstrukcjach młynów przeznaczonych do rozdrabniania biomasy [57, 275, 276], dlatego badania studialne fenomenów podziału ziarna w aspekcie wydatkowanej energii prowadzono właśnie dla tego typu obciążeń.

Badania podstawowe procesu rozdrabniania obejmowały wyznaczenie związków pomiędzy postacią geometryczną (przede wszystkim wielkością ziaren poddanych rozdrobnieniu), wilgotnością, jako istotnym parametrem ziaren biomasy, a energią podziału ziarna – energią minimum wg Integronu, na przykładzie ziaren ryżu i kukurydzy, a w konsekwencji wpływu wspomnianych właściwości tych materiałów na prawdopodobieństwo rozdrabniania.

Badania przeprowadzono dla ziaren kukurydzy i ryżu, jako że stanowią one najczęściej przetwarzane zboża w przemyśle spożywczym i paszowym [277–279]. Kukurydza charakteryzuje się najwyższą światową produkcją i konsumpcją wynoszącą 1207 mln Mg (dane za lata 2021/2022 [280]) a jej ziarna wykorzystuje się w całości, a także przetwarza na skrobię, olej, mąkę [281]. Produkty uboczne i pochodne przetwórstwa tego ziarna są szeroko stosowane w przemyśle spożywczym, chemicznym, energetycznym (np. fermentacja) i innych [281]. Ryż jest źródłem pożywienia (w postaci surowych i zmielonych ziaren, np. mąki i produktów mącznych, w tym także skrobi) dla prawie jednej trzeciej światowej populacji a jego globalną produkcję szacuje się na 760 mln t (dane za 2021 rok) [277]. Rokrocznie przetwarza się zatem łącznie ok. 2 mld t ziaren ryżu i kukurydzy, co pochłania znaczące ilości energii i paliw, szczególnie w procesach

rozdrabniania i ekstrakcji, wymagających wysokich nakładów energetycznych do osiągnięcia celu – dezintegracji struktury ziarna.

6.1. METODYKA BADAŃ

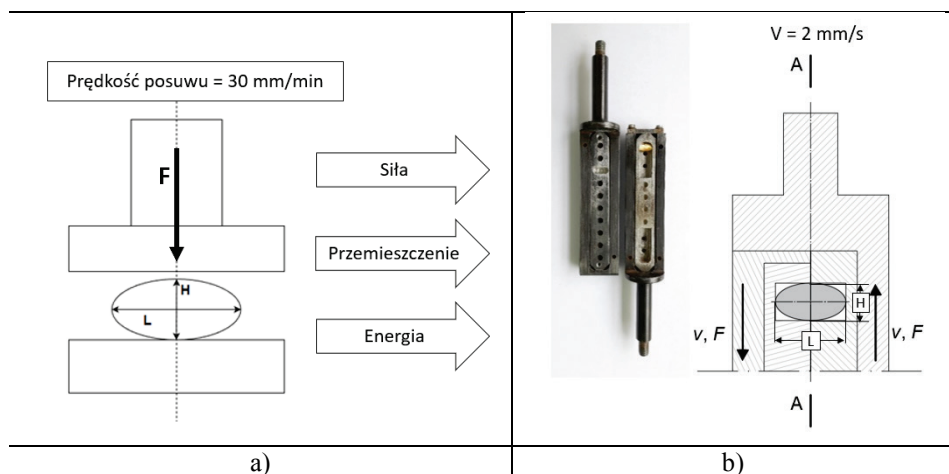
W celu oznaczenia energii minimum rozdrabniania przeprowadzono próby statycznego ściskania zgodnie z normą ASAE S368.4 [91] oraz próby ścinania pojedynczych ziaren. Badania realizowano z podziałem na trzy eksperymenty:

- I. Wyznaczenie wpływu wielkości ziaren na energię i prawdopodobieństwo rozdrabniania w próbie ścinania i ściskania.
- II. Wyznaczenie wpływu wilgotności i wielkości ziaren na energię i prawdopodobieństwo rozdrabniania podczas prób statycznego ściskania.
- III. Oznaczenie wpływu krotności obciążeń na energię i prawdopodobieństwo rozdrabniania.

6.1.1. Wyznaczenie wpływu wielkości ziaren na energię rozdrabniania

Do badań wykorzystano ziarna ryżu (ryż biały, długoziarnisty) i kukurydzy pochodzące z lokalnej sprzedaży na terenie Polski. Ziarna zostały uprzednio oczyszczone – kukurydza oddzielona od kolby, a ryż pozbawiony łuski. Do badań przygotowano 125-gramowe próbki zgodnie z normą PN-EN ISO 24333: 2012P [282], z których następnie wybrano po 100 ziaren do testów ściskania i ścinania oraz oznaczono wilgotność ziaren zgodnie z metodą ubytku masy [283] z wykorzystaniem wagosuszarki MAC 210/NP. Tak oznaczona wilgotność ziaren wyniosła $12.68 \pm 0.01\%$ oraz $13.02 \pm 0.01\%$ odpowiednio dla kukurydzy i ryżu. Ziarna wybrane do testów numerowano i dla każdego zmierzono długość (L), szerokość (W) i wysokość (H) za pomocą suwmiarki elektronicznej z dokładnością do 0.01 mm. Dodatkowo każde ziarno zważono na wadze analitycznej z dokładnością do 0.001 g. Z wcześniej prowadzonych badań dotyczących zależności pomiędzy kształtem, wielkością i masą cząstek [44, 111, 117, 284] płyną przesłanki do założenia, że wielkość cząstek ma wpływ na wartość energii rozdrabniania. W celu weryfikacji tych zależności badane ziarna podzielono na 4 grupy wymiarowe na podstawie jego grubości.

Badania ścinania oraz próbe ściskania przeprowadzano na maszynie wytrzymałościowej Instron 5966. Na rysunku 6.1 przedstawiono sposób ułożenia próbek podczas testów wraz z parametrami prędkości obciążania. Podczas obciążania ziaren rejestrowano siłę i przemieszczenie, a następnie obliczono energię potrzebną do podziału ziarna i wyznaczono prawdopodobieństwo pęknięcia. W przypadku ściskania obciążanie realizowano do momentu wystąpienia pierwszego pęknięcia ziarna, przejawiającego się jako spadek siły, i dla tego punktu wyznaczano energię rozdrabniania.



Rys. 6.1. Sposób ułożenia próbek: a) podczas prób statycznego ściskania, b) podczas prób ścinania

6.1.2. Wyznaczenie wpływu wilgotności i wielkości ziaren na energię rozdrabniania

W badaniach wykorzystano ziarna ryżu (ryż biały, średnioziarnisty) pochodzące z lokalnej sprzedaży w Stanach Zjednoczonych oraz kukurydzę pochodzącą z poletek doświadczalnych Uniwersytetu Purdue. Przygotowanie próbek obejmowało wyznaczenie początkowej wilgotności próbek zgodnie z normą ASAE S352.2 APR1988(R2017) [285], namoczenie do wilgotności 28%, a następnie podział na próbki i suszenie w temperaturze pokojowej do założonego poziomu wilgotności: 10, 14, 18, 22, 26%. Z każdej próby wydzielono po 100 ziaren ryżu i kukurydzy do badań ściskania, każde ziarno zważono i zmierzono, a następnie podzielono na 4 grupy względem wysokości ziarna.

Próby statycznego ściskania dla zróżnicowanych wilgotności ziaren realizowano na maszynie wytrzymałościowej MTS Criterion, model 43 będącej na wyposażeniu Uniwersytetu Purdue w Stanach Zjednoczonych. W tym przypadku zastosowano taki sam sposób ułożenia próbek, jak w poprzednim eksperymencie (rys. 6.1) oraz prędkość obciążania równą 1,25 mm/min. Rejestrowano siłę, przemieszczenie i naprężenia podczas obciążania, a następnie obliczono energię rozdrabniania i określono prawdopodobieństwo pęknięcia dla każdego poziomu wilgotności.

6.1.3. Wyznaczenie wpływu krotności obciążeń na energię i prawdopodobieństwo rozdrabniania

Ziarna o wilgotności 8%, 12%, 16% i 20% (zastosowano te same odmiany ziaren i taką samą metodę różnicowania i oznaczania wilgotności, jak opisana w rozdziale 6.1.2) podzielono na grupy wymiarowe, poddano wielokrotnym obciążeniom na maszynie wytrzymałościowej MTS (model 40) przyjmując schemat

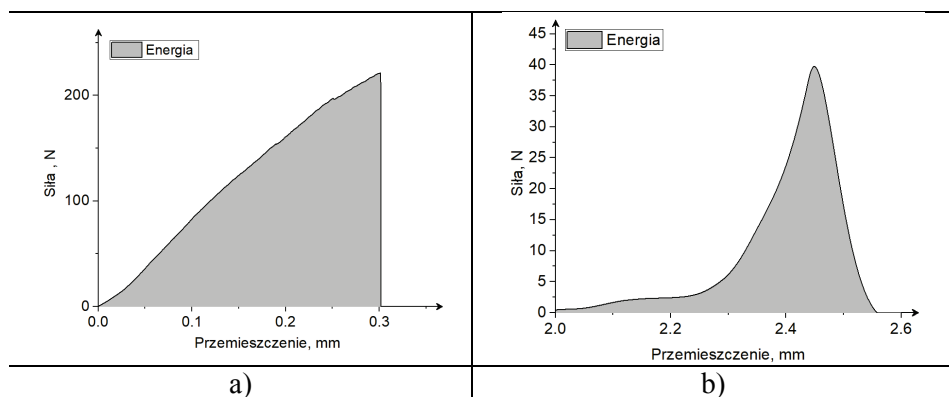
postępowania, podobny jak opisany w pracy [144]. Po pierwsze zidentyfikowano mechanizm zmian energii pęknięcia podczas wielokrotnych obciążeń na podstawie wyników próby ściskania pojedynczych ziaren. Ziarna umieszczano na podeście i ściskano za pomocą płyty obciążanej sukcesywnie przez tłok maszyny wytrzymałościowej do zadanego poziomu siły poniżej wartości maksymalnej siły niszczącej – 20 N i 30 N dla ziaren ryżu oraz 240 N i 260 N dla ziaren kukurydzy, a następnie odciążano. Sekwencję obciążania i odciążania powtarzano do momentu zniszczenia ziarna lub osiągnięcia zadanej maksymalnej liczby cykli. Podczas testów rejestrowano siły, przemieszczenia, czas i liczbę cykli obciążeń. Następnie wyznaczono prawdopodobieństwo pęknięcia przy każdorazowym ściskaniu jednocześnie 40 ziaren z przygotowanych wcześniej prób. Liczba ziaren w eksperymencie została ustalona na podstawie badań wstępnych. Wcześniejsze badania w zakresie prawdopodobieństwa rozdrabniania dla materiałów kruchych wykazały, że liczba cząstek w eksperymencie wpływa na wiarygodność wyników, jednak wraz ze zwiększaniem się liczby przebadanych cząstek wzrasta nakład pracy, czas potrzebny na wykonanie eksperymentu i jego koszty [48]. Biorąc pod uwagę zalecenia ze stanu wiedzy i analizy literatury przeprowadzono badania wstępne pozwalające na ustalenie minimalnej liczby cząstek, którą można wykorzystać, aby otrzymać powtarzalne wyniki [286]. Liczbę cząstek ustalono poprzez zwiększanie liczby ziaren ściskanych jednocześnie w kolejnych próbach (10, 20, 30, 40, 50, 60) i obserwacji zmian prawdopodobieństwa rozdrobnienia [48, 286, 287]. Jako minimalną liczbę cząstek przyjmowano tę, dla której parametry krzywych prawdopodobieństwa nie zmieniały się wraz z dalszym zwiększaniem liczby ziaren [48, 286, 287]. Badania ściskania grupy 40 ziaren przeprowadzono dla czterech grup wymiarowych o wąskim przedziale zmienności (kukurydza: grupa 1: 3.95–4.05 mm, grupa 2: 4.50–4.60 mm, grupa 3: 5.05–5.15 mm, grupa 4: 5.60–5.70 mm; ryż: grupa 1: 1.70–1.80 mm, grupa 2: 1.80–1.90 mm, grupa 3: 1.90–2.00 mm, grupa 4: 2.00–2.10 mm) i czterech poziomów wilgotności. Przetestowano następujące poziomy obciążen: dla kukurydzy 4500 N, dla ryżu 200 N.

6.1.4. Energia rozdrabniania

Energię minimum potrzebną do trwałego odkształcenia ziarna obliczono jako pole powierzchni pod wykresem siła-przemieszczenie pozyskane z prób ścinania i ściskania (rys. 6.2) na podstawie równania [46, 288, 289]:

$$E_{(RP)} = \int_{D_1}^{D_{(RP)}} F dD \quad (6.1)$$

gdzie: $E_{(RP)}$ – energia trwałego odkształcenia, J, F – siła niszcząca, N, dD – przemieszczenie, mm.



Rys. 6.2. Graficzna interpretacja obliczanej energii rozdrabniania: a) dla prób ściskania, b) dla prób ścinania

Jednostkową energię rozdrabniania w odniesieniu do masy ziarna określono jako [45]:

$$E_{m(RP)} = \frac{1}{m} \int_{D_1}^{D(RP)} F dD = \frac{E(RP)}{m} \quad (6.2)$$

gdzie: m – masa pojedynczego ziarna, kg.

Dodatkowo dla ziaren poddanych wielokrotnym obciążeniom wyznaczono energię odkształceń plastycznych i sprężystych. Energia podczas quasi-statycznego cyklicznego ściskania jest równa sumie pracy odkształcenia plastycznego i sprężystego, i jest obliczana na podstawie krzywej siła-odkształcenie [290]. Energia odkształceń sprężystych jest równa polu pod krzywą odciążenia i reprezentuje część energii włożonej i odzyskanej w wyniku odkształcenia sprężystego. Energię odkształceń plastycznych można określić jako pole powierzchni pomiędzy krzywą obciążenia i odciążania [291] i jest ona częścią energii zaabsorbowanej przez ziarno. W wielu pracach przyjmuje się, że energia (praca) wykorzystana na odkształcenia plastycznego materiału jest odpowiedzialna za proces osłabiania materiału i akumulacji uszkodzeń wewnątrz jego struktury [292].

6.1.5. Prawdopodobieństwo rozdrabniania

Na podstawie uzyskanych wyników energii minimum rozdrabniania podczas pojedynczego obciążania utworzono empiryczne rozkłady określające prawdopodobieństwo rozdrobnienia ziarna pod wpływem obciążania zadaniem poziomem energii. W celu wyznaczenia prawdopodobieństwa rozdrabniania posłużono się metodą statystyki pozycyjnej, podobnie jak w pracach [44, 289], za pomocą której można wyznaczyć empiryczne funkcje prawdopodobieństwa poprzez przypisanie danym odpowiedniej pozycji w rozkładzie. Wartości energii

uszeregowano rosnąco nadając rangi $i = 1, 2 \dots N$, poszczególnym obserwacjom. Skumulowany empiryczny rozkład prawdopodobieństwa analizowanej cechy można wówczas wyznaczyć z zależności [44, 289]:

$$P(X_i) = \frac{i - 0,5}{N} \quad (6.3)$$

gdzie: $P(X_i)$ jest wartością skumulowanego rozkładu prawdopodobieństwa wystąpienia danej cechy, X_i określa analizowaną cechę.

Dla ziaren poddanych wielokrotnym obciążeniom empiryczny rozkład prawdopodobieństwa wyznaczono na podstawie ilości cząstek, które uległy zniszczeniu po danym cyklu obciążenia zgodnie z zależnością [144]:

$$P(n) = \frac{N_{b,n}}{N_0} \cdot 100\% \quad (6.4)$$

gdzie: $P(n)$ – prawdopodobieństwo pęknięcia, n – liczba cykli obciążeń, N_b – liczba ziaren, która uległa zniszczeniu po n -tym cyklu, N_0 – początkowa liczba ziaren.

W konsekwencji wyznaczone eksperymentalne rozkłady prawdopodobieństwa opisano jednym ze znanych skumulowanych rozkładów: skumulowany rozkład log-normalny, skumulowany rozkład Weibulla oraz skumulowany rozkład gamma (tabela 6.1), jako najczęściej stosowanych do opisu prawdopodobieństwa pęknięcia [44, 45, 289, 293]. W celu dopasowania rozkładów wykorzystano algorytm optymalizacji nieliniowej Levenberga-Marquardta. Wyboru rozkładu o najlepszym dopasowaniu dokonano na podstawie rankingu funkcji wg wartości współczynnika determinacji adj. R^2 .

Tabela 6.1. Skumulowane rozkłady prawdopodobieństwa

Rozkład skumulowany	Model matematyczny
Rozkład Log-normalny	$P_{CDF} = y_0 + A \int_0^x \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma x}} e^{-\frac{(\ln(x)-\mu)^2}{2\sigma^2}} dx \quad (6.5)$
Rozkład Gamma	$P_{CDF} = y_0 + \frac{A_1}{b^a \Gamma(a)} \int_0^x x^{a-1} e^{-\frac{x}{b}} dx \quad (6.6)$
Rozkład Weibulla	$P_{CDF} = y_0 + A_1 \int_0^x b a^{-b} x^{b-1} e^{-\left(\frac{x}{a}\right)^b} dx \quad (6.7)$

6.2. WPŁYW POSTACI GEOMETRYCZNEJ ZIAREN NA ENERGIĘ I PRAWDOPODOBIENSTWO ROZDRABNIANIA

Omówione w poprzednich rozdziałach modele uwzględniają zmiany energii wraz z wielkością cząstek poddawanych obciążeniom, co wynika z zależności empirycznych pomiędzy energią rozdrabniania a wielkością cząstek prezentowanych, chociażby przez Bonda, Kicka czy Rittingera [211], a także Tavaresa i Kinga [170]. W celu ustalenia związków pomiędzy energią rozdrabniania a wielkością ziaren zbóż wykonano testy ściskania i ścinania ryżu oraz kukurydzy o różnej grubości.

Zdecydowanie większe wartości energii jednostkowej odnotowano dla obu ziaren w testach ściskania (tabela 6.2). Ma to związek ze sposobem obciążania próbki i powierzchnią kontaktu. Podczas ściskania ziaren powierzchnia kontaktu pomiędzy ziarnem a płytą ściskającą była zdecydowanie większa niż podczas ścinania w specjalnie przygotowanym przyrządzie, co wymagało przyłożenia znacznie większych sił do zniszczenia ziarna. Podobne spostrzeżenia przedstawiono w pracy [9].

Tabela 6.2. Jednostkowa energia w procesie cięcia i ściskania pojedynczych ziaren ryżu i kukurydzy dla ziaren o różnej grubości

		Ryż		
	Przedział wielkości (mm)	Średnia (J·kg ⁻¹)	Mediana (J·kg ⁻¹)	Odch. standard. (J·kg ⁻¹)
Ściskanie	1,30–1,43	2226,84 (a)	2128,96	1360,51
	1,43–1,50	1782,70 (a,b)	1543,30	1393,40
	1,50–1,60	1694,64 (a,b)	1190,82	1258,37
	>1,60	1167,11 (b)	909,93	845,91
Ścinanie	1,30–1,50	328,02 (a)	323,91	70,85
	1,50–1,60	296,13 (a,b)	289,40	74,53
	1,60–1,70	287,94 (a,b)	324,78	75,78
	>1,70	247,82 (b)	224,76	74,48
		Kukurydza		
	Przedział wielkości (mm)	Średnia (J·kg ⁻¹)	Mediana (J·kg ⁻¹)	Odch. standard. (J·kg ⁻¹)
Ściskanie	4,00–4,50	627,03 (a)	520,26	445,71
	4,50–5,00	475,45 (a,b)	437,49	329,62
	5,00–5,50	404,08 (a,b)	311,56	258,65
	>5,50	255,09 (b)	166,69	150,60
Ścinanie	4,00–4,45	251,67 (a)	232,83	63,32
	4,45–4,75	203,62 (a,b)	189,29	66,48
	4,75–5,20	188,20 (b)	178,10	64,94
	5,20–5,80	176,61 (b)	177,96	44,63

Średnie oznaczone różnymi literami alfabetu (a, b, c) różnią się istotnie dla przyjętego poziomu istotności 0,05 w teście post-hoc Tukeya.

Ponadto zarówno energia cięcia, jak i ściskania była większa dla ziaren ryżu niż dla ziaren kukurydzy, co jest związane z ich strukturą wewnętrzną. Ryż jako ziarno szkliste charakteryzuje się bardziej zwartą i uporządkowaną strukturą niż mączyste ziarna kukurydzy z luźno upakowanymi cząsteczkami skrobi [294]. Jak wykazały badania, wraz ze wzrostem szklistości zwiększa się energia jednostkowa konieczna do podziału ziarna [9, 111, 295]. Jak wskazano w [9] większe uporządkowanie struktury wewnętrznej i oddziałujących sił adhezji szklistych ziaren może oddziaływać na zwiększenie odporności na naprężenia normalne, jednocześnie ułatwiając przemieszczanie się noża w procesach cięcia, zmniejszając tym samym wytrzymałość na ścinanie, co tłumaczy zdecydowanie większe różnice pomiędzy energią ścinania i ściskania w przypadku ryżu niż w przypadku kukurydzy. Zatem, ziarna zbóż powinny być poddawane raczej obciążeniom ścinającym niż ściskającym dla zapewnienia niższej energochłonności procesu rozdrabniania. Badania stanowiskowe przeprowadzone przez Eisenlaueara i Teipela [26, 52, 231], wskazujące na niższą energochłonność młynów tnących niż młynów młotkowych, zdają się potwierdzać to stwierdzenie.

Badania związków pomiędzy grubością ziaren ryżu i kukurydzy a energią ściskania i ścinania wykazały, że grubość ziarna wpływa na zmiany energii rozdrabniania dla obu typów obciążeń, co potwierdzają wyniki analizy wariancji ANOVA (tabela 6.2). Istotne statystycznie różnice (dla poziomu istotności 0,05) w średniej energii ściskania i ścinania występowały przede wszystkim pomiędzy ziarnami o największym i najmniejszym wymiarze. Zarówno dla ziaren ryżu i kukurydzy poddawanych obciążeniom ściskającym i ścinającym obserwowano zmniejszanie się wartości średniej energii wraz ze zwiększaniem się grubości ziarna. Analiza korelacji Perasona pomiędzy średnią energią jednostkową a średnią grubością ziarna wykazała, że wartości te są ze sobą ujemnie skorelowane ($r > -0,9$) dla obu ziaren w obu testach obciążeń (tabela 6.3).

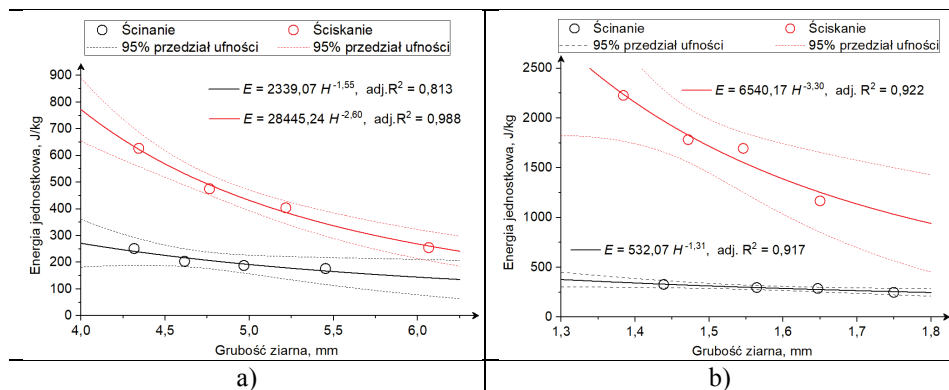
Tabela 6.3. Wyniki analizy korelacji pomiędzy średnią grubością ziarna H a energią jednostkową w próbach ściskania i ścinania ziaren ryżu i kukurydzy

			Energia jednostkowa (ściskanie)	Energia jednostkowa (ścinanie)
Średnia H	kukurydza	r-Pearsona	-0,983*	-0,903#
		p-value	0,017	0,097
Średnia H	ryż	r-Pearsona	-0,978*	-0,980*
		p-value	0,022	0,020

(*) – korelacja istotna statystycznie dla przyjętego poziomu istotności 0,05; (#) – korelacja istotna statystycznie dla przyjętego poziomu istotności 0,1.

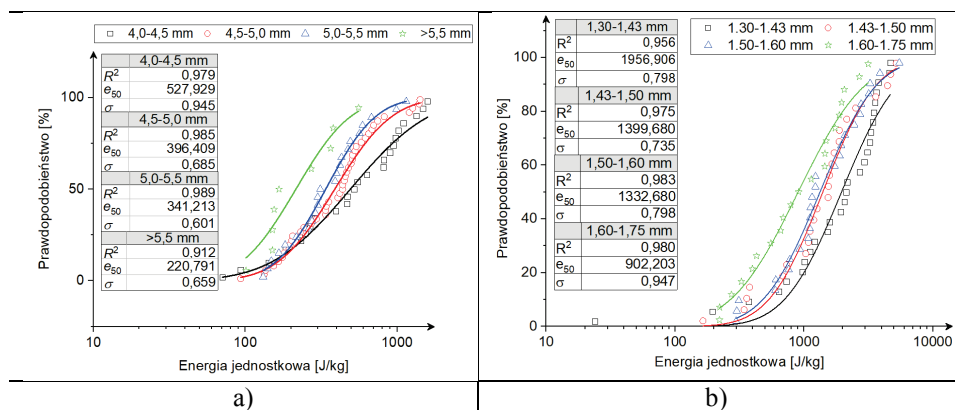
Relacje pomiędzy średnią jednostkową energią ścinania i ściskania a średnią grubością ziarna w danym przedziale wielkości można opisać z wysokim dopasowaniem (adj. $R^2 > 0,8$) za pomocą malejących funkcji potęgowych (rys. 6.3), co jest zbieżne z zależnościami uzyskiwanymi dla materiałów kruchych [15].

Współczynniki w otrzymanych równaniach są zależne od charakteru obciążeń, a przede wszystkim od właściwości materiału, co wynika z zależności (5.7) zaproponowanej przez Tavaresa i Kinga [170], opisującej związek pomiędzy medianą rozkładów energii rozdrabniania a wielkością rozdrabnianych cząstek.

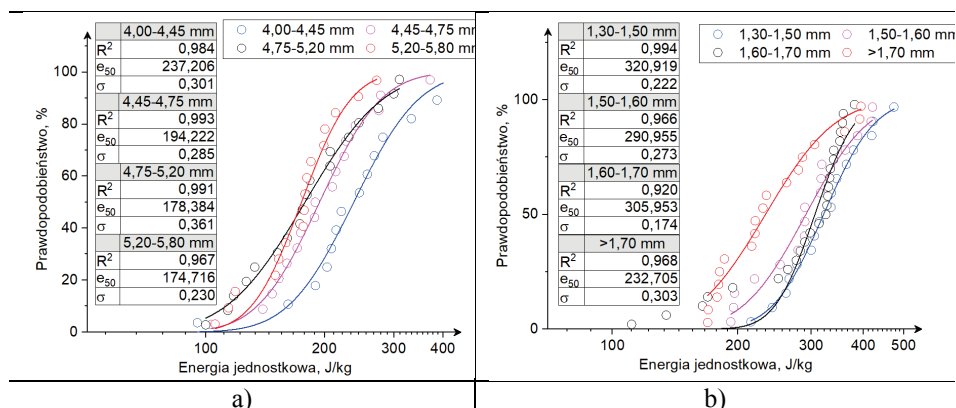


Rys. 6.3. Zależność jednostkowej energii rozdrabniania od średniej grubości ziaren: a) kukurydzy, b) ryżu

Wyznaczone empiryczne rozkłady prawdopodobieństwa rozdrobnienia utworzone na podstawie danych o energii ścinania i ściskania ziaren ryżu i kukurydzy odzwierciedlają m.in. wyniki analizy istotności różnic średnich energii jednostkowych i analizy korelacji pomiędzy energią jednostkową a grubością ziarna (rys. 6.4–6.5). Większe cząstki okazały się bardziej podatne na rozdrobnienie, na co wskazywano już w [267], a w konsekwencji prawdopodobieństwo uszkodzenia ziarna jest większe, co bardzo dobrze ilustrują krzywe prawdopodobieństwa rozdrobnienia ziarna podczas ściskania (rys. 6.4) oraz krzywe prawdopodobieństwa ścięcia ziarna (rys. 6.5). Powyższe obserwacje są zgodne z zależnościami słusznymi dla materiałów, takich jak skały i minerały [152, 153]. Zarówno rozkład Weibulla, jak i rozkład logarytmiczno-normalny dobrze opisywały prawdopodobieństwo rozdrabniania w zależności od jednostkowej energii obciążenia. W większości przypadków to rozkład logarytmiczno-normalny był tym najlepiej dopasowanym o najwyższej wartości współczynnika adj. R^2 , dlatego w dalszych analizach posługiwano się tym rozkładem.



Rys. 6.4. Prawdopodobieństwo rozdrobnienia ziarna: a) kukurydzy, b) ryżu poddanego obciążeniem ściskającym wraz z krzywami dopasowanymi rozkładu log-normalnego (linie ciągłe) dla ziaren o różnej grubości (opracowanie na podstawie badań własnych opublikowanych w [267])



Rys. 6.5. Prawdopodobieństwo rozdrobnienia ziarna a) kukurydzy, b) ryżu poddanego obciążeniem ścinającym wraz z krzywami dopasowanymi rozkładu log-normalnego (linie ciągłe) dla ziaren o różnej grubości

Podobnie jak w przypadku średnich energii jednostkowych ściskania i ścinania, mediany rozkładów log-normalnych zmniejszały się wraz ze wzrostem grubości ziarna (rys. 6.6). W przypadku ściskania ziaren ryżu i kukurydzy oraz dla ścinania kukurydzy zależność pomiędzy jednostkową energią a grubością ziarna przyjmuje postać funkcji potęgowej ($\text{adj. } R^2 > 0,85$), natomiast dla ścinania ryżu zależność ta była liniowa ($e_{50} = -247,57 H + 683,71$) i wyjaśniała zmienność energii ścinania w zależności od grubości ziarna w 56,7% (rys. 6.6). Na podstawie median rozkładów log-normalnych energii jednostkowej uzyskanych dla ziaren o różnej grubości możliwe było wyznaczenie wartości współczynników użytych w równaniu opracowanym przez Tavaresa i Kinga [170] (zależność 5.7). Przyjęto, że współczynnik sprężystości stali $k_{st} = 230$ GPa [296], natomiast

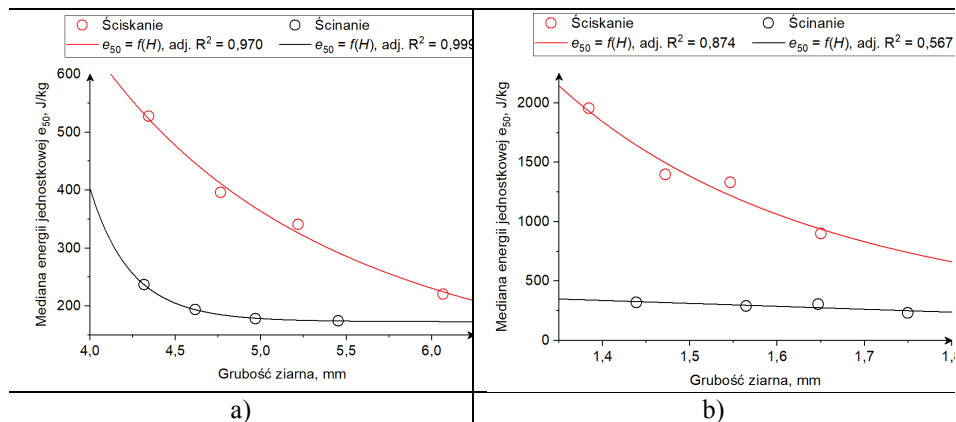
współczynnik sprężystości k_p dla ziaren kukurydzy obliczony na podstawie równania $k_p = E/(1-\nu^2)$ wynosi 0,089 GPa, przyjmując moduł Younga E równy 0,075 GPa [46] i współczynnik Poissona $\nu = 0,4$, a dla ryżu $k_p = 1,186$ GPa przyjmując moduł Younga na poziomie 0,996 GPa [103] i współczynnik Poissona $\nu = 0,4$. Z powyższych wartości wynika, że współczynnik sprężystości ziaren ryżu i kukurydzy w porównaniu ze współczynnikiem dla stali jest pomijalnie mały, w związku z tym można przyjąć zgodnie ze wskazaniami w [296], że człon $1/(1+k_p/k_{st})$ jest w przybliżeniu równy 1, co powoduje, że zależność 5.7 upraszcza się do postaci:

$$E_{m50} = E_{m,\infty} \left[1 + \left(\frac{d_{p,0}}{d_p} \right)^\varphi \right] \quad (6.8)$$

Wartości wyznaczonych współczynników równania 6.8 wynoszą:

- dla ściskania kukurydzy [267]: $d_{p,0} = 12,51$ mm; $E_{m,\infty} = 26,96$ J·kg⁻¹; $\varphi = 2,75$;
- dla ściskania ryżu [267]: $d_{p,0} = 3,11$ mm; $E_{m,\infty} = 57,84$ J·kg⁻¹; $\varphi = 4,30$;
- dla ścinania kukurydzy: $d_{p,0} = 4,07$ mm; $E_{m,\infty} = 173,02$ J·kg⁻¹; $\varphi = 16,77$.

Przedstawione współczynniki i zakresy wyznaczonej energii minimum w postaci rozkładów prawdopodobieństwa mogą być wykorzystane do modelowania procesów rozdrabniania z wykorzystaniem metody elementów dyskretnych i dostępnego oprogramowania, np. RockyDEM, EDEM, w których zaimplementowano m.in. model Tavaresa, ale które również dają możliwość budowania własnych modeli rozdrabniania.



Rys. 6.6. Zmiany mediany rozkładów log-normalnych prawdopodobieństwa rozdrabniania w zależności od wielkości cząstki dla procesu ściskania i ścinania ziaren: a) kukurydzy, b) ryżu

Z przeprowadzonej analizy wynika, że wielkość cząstek i mediana energii jednostkowej ściskania ziaren ryżu i kukurydzy oraz ścinania kukurydzy są powiązane funkcją potęgową grubości ziarna zgodnie z równaniem 6.8, co

przedstawiono na rysunku 6.6. Wysokie wartości współczynnika adj. R^2 potwierdzają dobrą zgodność modelu e_{50} z danymi eksperymentalnymi, co z kolei wskazuje, że model zaproponowany przez Tavaresa i Kinga [110, 113, 284] może być stosowany również dla ziaren zbóż. Istnieje jednak ryzyko, że mimo obiecujących rozkładów statystycznych prawdopodobieństwa rozdrobnienia pojedynczych ziaren, tak dobrego dopasowania nie uda się uzyskać w przypadku zbioru cząstek podczas mielenia w młynie, co może powodować rozbieżności między wynikami eksperymentalnymi a teoretycznymi [267]. Konieczne są zatem dalsze badania dla szerszej grupy materiałów oraz badania weryfikacyjne z uwzględnieniem właściwości materiałowych, takich jak wilgotność oraz skład chemiczny, ponieważ wywierają one istotny wpływ na wartość energii rozdrabniania.

Przedstawione wyniki potwierdzają zawarte we wcześniejszych pracach hipotezy, założenia i zależności dla ziaren pszenicy czy ryżu oraz materiałów niebiologicznych, np. pelletów z żelaza [44, 111, 117, 284], że wielkość cząstek wpływa na wartość energii odkształceń. Zasadniczo potwierdzono występowanie ujemnej korelacji pomiędzy grubością ziarna a energią rozdrabniania, co prezentowano w pracy dla ziaren pszenicy [111]. Wyniki zdają się także potwierdzać wnioski płynące z rozważań opisanych w [44] odnośnie zwiększania się wytrzymałości ziaren przy zmniejszających się wymiarach. W przypadku materiałów biologicznych, uziarnionych, zwiększenie energii wraz z redukcją wymiaru może wynikać ze struktury wewnętrznej ukształtowanego ziarna i mniejszej porowatości ziaren o mniejszym wymiarze. Wpływ może mieć także stosunek grubości warstwy bardziej miękkiego bielma do warstwy twardszej okrywy nasiennej.

6.3. WPŁYW WILGOTNOŚCI NA ENERGIĘ I PRAWDOPODOBIENSTWO ROZDRABNIANIA

Jak wskazano w poprzednich rozdziałach, zawartość wody w ziarnach jest istotnym parametrem modyfikującym właściwości mechaniczne. Wraz ze zmianami właściwości mechanicznych pod wpływem wilgotności zmienia się również energia jednostkowa potrzebna do rozbicia ziarna, co ma duże znaczenie w procesach przemysłowych, zwłaszcza w kontekście energochłonności podczas rozdrabniania, ekstrakcji czy przygotowania mąki [10, 107, 113, 297]. We wcześniejszych badaniach autorki [126] wskazano, że siły, naprężenia, odkształcenia i całkowita energia w procesie ściskania są zależne od wilgotności, a wartości energii całkowitej (zależność 6.2) zależą od kształtu krzywej siła-odkształcenie, której nachylenie zmienia się wraz z wilgotnością ziarna. W tabeli 6.4 przedstawiono zakresy energii jednostkowej w próbie statycznego ściskania ziaren ryżu i kukurydzy. Wyniki ANOVA wskazują, że zawartość wilgoci ma znaczący wpływ na energię potrzebną do zainicjowania pęknięcia ziaren ryżu i kukurydzy. Zaobserwowano istotne statystycznie różnice (na podstawie testu post hoc Tukeya) pomiędzy średnimi wartościami energii jednostkowej dla ziaren o różnej wilgotności w próbie ściskania (tabela 6.4).

Tabela 6.4. Jednostkowa energia ściskania pojedynczych ziaren ryżu i kukurydzy o różnych wilgotnościach

	Wilgotność (%)	Średnia (J·kg ⁻¹)	Mediana (J·kg ⁻¹)	Odch. standard. (J·kg ⁻¹)
Kukurydza	10	75,62 (d)	74,69	40,46
	14	124,35 (c)	123,73	50,57
	18	150,61 (b,c)	136,42	75,97
	22	171,42 (b)	151,04	79,89
	26	214,27 (a)	193,90	98,35
Ryż	10	85,06 (a)	69,16	50,92
	14	62,09 (b)	41,82	53,79
	18	47,29 (b,c)	36,90	36,49
	22	39,29 (c)	32,32	25,03
	26	43,64 (c)	40,29	26,81

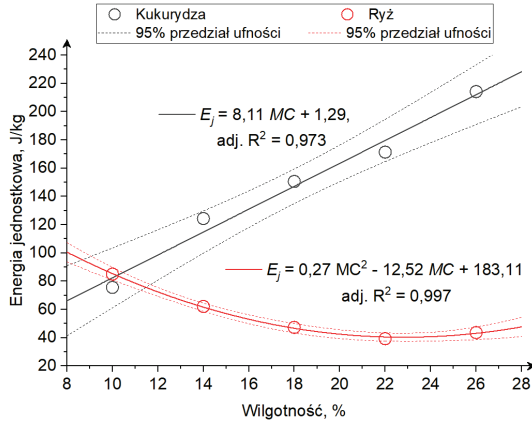
Średnie oznaczone różnymi literami alfabetu (a, b, c, d) różnią się istotnie dla przyjętego poziomu istotności 0,05 w teście post-hoc Tukeya.

Analiza wyników wykazała, że jednostkowa energia ściskania ziaren kukurydzy zwiększa się wraz ze wzrostem wilgotności, na co wskazuje duża, dodatnia wartość współczynnika korelacji ($r = 0,990$, tabela 6.5). Zależność tę można opisać z wysokim dopasowaniem za pomocą funkcji liniowej (rys. 6.7). Wzrost wilgotności w przypadku kukurydzy spowodował, że ziarna stały się bardziej plastyczne (odnotowywano wyższe wartości odkształceń, patrz [126]) i wytrzymały większe obciążenia niż ziarna suche (patrz [126]). W przypadku ziaren ryżu obserwowano odwrotną zależność. Jednostkowa energia ściskania ziaren ryżu zmniejszała się wraz ze wzrostem wilgotności, na co wskazuje duża, ujemna wartość współczynnika korelacji ($r = -0,897$, tabela 6.5). Zależność pomiędzy średnią jednostkową energią ściskania ziarna ryżu a wilgotnością opisuje funkcja kwadratowa (rys. 6.7). Ziarna ryżu charakteryzowały się więc większą odpornością na obciążenia przy małych wartościach wilgotności. Wzrost wilgotności przyczynił się do uplastycznienia ziaren ryżu, a w konsekwencji do obniżenia ich wytrzymałości (patrz [126]).

Tabela 6.5. Wyniki analizy korelacji pomiędzy wilgotnością a średnią energią jednostkową podczas ściskania ziaren ryżu i kukurydzy

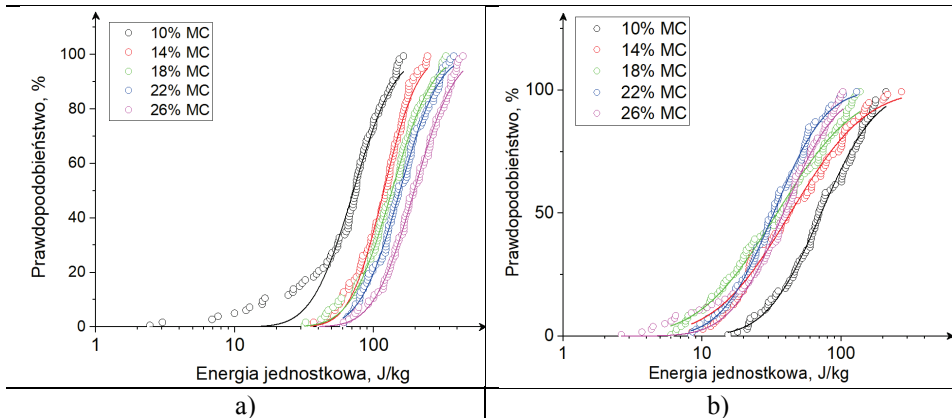
		Średnia energia jednostkowa	
MC	kukurydza	r-Pearsona	0,990*
		p-value	0,001
MC	ryż	r-Pearsona	-0,897*
		p-value	0,039

MC – wilgotność, (*) – korelacja istotna statystycznie dla przyjętego poziomu istotności 0,05.



Rys. 6.7. Średnia energia jednostkowa ściskania ziaren ryżu i kukurydzy w funkcji wilgotności

Wyznaczone empiryczne rozkłady prawdopodobieństwa rozdrobnienia utworzone na podstawie danych o energii ściskania ziaren ryżu i kukurydzy odzwierciedlają wyniki analizy istotności różnic średnich energii jednostkowych i analizy korelacji pomiędzy energią jednostkową a wilgotnością ziaren (rys. 6.8). Zarówno rozkład Weibulla, jak i rozkład logarytmiczno-normalny dobrze opisywały prawdopodobieństwo rozdrabniania w zależności od jednostkowej energii obciążenia dla różnych poziomów wilgotności. W większości przypadków to rozkład logarytmiczno-normalny był tym najlepiej dopasowanym o najwyższej wartości współczynnika adj. R^2 , dlatego w dalszych analizach posługiwano się tym rozkładem.



Rys. 6.8. Rozkład log-normalny prawdopodobieństwa rozdrobnienia ziarna: a) kukurydzy, b) ryżu w zależności od wilgotności (MC) [267]

Można zauważyć, że prawdopodobieństwo rozdrobnienia ziaren zmienia się w zależności od wilgotności (rys. 6.8), co potwierdza konieczność uwzględnienia wilgotności jako parametru funkcji rozkładu prawdopodobieństwa. Badane

ziarna kukurydzy o większej zawartości wody były bardziej odporne na uszkodzenia spowodowane obciążeniami zewnętrznymi niż ziarna suche. Ziarna o wilgotności 10% charakteryzowały się największym prawdopodobieństwem uszkodzenia, a ziarna o wilgotności 26% najmniejszym prawdopodobieństwem uszkodzenia zakładając obciążenia o takiej samej wartości energii [267]. Jak wykazały działania prowadzone przez innych badaczy, wytrzymałość i energia rozdrabniania kukurydzy są w dużym stopniu zależne od jej odmiany oraz stosunku zawartości bielma zrogowaciałego i mączystego, które jest unikalne dla każdej odmiany ziarna [131]. Stąd, dla ziaren kukurydzy różnych odmian, tj. mączystych (dent) i twardych (flint), otrzymano wprost proporcjonalne zależności pomiędzy wilgotnością i wytrzymałością na ściskanie dla kukurydzy typu dent, oraz odwrotnie proporcjonalną dla kukurydzy typu flint [136]. Wang i Wang [75] wykazali, że bielmo miękkie, mączyste charakteryzuje się mniejszą odpornością na obciążenia i większą odkształcalnością niż bielmo zrogowaciałe. Zatem przewaga jednego rodzaju bielma nad drugim określi właściwości mechaniczne, takie jak siła, odkształcenie i energia potrzebne do rozdrobnienia ziarna.

W przypadku ryżu najbardziej podatne na rozdrobnienie były ziarna o wilgotności 22%, a najmniej podatne ziarna o wilgotności 10%. Wyniki wskazują więc, że prawdopodobieństwo rozdrobnienia ziaren ryżu rośnie wraz ze wzrostem wilgotności [267]. W rezultacie zwiększania wilgotności (absorpcji wody) ziarna ryżu zmniejszają swoją wytrzymałość [126]. Właściwości mechaniczne ziaren ryżu są ściśle związane ze szklaną strukturą, w której komórki skrobi są ciasno upakowane. Absorpcja wody w przestrzenie międzykomórkowe powoduje wzrost odległości pomiędzy komórkami struktury wewnętrznej (zwiększa się objętość ziarna), powodując zwiększenie możliwości przemieszczania się łańcuchów skrobi, a tym samym zwiększając plastyczność ziarna i obniżając jego twardość [104, 113]. Zmniejszanie twardości z kolei przyczynia się do zmniejszenia siły i energii niszczącej podczas ściskania [100, 126]. Uzyskane wyniki wskazują, że ziarna ryżu będą najbardziej podatne na uszkodzenia przy wysokich wartościach wilgotności i nawet niewielkie, kilkukilogramowe obciążenia podczas operacji przetwórczych będą powodowały ich rozdrobnienie. Wartość energii zerwania będzie zależała od właściwości materiałów i ich zachowania się pod wpływem obciążeń, a dokładniej od odkształceń sprężystych i plastycznych podczas obciążania. Wilgotność zmienia udział odkształceń sprężystych i plastycznych w całkowitym odkształceniu ziarna, co ma wpływ na zmiany wartości energii [100, 126].

Podobnie jak w przypadku średnich energii jednostkowych ściskania, mediany rozkładów log-normalnych zmieniały się wraz ze zmianami wilgotności ziaren (rys. 6.9). Największym dopasowaniem do danych eksperymentalnych charakteryzowały się funkcje kwadratowe w postaci:

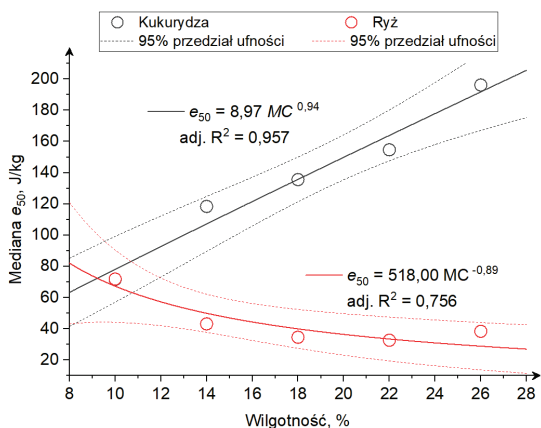
- dla kukurydzy: $e_{50} = -0,04 MC^2 + 8,53 MC - 4,45$, $R^2 = 0,968$; (6.9)

- dla ryżu: $e_{50} = -0,34 MC^2 - 14,08 MC + 177,50$, $R^2 = 0,982$. (6.10)

Wymagają one jednak wyznaczenia trzech współczynników. W prostszej postaci monotonicznej, zależność pomiędzy medianami rozkładów log-

normalnych prawdopodobieństwa rozdrobnienia ziaren o różnych wilgotnościach można przedstawić także za pomocą funkcji potęgowych (rys. 6.9).

Przedstawione wyniki mają duże znaczenie przy projektowaniu urządzeń przetwórczych ziaren zbóż. Z jednej strony wskazano zakresy wilgotności i energii minimum warunkujące występowanie małej liczby uszkodzeń podczas zbioru, przechowywania i transportu ziarna lub dużą liczbę i wysokie prawdopodobieństwo podziału, co jest istotne dla maszyn rozdrabniających [298]. Z drugiej strony przedstawione wyniki dotyczące energii minimum i prawdopodobieństwa rozdrabniania ziarna dla różnych poziomów wilgotności mogą stanowić wsparcie w projektowaniu obciążeń oddziałujących na ziarna w urządzeniach przetwórczych. Opracowane zależności zmian mediany rozkładu log-normalnego w zależności od wilgotności ziaren wskazują, że jest to istotny parametr, który winien być uwzględniany w obliczeniach prawdopodobieństwa rozdrobnienia.



Rys. 6.9. Mediana rozkładu logarytmiczno-normalnego prawdopodobieństwa rozdrobnienia ziarna ryżu i kukurydzy w funkcji wilgotności

6.4. MODELE ENERGETYCZNE POSTACI GEOMETRYCZNEJ I WILGOTNOŚCI

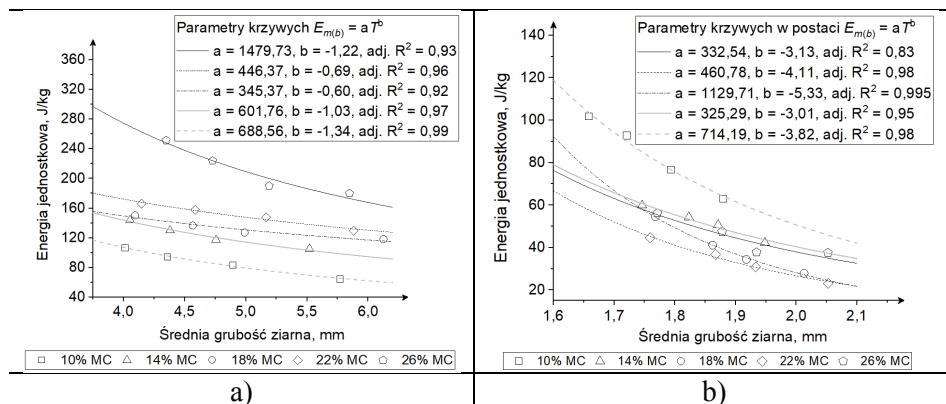
W poprzednich rozdziałach wykazano, że prawdopodobieństwo rozdrabniania ziaren ryżu i kukurydzy zależne jest od grubości ziarna oraz jego wilgotności. Na rysunku 6.10 przedstawiono funkcje potęgowe opisujące zmiany średniej energii jednostkowej w zależności od grubości ziarna dla ziaren o różnych wilgotnościach. Dla ziaren w każdym z analizowanych poziomów wilgotności (tj. 10%, 14%, 18%, 22%, 26%) funkcje potęgowe z wysokim dopasowaniem (adj. R^2 powyżej 0,83) opisywały zmiany średniej energii jednostkowej ściskania w zależności od średniej grubości ziarna.

Na podstawie znajomości energii rozdrabniania ziaren w różnych przedziałach wielkości i różnej wilgotności wyznaczono parametry rozkładów

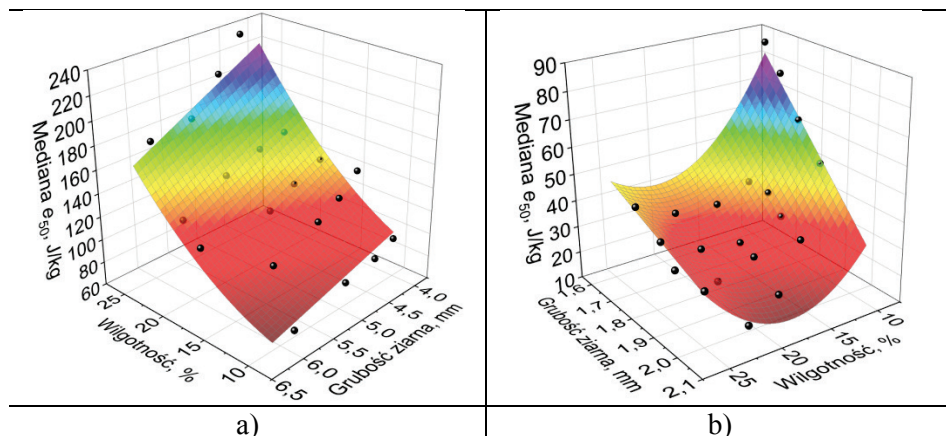
logarytmiczno-normalnych. W efekcie na podstawie analizy regresji opisano medianę rozkładu (e_{50}) jako funkcję wilgotności (MC) i grubości ziarna (T). Zależność na medianę dla dwóch rozpatrywanych ziaren opisano z bardzo dobrym dopasowaniem ($R^2 > 0.9$) za pomocą wielomianu w postaci (rys. 6.11):

$$e_{50} = \alpha \cdot MC^2 + \beta \cdot MC + \gamma \cdot T + \delta \cdot MC \cdot T + \lambda \quad (6.11)$$

gdzie: dla kukurydzy $\alpha = 0,22$, $\beta = 3,10$, $\gamma = -7,26$, $\delta = -0,85$, $\lambda = 110,43$, $\text{adj. } R^2 = 0,886$, a dla ryżu $\alpha = 0,29$, $\beta = -21,94$, $\gamma = -190,35$, $\delta = 5,63$, $\lambda = 497,16$, $\text{adj. } R^2 = 0,962$.



Rys. 6.10. Zmiany średniej energii jednostkowej ściskania w zależności od wielkości ziaren a) kukurydzy, b) ryżu dla różnych poziomów wilgotności (MC)



Rys. 6.11. Mediana rozkładu log-normalnego w funkcji grubości ziarna i wilgotności dla: a) kukurydzy, b) ryżu

Ograniczenie zakresu analizy dla ryżu do wartości wilgotności poniżej 22%, gdzie zmiany energii wraz z wilgotnością mają charakter monotoniczny, pozwoliło

na sformułowanie modelu prostszego opisującego medianę dla dwóch rodzajów ziaren w postaci:

$$e_{50} = a \cdot MC^b \cdot T^c \quad (6.12)$$

gdzie dla kukurydzy $a = 34,20$, $b = 0,93$, $c = -0,85$, $\text{adj. } R^2 = 0,874$, a dla ryżu $a = 5590,05$, $b = -0,85$, $c = -4,32$, $\text{adj. } R^2 = 0,957$.

Konieczne są dalsze badania na grupie ziaren o innej strukturze wewnętrznej, a tym samym innych właściwościach mechanicznych, a także badania w zakresie obciążeń dynamicznych i ich wielokrotności, w celu sformułowania uogólnień. Zaobserwowane zależności jednoznacznie wskazują na silny związek pomiędzy energią minimum rozdrabniania a właściwościami biomasy i potwierdzają tezę, że uwzględnianie właściwości biomasy jest konieczne dla precyzyjnego modelowania procesu ich podziału, w szczególności prawdopodobieństwa rozdrobnienia pod wpływem obciążeń i obliczania energii rozdrabniania.

6.5. WPŁYW KROTNOŚCI OBCIĄŻEŃ NA ENERGIĘ I PRAWDOPODOBIEŃSTWO ROZDRABNIANIA

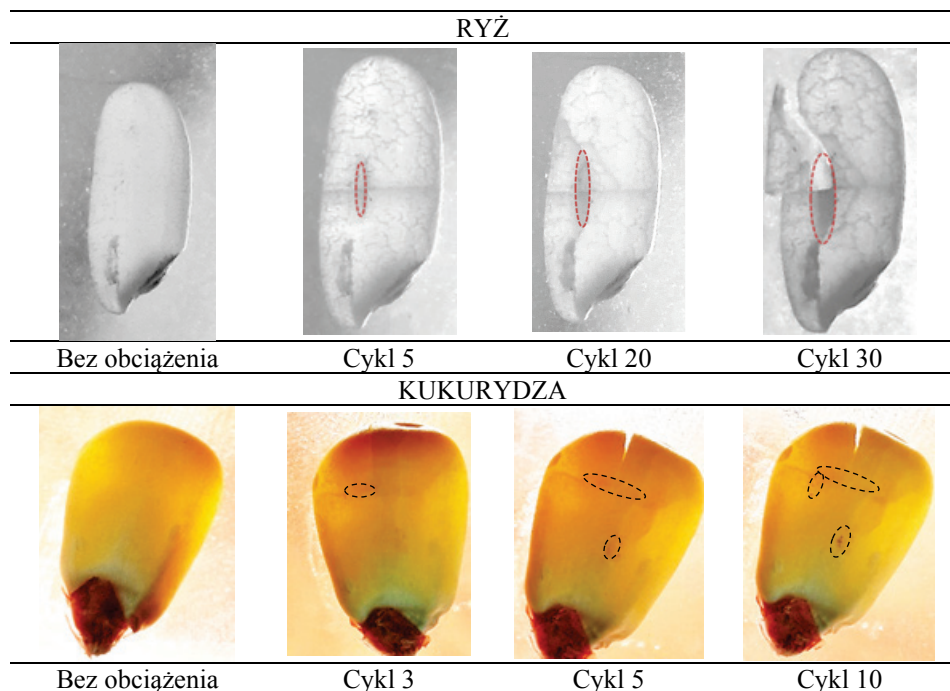
W maszynach przetwórczych ziarna poddawana są obciążeniom o różnej wielkości, kierunku i amplitudzie [4,5,47]. Często do podziału ziarna dochodzi na skutek obciążeń o niewielkiej energii, jednak wielokrotnie powtarzanych [4, 5, 47], co jest związane z akumulacją powstających uszkodzeń wewnętrznych i ich dalszej propagacji [148].

Ziarna ryżu i kukurydzy wykazują właściwości wiskoplastyczne. Udział odkształceń sprężystych i plastycznych podczas obciążania ściśle zależy od zawartości wilgoci, która zmienia zachowanie ziarna z bardziej kruchej dla małej wilgotności na bardziej plastyczne, gdy ziarno cechuje się dużą zawartością wody. W związku z tym zmienia udział energii odkształceń plastycznych i sprężystych [108] oraz zmienia się wartość energii rozdrabniania podczas pojedynczego kontaktu, jak wykazano w poprzednim rozdziale.

Zgodnie z założeniami mechaniki uszkodzeń, wady wewnętrzne kumulują się po każdym kontakcie, a prawdopodobieństwo pęknięcia jest zależne od historii poprzedniego stanu wad [148, 149]. Należy brać także pod uwagę, że prawdopodobieństwo rozdrobnienia zwiększy się dla ziarna obciążanego wielokrotnie w tym samym punkcie, w stosunku do ziarna obciążanego wielokrotnie w różnych punktach [149].

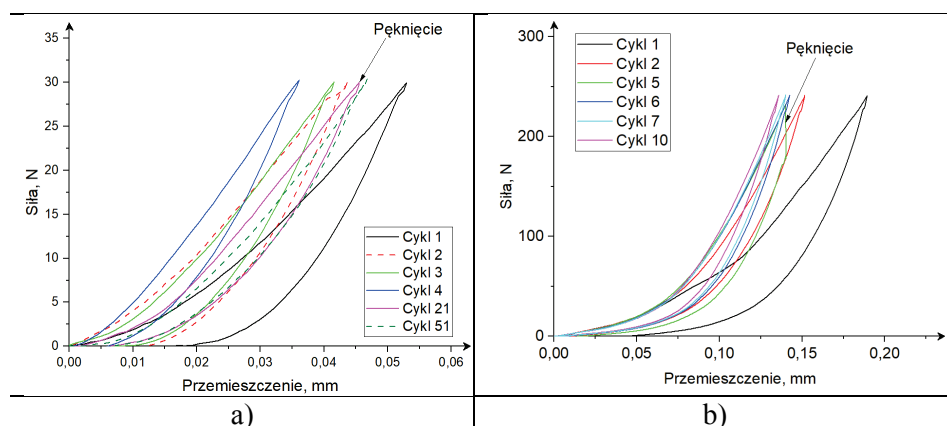
Analiza zmian energii odkształceń plastycznych i sprężystych podczas wielokrotnego obciążania pojedynczych ziaren ryżu i kukurydzy wykazała, że podział struktury wewnętrznej następuje wskutek akumulacji pęknięć i mikro-pęknięć powstających podczas trwałego odkształcenia plastycznego w miejscu styku, które pozostawało niezmiennie. Na rysunku 6.12 przedstawiono rozwój wad struktury wewnętrznej powstających w wyniku wielokrotnych obciążeń z zaznaczeniem obszaru trwałych odkształceń plastycznych w miejscu kontaktu płyta obciążająca – ziarno. W przypadku ryżu widać wyraźnie zwiększający się

obszar trwałego odkształcenia plastycznego w punkcie kontaktu oraz pojawiające się wady wewnętrzne propagujące wzdłuż najmniejszego przekroju ziarna, a następnie rozchodzące się promieniście od punktu styku, który ze względu na eliptyczny kształt ziarna znajdował się niemalże bezpośrednio nad punktem centralnym przekroju ziarna. W przypadku ziaren kukurydzy także obserwowano trwałe odkształcenia plastyczne w punkcie styku. W odróżnieniu od ziaren ryżu punkt styku nie znajdował się nad centralnym punktem przekroju, lecz w najgrubszej części ziarna, co spowodowane jest spłaszczonym i nieregularnym ukształtowaniem powierzchni ziarna kukurydzy. W kolejnych cyklach punkt kontaktu powiększał się i dodatkowo pojawiały się kolejne punkty styku na powierzchni ziarna, po osiągnięciu pewnej wartości trwałego odkształcenia plastycznego. W zależności od kształtu ziarna pęknięcie przebiegało przez centralną część ziarna od punktu kontaktu w kierunku zależnym od wypukłości ziarna i punktów podparcia o dolną płytę. Ziarna, które nie stykały się całą powierzchnią o płytę, a punkty styku stanowiły przeciwległe krawędzie ziarna, pękały przez środek, ponieważ oprócz ściskania dodatkowo dochodziło do zginania przekroju. Wskutek propagacji wad wewnętrznych następowało osłabienie ziaren ryżu i kukurydzy, a widoczne pęknięcia i podział ziarna następował po osiągnięciu pewnej krytycznej liczby obciążeń n_{kr} , gdy wartość miejscowych naprężeń wywołanych odkształceniem plastycznym przekraczała lokalną wytrzymałość.

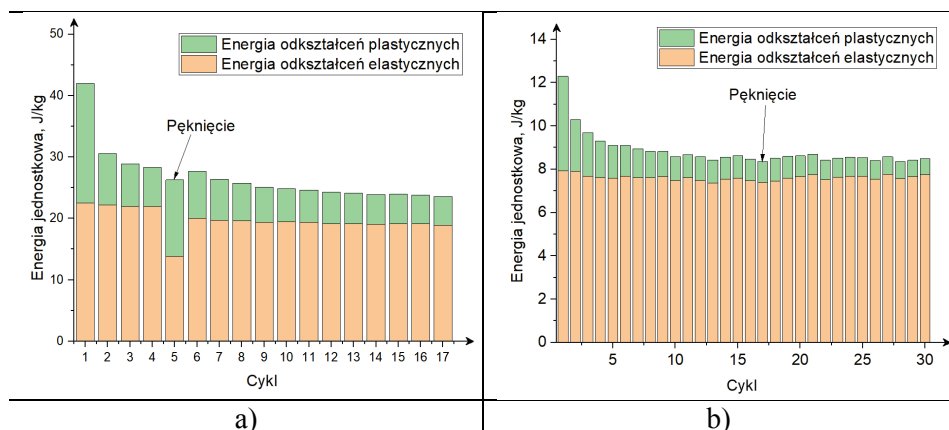


Rys. 6.12. Postaci uszkodzenia ziaren ryżu o wilgotności 12,8% w kolejnych cyklach obciążania siłą 30 N i ziaren kukurydzy o wilgotności 12,4% obciążanych siłą 260 N

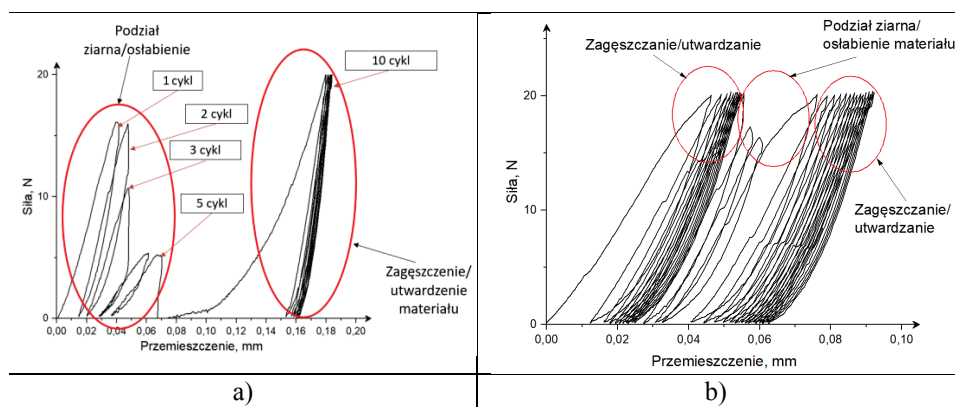
Analiza krzywych siła-przemieszczenie wykazała, że przemieszczenia (tożsame ze zmniejszeniem wymiaru ziarna w kierunku obciążenia) zmniejszały się w kolejnych cyklach (wzrost sztywności na skutek akumulacji dyslokacji plastycznych), aż do momentu wystąpienia uszkodzenia, a następnie zwiększały się (następowało zmniejszenie sztywności na skutek utraty spójności) i znów zmniejszały się (zagęszczanie materiału) (rys. 6.13a i b)). Podobną tendencję obserwowano dla pola powierzchni między krzywą obciążania i odciążania (reprezentującego energię odkształceń plastycznych), (rys. 6.14), co świadczy o stopniowym uszkodzeniu struktury ziaren, gdzie na przemian występuje osłabianie i utwardzanie (w wyniku zagęszczenia, zmniejszenia odległości pomiędzy elementami struktury wewnętrznej) materiału. Gdy w pierwszym cyklu obciążenia pojawiło się pęknięcie zewnętrzne (rys. 6.15a), odkształcenia w kolejnych cyklach narastają i obserwuje się wtórne pęknięcie ziarna pod wpływem mniejszego obciążenia. W momencie gdy zadawane obciążenie jest niewystarczające do wywołania dalszej fragmentacji ziarna, następuje zagęszczanie materiału. Gdy pęknięcie nie wystąpiło w pierwszym cyklu (rys. 6.15b), przemieszczenie i pole powierzchni pod krzywą siła-przemieszczenie zmniejszało się w kolejnych cyklach, aż do momentu wystąpienia uszkodzenia struktury po osiągnięciu krytycznej liczby obciążeń, dla której osiągnięto krytyczną wartość odkształcenia plastycznego. Można zauważyć, że siły zmniejszały się a przemieszczenia zwiększały w cyklach, w których obserwowano podział ziarna, co wskazuje na propagację pęknięć na skutek zwiększania się liczby wad wewnętrznych i zewnętrznych. Wtórne pęknięcia i podział ziarna wymaga większego obciążenia lub dodatkowych cykli kompresji. W wyniku akumulacji dyslokacji plastycznej zmienia się sztywność ziarna [121, 148, 149], co powoduje występowanie osłabiania i utwardzania materiału po osiągnięciu pewnej krytycznej liczby obciążeń, co obserwowano dla elasto-plastycznych granulek z tritlenku diglinu ($\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$) [149].



Rys. 6.13. Krzywe siła-przemieszczenie w kolejnych cyklach obciążania: a) pojedynczego ziarna ryżu o wilgotności 12,8% siłą 30 N, b) pojedynczego ziarna kukurydzy o wilgotności 8% siłą 240 N



Rys. 6.14. Zmiany energii odkształceń w kolejnych cyklach obciążenia ziaren: a) kukurydzy (wilgotność 8%, siła obciążająca 240 N) i b) ryżu (wilgotność 16%, siła obciążająca 20 N)



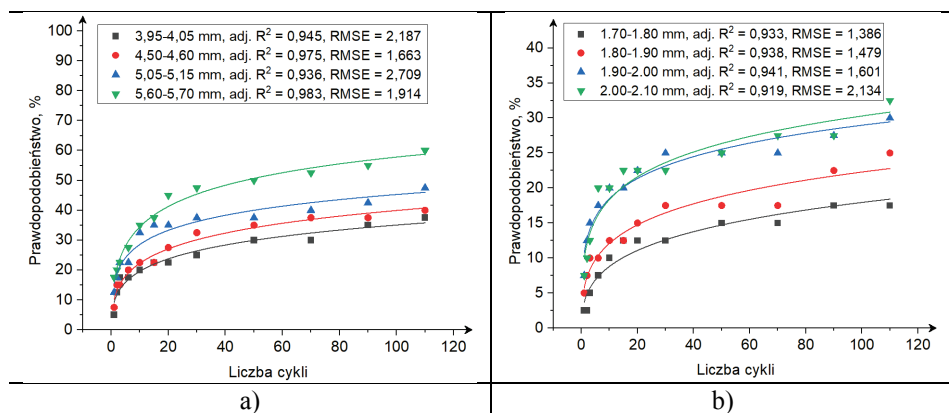
Rys. 6.15. Przykładowe krzywe siła-przemieszczenie wielokrotnie obciążanych ziaren: a) pęknięcie w pierwszym cyklu, b) pęknięcie w kolejnych cyklach

Analiza zmian energii w kolejnych cyklach obciążeń wykazała, że energia jednostkowa w dalszych cyklach ściskania maleje (rys. 6.14). Pierwszy cykl obciążenia charakteryzuje się największym nakładem energetycznym i największą energią na odkształcenie plastyczne ziarna. W kolejnych cyklach energia odkształcenia plastycznego maleje, aż do krytycznego cyklu, w którym następuje utrata spójności przez ziarno. Energia odkształcenia elastycznego praktycznie nie zmieniała się w następnych cyklach obciążeń, choć jej obniżenie odnotowano w momencie pęknięcia, gdy w jego wyniku nastąpił gwałtowny spadek siły (rys. 6.14 i 6.15). Podczas obciążania ziaren siłami o wartości niższej niż siła niszcząca przeważającą część energii odkształceń stanowi energia odkształceń elastycznych, a znaczącej zmianie ulega energia odkształceń plastycznych, co

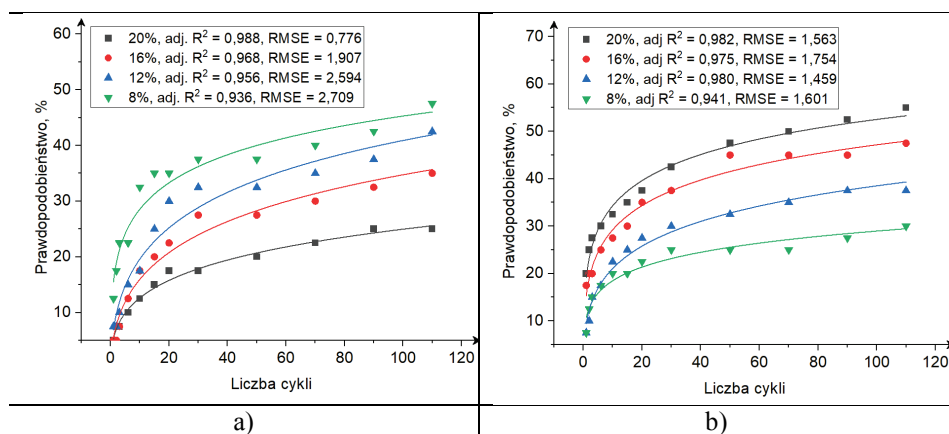
powoduje zmianę całkowitej energii jednostkowej podczas ściskania ziarna. Za-uważalne jest także, że energia w cyklu, w którym nastąpiła utrata spójności, jest zdecydowanie mniejsza niż energia niszcząca podczas pojedynczego obciążenia, wynikająca z wytrzymałości ziarna.

Przedstawione powyżej zależności wykazują związek pomiędzy liczbą cykli obciążenia a energią minimum potrzebną do podziału ziarna. Prowadzone wcześniej badania wskazały, że wraz ze wzrostem cykli obciążeń, następuje osłabienie materiału, w związku z tym prawdopodobieństwo rozdrobnienia wzrasta [148, 287, 296]. Dla ziaren ryżu i kukurydzy obserwowano podobne zależności, tj. prawdopodobieństwo wystąpienia pęknięcia wzrastało wraz ze wzrostem liczby cykli (rys. 6.16 i 6.17). Podobnie jak w przypadku rozkładów prawdopodobieństwa w zależności od energii jednostkowej wywołującej pęknięcie ziarna, prawdopodobieństwo rozdrobnienia w zależności od liczby cykli obciążeń można opisać z dobrym dopasowaniem za pomocą rozkładu logarytmiczno-normalnego (adj. $R^2 > 0,9$ oraz niskie wartości RMSE, rys. 6.16 i 6.17). Wynika to przede wszystkim z wykazanych wcześniej zmian energii w kolejnych cyklach obciążeń i jest zgodne z założeniem, że podział ziarna następuje w wyniku akumulacji uszkodzeń [148, 287]. Jak pokazano na rysunku 6.12, w pierwszych cyklach powstają mikropęknięcia wewnątrz struktury ziarna, które następnie, wraz z kolejnymi cyklami przechodzą w makropęknięcia, w następstwie czego dochodzi do fragmentacji ziarna. Analiza rozkładu prawdopodobieństwa dla różnej liczby cykli obciążeń i różnej grubości cząstek wykazała, że ziarna ryżu i kukurydzy o większej grubości wymagają większej liczby obciążeń do wystąpienia pęknięcia, co jest zgodne z wynikami badań prezentowanymi dla innych materiałów [149, 287, 289]. Jest to uwarunkowane naturalnie występującymi wadami struktury. Jak wskazano w [287], materiały o mniejszym wymiarze posiadają względnie mniejszą ilość mikropęknięć o mniejszym wymiarze, co powoduje, że są one mniej podatne na rozdrobnienie. W związku z tym mniejsze ziarna wymagają większych nakładów energii na rozdrobnienie (co wykazano w poprzednim rozdziale), ale także większej liczby cykli obciążeń, jeśli energia podczas obciążania jest mniejsza niż minimalna energia potrzebna do podziału ziarna.

Dla ziaren poddanych wielokrotnym obciążeniom obserwowano zmiany prawdopodobieństwa rozdrabniania w zależności od wilgotności. Wilgotne ziarna kukurydzy wymagały zastosowania większej liczby cykli obciążeń niż ziarna suche. Zasadniczo dla ziaren kukurydzy liczba cykli obciążeń do podziału ziarna wzrastała wraz ze wzrostem wilgotności (rys. 6.17). W przypadku ziaren ryżu występowała zależność odwrotna, tj. wraz ze wzrostem wilgotności liczba cykli obciążeń potrzebnych do rozdrobnienia ziarna malała. Powyższe zależności są zgodne z obserwacjami podczas ściskania pojedynczych ziaren opisanych we wcześniejszym rozdziale, gdzie prawdopodobieństwo rozdrabniania cząstek dla tej samej wartości energii obciążenia zmieniało się wraz z wilgotnością. Podczas jednoczesnego obciążania grupy ziaren obserwowano zjawisko selekcji, to znaczy słabsze, mniej wytrzymałe ziarna przeżywały mniejszą liczbę cykli obciążeń niż ziarna o większej wytrzymałości [168].



Rys. 6.16. Prawdopodobieństwo rozdrobnienia ziaren: a) kukurydzy (wilgotność 8%, siła obciążająca 4500 N) i b) ryżu (wilgotność 8%, siła obciążająca $F = 200$ N) w funkcji liczby cykli dla ziaren o różnej grubości (linie ciągłe przedstawiają dopasowany rozkład logarytmiczno-normalny, dla których adj. R^2 i RMSE podano w legendzie)



Rys. 6.17. Prawdopodobieństwo rozdrobnienia ziaren: a) kukurydzy (siła obciążająca 4500 N, grubość ziarna $H: 5,05-5,15$ mm) i b) ryżu (siła obciążająca $F = 200$ N, grubość ziarna $H = 1,90-2,00$ mm) w funkcji liczby cykli dla ziaren i wilgotności (linie ciągłe przedstawiają dopasowany rozkład logarytmiczno-normalny, dla których adj. R^2 i RMSE podano w legendzie)

Dla przedstawionych na rysunkach 6.16 i 6.17 rozkładów wyznaczono zależności opisujące medianę n_{50} jako funkcję grubości ziaren (H) i funkcję wilgotności (MC) w postaci:

$$n_{50} = a \cdot H^c \quad (6.13)$$

$$n_{50} = d \cdot MC^b \quad (6.14)$$

W tabeli 6.6 zestawiono wartości współczynników zależności 6.13 i 6.14 wraz z wartościami adj. R^2 dla wyznaczonych krzywych z rysunków 6.16 i 6.17. W obu przypadkach są to zależności potęgowe, podobnie jak to miało miejsce w dla związków mediany rozkładów utworzonych w zależności od poziomu energii e_{50} i jej związków z wilgotnością i wielkością ziarna.

Tabela 6.6. Współczynniki równania opisującego medianę rozkładu prawdopodobieństwa w zależności od liczby cykli obciążeń

	a	c	Adj R^2	d	b	Adj. R^2
Kukurydza	1977042,20	-5,78	0,982	27327200,00	7,69	0,978
Ryż	4734403,18	-10,55	0,997	669818000	-5,77	0,999

Należy mieć na uwadze, że liczba cykli obciążeń skutkujących fragmentacją będzie zależna także od wartości sił czy prędkości obciążenia, które wpływają na wartość energii podczas obciążenia [264, 287]. Zwiększanie sił obciążających powoduje, że struktura wewnętrzna ziarna szybciej ulega degradacji (obniżeniu ulega liczba cykli obciążeń do zniszczenia), co związane jest z jednoczesnym większym przyrostem wad struktury podczas pojedynczego kontaktu [299]. Wzrost sił powoduje wzrost przemieszczeń, w związku z tym osiągnięcie krytycznej wartości przemieszczenia, przy której następuje fragmentacja, zachodzi szybciej [149].

Badania przeprowadzono w statycznych warunkach przy niewielkiej prędkości obciążania. W typowych warunkach podczas rozdrabniania prędkości zderzeń są znacznie wyższe, co może wywierać wpływ na prawdopodobieństwo rozdrabniania. Dalsze badania powinny więc uwzględniać ustalenie związków pomiędzy wartościami sił obciążających, a także prędkościami obciążania w warunkach dynamicznych.

7. BADANIA RELACJI PIĘTROWEJ STRUKTURY SYSTEMU ROZDRABNIANIA

7.1. MATERIAŁ I METODY

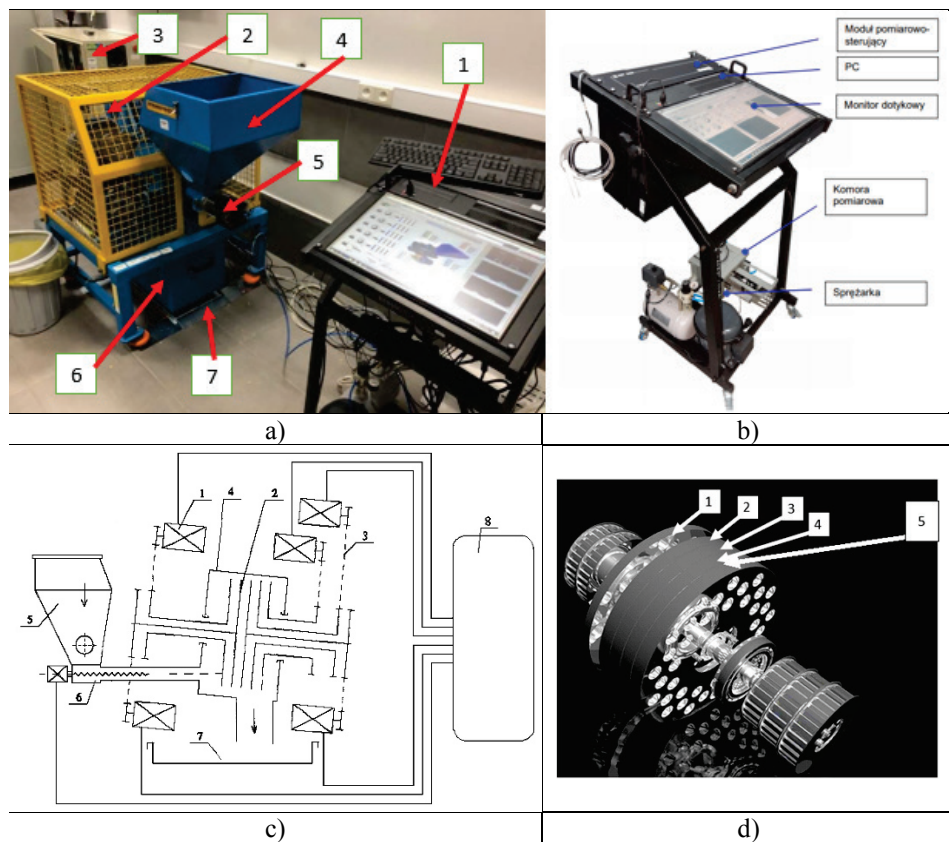
7.1.1. Innowacyjne stanowisko badań rozdrabniania

Badania relacji piętrowej struktury systemu rozdrabniania w celu wyznaczenia zależności pomiędzy parametrami maszynowymi i procesowymi a wybranymi wskaźnikami rozdrabniania wykonano na innowacyjnym stanowisku składającym się z rozdrabniacza pięciotarczowego z tarczami wielootworowymi oraz systemu kontrolno-pomiarowego wyposażonego w inteligentny system sterowania i monitorowania wskaźników rozdrabniania w czasie rzeczywistym. Na rysunku 7.1 przedstawiono widok stanowiska i systemu kontrolno-pomiarowego.

Główne elementy konstrukcyjne rozdrabniacza to korpus, komora robocza z zespołem roboczym złożonym z pięciu tarcz rozdrabniających, osadzonych na wale napędowym, innowacyjny układ napędowy z przekładniami pasowo-zębatymi, kosz zasypowy z podajnikiem ślimakowym, kosz odbiorczy. Unikalną cechą rozdrabniacza jest zespół roboczy i napędowy (rys. 7.1c). W skład układu rozdrabniającego wchodzi pięć wielootworowych tarcz (rys. 7.1 d) o cechach konstrukcyjnych przedstawionych w tabeli 7.1. Tarcze osadzone są na indywidualnych wałach i tulejach napędowych. Napęd realizowany jest za pomocą układu pięciu silników elektrycznych, sterowanych za pomocą falowników i zespołu przekładni pasowych zębatych, każda o innym przełożeniu, zapewniających przeniesienie napędu na tarcze robocze (pat. 221397 [300]). Takie rozwiązanie pozwala na indywidualny napęd i zmianę prędkości kątowych niezależnie dla każdej z tarcz roboczych.

Sterowanie i monitorowanie parametrów podczas rozdrabniania odbywa się za pomocą opracowanego oryginalnego, specjalistycznego systemu kontrolno-pomiarowego. Główne elementy tego zespołu to: system podawania wsadu z podajnikiem ślimakowym o zmiennym wydatku regulowanym za pomocą silnika krokowego sprzężonego z modułem sterowania ADP 8084, system identyfikacji i pomiaru wielkości cząstek z komorą pomiarową wyposażoną w kamerę szybko-klatkową, magistrala i serwer portów: RS485, N-PORT umożliwiający komunikację z przemiennikami częstotliwości typu pDrive MX 600 4V2.0 VATECH silników napędzających tarcze rozdrabniacza, moduł sterowania LabJack 6,0, moduł zbierania sygnałów z czujników drgań (Vibdaq 2+, podłączenie czujników zgodnie ze standardem ICP) i czujników wilgotności umieszczonych w podajniku i na zewnątrz rozdrabniacza, waga produktu (zakres pomiarowy: 0–60 kg) umieszczona pod koszem odbiorczym rozdrobnionego materiału, szafa sterownicza, wewnątrz której umieszczono przemienniki częstotliwości oraz jednostka sterująca w postaci komputera PC (procesor: Intel® Core™ i5-2400 (6M Cache,

3.10 GHz), ilość rdzeni 4, pamięć operacyjna: 8 GB, 4 porty USB 2.0, 2 porty USB 3.0, Windows 10, obudowa przemysłowa RACK19) i 17-calowy ekran dotykowy LCD (rodzaj matrycy TN, rozdzielczość nominalna 1440 x 900 pikseli) z dedykowanym oprogramowaniem sterującym MŁYN_2019 pracującym w środowisku LABView (rys. 7.2).



Rys. 7.1. a) Stanowisko badawcze rozdrabniacza wielotarczowego: 1 – jednostka sterownicza, 2 – rozdrabniacz pięciotarczowy, 3 – szafa sterownicza, 4 – podajnik ślimakowy, 5 – silnik krokowy, 6 – kosz odbiorczy, 7 – waga [12]; b) Jednostka sterownicza z komorą pomiarową wielkości cząstek produktu rozdrabniania [12]; c) Schemat układu rozdrabniania i układu napędowego: 1 – silnik elektryczny, 2 – pięciotarczowy zespół roboczy, 3 – przekładnia pasowa zębata, 4 – korpus rozdrabniacza, 5 – kosz odbiorczy produktu, 6 – podajnik ślimakowy, 7 – kosz odbiorczy produktu, 8 – jednostka zasypowy, 8 – jednostka sterownicza [300]; d) Widok zespołu rozdrabniającego: 1–5 – kolejne tarcze robocze [12]

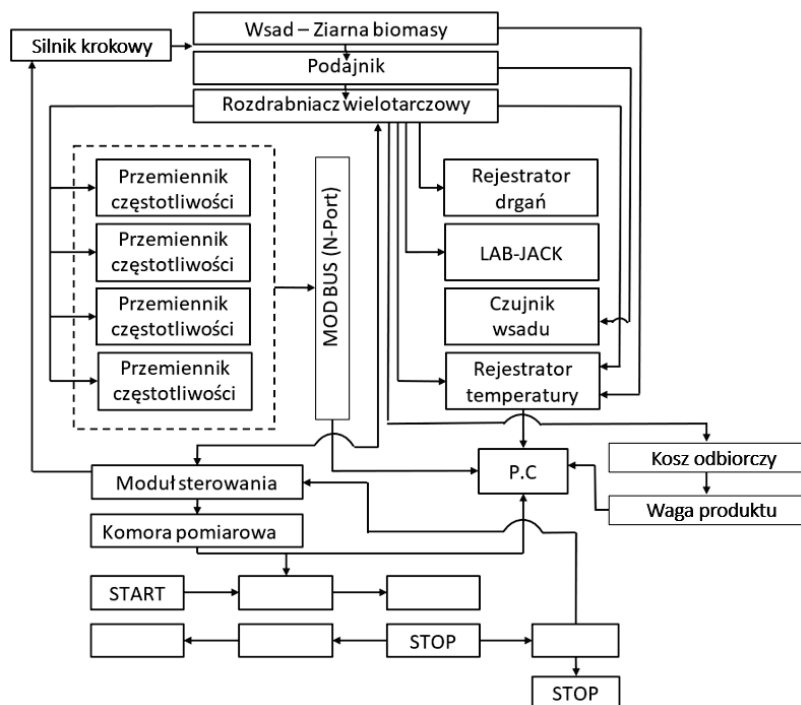
Zastosowanie systemu kontrolno-pomiarowego umożliwia rejestrację z częstotliwością próbkowania co 0,5 s, takich parametrów jak: wilgotność względna w pomieszczeniu, wilgotność materiału wsadowego, temperatura otoczenia, pobór

mocy, prędkości kątowne i momenty obrotowe dla każdej tarczy, masę materiału w koszu odbiorczym, wielkość i liczbę cząstek w danym przedziale wielkości wymiarowej. Wszystkie monitorowane wartości dostępne są w postaci arkusza Excel, a dodatkowo chwilowe przebiegi mocy, momentów obrotowych i histogramy rozdrobnienia materiału w postaci graficznej wyświetlane są na bieżąco z poziomu interfejsu komunikacyjnego. Sterowanie może odbywać się ręcznie lub za pomocą oprogramowania MŁYN_2019 z poziomu pulpitu sterowniczego (rys. 7.1).

Tabela 7.1. Cechy geometryczne tarcz roboczych rozdrabniacza pięciotarczowego RWT-KZ5

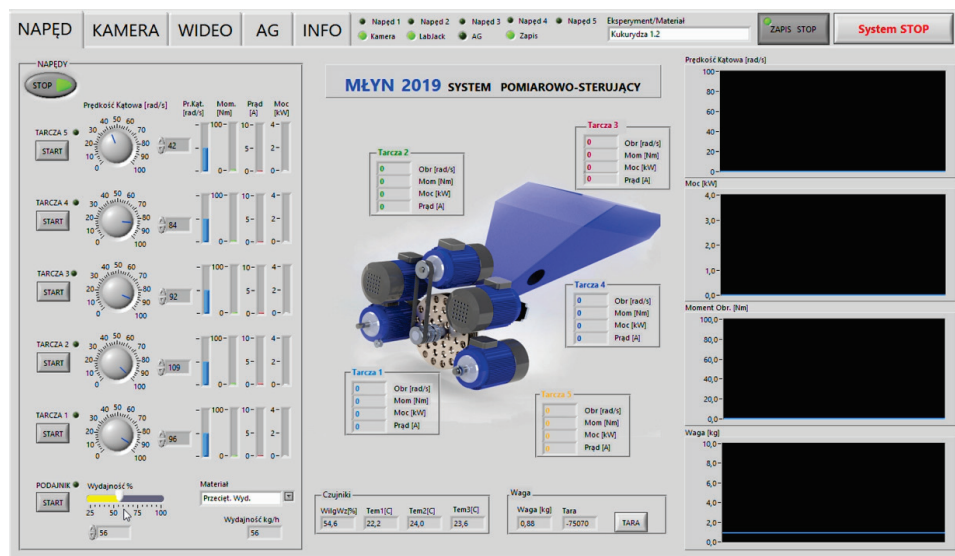
Parametr	Jednostka	Tarcza				
		1	2	3	4	5
Średnica tarczy D_n	mm	274	274	274	274	274
Liczba otworów l_n	szt.	14	22	27	33	39
Średnica otworów d_n	mm	30	23	21	17,5	17,5
R1	mm	85	82,4	79,5	79,5	82
R2	mm	101,5	107,4	95,5	99,5	102
R3	mm	–	–	110,5	114,5	117

R1 – promień rozmieszczenia otworów w rzędzie 1, R2 – promień rozmieszczenia otworów w rzędzie 2, R3 – promień rozmieszczenia otworów w rzędzie 3



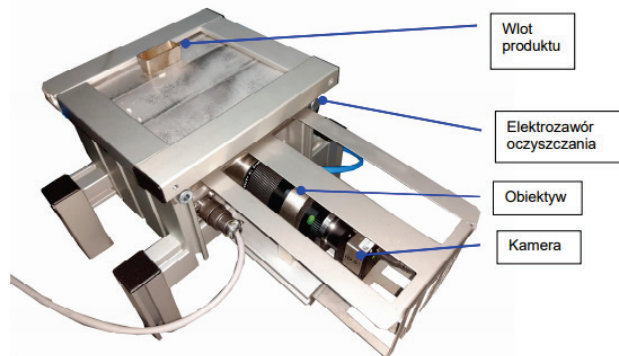
Rys. 7.2. Schemat struktury układu kontrolno-pomiarowego rozdrabniacza pięciotarczowego RWT_KZ5

Na rysunku 7.3. przedstawiono interfejs komunikacyjny oprogramowania pomiarowo-sterującego MŁYN_2019. Sterowanie rozdrabniaczem realizowane jest za pomocą przycisków START/STOP: NAPĘD – uruchomienie napędu, TARCZA 1 → TARCZA 5 – uruchomienie poszczególnych tarcz (za pomocą pokręteł ustawiana jest prędkość kątowna), PODAJNIK – uruchomienie podajnika (za pomocą suwaka, ustawiany jest wydatek w zakresie 0-100%, skalibrowany dla ziaren ryżu, kukurydzy, żyta i pszenicy), System STOP – kończenie pracy programu, Zapis START/STOP – rozpoczęcie i zakończenie rejestracji wyników (zielona dioda informuje o stanie zapisu).



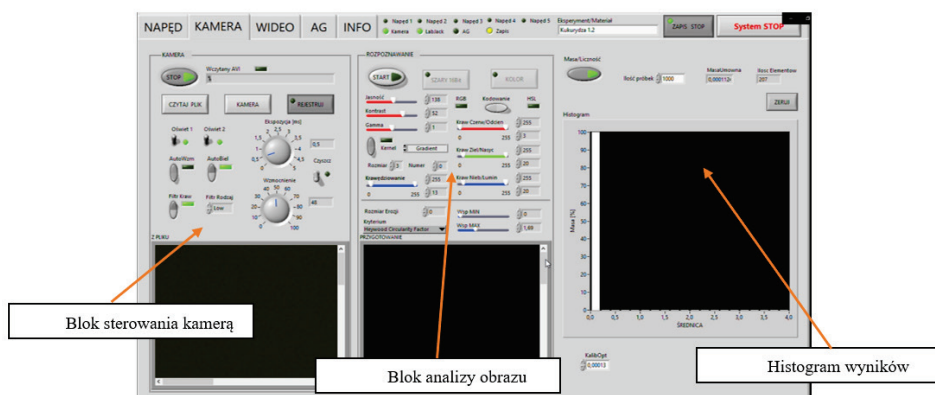
Rys. 7.3. Moduł analizy wyników badań rozdrabniacza – aplikacja sterująca MŁYN 2019

Za pomocą systemu kontrolno-pomiarowego możliwe jest analizowanie wielkości cząstek produktu rozdrabniania. System przeznaczony jest do badania parametrów proszków lub granulatów i działa na zasadzie cyfrowego przetwarzania obrazów. Materiał z komory rozdrabniania transportowany jest za pomocą podajnika wibracyjnego PL-2 Wibramet (moc 25 W, szybkość podawania 0-6 m·min⁻¹) do komory pomiarowej (rys. 7.4) wyposażonej w kolorową kamerę CMOS UI-1480SE-C-HQ (rozdzielczość: 2560x1920 pikseli, szybkość: 25 FPS) z obiektywem telecentrycznym COMPUTAR 55 i 5 lamp bocznych i czołowych LED o barwie białej. Obiektyw kamery oczyszczany jest z pyłu i cząstek produktu przed pomiarem poprzez sprężarkę bezszumową WERTHER SilAir 15.



Rys. 7.4. Komora pomiarowa systemu analizy wielkości cząstek innowacyjnego stanowiska badawczego wielotarczowego rozdrabniania

Sterowanie systemem analizy wielkości cząstek odbywa się z pulpitu sterowniczego w zakładkach KAMERA i WIDEO systemu oprogramowania MŁYN_2019.



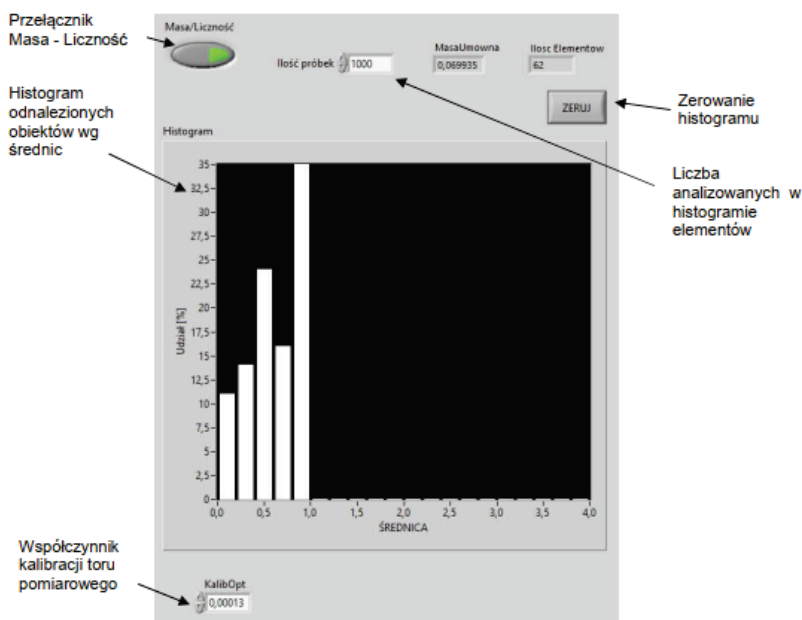
Rys. 7.5. Zakładka analizy obrazu i odczytu wielkości produktu rozdrabniania

Panel KAMERA (rys. 7.5) umożliwia wczytanie obrazu z kamery znajdującej się w komorze pomiarowej lub z pliku dyskowego AVI. Panel podzielono na trzy bloki: sterowania kamerą, analizy obrazu i wizualizacji wyników w postaci histogramu. Z poziomu panelu sterowania kamerą możliwe jest uruchomienie kamery (przycisk kamera START/STOP), dostosowania oświetlenia (Oświet 1 – czołowe, Oświet 2 – boczne), ustawienie czasu ekspozycji, jasności i wzmocnienia obrazu, korekty barw czy filtracji krawędzi obiektów. Przycisk REJESTRUJ rozpoczyna rejestrację obrazów z kamery i ich zapis na dysku. Za pomocą przycisku CZYTAJ PLIK wczytywane są pliki zapisane wcześniej na dysku.

Zadaniem bloku analizy obrazu jest identyfikacja wielkości cząstek produktu rozdrabniania znajdujących się w obrębie komory pomiarowej, ich

policzenie oraz pomiar powierzchni na obrazie wideo. Źródłem obrazu może być kamera lub wczytany plik. Obraz można wyświetlać zarówno w odcieniach szarości, jak i kolorze. Dodatkowo możliwa jest korekcja parametrów obrazu, takich jak jasność, kontrast oraz wyostrenie/zmiękczenie obrazu. Rozpoznawanie obiektów odbywa się po wyborze odpowiedniego kryterium z rozwijanej listy (domyślnie: kryterium Heywooda dla obiektów kołowych) o określeniu górnych i dolnych współczynników przetwarzania dla wybranego kryterium.

Obiekty rozpoznane są zliczane, mierzone, przeliczane i klasyfikowane. W panelu wizualizacji wyników wyświetlana jest bieżąca liczba elementów, rozpoznanych obiektów, masa umowna określająca bezwymiarowy współczynnik pozwalający na porównanie masy cząstek oraz histogram rozkładu masy lub ilości rozpoznanych cząstek w zależności od ich średnicy (rys. 7.6).



Rys. 7.6. Blok wizualizacji wyników w zakładce KAMERA – przykładowy histogram

7.1.2. Plan badań

Celem przeprowadzonego eksperymentu maszynowego było scharakteryzowanie i wyznaczenie postaci matematycznych zależności piętrowej struktury systemu rozdrabniania, tj. zależności pomiędzy parametrami konstrukcyjnymi maszyn i procesowymi a wybranymi wskaźnikami rozdrabniania na przykładzie scharakteryzowanego w poprzednim rozdziale rozdrabniacza pięciotarczowego RWT_KZ5.

Do badań wykorzystano ziarna ryżu i kukurydzy o wilgotności odpowiednio 12,234%, a ryżu 11,342% oznaczonej za pomocą wagosuszarki MAC 210/NP (RADWAG, Radom, Polska), działającej na zasadzie termogravimetrycznej zgodnie z metodyką opisaną we wcześniejszych pracach [12].

Przeprowadzono eksperyment wieloczynnikowy, a badania miały charakter badań programowanych, gdzie celowo zmieniano wartości odpowiednich zmiennych niezależnych, aby można było zaobserwować pewne zależności.

Badania realizowano na podstawie czterech programów badawczych, w których przyjmowano inne zmienne niezależne, jako zmienne sterujące, aby określić ich wpływ na wskaźniki rozdrabniania:

- I. **Program I** – badanie wpływu zmian prędkości kątowych elementów rozdrabniających i krotności rozdrabniania.
- II. **Program II** – badanie wpływu wydatku (intensywności) dozowania wsadu i prędkości kątovej pierwszej tarczy.
- III. **Program III** – badanie wpływu intensywności dozowania wsadu i prędkości kątovej tarcz.
- IV. **Program IV** – wyznaczenie związków pomiędzy energią rozdrabniania a krzywymi uziarnienia produktu.

Każdorazowo rozdrabniano 1000 g próbki ziaren ryżu i kukurydzy i rejestrowano z częstotliwością próbkowania 0,5 s momenty obrotowe, pobór mocy, prędkość kątovej poszczególnych tarcz, wilgotność wsadu, masę produktu i wielkość cząstek. Na podstawie zarejestrowanych parametrów wyznaczono wskaźniki rozdrabniania (tabela 7.2):

- pobór mocy, określaný jako średnia sum poboru mocy na poszczególnych tarczach rozdrabniacza,
- jednostkowe zużycie energii będące stosunkiem energii zużytej podczas rozdrobnienia do masy uzyskanego produktu,
- wydajność procesu określaną jako masa uzyskanego produktu w danym przedziale czasowym,
- stopień rozdrobnienia będący stosunkiem wymiaru ziarna przed i po rozdrobnieniu, w tym przypadku przyjęto 80% stopień rozdrobnienia (patrz tabela 7.2),
- energochłonność zintegrowaną jako wskaźnik umożliwiający ocenę procesu rozdrabniania pod względem energochłonności,
- emisyjność zrównoważoną, pozwalającą na ocenę emisyjności maszynowego procesu rozdrabniania, wynikającą z zużycia energii,
- funkcję oceny energetyczno-środowiskowej, która jednocześnie uwzględnia energochłonność i emisyjność rozdrabniania.

Tabela 7.2. Postaci matematyczne wyznaczonych wskaźników rozdrabniania

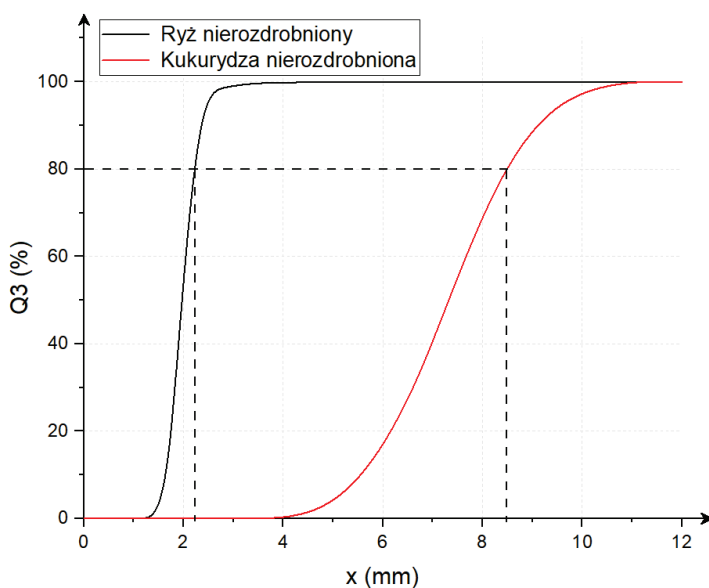
Wskaźnik	Postać matematyczna
Pobór mocy	$P_T = P_{c1} + P_{c2} + P_{c3} + P_{c4} + P_{c5} \quad (7.1)$ <p>P_T – pobór mocy rozdrabniacza, kW; $P_{c1, 2, 3, 4, 5}$ – całkowity pobór mocy podczas rozdrabniania odpowiednio na tarczy 1, 2, 3, 4, i 5, kW</p>
Jednostkowe zużycie energii [26]	$E_j = \frac{1}{m} \int_{t_0}^t P_T dt \quad (7.2)$ <p>E_j – jednostkowe zużycie energii, kWh/kg; m – masa produktu rozdrabniania, kg, P_T – całkowity pobór mocy podczas rozdrabniania, kW</p>
Wydajność [155]	$Q_r = \int_0^t m dt \quad (7.3)$ <p>Q_r – wydajność, kg/h, m – masa produktu rozdrabniania, kg</p>
Stopień rozdrobnienia [12, 203]	$\lambda_{80} = \frac{D_{80}}{d_{80}} \quad (7.4)$ <p>D_{80} – wymiar otworu sita, przez który przechodzi 80% materiału wsadowego, mm, d_{80} – wymiar otworu sita, przez który przechodzi 80% produktu rozdrabniania, mm</p>
Energochłonność zintegrowana [155, 199]	$E_{zint} = K_{Q_r} \cdot K_P \cdot K_{E_j} \cdot K_i \quad (7.5)$ <p>K_{Q_r} – wskaźnik wydajności rozdrabniania, $K_{Q_r} = Q_r$, K_P – wskaźnik zapotrzebowania mocy, $K_P = \frac{1}{P_r}$, K_{E_j} – wskaźnik jednostkowego zapotrzebowania na energię, $K_{E_j} = \frac{1}{E_j}$, K_i – wskaźnik stopnia rozdrobnienia, $K_i = i_{80}$</p>
Emisyjność zrównoważona [155, 199]	$\Delta E_{eco} = E_{es} - E_{Rt} \quad (7.6)$ $E_{es} = W_i \cdot Q_r \cdot t_R \cdot k_e \quad (7.7)$ $e_{zrów} = P_R \cdot \frac{1}{\Delta E_{eco}} \cdot \frac{1}{t_R} \quad (7.8)$ <p>ΔE_{eco} – przyrost korzyści ekologicznych, kWh, P_R – pobór mocy w procesie rozdrabniania, kW, t_R – czas rozdrabniania, h, E_{es} – energia elektryczna wytworzona ze spalania rozdrobnionej biomasy, kWh, E_{Rt} – energia elektryczna zużyta w procesie rozdrabniania, kWh, E_s – energia ze spalania biomasy, kWh, W_i – wartość opałowa rozdrobnionej biomasy, kWh · kg⁻¹, m_b – masa rozdrobnionej spalanej biomasy, kg, k_e – współczynnik kogeneracji, $k_e = 0,4$ [301]</p>
Funkcja oceny energetyczno-środowiskowej [155, 199]	$F_{e-s} = K_E \cdot K_e = \frac{1}{E_{zint}} \cdot \frac{1}{e_{zrów}} \quad (7.9)$ <p>K_E – kryterium energochłonności, K_e – kryterium emisyjności</p>

Aby wyznaczyć 80% wymiar cząstek materiału wsadowego oraz produktu rozdrabniania, przeprowadzono analizę granulometryczną na urządzeniu CAMSIZER (Retsch Technology GmbH, Haan, Germany), w zgodności z normą ISO 13322-2:2006 [302]. W ten sposób opracowano skumulowane rozkłady wielkości cząstek (w stosunku do objętości) zgodnie z zależnością (7.10) [303], a następnie odczytano wielkość cząstek, dla której udział procentowy objętości wsadu wynosił 80%.

$$Q_3(x, m) = \sum_{i=1}^m \bar{q}_3(x, i) \Delta x, i \quad (7.10)$$

gdzie: Q_3 – skumulowany rozkład wielkości cząstek, \bar{q}_3 – pole pod wykresem, x – średnica cząstki, która jest oznaczana jako najkrótsza cięciwa mierzono zbioru maksymalnych cięciw rzutu cząstek.

Rysunek 7.7 przedstawia wyznaczone w ten sposób skumulowane rozkłady granulometryczne dla ziaren przed rozdrobnieniem.



Rys. 7.7. Skumulowany rozkład wielkości cząstek ziaren ryżu i kukurydzy przed rozdrabnianiem

7.1.2.1. **Program I** – badanie wpływu zmian prędkości kątowych elementów rozdrabniających i krotności rozdrabniania na wskaźniki rozdrabniania

W programie I testowano różne prędkości kątowe tarcz rozdrabniacza z uwzględnieniem zmiennej liczby tarcz (1÷5) biorących udział w rozdrabnianiu zgodnie z tabelą 7.3. Za zmienne przyjęto liczbę tarcz biorących udział w rozdrabnianiu oraz całkowity przyrost prędkości kątowej tarcz $S\Delta\omega$, zdefiniowany jako suma wzrostu prędkości kątowej na każdej tarczy od najniższego poziomu prędkości równego $20 \text{ rad}\cdot\text{s}^{-1}$, przy której materiał jest rozdrabniany, podobnie jak w pracach [31, 304].

Tabela 7.3. Testowane ustawienia prędkości kątowych i liczby tarcz rozdrabniających

Przyrost prędkości kątowej	Prędkość kątowa tarcz				
	$S\Delta\omega$ $\text{rad}\cdot\text{s}^{-1}$	ω_1 $\text{rad}\cdot\text{s}^{-1}$	ω_2 $\text{rad}\cdot\text{s}^{-1}$	ω_3 $\text{rad}\cdot\text{s}^{-1}$	ω_4 $\text{rad}\cdot\text{s}^{-1}$
0	20	–	–	–	–
30	20	30	–	–	–
70	20	30	40	–	–
120	20	30	40	50	–
180	20	30	40	50	60
10	30	–	–	–	–
50	30	40	–	–	–
100	30	40	50	–	–
160	30	40	50	60	–
230	30	40	50	60	70
20	40	–	–	–	–
70	40	50	–	–	–
130	40	50	60	–	–
200	40	50	60	70	–
280	40	50	60	70	80
30	50	–	–	–	–
90	50	60	–	–	–
160	50	60	70	–	–
240	50	60	70	80	–
330	50	60	70	80	90
40	60	–	–	–	–
110	60	70	–	–	–
190	60	70	80	–	–
280	60	70	80	90	–
380	60	70	80	90	100
80	100	–	–	–	–
170	100	90	–	–	–

cd. tabeli 7.3.

250	100	90	80	–	–
320	100	90	80	70	–
380	100	90	80	70	60
70	90	–	–	–	–
150	90	80	–	–	–
220	90	80	70	–	–
280	90	80	70	60	–
330	90	80	70	60	50
60	80	–	–	–	–
130	80	70	–	–	–
190	80	70	60	–	–
240	80	70	60	50	–
280	80	70	60	50	40
50	70	–	–	–	–
110	70	60	–	–	–
160	70	60	50	–	–
200	70	60	50	40	–
230	70	60	50	40	30
40	60	–	–	–	–
90	60	50	–	–	–
130	60	50	40	–	–
160	60	50	40	30	–
180	60	20	40	30	20

7.1.2.2. Program II – badanie wpływu intensywności dozowania wsadu i prędkości kątowej pierwszej tarczy na wskaźniki rozdrabniania

W programie II testowano różne prędkości kątowe pierwszej tarczy rozdrabniacza w zakresie od $20 \text{ rad}\cdot\text{s}^{-1}$, zwiększając prędkość co $10 \text{ rad}\cdot\text{s}^{-1}$ aż do $100 \text{ rad}\cdot\text{s}^{-1}$ oraz intensywności dozowania wsadu w zakresie od $10 \text{ kg}\cdot\text{h}^{-1}$ zwiększając dawkę co $10 \text{ kg}\cdot\text{h}^{-1}$ aż do $100 \text{ kg}\cdot\text{h}^{-1}$.

7.1.2.3. Program III – badanie wpływu intensywności dozowania wsadu i prędkości kątowych tarcz na wskaźniki rozdrabniania

W programie III każdy eksperyment różnił się konfiguracją wydatku (intensywności dozowania wsadu) i prędkości kątowej tarcz, co przedstawiono w tabeli 7.4. Całkowity przyrost prędkości kątowej tarcz $S\Delta\omega$, zdefiniowany jako suma wzrostu prędkości kątowej na każdej tarczy od najniższego poziomu prędkości równego $20 \text{ rad}\cdot\text{s}^{-1}$, przy której materiał jest rozdrabniany, przyjęto jako zmienną, podobnie jak w pracach [31,304], w celu zbadania wpływu zmian prędkości kątowej tarczy na wskaźniki rozdrabniania, takie jak pobór mocy, jednostkowe zużycie energii, wydajność i stopień rozdrobnienia.

Tabela 7.4. Testowane ustawienia prędkości kątowych i intensywności dozowania wsadu [12]

Intensywność dozowania wsadu	Przyrost prędkości kątovej	Prędkość kątowa tarcz				
		ω_1	ω_2	ω_3	ω_4	ω_5
W	$S\Delta\omega$	ω_1	ω_2	ω_3	ω_4	ω_5
$\text{kg}\cdot\text{h}^{-1}$	$\text{rad}\cdot\text{s}^{-1}$	$\text{rad}\cdot\text{s}^{-1}$	$\text{rad}\cdot\text{s}^{-1}$	$\text{rad}\cdot\text{s}^{-1}$	$\text{rad}\cdot\text{s}^{-1}$	$\text{rad}\cdot\text{s}^{-1}$
100	200	100	80	60	40	20
	150	80	65	50	35	20
	100	60	50	40	30	20
	50	40	35	30	25	20
80	200	100	80	60	40	20
	150	80	65	50	35	20
	100	60	50	40	30	20
	50	40	35	30	25	20
60	200	100	80	60	40	20
	150	80	65	50	35	20
	100	60	50	40	30	20
	50	40	35	30	25	20
40	200	100	80	60	40	20
	150	80	65	50	35	20
	100	60	50	40	30	20
	50	40	35	30	25	20

7.1.2.4. Program IV – wyznaczenie związków pomiędzy energią rozdrabniania a krzywymi uziarnienia produktu

Na potrzeby wyznaczenia związków pomiędzy zużyciem energii a parametrami procesowymi, jako zmienną procesową sterującą przyjęto prędkość kątową na poszczególnych tarczach, a dokładniej średnią prędkość kątową ω_{sr} wyznaczoną jako średnia z prędkości kątowych poszczególnych tarcz. Przedstawiony w tabeli 7.5 program testowanych ustawień prędkości kątowych przyjęto za [12, 31] jako kontynuację badań charakterystyk użytkowych wielotarczowego rozdrabniacza biomasy na potrzeby wdrożenia.

Tabela 7.5. Ustawienia prędkości kątowych tarcz rozdrabniacza w czwartym programie badawczym [12, 31]

Grupa	Ustawienie	Prędkość kątowa tarcz					
		Średnia prędkość kątowa	ω_1	ω_2	ω_3	ω_4	ω_5
		ω_{sr} rad·s ⁻¹	rad·s ⁻¹	rad·s ⁻¹	rad·s ⁻¹	rad·s ⁻¹	rad·s ⁻¹
I	1	30	20	25	30	35	40
	2	40	20	30	40	50	60
	3	50	20	35	50	65	80
	4	60	20	40	60	80	100
II	1	60	100	80	60	40	20
	2	50	80	65	50	35	20
	3	40	60	50	40	30	20
	4	30	40	35	30	25	20
III	1	28	20	40	20	40	20
	2	37	45	25	45	25	45
	3	65	75	50	75	50	75
	4	92	100	80	100	80	100
IV	1	28	20	40	20	40	20
	2	36	20	60	20	60	20
	3	44	20	80	20	80	20
	4	52	20	100	20	100	20
V	1	68	100	20	100	20	100
	2	76	100	40	100	40	100
	3	84	100	60	100	60	100
	4	92	100	80	100	80	100

Skumulowane rozkłady wielkości cząstek produktu rozdrabniania aproksymowano za pomocą dwuparametrowego rozkładu Weibulla. Rozkład Weibulla, a dokładniej rozkład Rosin-Rammler-Sperling-Bennet (RRSB) jest bardzo często wykorzystywany do opisu rozkładów wielkości cząstek, w szczególności takich, w których dominujące są cząstki o bardzo małych rozmiarach [305, 306], dlatego w tej pracy posłużono się tym rozkładem. Jest on opisany równaniem [261, 305, 306]:

$$Q(x) = 1 - \exp\left(-\frac{x_a}{x_0}\right)^k, \quad x \in (0, \infty) \quad (7.11)$$

gdzie: x_a – względna lub bezwzględna średnica cząstek, mm x_0 , k – parametry rozkładu wyznaczone na podstawie danych eksperymentalnych.

Parametr x_0 odzwierciedla wielkość cząstki, dla której skumulowany rozkład wielkości cząstek przyjmuje wartość równą 0,632 [306] i nazywany jest także statystyczną średnią średnicą [261]. Parametr k jest parametrem określającym

niejednorodność rozkładu cząstek względem statystycznej średniej średnicy cząstek – im mniejsze k , tym większa jednorodność rozkładu wielkości cząstek wokół średniej statystycznej [261, 306]. Następnie wyznaczono zależności opisujące zmiany współczynników kształtu rozkładu RRSB w zależności od poziomu energii maszynowej rozdrabniania i średniej prędkości tarcz rozdrabniających. Aproksymacji rozkładów RRSB dokonano z wykorzystaniem algorytmu Lavenberga-Marquardta, przyjmując poziom istotności $p < 0,05$.

7.1.2.5. Analiza statystyczna

Analiza statystyczna wyników obejmowała podstawowy opis cech rozkładów zmiennych oraz analizę korelacji Pearsona w celu zbadania wpływu zmiennej niezależnej na zmienne zależne. Wykonano także analizę korelacji cząstkowych w przypadku kilku zmiennych mających wpływ na zmienną zależną. Za poziom istotności przyjęto $p < 0,1$ dla obu analiz. Zastosowano wieloraką regresję liniową i nieliniową w celu zbudowania i sprawdzenia dokładności modeli predykcyjnych zmiennych zależnych. Modele i współczynniki przyjęto za istotne dla $p < 0,05$. Dopasowanie modeli oceniono na podstawie kryterium BIC i współczynnika determinacji R^2 . Za najlepiej dopasowany uznano ten, dla którego R^2 było większe niż 0,3, a BIC przyjął najniższą wartość. Do analizy statystycznej wykorzystano oprogramowanie OriginPro 2021b (OriginLab Corporation, Northampton, Massachusetts, USA).

7.2. RELACJE POMIĘDZY PRĘDKOŚCIĄ KĄTOWĄ TARCZ I KROTNOŚCIĄ ROZDRABNIANIA A WYBRANYMI WSKAŹNIKAMI OCENY

Analiza wyników badań eksperymentalnych według I programu badawczego wykazała wpływ prędkości kątowych tarcz roboczych i krotności przejścia materiału przez zespół rozdrabniający na wybrane wskaźniki oceny procesu maszynowego rozdrabniania (tabela 7.6). Stwierdzono, że istnieje wysoka korelacja dodatnia między krotnością rozdrabniania wsadu a poborem mocy i stopniem rozdrobnienia ($0,5 < r < 0,7$ według skali Guilforda [307]) podczas rozdrabniania ryżu. Bardzo wysoka korelacja dodatnia ($0,7 < r < 0,9$) wystąpiła pomiędzy poborem mocy a krotnością rozdrabniania wsadu podczas rozdrabniania kukurydzy. Wysoką korelację dodatnią natomiast odnotowano pomiędzy stopniem rozdrobnienia a krotnością przejścia wsadu podczas rozdrabniania kukurydzy. Zaobserwowane korelacje pomiędzy krotnością rozdrabniania a poborem mocy i stopniem rozdrobnienia pokrywają się z wynikami badań wpływu krotności obciążania na energię i prawdopodobieństwo rozdrabniania przeprowadzone w warunkach laboratoryjnych na maszynie wytrzymałościowej. Wykorzystanie większej liczby tarcz podczas rozdrabniania prowadzi z jednej strony do zwiększenia sumarycznego

zapotrzebowania mocy do napędu i rozdrobnienia ziaren (rys. 7.8). Dla ustawień, w których rozdrabnianie zachodziło przy wykorzystaniu więcej niż jednej tarczy oraz dla których prędkości kątowe kolejnych tarcz malały od pierwszej ($100 \text{ rad}\cdot\text{s}^{-1}$) do ostatniej, obserwowano gwałtowny wzrost poboru mocy (rys. 7.8) przy jednoczesnym obniżeniu wydajności, co sugeruje występowanie zjawiska dławienia komory roboczej, z uwagi na utrudniony przepływ materiału i wzrost oporów ruchu. Z drugiej strony zastosowanie większej liczby tarcz powoduje wprowadzenie dodatkowych elementów rozdrabniających, otworowych krawędzi tnących, zwiększając tym samym krotność przejść materiału pomiędzy sąsiadującymi tarczami, co skutkuje wzrostem prawdopodobieństwa rozdrobnienia [38], ale także sukcesywnym zmniejszaniem wymiaru ziarna w kolejnych cyklach przejścia przez tarcze otworowe (rys. 7.9). Jest to zgodne z wcześniej prowadzonymi badaniami dla innych młynów, gdzie wykazano związek pomiędzy ilością kontaktów materiału z elementami roboczymi i rozdrobnieniem produktu [238]. Należy jednak zwrócić uwagę, że w przypadku kukurydzy rozdrabnianie przez zestaw czterech i pięciu tarcz nie powodowało dalszego wzrostu stopnia rozdrobnienia (rys. 7.9), co może wskazywać na osiągnięty graniczny stopień rozdrobnienia, możliwy przy zadanych wartościach energii zderzeń.

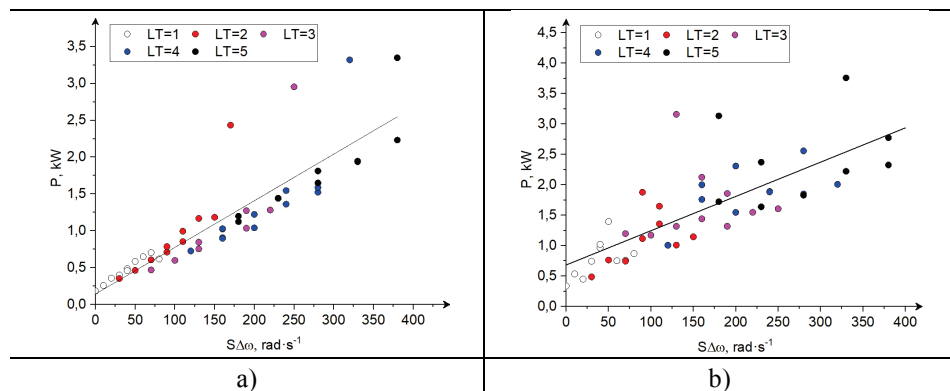
Tabela 7.6. Wyniki analizy korelacji Pearsona pomiędzy parametrami pracy młyna a wybranymi wskaźnikami rozdrobnienia

		P	Q_r	E_j	λ_{80}	E_{zint}	$e_{zrów}$	F_{e-s}
Ryż	LT	r-Pearsona	0,614*	0,076	0,438*	0,672*	-0,404*	0,403*
		p-value	< 0,1	0,601	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1
	$S\Delta\omega$	r-Pearsona	0,867*	-0,012	0,729*	0,875*	-0,539*	0,726*
		p-value	< 0,1	0,933	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1
Kukurydza	LT	r-Pearsona	0,757*	0,708*	-0,190	0,601*	0,153	-0,195
		p-value	< 0,1	< 0,1	0,186	< 0,1	0,288	0,175
	$S\Delta\omega$	r-Pearsona	0,757*	0,671*	-0,182	0,557*	0,082	-0,191
		p-value	< 0,1	< 0,1	0,205	< 0,1	0,569	0,184

Wykorzystano test istotności dwustronnej; (*) korelacja istotna dla $p < 0,1$, LT – liczba tarcz biorących udział w rozdrabnianiu, $S\Delta\omega$ – sumaryczny przyrost prędkości na tarczach, rad/s , P – moc, kW , Q_r – wydajność, $\text{kg}\cdot\text{h}^{-1}$, E_j – jednostkowe zużycie energii, $\text{kWh}\cdot\text{kg}^{-1}$, λ_{80} – 80% stopień rozdrobnienia, E_{zint} – energochłonność zintegrowana, $e_{zrów}$ – emisyjność zrównoważona, F_{e-s} – funkcja oceny energetyczno-środowiskowej

Analiza wykazała istotne statystycznie, wysokie korelacje dodatnie między $S\Delta\omega$ a poborem mocy i stopniem rozdrobnienia podczas rozdrabniania ziaren ryżu i kukurydzy (tabela 7.6 oraz rys. 7.8 i 7.9) w wielootworowej, wielotarczowej konstrukcji rozdrabniacza. W przypadku rozdrabniania ryżu z zastosowaniem jednej tarczy wzrost prędkości kątowych nie powodował istotnych zmian stopnia rozdrobnienia (rys. 7.9). Dla ziaren kukurydzy wzrost prędkości kątowych nie powodował istotnych zmian stopnia rozdrobnienia podczas

rozdrabniania przez zestaw czterech i pięciu tarcz (rys. 7.9). Potwierdza to stwierdzenie Williams et al. [226], którzy wskazali na istnienie wielkości granicznej cząstek, poniżej której rozdrabnianie przestaje być efektywne (cząstki nie rozdrabniają się, następuje gwałtowny wzrost zużycia energii i spadek wydajności) i obserwuje się dławienie. Dla kukurydzy rozdrabnianie przestawało być efektywne, gdy wymiar d_{80} produktu wynosił poniżej 2,2 mm. Dla ryżu i dla kukurydzy (do momentu osiągnięcia przez cząstki rozdrabniane wielkości granicznej) widoczny jest wyraźny wzrost stopnia rozdrobnienia wraz ze wzrostem prędkości kątowych tarcz. Powyższe pozostaje w zgodzie z obserwacjami dla innych konstrukcji rozdrabniających, np. młynów młotkowych [217, 233, 241]. Liczne badania wykazały, że wraz ze wzrostem obrotów wirnika liczba kontaktów element rozdrabniający-ziarno rośnie wprost proporcjonalnie [227, 240], powodując zwiększenie intensywności rozdrabniania i zmniejszenie cząstek produktu finalnego. Niestety zwiększanie prędkości elementów rozdrabniających związane jest ze wzrostem momentów, oporów ruchu, a w konsekwencji poboru mocy [1, 225].



Rys. 7.8. Wyniki badań poboru mocy podczas rozdrabniania ziaren: a) ryżu, b) kukurydzy

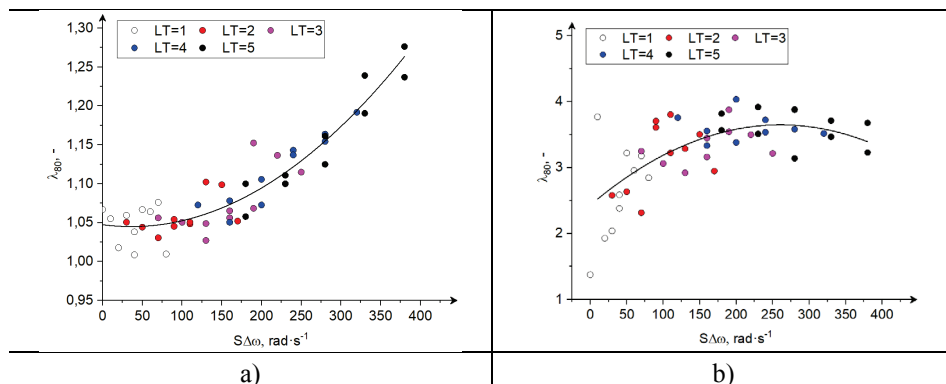
Na podstawie analizy korelacji dla poboru mocy i stopnia rozdrobnienia należy wnioskować, że wskaźniki rozdrabniania można opisać modelami jednej zmiennej, np. krotności rozdrabniania przejawiającej się w liczbie tarcz użytych do rozdrabniania materiału LT lub sumarycznego przyrostu prędkości kątowej tarcz $S\Delta\omega$. Stopień rozdrobnienia ziaren ryżu najlepiej opisywał model kwadratowy (rys. 7.10) jednej zmiennej $S\Delta\omega$ (adj. $R^2 = 0,866$) w postaci:

$$\lambda_{80} = 1,85 \cdot 10^{-6} \cdot (S\Delta\omega)^2 - 1,34 \cdot 10^{-4} \cdot S\Delta\omega + 1,05 \quad (7.12)$$

Analiza regresji wielorakiej wykazała, że bardziej adekwatne do opisu zmian poboru mocy dla obu ziaren i stopnia rozdrobnienia kukurydzy w badanej konstrukcji zespołu roboczego, będą modele dwóch zmiennych w postaci:

$$V_D = ALT + BS\Delta\omega + C, \quad (7.13)$$

gdzie: V_D – zmienna zależna (pobór mocy, wydajność, jednostkowe zużycie energii, stopień rozdrobnienia, energochłonność zintegrowana, emisyjność zrównoważona, funkcja oceny energetyczno-środowiskowej), A, B, C – współczynniki regresji.



Rys. 7.9. Wyniki badań stopnia rozdrobnienia ziaren: a) ryżu, b) kukurydzy

Model dwóch zmiennych $S\Delta\omega$ i LT wyjaśniał 80,1% i 60,1% zmienności poboru mocy odpowiednio dla rozdrabniania ryżu i kukurydzy (tabela 7.7 i 7.8). W przypadku modeli nieliniowych poboru mocy, w zależności od dwóch omawianych zmiennych, nie uzyskano znaczącej poprawy w dopasowaniu modeli, uznając tym samym modele liniowe dwóch zmiennych jako te najlepiej opisujące zmiany poboru mocy podczas rozdrabniania. Zmienność 80% stopnia rozdrobnienia wyjaśniono za pomocą dwóch zmiennych w 77,6% w przypadku rozdrabniania ryżu (tabela 7.7) i 34,1% w przypadku rozdrabniania kukurydzy (tabela 7.8). Modele nieliniowe stopnia rozdrobnienia kukurydzy w zależności od dwóch zmiennych $S\Delta\omega$ i LT charakteryzowały się znacznie lepszym stopniem dopasowania do danych eksperymentalnych niż modele liniowe (rys. 7.10). Model nieliniowy dwóch zmiennych opisujący stopień rozdrobnienia ryżu charakteryzował się bardzo podobnym stopniem dopasowania (adj. $R^2 = 0,862$), co model kwadratowy jednej zmiennej (zależność 7.12).

Tabela 7.7. Wyniki wielokrotnej regresji liniowej dla modelowania wskaźników rozdrabniania ryżu przez dwie zmienne: krotność rozdrabniania wsadu i sumaryczny wzrost prędkości kątowych tarcz

	Wartość	Błąd standardowy	t-Value	Prob> t	F Value	Prob>F	R ²	Adj. R ²
C	0,391#	0,110	3,554	0,001				
P	A (LT)	-0,234#	0,063	-3,738	0,001	99,645*	0	0,809
	B ($S\Delta\omega$)	0,009#	0,001	10,313	>0,001			
Q _r	C	41,583#	6,757	6,154	>0,001			
	A (LT)	4,393	3,840	1,144	0,258	0,6579	0,523	0,027
	B ($S\Delta\omega$)	-0,056	0,055	-1,019	0,313			-0,014

cd. tabeli 7.7.

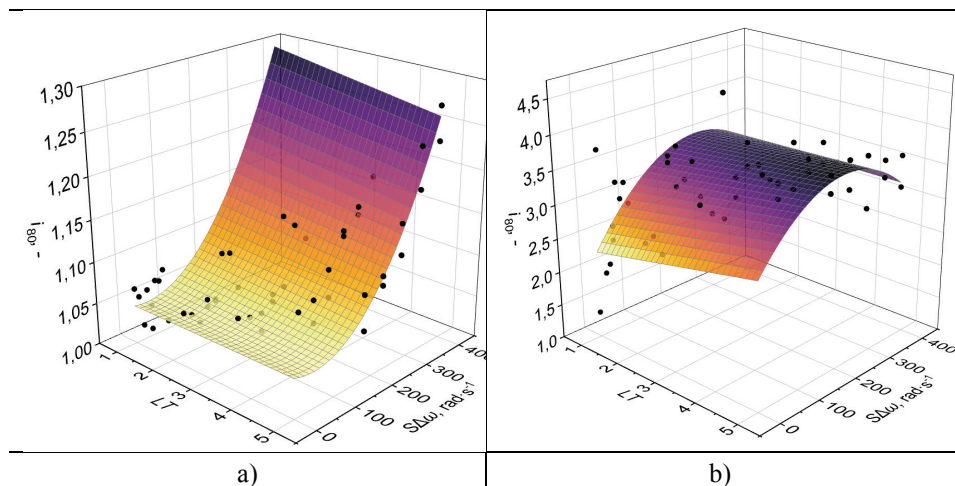
	<i>C</i>	0,016#	0,004	3,924	>0,001				
<i>E_j</i>	<i>A (LT)</i>	-0,009#	0,002	-4,088	>0,001	44,547*	>0,001	0,655	0,640
	<i>B (SΔω)</i>	0,0003#	0,000	7,937	>0,001				
	<i>C</i>	1,019#	0,010	105,207	>0,001				
<i>λ₈₀</i>	<i>A (LT)</i>	-0,011	0,006	-2,085	0,043	86,044*	>0,001	0,785	0,776
	<i>B (SΔω)</i>	0,001#	0,000	8,558	>0,001				
	<i>C</i>	8400,614#	1675,215	5,015	>0,001				
<i>E_{zint}</i>	<i>A (LT)</i>	921,024	973,837	0,956	0,349	10,053*	>0,001	0,304	0,274
	<i>B (SΔω)</i>	-42,608#	13,944	-3,056	0,004				
	<i>C</i>	0,009#	0,002	3,764	>0,001				
<i>e_{zrów}</i>	<i>A (LT)</i>	-0,005#	0,001	-4,085	>0,001	43,918*	>0,001	0,651	0,637
	<i>B (SΔω)</i>	0,00015#	0,000	7,897	>0,001				
	<i>C</i>	0,029#	0,006	4,779	>0,001				
<i>F_{e-s}</i>	<i>A (LT)</i>	-0,014#	0,003	-3,952	>0,001	36,846*	>0,001	0,611	0,594
	<i>B (SΔω)</i>	0,00036#	0,000	7,358	>0,001				

Błąd standardowy skalowano pierwiastkiem kwadratowym ze zredukowanego Chi², (#) – wartość jest istotna statystycznie na poziomie 0,05, (*) – na poziomie 0,05 funkcja dopasowania jest znacznie lepsza niż funkcja $y = \text{constant}$.

Tabela 7.8. Wyniki wielokrotnej regresji liniowej dla modelowania wskaźników rozdrabniania kukurydzy przez dwie zmienne: krotność rozdrabniania wsadu i całkowity wzrost prędkości kątowych tarcz

		Wartość	Błąd standardowy	<i>t</i> -Value	Prob> <i>t</i>	<i>F</i> Value	Prob> <i>F</i>	R ²	Adj. R ²
	<i>C</i>	0,444#	0,164	2,709	0,010				
<i>P</i>	<i>A (LT)</i>	0,218#	0,094	2,324	0,025	36,437*	>0,001	0,618	0,601
	<i>B (SΔω)</i>	0,003#	0,001	2,302	0,026				
	<i>C</i>	5,664	3,173	1,785	0,081				
<i>Q_r</i>	<i>A (LT)</i>	4,602#	1,793	2,566	0,014	24,457*	>0,001	0,521	0,500
	<i>B (SΔω)</i>	0,034	0,026	1,335	0,189				
	<i>C</i>	0,115#	0,025	4,562	>0,001				
<i>E_j</i>	<i>A (LT)</i>	-0,007	0,014	-0,465	0,644	0,920	0,406	0,038	-0,003
	<i>B (SΔω)</i>	-0,000055	0,0002	-0,271	0,788				
	<i>C</i>	2,682#	0,140	19,208	>0,001				
<i>i</i>	<i>A (LT)</i>	0,159#	0,077	2,048	0,046	13,170*	>0,001	0,369	0,341
	<i>B (SΔω)</i>	0,001	0,001	0,777	0,441				
	<i>C</i>	766,169#	344,858	2,222	0,031				
<i>E_{zint}</i>	<i>A (LT)</i>	216,345	195,968	1,104	0,275	0,775	0,467	0,032	-0,009
	<i>B (SΔω)</i>	-1,780	2,783	-0,640	0,526				
	<i>C</i>	0,073#	0,018	4,117	>0,001				
<i>e_{zró}</i> ^w	<i>A (LT)</i>	-0,004	0,010	-0,432	0,668	0,985	0,381	0,040	-0,001
	<i>B (SΔω)</i>	-0,000	0,000	-0,331	0,742				
	<i>C</i>	0,066#	0,011	5,941	>0,001				
<i>F_{e-s}</i>	<i>A (LT)</i>	-0,006	0,006	-0,919	0,363	2,466	0,096	0,095	0,056
	<i>B (SΔω)</i>	-0,000	0,000	-0,276	0,784				

Błąd standardowy skalowano pierwiastkiem kwadratowym ze zredukowanego Chi², (#) – wartość jest istotna statystycznie na poziomie 0,05, (*) – na poziomie 0,05 funkcja dopasowania jest znacznie lepsza niż funkcja $y = \text{constant}$.



Rys. 7.10. Wykres powierzchniowy 80% stopnia rozdrobnienia w zależności od krotności rozdrabniania wsadu LT i całkowitego wzrostu prędkości kątowej $S\Delta\omega$ podczas rozdrabniania: a) ryżu: $\lambda_{80} = 2,02 \cdot 10^{-6} \cdot (S\Delta\omega)^2 - 2,28 \cdot 10^{-5} \cdot S\Delta\omega \cdot LT - 8,10 \cdot 10^{-5} \cdot S\Delta\omega + 3,61 \cdot 10^{-4} \cdot LT + 1,05$, adj. $R^2 = 0,862$; b) kukurydzy: $\lambda_{80} = 1,84 \cdot 10^{-5} \cdot (S\Delta\omega)^2 - 3,44 \cdot 10^{-4} \cdot S\Delta\omega \cdot LT + 9,92 \cdot 10^{-3} \cdot S\Delta\omega + 0,13 \cdot LT + 2,16$, adj. $R^2 = 0,438$

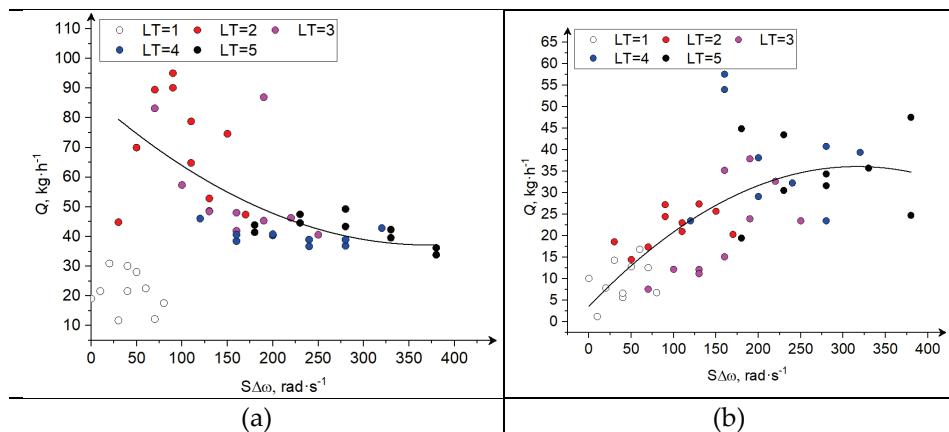
Analiza korelacji wykazała brak statystycznie istotnej zależności pomiędzy wydajnością rozdrabniania ryżu a krotnością przejścia materiału przez tarcze robocze (tabela 7.6). Należy wskazać, że najniższą wydajność rozdrabniania ryżu uzyskano, gdy rozdrabnianie następowało przez jedną tarczę roboczą (rys. 7.11). Rozdrabnianie przez zestaw dwóch tarcz z kolei skutkowało największą wydajnością podczas rozdrabniania ryżu (rys. 7.11). Dalsze zwiększanie liczby tarcz biorących udział w rozdrabnianiu ryżu powodowało obniżenie wydajności (rys. 7.11). Wydajność rozdrabniania ziaren kukurydzy zwiększała się istotnie, gdy stosowano większą liczbę tarcz rozdrabniających (tabela 7.6, rys. 7.11).

Przyczyn tych różnic należy dopatrywać się w relacji pomiędzy wielkością ziaren a cechami konstrukcyjnymi tarcz, np. wielkością otworów w tarczy oraz relacji wielkości ziarna i szczeliny międzyczarowej, a także ukształtowaniu zespołu roboczego. Dla analizowanej konstrukcji rozdrabniacza wielkość szczeliny międzyczarowej jest stała i nie zmienia się przy zmianie materiału. Początkowy wymiar ziaren kukurydzy ($D_{80} = 7,942$ mm) był większy niż początkowy wymiar ziaren ryżu ($D_{80} = 2,124$ mm), co przy założeniu stałej szczeliny międzyczarowej powoduje, że ziarna kukurydzy, aby opuścić przestrzeń międzyczarową, potrzebują większej liczby efektywnych kontaktów ziarno-element rozdrabniający niż ziarna ryżu. Wpływa to przede wszystkim na występowanie najniższej wydajności podczas rozdrabniania przez jedną tarczę roboczą. Z uwagi na sposób ułożenia tarcz jedna za drugą w zespole roboczym ilość materiału rozdrabnianego zależy (jak wykazała autorka w jednej z poprzednich prac [155]) od rzeczywistej objętości ziarna wprowadzanej do otworów w pierwszej tarczy, jej prędkości kątowej,

gęstości nasypowej ziarna oraz objętości materiału pozostającej w otworze po n -tym cięciu. W przypadku gdy rozdrabnianie zachodzi tylko przez pierwszą tarczę roboczą, materiał może opuścić komorę rozdrabniania wyłącznie przez szczelinę międzytarczową i część wspólną otworów w tarczy pierwszej i drugiej. Ponieważ druga tarcza jest nieruchoma materiał z jej otworów może przemieszczać się pod wpływem sił grawitacji oraz na skutek parcia przez kolejne partie materiału z tarczy pierwszej. To powoduje, że materiał z pierwszej tarczy nie jest w pełni odbierany, w konsekwencji w otworach roboczych mieszanka materiału rozdrobnionego i nierozdrobnionego pozostaje dłużej, obniżając możliwość przyjęcia nowego materiału z podajnika ślimakowego. Z uwagi na to, że ziarna kukurydzy są zdecydowanie większe niż ziarna ryżu, ich rozdrobnienie do wymiaru szczeliny s , aby mogły opuścić przestrzeń roboczą, wymaga większej liczby cięć, a tym samym dłuższego czasu pozostawania w komorze roboczej, co skutkowało niższymi wartościami wydajności niż podczas rozdrabniania ryżu (rys. 7.11).

Podczas rozdrabniania przez zestaw dwóch tarcz dla ryżu osiągnięto największą wydajność, co ma związek z niezakłóconym transportem materiału z pierwszej tarczy i zwiększeniem tym samym możliwości przepływu masy. Dalsze zwiększanie liczby tarcz biorących udział w rozdrabnianiu z kolei powodowało obniżenie wydajności. Ma na to wpływ kilka czynników. Wraz ze zwiększaniem się liczby tarcz w rozdrabniaczu wydłuża się czas przebywania ziarna w komorze roboczej, stąd mniejsza wydajność, ale rośnie też stopień rozdrobnienia (rys. 7.9). Należy przypuszczać, że obniżenie wydajności podczas rozdrabniania przez zestaw czterech i pięciu tarcz roboczych jest powodowane podobnie jak w przypadku kukurydzy przez proces dławienia i zmniejszenia intensywności rozdrabniania. Widać bowiem wyraźnie wzrost poboru mocy i zmniejszenie wydajności dla rozdrabniania ryżu przez zestaw czterech i pięciu tarcz (rys. 7.8 i 7.11). Wymiar ziaren ryżu d_{80} , dla których obserwowano zmniejszenie wydajności przy wzroście poboru mocy i stopnia rozdrobnienia wynosił 1,80 mm. Obserwowane wówczas zmniejszenie wydajności przy zwiększaniu liczby tarcz rozdrabniających z jednoczesnym zwiększaniem stopnia rozdrobnienia, może także być uwarunkowane zmniejszaniem się wielkości otworów rozdrabniających w kolejnych tarczach (tabela 7.1).

W przypadku rozdrabniania kukurydzy zwiększanie liczby tarcz rozdrabniających powodowało zwiększenie ilości odbieranego materiału z tarczy pierwszej i niezaburzone przejście materiału przez kolejne tarcze robocze, stąd obserwowany wzrost wydajności z jednoczesnym sukcesywnym zmniejszaniem wymiarów cząstek (o czym świadczy zwiększanie się stopnia rozdrobnienia wraz ze wzrostem liczby tarcz (rys. 7.9)). Podobnie jak w przypadku stopnia rozdrobnienia przy rozdrabnianiu kukurydzy przez zestaw czterech i pięciu tarcz obserwowano pewną stabilizację wydajności. Jest to związane z omówionym wcześniej osiągnięciem granicznej wielkości cząstek i dławieniem, ale może także wynikać ze zmniejszania się otworów w kolejnych tarczach, co może w pewien sposób zaburzać przepływ materiału.



Rys. 7.11. Wyniki badań wydajności podczas rozdrabniania: a) ryżu, b) kukurydzy

Podobnie jak pomiędzy wydajnością i krotnością przejścia materiału przez zestaw tarcz, w przypadku rozdrabniania ryżu dla analizowanej wielotarczowej, wielootworowej postaci konstrukcyjnej zespołu roboczego nie wystąpiła statystycznie istotna korelacja pomiędzy wydajnością a całkowitym wzrostem prędkości kątowych tarcz (tabela 7.6). Należy jednak wskazać, że bez uwzględniania wyników rozdrabniania przez tarczę pierwszą, wzrost prędkości kątowych na tarczach powodował obniżenie wydajności rozdrabniania ryżu (rys. 7.11, czarna linia ciągła). Wydajność rozdrabniania ziaren kukurydzy natomiast zwiększała się wraz ze wzrostem prędkości kątowych tarcz (tabela 7.6, rys. 7.11). Powyższe zależności są niemalże identyczne dla tych obserwowanych dla zmian wydajności wraz z liczbą tarcz. Jak wykazano w [155], napełnianie otworu w pierwszej tarczy zmienia się w czasie zgodnie z równaniem:

$$\frac{dV_{otwT1}}{dt}(t) = uS(t) \quad (7.14)$$

gdzie: V_{otwT1} – objętość masy wprowadzanej do otworu, m³, t – czas, s, u – prędkość cząstek materiału, m·s⁻¹, $S(t)$ – pole powierzchni wspólnej otworu i strefy dozowania, m² w związku z tym objętość materiału w całej tarczy V_{mT} (m³) dana jest zależnością:

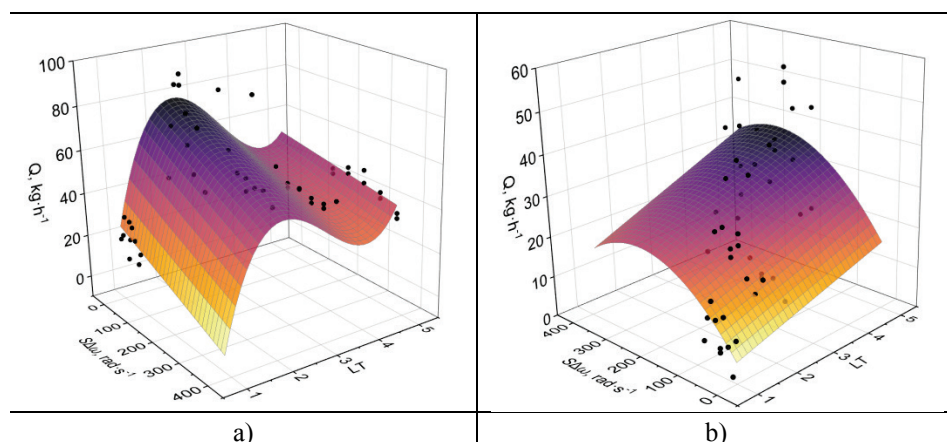
$$V_{mT} = \frac{n_{otw} \cdot V_{otwT1}(t) \cdot \omega \cdot \rho_n}{2\pi} \quad (7.15)$$

gdzie: n_{otw} – liczba otworów w tarczy, ρ_n – gęstość nasypowa ziarna, kg·m³, ω – prędkość kątowa tarczy, rad·s⁻¹.

Analizując powyższe równanie należy stwierdzić, że istnieje pewna krytyczna wartość prędkości kątowej ω_{kr} dla danej wielkości otworów i ich liczby, gęstości nasypowej ziaren oraz intensywności dozowania cząstek, przy których wartości wydajności mogą rosnąć lub maleć. Z jednej strony mniejsza prędkość kątowa

przy stałych pozostałych parametrach powoduje, że więcej materiału jest włączane do otworu, jednak wydłuża się czas napełniania jednego otworu i przekazania materiału z jednej tarczy na drugą, z drugiej zaś strony zwiększenie prędkości kątowej może powodować, że czas napełniania otworu będzie tak krótki, że ziarna nie zostaną odebrane przez kolejną tarczę. Należy także wskazać, że dla każdej tarczy będzie istniała inna wartość krytycznej prędkości kątowej z uwagi na zmianę gęstości nasypowej materiału wskutek rozdrobnienia, zmianę prędkości cząstek przechodzących przez zespół rozdrabniający oraz inną liczbę i geometrię otworów.

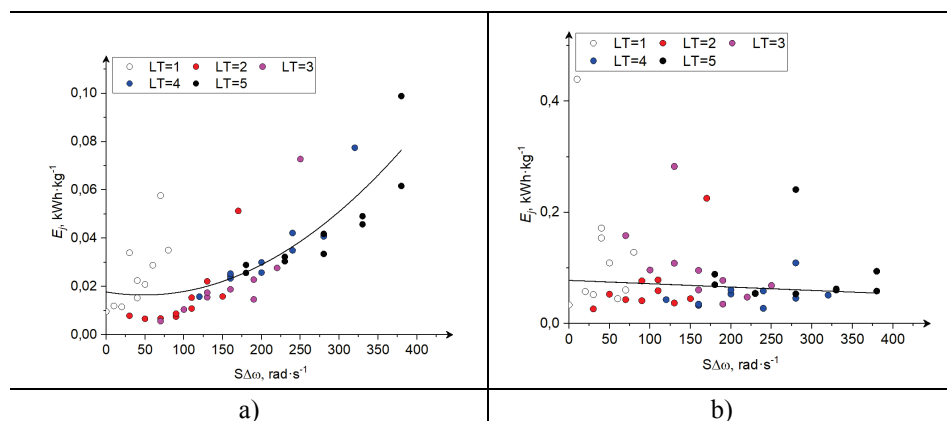
Zmiany wydajności rozdrabniania kukurydzy można opisać, zgodnie z zależnością 7.13, za pomocą modelu dwóch zmiennych $S\Delta\omega$ i LT (tabela 7.8), który wyjaśniał zmienność wydajności rozdrabniania w 50,0%. Najlepiej zmienność wydajności w przypadku obu ziaren opisywały modele nieliniowe przedstawione na rysunku 7.12.



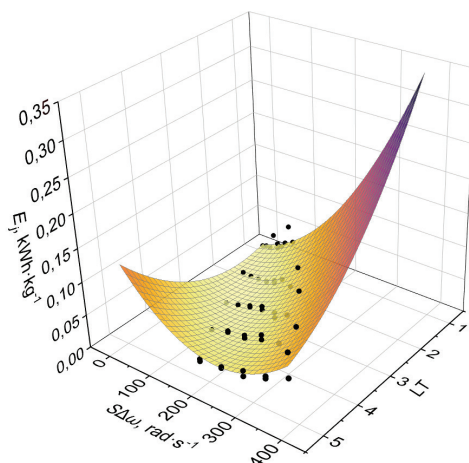
Rys. 7.12. Wykres powierzchniowy wydajności w zależności od krotności rozdrabniania wsadu LT i całkowitego wzrostu prędkości kątowej $S\Delta\omega$ podczas rozdrabniania: a) ryżu: $Q = 6,45 \cdot LT^3 + 6,54 \cdot 10^{-3} \cdot S\Delta\omega \cdot LT^2 - 66,38 \cdot LT^2 - 0,03 \cdot S\Delta\omega \cdot LT - 0,05 \cdot S\Delta\omega + 204,77 \cdot LT - 119,66$, adj. $R^2 = 0,647$; b) kukurydzy: $Q = -2,81 \cdot 10^{-4} \cdot (S\Delta\omega)^2 + 3,57 \cdot 10^{-3} \cdot S\Delta\omega \cdot LT + 0,14 \cdot S\Delta\omega + 2,19 \cdot LT + 2,20$, adj. $R^2 = 0,515$

Podczas rozdrabniania ryżu obserwowano zmiany jednostkowego zużycia energii wraz ze zmianami liczby tarcz rozdrabniających, wykorzystanych do rozdrabniania (korelacja średnia ($0,3 < r < 0,5$) oraz zmianami prędkości kątowych tarcz (korelacja bardzo wysoka, $r = 0,729$) (tabela 7.6 i rys. 7.13). W przypadku rozdrabniania kukurydzy jednostkowe zużycie energii nie zmieniało się w zależności od omawianych dwóch zmiennych (tabela 7.6, rys. 7.13). Jednostkowe zużycie energii (zgodnie z zależnością 4.3) zależy od wydajności i poboru mocy. Dla ryżu pobór mocy rósł wraz ze wzrostem LT i $S\Delta\omega$, wydajność natomiast malała, co oczywiście prowadziło do wzrostu jednostkowego zużycia energii wraz

ze wzrostem LT i $S\Delta\omega$ (rys. 7.13). W przypadku kukurydzy zarówno pobór mocy, jak i wydajność rosły wraz ze wzrostem liczby tarcz biorących udział w rozdrabnianiu, a także wraz ze wzrostem całkowitego przyrostu prędkości kątowych na tarczach. Pobór mocy i wydajność rozdrabniania kukurydzy rosły względem siebie proporcjonalnie wraz ze wzrostem zmiennych sterujących LT i $S\Delta\omega$, w związku z tym nie obserwowano zależności pomiędzy jednostkowym zużyciem energii a zmiennymi LT i $S\Delta\omega$ (rys. 7.13). Model liniowy dwóch zmiennych wyjaśniał w 64,0% zmienność jednostkowego zużycia energii podczas rozdrabniania ryżu (tabela 7.7), jednak znacznie lepiej zmiany jednostkowego zużycia energii opisywał model nieliniowy przedstawiony na rysunku 7.14.

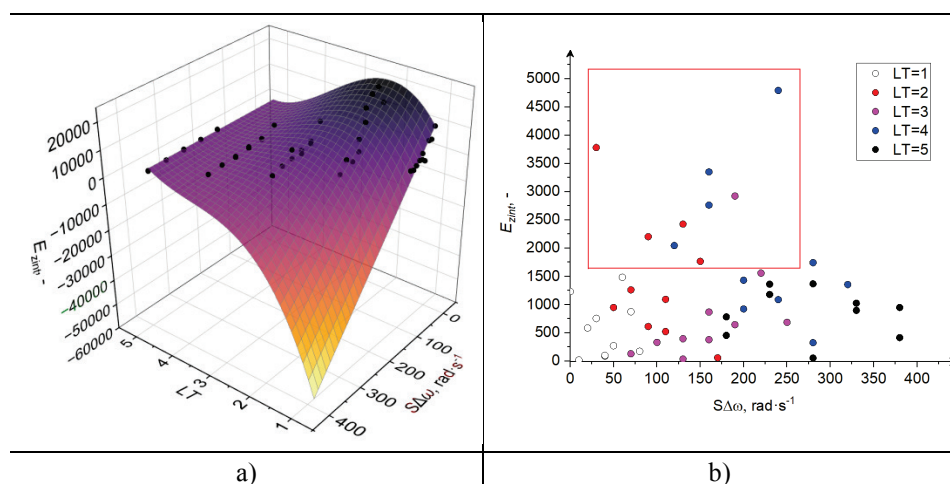


Rys. 7.13. Wyniki badań jednostkowego zużycia energii podczas rozdrabniania: a) ryżu, b) kukurydzy



Rys. 7.14. Wykres powierzchniowy jednostkowego zużycia energii w zależności od krotności rozdrabniania wsadu LT i całkowitego wzrostu prędkości kątowej $S\Delta\omega$ podczas rozdrabniania ryżu: $E_j = 1,90 \cdot 10^{-6} \cdot (S\Delta\omega)^2 - 2,46 \cdot 10^{-4} \cdot S\Delta\omega \cdot LT + 0,01 \cdot LT^2 + 4,01 \cdot 10^{-4} \cdot S\Delta\omega - 0,04 \cdot LT + 0,04$, adj. $R^2 = 0,781$

Na podstawie wyznaczonych wskaźników poboru mocy, jednostkowego zużycia energii, wydajności i stopnia rozdrobnienia dla badanych ustawień nastaw parametrów procesowych i konstrukcyjnych rozdrabniacza obliczono wartości wskaźników zintegrowanej energochłonności (rys. 7.15), emisyjności zrównoważonej (rys. 7.16) i funkcji oceny energetyczno-środowiskowej (rys. 7.17). Dla procesu rozdrabniania ryżu wartości energochłonności zintegrowanej, emisyjności zrównoważonej i funkcji oceny energetyczno-środowiskowej były skorelowane z liczbą tarcz użytych podczas rozdrabniania (odpowiednio $r = -0,404$, $r = 0,435$, $r = 0,403$) oraz całkowitym przyrostem prędkości kątowych tarcz (odpowiednio $r = -0,539$, $r = 0,726$, $r = 0,694$), co sugeruje, że lepiej rozdrabniać ryż stosując mniejszą liczbę tarcz roboczych o niższych prędkościach kątowych. Dla procesu rozdrabniania kukurydzy wystąpiły tylko bardzo słabe korelacje ujemne pomiędzy funkcją oceny energetyczno-środowiskowej a liczbą tarcz w procesie rozdrabniania ($r = -0,306$) i całkowitym przyrostem prędkości kątowych tarcz ($r = -0,281$). Istnienie korelacji pomiędzy energochłonnością zintegrowaną, emisyjnością zrównoważoną i funkcją oceny energetyczno-środowiskowej uzależnione jest od zmian poboru mocy, jednostkowego zużycia energii, wydajności i stopnia rozdrobnienia wraz ze zmianami nastaw rozdrabniacza.



Rys. 7.15. Zintegrowana energochłonność rozdrabniania ziaren: a) ryżu, b) kukurydzy w zależności od krotności rozdrabniania oraz całkowitego sumarycznego przyrostu prędkości na tarczach rozdrabniacza

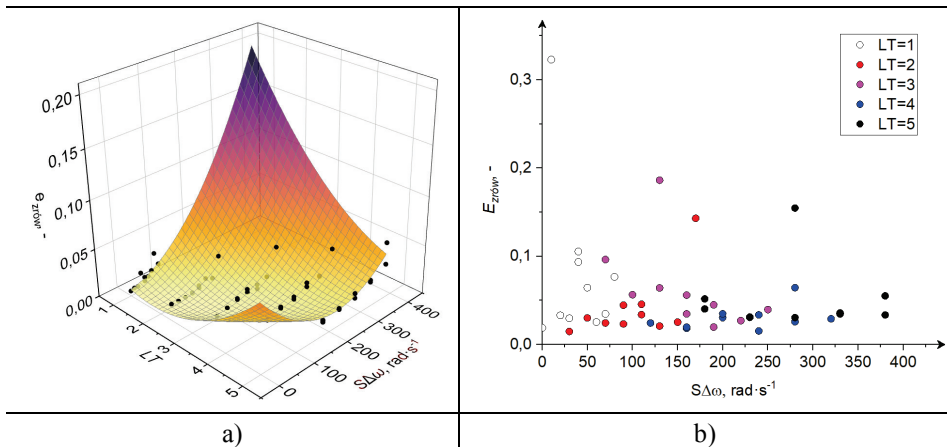
Zmiany emisyjności zrównoważonej, energochłonności zintegrowanej i funkcji energetyczno-środowiskowej rozdrabniania ryżu można opisać za pomocą ogólnego równania:

$$E_{zint}, e_{zrów}, F_{e-s}(LT, S\Delta\omega) = A + BLT + CS\Delta\omega + DLT^2 + ELTS\Delta\omega + F(S\Delta\omega)^2 + GLT^3 + HLT^2S\Delta\omega \quad (6.16)$$

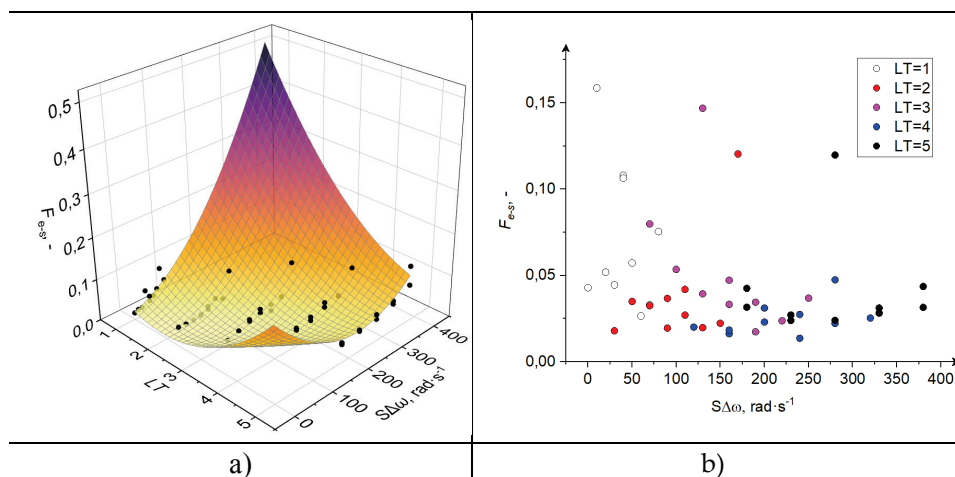
gdzie: LT – krotność rozdrabniania wyrażona poprzez liczbę tarcz rozdrabniających, $S\Delta\omega$ – sumaryczny przyrost prędkości na tarczach rozdrabniacza, $\text{rad}\cdot\text{s}^{-1}$, $A, B, C, D, E, F, G, H, I, J$ – współczynniki równania powierzchni wyznaczone na podstawie danych eksperymentalnych.

Parametry opisujące powierzchnie przedstawione na rysunkach 7.15–7.17 zaprezentowano w tabeli 7.9.

Na podstawie otrzymanych rezultatów możliwe jest wskazanie nastaw rozdrabniacza o najniższej energochłonności i emisyjności. Najwyższą wartość energochłonności zintegrowanej (33337,11) oraz najniższe wartości emisyjności zrównoważonej (0,0031) i funkcji oceny energetyczno-środowiskowej (0,0097) podczas rozdrabniania ryżu odnotowano dla procesu z użyciem trzech tarcz roboczych o prędkościach kątowych $\omega_1 = 20 \text{ rad}\cdot\text{s}^{-1}$, $\omega_2 = 30 \text{ rad}\cdot\text{s}^{-1}$ i $\omega_3 = 40 \text{ rad}\cdot\text{s}^{-1}$ ($P = 0,47 \text{ kW}$, $Q = 83,24 \text{ kg}\cdot\text{h}^{-1}$, $E_j = 0,006 \text{ kWh}\cdot\text{kg}^{-1}$, $\lambda_{80} = 1,06$). Podczas rozdrabniania kukurydzy najwyższe wartości energochłonności zintegrowanej (4792,50) oraz najniższe wartości funkcji energetyczno-środowiskowej (0,014) wystąpiły dla rozdrabniania przez cztery tarcze robocze o prędkościach $\omega_1 = 80 \text{ rad}\cdot\text{s}^{-1}$, $\omega_2 = 70 \text{ rad}\cdot\text{s}^{-1}$, $\omega_3 = 60 \text{ rad}\cdot\text{s}^{-1}$ i $\omega_4 = 50 \text{ rad}\cdot\text{s}^{-1}$ ($P = 1,88 \text{ kW}$, $Q = 69,33 \text{ kg}\cdot\text{h}^{-1}$, $E_j = 0,027 \text{ kWh}\cdot\text{kg}^{-1}$, $\lambda_{80} = 3,54$). Najniższą wartość emisyjności zrównoważonej podczas rozdrabniania kukurydzy odnotowano dla procesu z użyciem dwóch tarcz roboczych o prędkościach kątowych $\omega_1 = 20 \text{ rad}\cdot\text{s}^{-1}$ i $\omega_2 = 30 \text{ rad}\cdot\text{s}^{-1}$ ($P = 0,49 \text{ kW}$, $Q = 18,59 \text{ kg}\cdot\text{h}^{-1}$, $E_j = 0,026 \text{ kWh}\cdot\text{kg}^{-1}$, $\lambda_{80} = 2,58$).



Rys. 7.16. Emisyjność zrównoważona rozdrabniania ziaren: a) ryżu, b) kukurydzy w zależności od krotności rozdrabniania oraz całkowitego sumarycznego przyrostu prędkości na tarczach rozdrabniacza



Rys. 7.17. Funkcja oceny energetyczno-środowiskowej rozdrabniania ziaren: a) ryżu, b) kukurydzy w zależności od krotności rozdrabniania oraz całkowitego sumarycznego przyrostu prędkości na tarczach rozdrabniacza

Tabela 7.9. Zestawienie współczynników powierzchni przedstawionych na rysunkach 7.15–7.17

Współczynnik	Ryż		
	E_{zint}	$e_{zrów}$	F_{e-s}
<i>A</i>	-26666,00	0,02	0,07
<i>B</i>	55744,68	-0,02	-0,06
<i>C</i>	-266,67	$2,26 \cdot 10^{-4}$	$7,04 \cdot 10^{-4}$
<i>D</i>	-19168,50	0,007	0,02
<i>E</i>	84,07	$-1,44 \cdot 10^{-4}$	$-3,72 \cdot 10^{-4}$
<i>F</i>	–	$1,12 \cdot 10^{-6}$	$2,57 \cdot 10^{-6}$
<i>G</i>	1827,40	–	–
<i>H</i>	-6,17	–	–
<i>Adj. R</i> ²	0,728	0,780	0,742
BIC	809,898	-502,208	-403,256

Przedstawione wyniki badań jasno wskazują, że zarówno liczba tarcz, jak i ich prędkość kątowna wywierają istotny wpływ na wskaźniki rozdrabniania w konstrukcji roboczego zespołu wielotarczowego. Należy podkreślić, że proces rozdrabniania i wyznaczone zależności są ściśle powiązane z właściwościami materiałów rozdrabnianych, o czym świadczą otrzymywane różne postaci matematyczne tych zależności dla różnych ziaren. Potwierdza to potrzebę rozpatrywania systemu rozdrabniania w myśl zasady piętrowej struktury modelu Integronu, tj. uwzględniania właściwości materiałowych w procesie projektowania maszyn i urządzeń procesów rozdrabniania, a także wyznaczania relacji pomiędzy cechami konstrukcyjnymi młynów, wskaźnikami oceny i parametrami materiałów.

7.3. RELACJE POMIĘDZY INTENSYWNOŚCIĄ DOZOWANIA WSADU, PRĘDKOŚCIAMI KĄTOWYMI TARCZ A WSKAŹNIKAMI ROZDRABNIANIA

7.3.1. Relacje pomiędzy prędkością kątową pierwszej tarczy, intensywnością dozowania a wskaźnikami rozdrabniania

W celu zbadania relacji pomiędzy parametrami pracy rozdrabniacza, tj. prędkością kątową tarczy pierwszej i intensywnością dozowania wsadu a wskaźnikami rozdrobnienia: poborem mocy, wydajnością, jednostkowym zużyciem energii i stopniem rozdrobnienia wykorzystano korelację Pearsona. W tabeli 7.10 przedstawiono wyniki analizy korelacji. Wykonano także analizę korelacji cząstkowej, aby określić siłę korelacji jednej ze zmiennych niezależnych na zmienną zależną przy wyłączeniu wpływu drugiej zmiennej niezależnej. Wyniki tej analizy zestawiono w tabelach 7.11 i 7.12.

Tabela 7.10. Wyniki analizy korelacji Pearsona pomiędzy parametrami pracy rozdrabniacza a wybranymi wskaźnikami rozdrobnienia

			<i>P</i>	<i>Q_r</i>	<i>E_j</i>	<i>i</i>
Ryż	<i>V_P</i>	r-Pearsona	-0,108	0,790*	-0,604*	-0,375*
		p-value	0,318	0,000	0,000	0,001
	<i>ω₁</i>	r-Pearsona	0,952*	0,028	0,583*	0,467*
		p-value	0,000	0,800	0,000	0,000
Kukurydza	<i>V_P</i>	r-Pearsona	0,332*	-0,667*	0,679*	-0,401*
		p-value	0,002	0,000	0,000	0,000
	<i>ω₁</i>	r-Pearsona	0,863*	0,041	0,228*	0,086
		p-value	0,000	0,712	0,038	0,423

Wykorzystano test istotności dwustronnej; (*) korelacja istotna dla $p < 0,05$, *P* – moc, kW, *Q_r* – wydajność, kg·h⁻¹, *E_j* – jednostkowe zużycie energii, kWh·kg⁻¹, *i* – 80% stopień rozdrobnienia.

Tabela 7.11. Współczynniki korelacji cząstkowej między parametrami pracy rozdrabniacza a wybranymi wskaźnikami rozdrabniania, gdy jako zmienną sterującą przyjęto intensywność dozowania wsadu *V_P*

			<i>P</i>	<i>Q_r</i>	<i>E_j</i>	<i>i</i>
Ryż	<i>ω₁</i>	r-cząstkowe	0,954*	-0,135	0,766*	0,526*
		p-value	0,000	0,259	0,000	0,000
Kukurydza	<i>ω₁</i>	r-cząstkowe	0,903*	-0,021	0,471*	0,074
		p-value	0,000	0,865	0,000	0,548

Wykorzystano test istotności dwustronnej, (*) korelacja cząstkowa jest istotnie różna od zera dla $p < 0,05$, *P* – moc, kW, *Q_r* – wydajność, kg·h⁻¹, *E_j* – jednostkowe zużycie energii, kWh·kg⁻¹, *i* – 80% stopień rozdrobnienia.

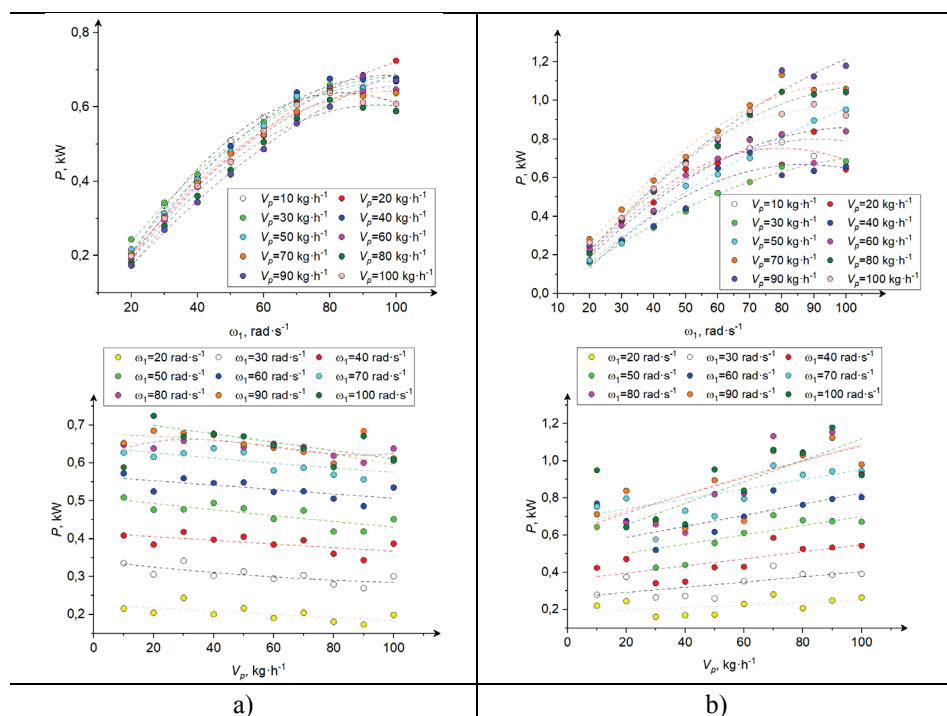
Tabela 7.12. Współczynniki korelacji cząstkowej między parametrami pracy rozdrabniacza a wybranymi wskaźnikami rozdrabniania, gdy jako zmienną sterującą wybrano prędkość kątową tarczy pierwszej ω_1

			P	Q_r	E_j	i
Ryż	V_P	r-cząstkowe	-0,456*	0,800*	-0,789*	-0,417*
		p-value	0,000	0,000	0,000	0,000
Kukurydza	V_P	r-cząstkowe	0,657*	-0,668*	0,698*	-0,402*
		p-value	0,000	0,000	0,000	0,000

Wykorzystano test istotności dwustronnej, (*) korelacja cząstkowa jest istotnie różna od zera dla $p < 0,05$, P – moc, kW, Q_r – wydajność, $\text{kg} \cdot \text{h}^{-1}$, E_j – jednostkowe zużycie energii, $\text{kWh} \cdot \text{kg}^{-1}$, i – 80% stopień rozdrobnienia

Badania dla analizowanej konstrukcji rozdrabniacza wielotarczowego, wielootworowego wykazały silny dodatni związek pomiędzy prędkością kątową tarczy pierwszej a poborem mocy, o czym świadczą otrzymane wysokie wartości ($r > 0,86$) korelacji Pearsona i korelacji cząstkowej (tabele 7.10–7.12). Pobór mocy podczas rozdrabniania kukurydzy i ryżu wzrastał wraz ze wzrostem prędkości kątowej tarczy pierwszej niemalże liniowo, jednak przy prędkościach kątowych w zakresie od 80 do 100 $\text{rad} \cdot \text{s}^{-1}$ obserwowano nieznaczne zmniejszanie się poboru mocy wraz ze wzrostem prędkości kątowych (rys. 7.18). Wzrost poboru mocy wraz ze wzrostem prędkości kątowej był spodziewany biorąc pod uwagę wzrost momentu potrzebnego do napędu tarczy, ale także rosnących oporów ruchu, gdy materiał jest rozdrabniany w przestrzeni otworowej. Nieznaczne zmniejszenie poboru mocy przy dużych prędkościach jest związane z ilością materiału rozdrabnianego w otworze i jego przepływem wewnątrz zespołu roboczego. Przy wyższych prędkościach obrotowych czas napełniania otworu jest krótki, co powoduje, że mniejsza ilość ziaren jest rozdrabniania jednocześnie, o czym świadczy chociażby zmniejszenie wydajności przy wyższych prędkościach kątowych (rys. 7.20) i jednocześnie zwiększenie stopnia rozdrobnienia (rys. 7.24), na skutek zwiększenia intensywności zderzeń/kontaktów materiał-element rozdrabniający. Pozornie wydatek dozowania wsadu nie miał istotnego wpływu na pobór mocy, na co wskazuje brak istotnej korelacji pomiędzy wydatkiem dozowania wsadu a poborem mocy podczas rozdrabniania ryżu oraz słaba korelacja pomiędzy wspomnianymi zmiennymi dla rozdrabniania kukurydzy (tabela 7.10). Analiza korelacji cząstkowej wykazała, po wykluczeniu wpływu prędkości kątowej, że intensywność dozowania wsadu jest ujemnie skorelowana ($r = -0,456$) z poborem mocy w przypadku rozdrabniania ryżu, a dodatnio skorelowana ($r = 0,657$) z poborem mocy podczas rozdrabniania kukurydzy (tabela 7.12). Zwiększenie ilości materiału w otworach powoduje ich większy napór podczas przechodzenia przez otwory przepustowo-rozdrabniające w tarczy. Mniejsze niż kukurydza ziarna ryżu wspomagane naporem dozowanego wsadu przemieszczają się szybciej przez zespół roboczy, co powoduje zmniejszenie liczby kontaktów i intensywności rozdrabniania (zmniejszenie stopnia rozdrobnienia

wraz ze wzrostem intensywności dozowania wsadu (rys. 7.24), a w konsekwencji poboru mocy (rys. 7.18) mimo dużej wydajności i zwiększonego przepływu masy ziaren (rys. 7.20). W przypadku kukurydzy obserwowano zwiększanie poboru mocy wraz ze zwiększaniem intensywności dozowania wsadu. Jak wspomniano wcześniej, większa ilość materiału powoduje zwiększone opory ruchu. W odróżnieniu jednak od ziaren ryżu, ziarna kukurydzy charakteryzują się większym wymiarem początkowym, więc aby opuścić przestrzeń rozdrabniania, wymagają większej liczby kontaktów dekohezyjnych, o czym dyskutowano już w poprzednim podrozdziale, dlatego dłużej pozostają w otworach roboczych tarcz powodując dodatkowe opory ruchu i wzrost poboru mocy (rys. 7.18).



Rys. 7.18. Wyniki badań poboru mocy podczas rozdrabniania ziaren: a) ryżu, b) kukurydzy przy zmiennej prędkości kątowej tarczy pierwszej ω_1 i intensywności podawania wsadu V_p

Zmiany poboru mocy podczas rozdrabniania ryżu i kukurydzy w zależności od prędkości kątowej pierwszej tarczy rozdrabniacza pięciotarczowego i intensywności dozowania wsadu można opisać z wysokim dopasowaniem za pomocą modelu liniowego dwóch zmiennych (adj. $R^2 > 0,834$), co wykazała przeprowadzona analiza regresji wielorakiej (tabele 7.13 i 7.14). Biorąc jednak pod uwagę, że krzywe obrazujące zmiany poboru mocy w zależności od prędkości kątowej przedstawione na rysunku 7.18 sugerują nieliniowy charakter zmian, pobór mocy

z lepszym dopasowaniem można opisać za pomocą funkcji wielomianowej dwóch zmiennych, gdzie prędkość kątowna występuje w drugiej potędze (rys. 7.19).

Tabela 7.13. Wyniki wielokrotnej regresji liniowej dla modelowania wskaźników rozdrabniania ryżu przez dwie zmienne: intensywność dozowania wsadu i prędkość kątowną tarczy pierwszej

		Wartość	Błąd standardowy	t-Value	Prob> t	F Value	Prob>F	R ²	Adj, R ²
<i>P</i>	<i>C</i>	0,179#	0,015	11,704	0,000	487,80*	0,000	0,920	0,918
	<i>A (V_P)</i>	-6,58·10 ⁻⁴ #	1,70·10 ⁻⁴	-3,872	0,000				
	<i>B (ω₁)</i>	0,006#	1,89·10 ⁻⁴	31,037	0,000				
<i>Q_r</i>	<i>C</i>	19,741#	3,961	4,984	0,000	68,52*	0,000	0,626	0,617
	<i>A (V_P)</i>	0,506#	0,043	11,699	0,000				
	<i>B (ω₁)</i>	-0,029	0,049	-0,587	0,559				
<i>E_j</i>	<i>C</i>	0,011#	0,001	8,772	0,000	106,627*	0,000	0,720	0,713
	<i>A (V_P)</i>	-1,4·10 ⁻⁴ #	1,00·10 ⁻⁵	-10,610	0,000				
	<i>B (ω₁)</i>	1,6·10 ⁻⁴ #	2,00·10 ⁻⁵	10,253	0,000				
<i>i</i>	<i>C</i>	1,043#	0,006	168,153	0,000	22,277*	0,000	0,367	0,350
	<i>A (V_P)</i>	-2,8·10 ⁻⁴ #	6,6·10 ⁻⁵	-4,246	0,000				
	<i>B (ω₁)</i>	4,0·10 ⁻⁴ #	7,6·10 ⁻⁵	5,241	0,000				

Błąd standardowy skalowano pierwiastkiem kwadratowym ze zredukowanego Chi², (#) – wartość jest istotna statystycznie na poziomie 0,05, (*) – na poziomie 0,05 funkcja dopasowania jest znacznie lepsza niż funkcja $y = \text{constant}$.

Tabela 7.14. Wyniki wielokrotnej regresji liniowej dla modelowania wskaźników rozdrabniania kukurydzy przez dwie zmienne: intensywność dozowania wsadu i prędkość kątowną tarczy pierwszej

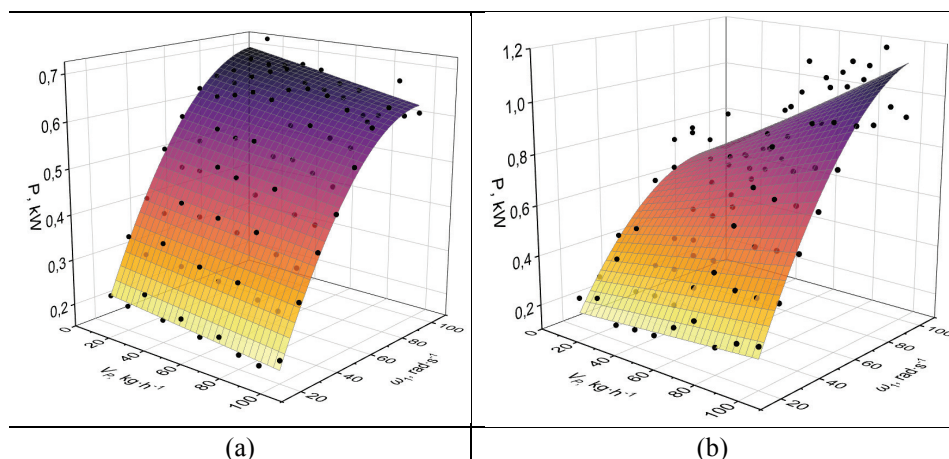
		Wartość	Błąd standardowy	t-Value	Prob> t	F Value	Prob>F	R ²	Adj, R ²
<i>P</i>	<i>C</i>	-0,058#	0,038	-1,514	0,134	209,21*	0,000	0,839	0,834
	<i>A (V_P)</i>	0,003#	4,3·10 ⁻⁴	6,808	0,000				
	<i>B (ω₁)</i>	0,009#	4,7·10 ⁻⁴	19,067	0,000				
<i>Q_r</i>	<i>C</i>	8,012#	0,876	9,149	0,000	31,764*	0,000	0,446	0,432
	<i>A (V_P)</i>	-0,073#	0,009	-7,955	0,000				
	<i>B (ω₁)</i>	0,002	0,010	0,211	0,834				
<i>E_j</i>	<i>C</i>	-0,174#	0,053	-3,290	0,002	47,802*	0,000	0,544	0,533
	<i>A (V_P)</i>	0,005#	5,73·10 ⁻⁴	9,299	0,000				
	<i>B (ω₁)</i>	0,002#	6,37·10 ⁻⁴	3,813	2,10·10 ⁻⁴				
<i>i</i>	<i>C</i>	3,424#	0,350	9,792	0,000	8,546*	0,000	0,67	0,148
	<i>A (V_P)</i>	-0,015#	0,004	-4,041	1,16·10 ⁻⁴				
	<i>B (ω₁)</i>	0,004#	0,004	0,836	0,405				

Błąd standardowy skalowano pierwiastkiem kwadratowym ze zredukowanego Chi², (#) – wartość jest istotna statystycznie na poziomie 0,05, (*) – na poziomie 0,05 funkcja dopasowania jest znacznie lepsza niż funkcja $y = \text{constant}$.

Wydajność procesu rozdrabniania ryżu była dodatnio skorelowana z intensywnością dozowania wsadu ($r = 0,790$, tabela 7.10). Obserwowane zwiększenie wydajności rozdrabniania ryżu wraz ze zwiększaniem intensywności dozowania wsadu, tj. wtłaczaniem większej ilości materiału do otworów w jednostce czasu, jest efektem spodziewanym, gdyż potencjalnie więcej materiału może zostać rozdrobnione w tym samym czasie, o ile nie zostanie przekroczona maksymalna przepustowość robocza młyna, określona objętością materiału, która w danej chwili może znajdować się w otworach i efektywnie przemieszczać się przez przestrzeń ograniczoną przez współpracujące otwory sąsiednich tarcz. Należy mieć tutaj na uwadze, że zachodzące zależności wynikają ze specyfiki ukształtowania zespołu roboczego oraz zasady działania rozdrabniacza wielotworowego, w którym w tarczach otworowych zachodzi zarówno proces quasi-ścianania, jak i transport materiału przez kolejne otwory robocze. Procesy te zachodzą równocześnie i wpływają na siebie mogąc wspomagać lub zaburzać efekty energetyczne i rozdrobnienie produktu, co wykazywano chociażby w odniesieniu do innych konstrukcji rozdrabniających [243, 252]. Badania opisane w [239], wykazały że tylko część powierzchni wspólnej otworów jest efektywnie wykorzystana, co wynika ze zmieniającego się w czasie stosunku pola powierzchni wspólnej otworów i charakteru ruchu tarcz, ale także charakterystyk przepływu ziaren przez otwory. Badania przepływu przez otwory dla ziaren łubinu, rzepaku i owsa wykazały, że wraz ze wzrostem średnicy hydraulicznej otworu i powierzchni otworu w rozdrabniaczu (tożsamej z polem powierzchni wspólnej otworów w sąsiednich tarczach) rośnie natężenie przepływu, natomiast wraz ze wzrostem średnicy zastępczej ziaren natężenie przepływu przez otwory zmniejsza się zgodnie z zależnością 7.17 [308], co tłumaczy wyższe wydajności uzyskiwane dla rozdrabniania ryżu w stosunku do rozdrabniania kukurydzy mając na uwadze, że parametry geometryczne otworów w pierwszej tarczy pozostają niezmiennie.

$$\Phi = C_0 \cdot A \cdot D^{\frac{n}{d}} \quad (7.17)$$

gdzie: Φ – objętościowe natężenie przepływu, $\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$, C_0 , n – współczynniki równania wyznaczone doświadczalnie, A – powierzchnia otworu, cm^2 , D – średnica hydrauliczna otworu, cm , d – średnica zastępcza ziarna, mm .

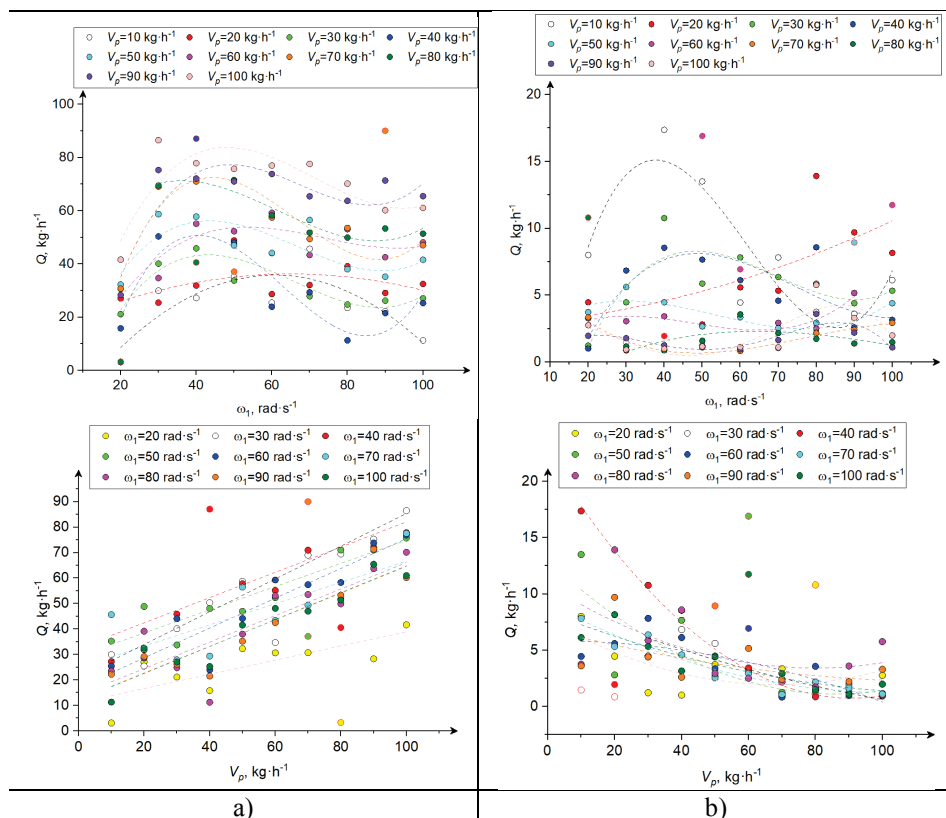


Rys. 7.19. Wykres powierzchniowy poboru mocy w zależności od intensywności dozowania wsadu V_p i prędkości kątowej tarczy pierwszej ω_1 podczas rozdrabniania: a) ryżu: $P = -0,04 - 3,29 \cdot 10^{-4} \cdot V_p + 0,01 \cdot \omega_1 - 5,08 \cdot 10^{-6} \cdot V_p \cdot \omega_1 - 6,82 \cdot 10^{-5} \cdot (\omega_1)^2$, $\text{adj. } R^2 = 0,984$; b) kukurydzy: $P = -0,17 - 5,14 \cdot 10^{-4} \cdot V_p + 0,02 \cdot \omega_1 + 5,79 \cdot 10^{-5} \cdot V_p \cdot \omega_1 - 1,06 \cdot 10^{-4} \cdot (\omega_1)^2$, $\text{adj. } R^2 = 0,906$

Przy zwiększaniu intensywności podawania wsadu zmienia się rozkład naprężeń w otworze oraz wymuszone wstępnie przez podajnik parcie materiału w kierunku wzdłużnym i poprzecznym dla komory roboczej rozdrabniacza [309]. W przypadku ryżu zwiększone parcie i wzrost natężenia przepływu przez otwór powodują zwiększenie wydajności rozdrabniania. Podczas rozdrabniania kukurydzy wydajność masowa procesu malała wraz ze wzrostem intensywności dozowania wsadu (rys. 7.20) – zmienne były ujemnie skorelowane ($r = -0,667$, tabela 7.10). Przy zachowaniu tych samych cech geometrycznych otworów i parametrów prędkości kątowej tarczy natężenie przepływu ziaren kukurydzy przez otwory w tarczy pierwszej będzie mniejsze niż natężenie przepływu ziaren ryżu (zgodnie z zależnością 7.17), co potwierdzają wyniki badań wydajności rozdrabniania (rys. 7.20). Jak wspomniano, wraz ze wzrostem intensywności dozowania wsadu wzrastać będzie parcie w otworach w pierwszej tarczy. Biorąc pod uwagę ograniczoną objętość otworów w tarczy podczas rozdrabniania kukurydzy może dochodzić do wolnego i bardzo wolnego przepływu oraz zaburzeń opróżniania otworów w wyniku blokowania materiału spowodowanego występowaniem parcia poziomego i wzrostu tarcia ziaren o powierzchnię otworu oraz w kontakcie ziarno-ziarno w wyniku zagęszczania materiału w otworze [310], co może mieć miejsce, gdy prędkość opróżniania otworów jest mniejsza niż założona prędkość napełniania. Można zatem wnioskować, że intensywność podawania wsadu nie powinna przekraczać wartości natężenia przepływu ziaren przez rozdrabniacz, gdyż może skutkować to obniżeniem wydajności.

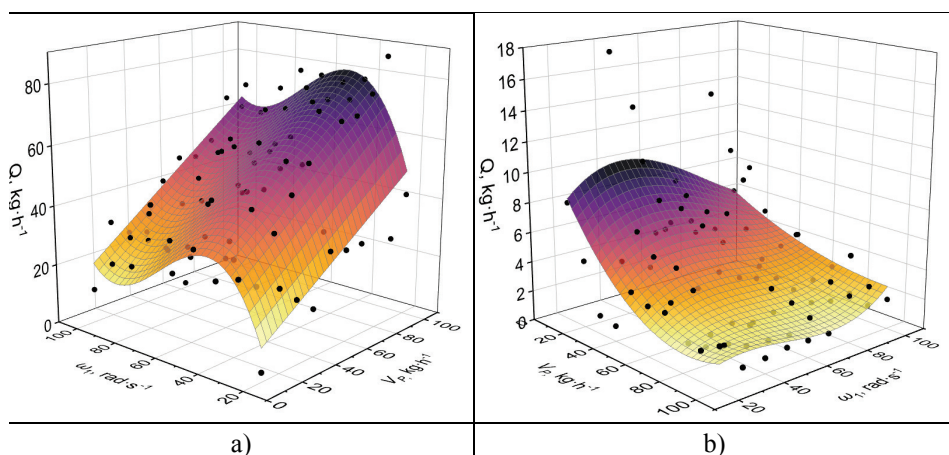
Istotną w kwestii napełniania otworów jest prędkość kątowa tarczy pierwszej, ponieważ warunkuje ona czas napełniania i opróżniania otworów, a tym samym objętość materiału obecnego w przestrzeni roboczej. Cykliczny charakter zmian w czasie użytecznej powierzchni wspólnej otworów modyfikuje także parametry

przepływu ziarna. Jak się spodziewano, nie odnotowano występowania korelacji Pearsona (tabela 7.10) ani korelacji cząstkowych (tabela 7.11 i 7.12) pomiędzy prędkością kątową pierwszej tarczy a wydajnością, świadczących o istnieniu liniowych, monotonicznych zależności pomiędzy tymi zmiennymi. Analiza zmian wydajności dla poszczególnych intensywności dozowania wsadu wykazała nieliniowy charakter zmian wydajności (funkcje wielomianowe trzeciego stopnia) w zależności od prędkości kątowej tarczy pierwszej (rys. 7.20). Wydajność początkowo rosła wraz ze wzrostem prędkości kątowych, aż do osiągnięcia maksimum dla pewnej wartości krytycznej prędkości kątowej, a następnie malała (rys. 7.20). Wartość krytyczna prędkości kątowej, przy której następowała zmiana gradientu wydajności, zależna była ściśle od wydatku dozowania wsadu. Zasadniczo przy niższych prędkościach kątowych obserwowano większe wartości wydajności, co spowodowane jest zwiększeniem czasu napełniania i opróżniania otworów i mniejszymi zaburzeniami przepływu. Przy większych prędkościach kątowych tarczy pierwszej wydajność zmniejszała się (rys. 7.20), choć wpływ prędkości kątowej na wartości wydajności nie był tak duży, jak wpływ intensywności dozowania wsadu.



Rys. 7.20. Wyniki badań wydajności podczas rozdrabniania ziaren: a) ryżu, b) kukurydzy przy zmiennej prędkości kątowej tarczy pierwszej ω_1 i intensywności podawania wsadu V_p

Z uwagi na brak korelacji i liniowych zależności pomiędzy wydajnością i prędkością kątową tarczy pierwszej modele liniowe dwóch zmiennych, tj. intensywności dozowania wsadu i prędkości kątowej tarczy pierwszej w umiarkowanym stopniu wyjaśniały zmiany wydajności (tabele 7.13 i 7.14). Biorąc pod uwagę nieliniowy charakter zmian wydajności w zależności od prędkości kątowej tarczy pierwszej najlepszym dopasowaniem do danych eksperymentalnych charakteryzował się model wielomianowy dwóch zmiennych, gdzie prędkość kątowa występuje w trzeciej potęgze (rys. 7.21). Niejednorodność wymiarowa ziaren kukurydzy oraz nierównomierność pracy rozdrabniacza (zjawisko opisane w [38, 59, 311]) powodowały duży rozrzut wyników, co skutkowało niższymi współczynnikami dopasowania modeli do danych dla kukurydzy, niż miało to miejsce dla ryżu.



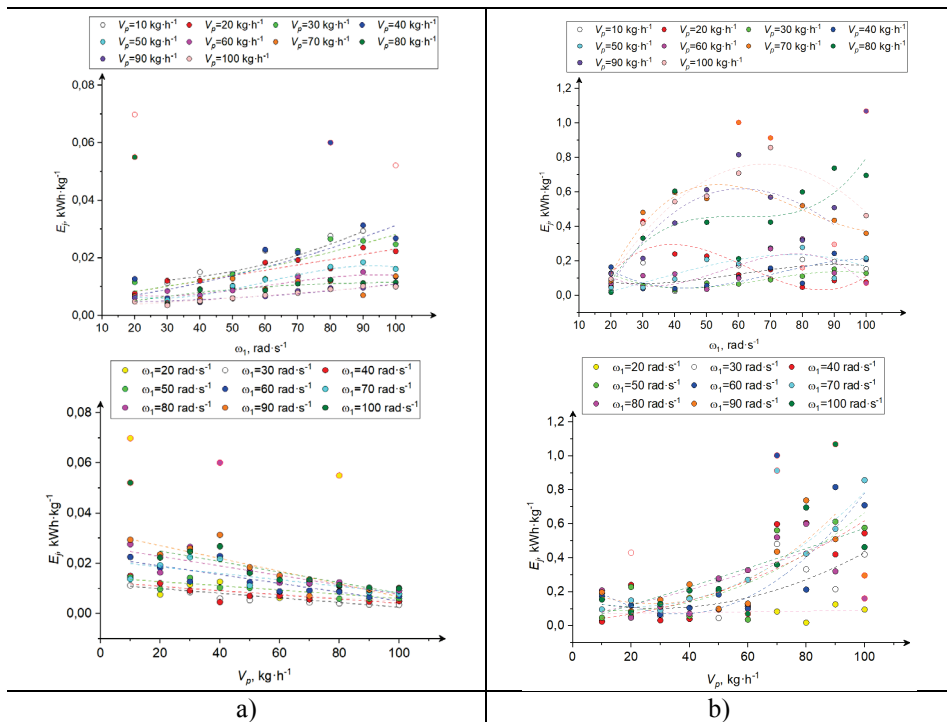
Rys. 7.21. Wykres powierzchniowy wydajności w zależności od intensywności dozowania wsadu V_p i prędkości kątowej tarczy pierwszej ω_1 podczas rozdrabniania: a) ryżu: $Q = -63,44 + 0,33 \cdot V_p + 5,04 \cdot \omega_1 + 0,006 \cdot V_p \cdot \omega_1 - 0,09 \cdot (\omega_1)^2 - 4,33 \cdot 10^{-5} \cdot V_p \cdot (\omega_1)^2 + 4,34 \cdot 10^{-4} \cdot (\omega_1)^3$, adj. $R^2 = 0,789$; b) kukurydzy: $Q = 5,31 - 0,21 \cdot V_p + 0,35 \cdot \omega_1 + 0,002 \cdot (V_p)^2 - 9,25 \cdot 10^{-4} \cdot V_p \cdot \omega_1 - 0,006 \cdot (\omega_1)^2 - 1,22 \cdot 10^{-5} \cdot (V_p)^2 \cdot \omega_1 + 2,27 \cdot 10^{-5} \cdot V_p \cdot (\omega_1)^2 + 2,12 \cdot 10^{-5} \cdot (\omega_1)^3$, adj. $R^2 = 0,473$

Zależności jednostkowego zużycia energii otrzymane dla rozdrabniania ziaren ryżu i kukurydzy w zależności od intensywności dozowania wsadu i prędkości kątowej tarczy pierwszej wynikają ze wzajemnych relacji pomiędzy wydajnością i poborem mocy na rozdrabnianie (zgodnie z równaniem 4.3). Jednostkowe zużycie energii podczas rozdrabniania ryżu zmniejszało się liniowo wraz ze wzrostem intensywności dozowania wsadu (rys. 7.22), o czym świadczą ujemne wartości współczynników korelacji Pearsona i korelacji cząstkowych (tabele 7.10–7.12). Liniowy charakter zmian jednostkowego zużycia energii w zależności od intensywności dozowania wsadu podczas rozdrabniania ryżu dla analizowanej postaci konstrukcyjnej zespołu roboczego wynika wprost z liniowych zależności poboru mocy i wydajności od tej zmiennej. Obserwowano

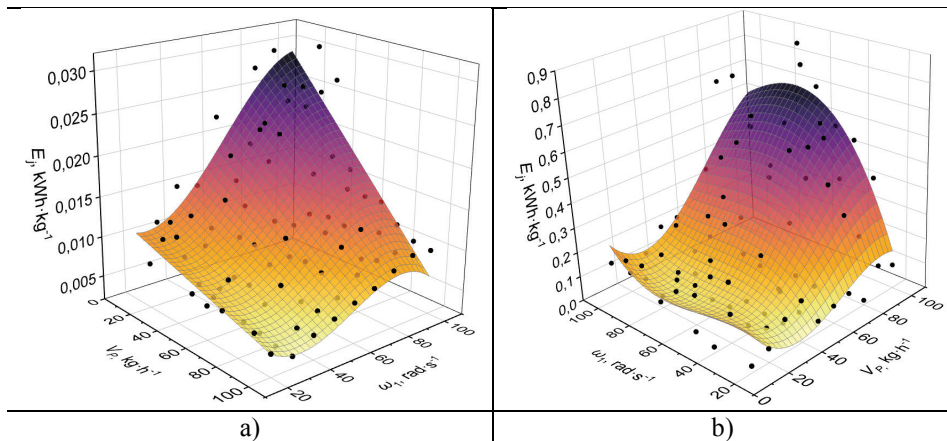
jednoczesny wzrost wydajności (rys. 7.20) i zmniejszanie się poboru mocy (rys. 7.18) wraz ze wzrostem intensywności dozowania wsadu podczas rozdrabniania ryżu, co skutkowało zmniejszaniem się jednostkowego zużycia energii i jest zbieżne m.in. z wynikami opublikowanymi w [233]. Podczas rozdrabniania kukurydzy obserwowano odwrotne zależności, tj. wzrost poboru mocy i zmniejszanie się wydajności wraz ze wzrostem intensywności dozowania wsadu, co prowadziło w konsekwencji do wzrostu jednostkowego zużycia energii (rys. 7.22). W przypadku rozdrabniania kukurydzy zmiany jednostkowego zużycia energii w funkcji wydatku dozowania wsadu nie dla wszystkich prędkości kątowych były liniowe, lecz zmieniały się zgodnie z zależnością wielomianową drugiego stopnia (rys. 7.23). Podobne zależności wykazano m.in. w [233, 242, 252].

Analiza korelacji Pearsona i korelacji cząstkowej wykazała także dodatnie związki pomiędzy prędkością kątową tarczy pierwszej i jednostkowym zużyciem energii dla obu rozdrabnianych ziaren (tabele 7.10–7.12). Zmiany jednostkowego zużycia energii nie zachodziły jednak liniowo wraz ze wzrostem intensywności dozowania wsadu (rys. 7.22), co ma związek przede wszystkim z nieliniowymi zmianami wydajności w zależności od analizowanej zmiennej niezależnej. Biorąc pod uwagę powyższe, model liniowy dwóch zmiennych prędkości kątowej tarczy pierwszej i intensywności dozowania wsadu wyjaśniał zmiany jednostkowego zużycia energii rozdrabniania ryżu w 71,3% oraz jednostkowego zużycia energii na rozdrabnianie kukurydzy w 53,3% (tabele 7.13 i 7.14). Najlepiej zmiany jednostkowego zużycia energii rozdrabniania ziaren ryżu (adj. $R^2 = 0,787$) i kukurydzy (adj. $R^2 = 0,694$) opisywały nieliniowe modele dwóch zmiennych przedstawione na rysunku 7.23.

Stopień rozdrobnienia ziaren ryżu i kukurydzy był ujemnie skorelowany z intensywnością dozowania wsadu, na co wskazują ujemne wartości współczynników korelacji (tabele 7.10–7.12). Charakter zmian stopnia rozdrobnienia w zależności od intensywności dozowania wsadu dla poszczególnych prędkości kątowych tarczy pierwszej nie był jednak czysto liniowy, co przedstawiono na rysunku 7.24. Zasadniczo najmniejsze wartości stopnia rozdrobnienia występowały przy wydatku dozowania równym $10 \text{ kg}\cdot\text{h}^{-1}$ oraz powyżej $70 \text{ kg}\cdot\text{h}^{-1}$. Największy stopień rozdrobnienia występował podczas rozdrabniania ryżu przy wydatku dozowania wsadu w zakresie $20\text{--}60 \text{ kg}\cdot\text{h}^{-1}$ w zależności od prędkości kątowej tarczy, a dla kukurydzy przy wydatku dozowania $30\text{--}50 \text{ kg}\cdot\text{h}^{-1}$ (rys. 7.24). W ogólności obserwowano wzrost stopnia rozdrobnienia wraz ze zmniejszaniem się intensywności dozowania wsadu, co pokrywa się z rezultatami dla młyna mieszałowego [312]. Trend zmian stopnia rozdrobnienia w zależności od prędkości kątowej tarczy pierwszej różnił się dla poszczególnych ustawień intensywności dozowania wsadu (rys. 7.24). W większości przypadków jednak stopień rozdrobnienia wzrastał wraz ze wzrostem prędkości kątowej tarczy, choć nie zawsze liniowo (rys. 7.24). Wpływ obu zmiennych na stopień rozdrobnienia jest zagadnieniem złożonym, zależnym od zjawisk zachodzących w przestrzeni otworowej.



Rys. 7.22. Wyniki badań jednostkowego zużycia energii podczas rozdrabniania ziaren: a) ryżu, b) kukurydzy przy zmiennej prędkości kątowej tarczy pierwszej ω_1 i intensywności podawania wsadu V_p

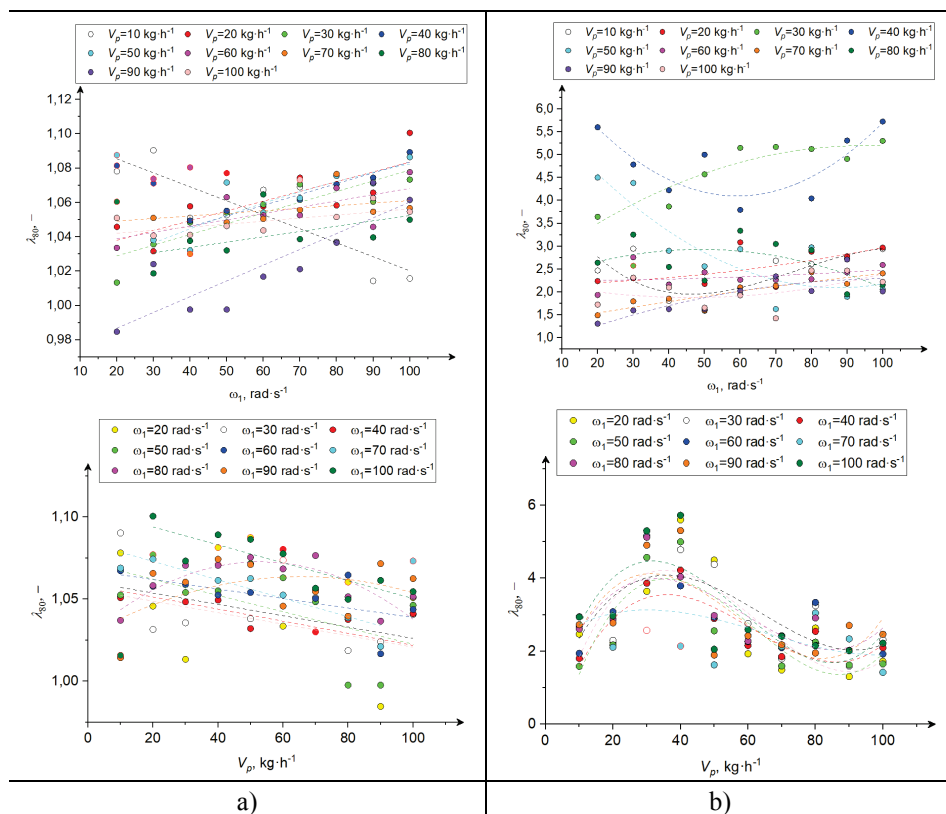


Rys. 7.23. Wykres powierzchniowy jednostkowego zużycia energii w zależności od intensywności dozowania wsadu V_p i prędkości kątowej tarczy pierwszej ω_1 podczas rozdrabniania (a) ryżu: $E_j = 0,02 - 4,38 \cdot 10^{-5} \cdot V_p - 5,59 \cdot 10^{-4} \cdot \omega_1 - 7,94 \cdot 10^{-7} \cdot V_p \cdot \omega_1 + 1,44 \cdot 10^{-5} \cdot (\omega_1)^2 - 1,22 \cdot 10^{-8} \cdot V_p \cdot (\omega_1)^2 - 7,44 \cdot 10^{-8} \cdot (\omega_1)^3$, adj. $R^2 = 0,787$; (b) kukurydzy: $E_j = 0,29 - 0,02 \cdot V_p + 0,003 \cdot \omega_1 + 3,26 \cdot 10^{-4} \cdot (V_p)^2 + 3,22 \cdot 10^{-4} \cdot V_p \cdot \omega_1 - 1,33 \cdot 10^{-4} \cdot (\omega_1)^2 - 1,69 \cdot 10^{-6} \cdot (V_p)^3 + 3,32 \cdot 10^{-7} \cdot (V_p)^2 \cdot \omega_1 - 2,55 \cdot 10^{-6} \cdot V_p \cdot (\omega_1)^2 + 1,15 \cdot 10^{-6} \cdot (\omega_1)^3$, adj. $R^2 = 0,694$

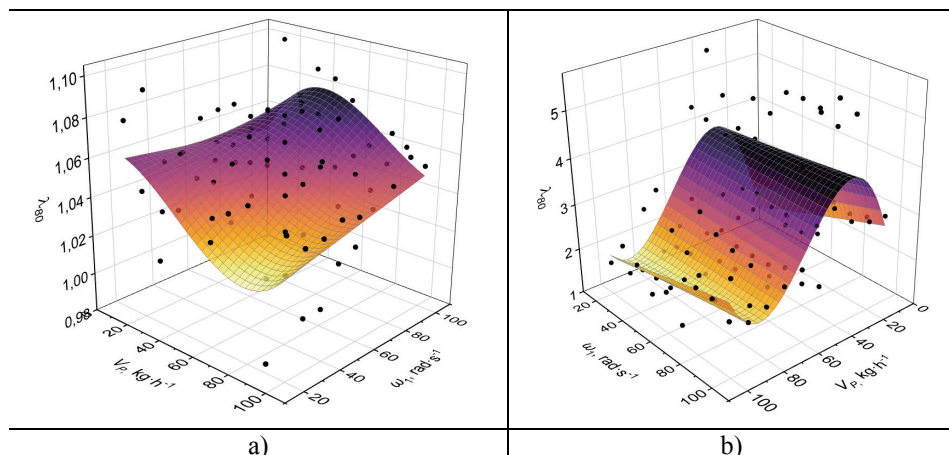
Wcześniejsze badania wykazały silny związek pomiędzy liczbą kontaktów oraz energią uderzeń a stopniem rozdrobnienia [217, 233, 241]. Wzrost prędkości kątowej powoduje wzrost prędkości liniowej elementów rozdrabniających, co skutkuje większą energią zderzeń, ale także zwiększeniem częstotliwości zderzeń. Zatem przy założeniu niezmiennej masy ziaren w komorze roboczej stopień rozdrobnienia powinien wzrastać, co uzyskano dla większości poziomów wydatku dozowania wsadu (rys. 7.24). Jednak w rozdrabniaczu wielotarczowym masa ziarna w otworze zmienia się ze względu na nierównomierność przepływu z uwagi na periodyczne podawanie i usuwanie materiału z przestrzeni otworowej, ale także zmienne prawdopodobieństwo ścięcia materiału [10, 38, 311]. Skutkuje to zmiennym czasem przebywania materiału w komorze. W przypadku małych prędkości kątowych tarcz i przy małej intensywności dozowania wsadu objętość materiału w komorze jest niewielka, co daje możliwość szybkiego przejścia materiału przez zespół roboczy przy mniejszej ilości zderzeń. Sukcesywne zwiększanie intensywności dozowania wsadu powoduje zagęszczenie materiału i częściowe jego stłoczenie w przestrzeni otworowej, a to z kolei powoduje, że cząstki przemieszczają się wolniej i mogą być wielokrotnie ścinane przez krawędzie współpracujących otworów. Jednak po przekroczeniu krytycznej wartości wypełnienia otworu zagęszczenie materiału jest na tyle duże, że ziarna przestają się przemieszczać względem siebie i następuje ponowne zmniejszenie prawdopodobieństwa zderzeń i rozdrobnienia pomiędzy elementami quasi-ścinającymi, co przyczynia się do zmniejszenia stopnia rozdrobnienia. Zmiany prędkości kątowej pośrednio wpływają na ilość materiału w otworach, wprowadzając pewną cykliczność przepływu ziaren, ale także przyczyniają się do zmian ilości zderzeń i ich wartości energetycznej. Wartość stopnia rozdrobnienia w rozdrabniaczach wielotarczowych jest zatem wynikiem zmian energii rozdrabniania, ilości efektywnych kontaktów (powodujących rozdrobnienie), parametrów przepływu ziarna oraz charakterystyki rozdrabniania materiału (tj. wielkości ziaren uzyskiwanych podczas pojedynczego kontaktu o określonej wartości energii) zależnych od intensywności dozowania wsadu i prędkości kątowej tarczy, co biorąc pod uwagę współistnienie zależności (często nieliniowych) pomiędzy zmiennymi powoduje utrudnione przewidywanie stopnia rozdrobnienia. Między innymi dlatego modele liniowe dwóch zmiennych: intensywności dozowania wsadu i prędkości kątowej tarczy pierwszej opisywały zmienność stopnia rozdrobnienia dla badanej konstrukcji rozdrabniacza tylko w 35% dla ryżu i 14,8% dla kukurydzy (tabele 7.13 i 7.14), a modele wielomianowe dwóch zmiennych wyższego rzędu w ok. 45% (rys. 7.25).

Wyniki badań jednoznacznie wskazują, że aby rozdrabnianie zachodziło efektywnie, parametry dozowania wsadu, ale także parametry ruchu tarczy roboczej muszą być ze sobą odpowiednio skorelowane. Wówczas możliwe jest jednocześnie skuteczne przemieszczanie materiału w przestrzeni otworowej oraz cięcie wsadu. Co ważne, parametry te powinny być tak dobrane, aby dwie realizowane funkcje cięcia i transportu nie oddziaływały na siebie destrukcyjnie, co – jak wskazują wyniki badań – jest zagadnieniem złożonym i wielowymiarowym.

Podkreśla to znaczenie piętrowości struktury systemu rozdrabniania w rozwoju konstrukcji rozdrabniaczy. Poznanie relacji pomiędzy elementami struktury wyrażanych zgodnie z rys. 2.3 jako funkcje relacji parametrów wejściowych (zmiennych sterujących), charakterystyk użytkowych i wskaźników rozdrabniania należy uznać zatem za warunek konieczny innowacji konstrukcyjnych oraz procesowych maszyn i urządzeń procesów rozdrabniania, aby mogły skuteczniej i efektywniej realizować cel przetwórczy.



Rys. 7.24. Wyniki badań stopnia rozdrobnienia podczas rozdrabniania ziaren: a) ryżu, b) kukurydzy przy zmiennej prędkości kątowej tarczy pierwszej ω_1 i intensywności podawania wsadu V_p



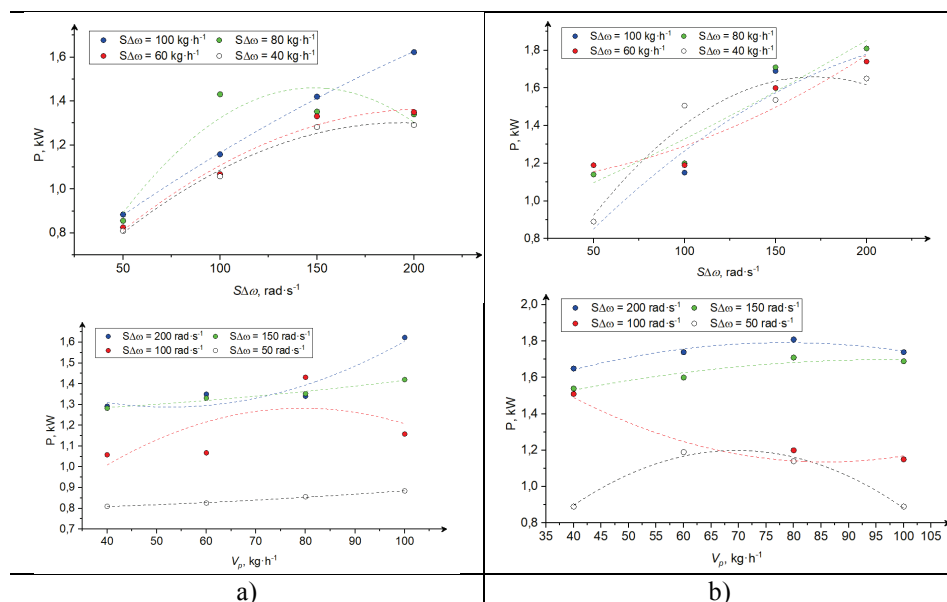
Rys. 7.25. Wykres powierzchniowy stopnia rozdrobienia w zależności od intensywności dozowania wsadu V_p i prędkości kątowej tarczy pierwszej ω_1 podczas rozdrabniania: a) ryżu: $\lambda_{80} = 1,07 - 6,17 \cdot 10^{-4} \cdot V_p - 4,50 \cdot 10^{-4} \cdot \omega_1 - 1,75 \cdot 10^{-5} \cdot (V_p)^2 + 3,50 \cdot 10^{-5} \cdot V_p \cdot \omega_1 + 1,92 \cdot 10^{-7} \cdot (V_p)^3 - 2,81 \cdot 10^{-7} \cdot (V_p)^2 \cdot \omega_1$, adj. $R^2 = 0,424$; b) kukurydzy: $\lambda_{80} = -1,10 + 0,31 \cdot V_p + 0,02 \cdot \omega_1 - 0,006 \cdot (V_p)^2 - 7,63 \cdot 10^{-4} \cdot V_p \cdot \omega_1 + 2,93 \cdot 10^{-5} \cdot (V_p)^3 + 6,53 \cdot 10^{-6} \cdot (V_p)^2 \cdot \omega_1$, adj. $R^2 = 0,455$

7.3.2. Relacje pomiędzy intensywnością dozowania wsadu i prędkością kątową tarcz a wybranymi wskaźnikami oceny

Rozważania dotyczące wpływu intensywności dozowania wsadu i prędkości kątowej tarczy pierwszej poszerzono o analizę wpływu intensywności dozowania wsadu i zmiennej prędkości kątowej dla zestawu pięciu tarcz. Częściowo wyniki badań przedstawiono we wcześniejszych pracach [12, 60], więc analiza zostanie ograniczona do najważniejszych wniosków oraz uzupełniona o nieporuszone wcześniej kwestie.

Analiza wyników badań wykazała istnienie podobnych zależności pomiędzy wskaźnikami rozdrabniania a zmiennym wydatkiem dozowania wsadu V_p i sumarycznym przyrostem prędkości kątowych tarcz $S\Delta\omega$ dla badanej konstrukcji rozdrabniacza wielotarczowego. Pobór mocy rozdrabniania ryżu i kukurydzy był dodatnio skorelowany z prędkością kątową tarcz ($r = 0,854$ dla ryżu i $r = 0,915$ dla kukurydzy), na co wskazywano już w poprzednich rozdziałach. Wzrost poboru mocy nie był liniowy wraz ze wzrostem sumarycznego przyrostu prędkości kątowych na tarczach (rys. 7.26), podobnie jak miało to miejsce w przypadku rozdrabniania przez jedną tarczę i rosnących jej prędkościach kątowych. Podobne obserwacje dotyczące wzrostu poboru mocy wraz ze wzrostem prędkości liniowych, kątowych, obrotowych elementów rozdrabniających opisano m.in. w [203, 215, 233, 271, 276, 313–315]. Zależność poboru mocy od całkowitego przyrostu prędkości kątowej tarcz wynika z prostej zależności, że moc jest iloczynem momentu obrotowego i prędkości kątowej tarczy, która dla biegu jałowego rozdrabniacza wielotarczowego (bez wsadu) jest zależnością liniową i stanowi, jak wykazano w [199] ponad połowę całkowitego zapotrzebowania na moc podczas rozdrabniania [12, 60].

Analiza korelacji cząstkowych wykazała dodatnią korelację pomiędzy intensywnością dozowania wsadu a poborem mocy rozdrabniania ryżu ($r = 0,522$) i brak korelacji pomiędzy intensywnością dozowania wsadu i poborem mocy podczas rozdrabniania kukurydzy ($r = -0,045$) [12, 60], co różni się od wyników przedstawionych w poprzednim podrozdziale. Podczas rozdrabniania tylko przez tarczę pierwszą wzrost intensywności dozowania wsadu powodował zmniejszanie się poboru mocy podczas rozdrabniania ryżu i wzrost poboru mocy podczas rozdrabniania kukurydzy. Rozdrabnianie przez komplet pięciu tarcz spowodowało zmiany dynamiki przepływu materiału w stosunku do rozdrabniania przez jedną tarczę, co wykazano także w eksperymencie, w którym zmienną była liczba tarcz użytych podczas rozdrabniania. Zwiększanie intensywności dozowania ziaren ryżu do przestrzeni roboczej, gdy rozdrabnianie zachodzi przez pięć tarcz, powoduje wzrost poboru mocy (rys. 7.26) na skutek zwiększania się ilości materiału jednocześnie ścinanego pomiędzy tarczami. Zależność ta jest odwrotna niż obserwowana dla rozdrabniania ryżu przez jedną tarczę z uwagi na zmianę dynamiki przepływu ziaren. W przypadku jednej tarczy ziarna szybko przemieszczały się w otworach i bardzo szybko opuszczały przestrzeń rozdrabniania. W przypadku zastosowania pięciu tarcz wydłużyła się droga, jaką przebywały ziarna do opuszczenia przestrzeni otworowej, w związku z tym ich większa ilość znajdowała się w komorze w tym samym czasie i jednocześnie zwiększała się ilość kontaktów ziano-element rozdrabniający w stosunku do rozdrabniania tylko przez jedną tarczę, co zwiększało opory ruchu na tarczach i wzrost poboru mocy.



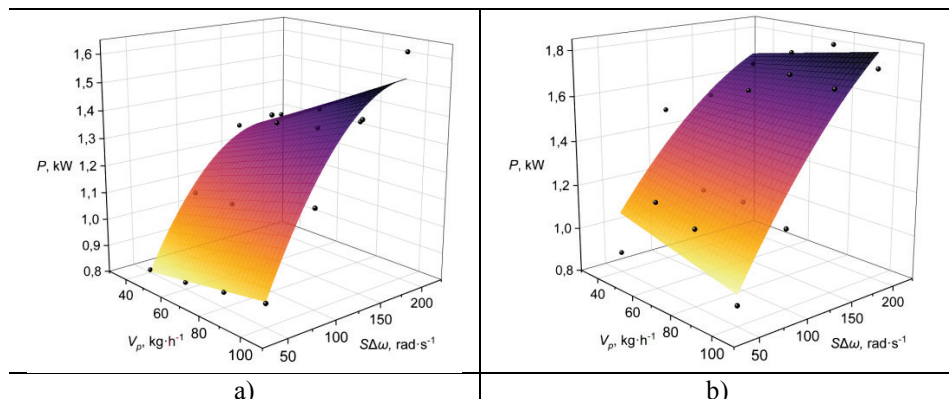
Rys. 7.26. Wyniki badań poboru mocy podczas rozdrabniania ziaren: a) ryżu, b) kukurydzy przy zmiennej wartości sumarycznego przyrostu prędkości na tarczach rozdrabniacza i intensywności podawania wsadu V_p

W przypadku kukurydzy nie odnotowano korelacji pomiędzy poborem mocy a intensywnością dozowania wsadu, co wynika między innymi z nieliniowego, niemonotonicznego charakteru zmian poboru mocy wraz z intensywnością dozowania wsadu (rys. 7.26) uzależnionych w przeważającej mierze od ilości materiału znajdującego się w komorze rozdrabniania i właściwości charakteryzujących jego przepływ przez otwory. Jednym z powodów braku korelacji jest nierównomierność rozdrabniania, która zwielokrotnia się przy zwiększaniu liczby elementów rozdrabniających, przez co występujące potencjalne zależności między zmiennymi są trudniejsze do zaobserwowania. Z wielu badań wynika, że pobór mocy podczas rozdrabniania jest nierównomierny, co jest spowodowane nierównomiernym przepływem materiału w komorze rozdrabniania oraz nierównomiernością ruchu elementów mielących [10, 59, 311, 316]. Objawia się to okresowym wzrostem i spadkiem poboru mocy w czasie. Zmienność poboru mocy rozdrabniania materiału dozowanego okresowo jest efektem nierównomierności ruchu tarcz, nierównomierności dozowania oraz nierównomierności przepływu materiału wewnątrz komory [10, 59, 311, 316]. Powoduje to, że w każdej chwili czasu t ilość materiału rozdrabnianego zmienia się i pojawiają się różne opory ruchu i opory quasi-ścianania.

Pobór mocy podczas rozdrabniania przez zespół pięciotarczowy w zależności od intensywności dozowania wsadu i sumarycznego przyrostu prędkości kątowych na tarczach rozdrabniacza opisują modele liniowe dwóch zmiennych w postaci [12]:

- dla ryżu: $P = 0,529 + 0,003 V_p + 0,004 S\Delta\omega$, adj. $R^2 = 0,773$ (7.18)
- dla kukurydzy: $P = 0,808 - 2,45 \cdot 10^{-4} V_p + 0,005 S\Delta\omega$, adj. $R^2 = 0,813$. (7.19)

Nieznacznie lepszym dopasowaniem do danych eksperymentalnych charakteryzowały się modele wielomianowe drugiego rzędu dwóch zmiennych przedstawione na rysunku 7.27.



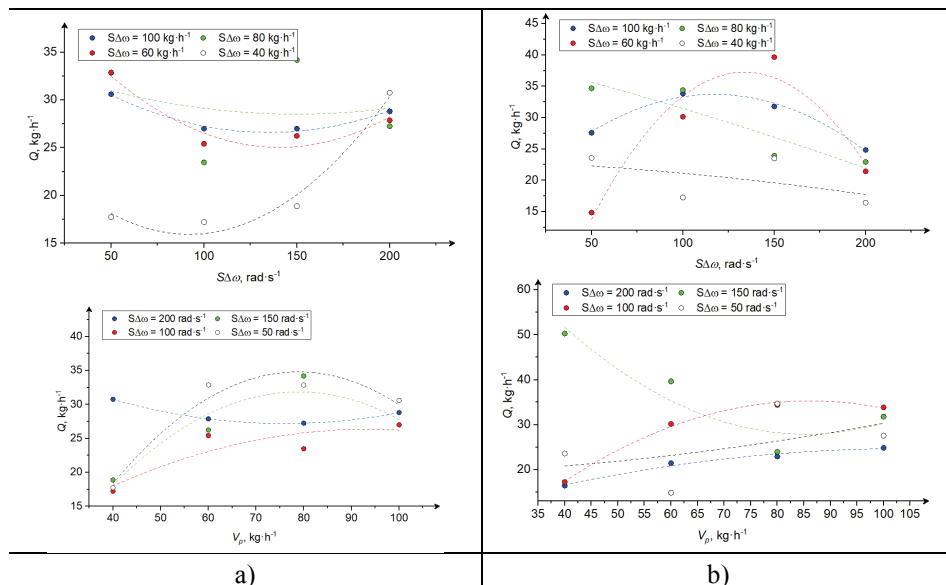
Rys. 7.27. Wykres powierzchniowy poboru mocy w zależności od intensywności dozowania wsadu V_p i sumarycznego wzrostu prędkości kątowych tarcz $S\Delta\omega$ podczas rozdrabniania: a) ryżu: $P = 0,35 + 4,65 \cdot 10^{-4} \cdot V_p + 0,01 \cdot S\Delta\omega + 1,96 \cdot 10^{-5} \cdot V_p \cdot S\Delta\omega - 2,80 \cdot 10^{-5} \cdot (S\Delta\omega)^2$, adj. $R^2 = 0,861$; b) kukurydzy: $P = 0,89 - 0,004 \cdot V_p + 0,006 \cdot S\Delta\omega + 2,80 \cdot 10^{-5} \cdot V_p \cdot S\Delta\omega - 1,33 \cdot 10^{-5} \cdot (S\Delta\omega)^2$, adj. $R^2 = 0,813$

Podobnie jak w przypadku rozdrabniania tylko przez pierwszą tarczę, wydajność rozdrabniania ryżu i kukurydzy była skorelowana tylko z intensywnością dozowania wsadu (współczynniki korelacji cząstkowej równe 0,502 i 0,492 odpowiednio dla ryżu i kukurydzy) [12, 60]. Podobnie nie odnotowano korelacji pomiędzy sumarycznym przyrostem prędkości kątowych tarcz a wydajnością z uwagi na niemonotoniczny charakter zmian wydajności (rys. 7.28). Brak zależności wydajności od całkowitego przyrostu prędkości kątowej tarcz jest efektem występowania krytycznych wartości prędkości kątowych tarczy, przy których wydajność jest największa dla określonej wartości wydatku dozowania wsadu przy ustalonych cechach konstrukcyjnych zespołu roboczego.

Analiza wykazała, że wydajność rozdrabniania na ogół rosła wraz ze wzrostem intensywności dozowania wsadu, ponieważ im więcej materiału jest dozowane, tym więcej jest rozdrabniane. Otrzymana zależność wydajności rozdrabniania kukurydzy od intensywności dozowania wsadu dla zespołu pięciotarczowego jest jednak odwrotna niż otrzymana dla rozdrabniania za pomocą jednej tarczy. Ma to swoje uzasadnienie w specyfice przejścia materiału przez rozdrabniacz. Gdy materiał rozdrabniany jest przez jedną tarczę ruchomą, otwory w tarczy następującej stanowią przeciwostża i jednocześnie kanały wylotowe dla materiału. Ponieważ tarcza następująca jest nieruchoma, to materiał przemieszcza się przez otwory na skutek parcia materiału przedostającego się z tarczy poprzedzającej i sił grawitacji, w związku z czym przepływ materiału jest powolny i zakłócony (materiał może się blokować w otworach). Podczas rozdrabniania z wykorzystaniem kolejnych tarcz materiał jest sukcesywnie odbierany z pierwszej tarczy i przenoszony na kolejne tarcze doznając przyspieszenia, dlatego kolejne partie materiału mogą się szybciej przemieszczać doznając jednocześnie większej liczby kontaktów, przez co cząstki szybciej opuszczają przestrzeń rozdrabniania i wydajność zwiększa się. Dobrze obrazują to zmiany wydajności rozdrabniania kukurydzy wraz ze wzrostem liczby tarcz wykorzystanych podczas rozdrabniania, omówione w jednym z poprzednich rozdziałów.

Wartości współczynników korelacji (tabele 7.6 oraz 7.10–7.12) sugerujące brak współzależności lub występowanie wzajemnych relacji umiarkowanych i wysokich ($0,5 < r < 0,8$) pomiędzy wydajnością a zmiennymi niezależnymi, tj. liczbą tarcz, intensywnością dozowania wsadu, prędkościami kątowymi tarcz prowadzą do wniosku, że istnieją pewne czynniki zakłócające przepływ materiału. Jednym z takich zjawisk jest wspomniana wcześniej nierównomierność rozdrabniania. Inne czynniki, które mogą wpływać na wydajność, to np. struktura materiału, jego wilgotność, zdolności adhezyjne i parametry mechaniczne związane z ruchem, jak współczynniki tarcia [12]. Badania przeprowadzone z udziałem cząstek o dużej wilgotności wykazały, że przy zwiększonych siłach adhezji pomiędzy ziarnami mogą występować problemy z przepływem materiału [317–320]. Cząstki wilgotne wykazujące właściwości adhezyjne łatwo tworzą aglomeraty i przyklejają się do elementów rozdrabniających i ścianek komory rozdrabniania [12], co powoduje, że pozostaje on w komorze. Nagromadzenie materiału na elementach roboczych może z czasem skutkować odklejeniem materiału

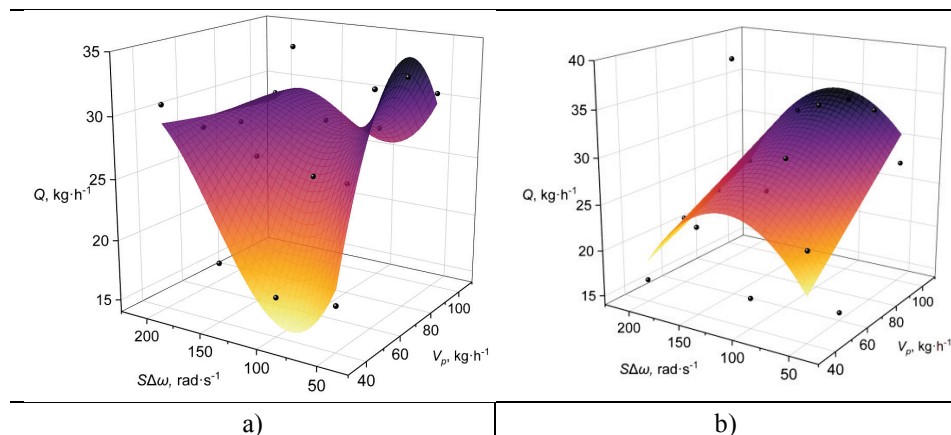
powodując gwałtowne wzrosty wydajności; zostało to szerzej opisane w [10, 59, 311, 316].



Rys. 7.28. Wyniki badań wydajności podczas rozdrabniania ziaren: a) ryżu, b) kukurydzy przy zmiennej wartości sumarycznego przyrostu prędkości na tarczach rozdrabniacza i intensywności podawania wsadu V_p

Wydajność podczas rozdrabniania ryżu i kukurydzy przy zmiennym wydatku dozowania wsadu od 40 do 100 $\text{kg}\cdot\text{h}^{-1}$ nie przekroczyła 40 $\text{kg}\cdot\text{h}^{-1}$ na godzinę przy rozdrabnianiu przez pięć tarcz roboczych [12, 60]. Podobne wartości uzyskiwano w pierwszym programie badawczym podczas rozdrabniania przez zestaw pięciu tarcz i wydatku dozowania wsadu na poziomie 100 $\text{kg}\cdot\text{h}^{-1}$. Wskazuje to, że tarcze nie odbierają całego materiału dozowanego do komory przez podajnik. Poprawę wydajności można osiągnąć poprzez modyfikację konstrukcji tarcz i konfiguracji zespołu roboczego. W przypadku ryżu lepsze wartości wydajności można osiągnąć stosując dwie tarcze (rys. 7.11), jednak stopień rozdrobnienia będzie mniejszy (rys. 7.9). Zwiększenie liczby otworów z jednoczesnym zmniejszeniem ich średnicy mogłoby doprowadzić do zwielokrotnienia zderzeń przyczyniając się do poprawy stopnia rozdrobnienia ziaren ryżu przy zastosowaniu zespołu składającego się z dwóch tarcz [12,60].

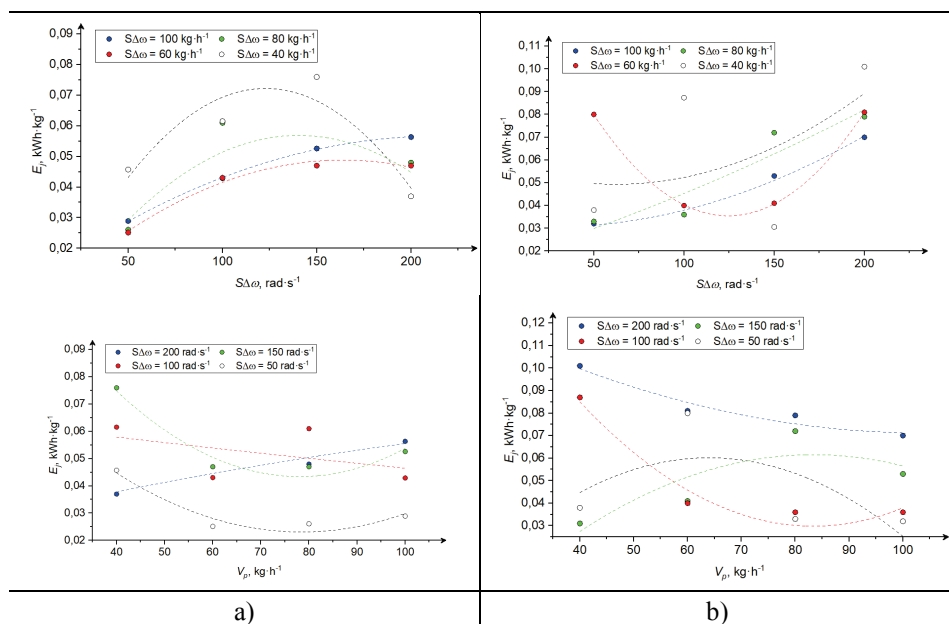
Zmiany wydajności rozdrabniania w warunkach badanej postaci konstrukcyjnej zespołu roboczego najlepiej odwzorowują modele nieliniowe dwóch zmiennych (rys. 7.29), jednak wyjaśniały one tylko niewielki zakres zmienności wydajności w zależności od wydatku (intensywności) dozowania wsadu i sumarycznego przyrostu prędkości kątowych tarcz, nieco ponad 25% zmienności wydajności rozdrabniania kukurydzy i ok. 60% zmienności wydajności rozdrabniania ziaren ryżu [12].



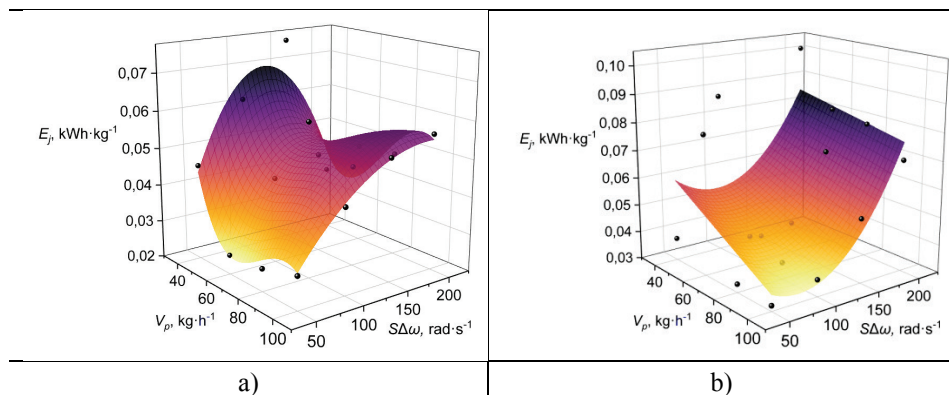
Rys. 7.29. Wykres powierzchniowy wydajności w zależności od intensywności dozowania wsadu V_p i sumarycznego wzrostu prędkości kątowych tarcz $S\Delta\omega$ podczas rozdrabniania: a) ryżu: $Q = -15,61 + 2,02 \cdot V_p - 0,56 \cdot S\Delta\omega - 0,01 \cdot (V_p)^2 - 0,008 \cdot V_p \cdot S\Delta\omega + 0,007 \cdot (S\Delta\omega)^2 + 6,95 \cdot 10^{-5} \cdot (V_p)^2 \cdot S\Delta\omega - 1,38 \cdot 10^{-5} \cdot V_p \cdot (S\Delta\omega)^2 - 1,30 \cdot 10^{-5} \cdot (S\Delta\omega)^3$, adj. $R^2 = 0,599$; b) kukurydzy: $Q = -2,04 + 0,23 \cdot V_p + 0,32 \cdot S\Delta\omega - 6,01 \cdot 10^{-4} \cdot V_p \cdot S\Delta\omega - 0,001 \cdot (S\Delta\omega)^2$, adj. $R^2 = 0,263$

Podobnie jak w poprzednich programach badawczych, jednostkowe zużycie energii było dodatnio skorelowane z przyrostem prędkości kątowych tarcz ($r = 0,430$ i $r = 0,534$ odpowiednio dla rozdrabniania ryżu i kukurydzy). Wykazano, że pobór mocy był dodatnio skorelowany z sumarycznym przyrostem prędkości kątowych, natomiast wydajność tylko umiarkowanie skorelowana z intensywnością dozowania wsadu, dlatego wystąpiły tylko średnia i wysoka współzależność jednostkowego zużycia energii z sumarycznym przyrostem prędkości kątowych na tarczach rozdrabniacza oraz brak korelacji z wydatkiem dozowania wsadu [12]. Jednostkowe zużycie energii w zależności od badanych zmiennych nie zmieniało się liniowo (rys. 7.30), ponieważ nieliniowe były także zmiany wydajności i poboru mocy.

Zmiany jednostkowego zużycia energii dla analizowanej konstrukcji rozdrabniacza wielotarczowego najlepiej opisywały modele nieliniowe dwóch zmiennych (rys. 7.31), jednak wyjaśniały one tylko niewielki zakres zmienności jednostkowego zużycia energii w zależności od wydatku dozowania wsadu i sumarycznego przyrostu prędkości kątowych tarcz, nieco ponad 27% zmienności jednostkowego zużycia energii na rozdrabnianie kukurydzy i ok. 60% zmienności jednostkowego zużycia energii na rozdrabnianie ziaren ryżu [12, 60].



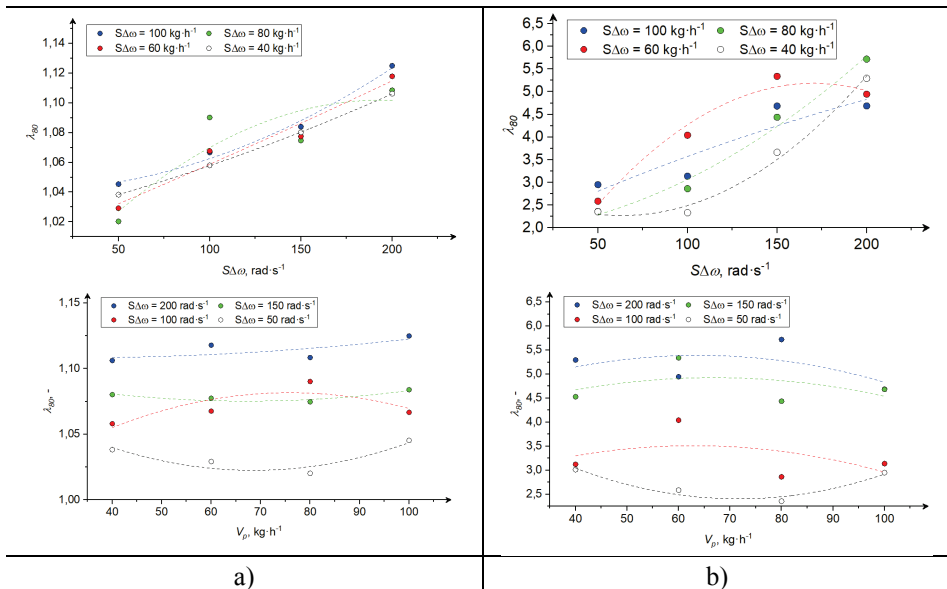
Rys. 7.30. Wyniki badań jednostkowego zużycia energii podczas rozdrabniania ziaren: a) ryżu, b) kukurydzy przy zmiennej wartości sumarycznego przyrostu prędkości na tarczach rozdrabniacza i intensywności podawania wsadu V_p



Rys. 7.31. Wykres powierzchniowy jednostkowego zużycia energii w zależności od intensywności dozowania wsadu V_p i sumarycznego wzrostu prędkości kątowych tarcz $S\Delta\omega$ podczas rozdrabniania: a) ryżu: $E_j = 0,20 - 0,009 \cdot V_p + 0,001 \cdot S\Delta\omega + 1,24 \cdot 10^{-4} \cdot (V_p)^2 - 4,61 \cdot 10^{-6} \cdot V_p \cdot S\Delta\omega - 7,04 \cdot 10^{-6} \cdot (S\Delta\omega)^2 - 5,16 \cdot 10^{-7} \cdot (V_p)^3 - 5,12 \cdot 10^{-8} \cdot (V_p)^2 \cdot S\Delta\omega + 5,89 \cdot 10^{-8} \cdot V_p \cdot (S\Delta\omega)^2$, adj. $R^2 = 0,590$; b) kukurydzy: $E_j = 0,10 - 4,83 \cdot 10^{-4} \cdot V_p - 6,34 \cdot 10^{-4} \cdot S\Delta\omega + 1,66 \cdot 10^{-6} \cdot V_p \cdot S\Delta\omega + 2,95 \cdot 10^{-6} \cdot (S\Delta\omega)^2$, adj. $R^2 = 0,271$

Analiza wyników badań wykazała wzrost stopnia rozdrobnienia wraz ze wzrostem sumarycznego przyrostu prędkości kątowych tarcz (rys. 7.32), co jest zgodne z wynikami przedstawionymi w poprzednich rozdziałach. Wynika to z większej liczby kontaktów materiału z elementami rozdrabniającymi przy większych prędkościach kątowych [31, 312, 321, 322].

Nie stwierdzono istotnych statystycznie korelacji między stopniem rozdrobnienia a wydatkiem dozowania wsadu, pomimo że podczas rozdrabniania przez pojedynczą tarczę występowały korelacje ujemne pomiędzy zmiennymi. Brak zależności statystycznej może wynikać z faktu, że przetestowano tylko cztery poziomy wydatku podawania wsadu. Może to także sugerować, że podczas rozdrabniania przez pięć tarcz wpływ intensywności dozowania wsadu na stopień rozdrobnienia zanika częściowo z uwagi na zwielokrotnienie kontaktów ziarno-element rozdrabniający w stosunku do rozdrabniania przez jedną tarczę oraz bardziej równomierne rozłożenie materiału w otworach, co zapobiega akumulacji ziaren i zmniejszeniu prawdopodobieństwa zderzeń.

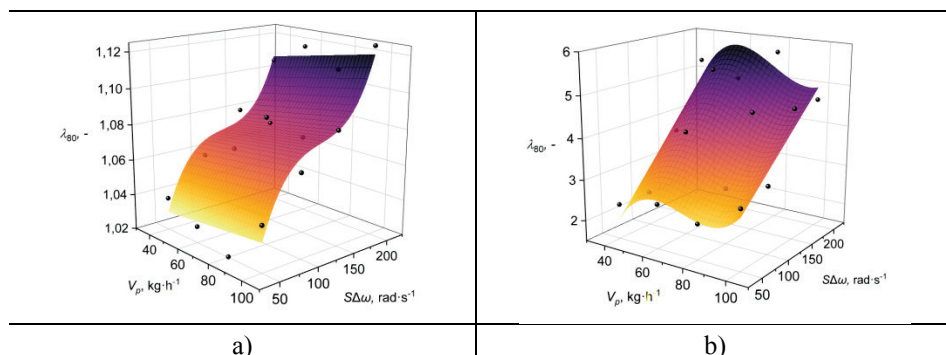


Rys. 7.32. Wyniki badań stopnia rozdrobnienia podczas rozdrabniania ziaren: a) ryżu, b) kukurydzy przy zmiennej wartości sumarycznego przyrostu prędkości na tarczach rozdrabniacza i intensywności podawania wsadu V_p

Stopień rozdrobnienia podczas rozdrabniania przez zespół pięcioletkowy w zależności od wydatku dozowania wsadu i sumarycznego przyrostu prędkości kątowych na tarczach rozdrabniacza opisuje model liniowy dwóch zmiennych w postaci [12]:

- dla ryżu: $\lambda_{80} = 1,00 + 1,46 \cdot 10^{-4} V_p + 5,04 \cdot 10^{-4} S\Delta\omega$, adj. $R^2 = 0,868$ (7.20)
- dla kukurydzy: $\lambda_{80} = 1,19 + 0,005 V_p + 0,02 S\Delta\omega$, adj. $R^2 = 0,774$. (7.21)

Zmiany stopnia rozdrobnienia najlepiej opisywały jednak modele nieliniowe dwóch zmiennych (rys. 7.33).



Rys. 7.33. Wykres powierzchniowy stopnia rozdrobnienia w zależności od intensywności dozowania wsadu V_p i sumarycznego wzrostu prędkości kątowych tarcz $S\Delta\omega$ podczas rozdrabniania: a) ryżu: $\lambda_{80} = 0,91 + 7,82 \cdot 10^{-5} \cdot V_p + 0,004 \cdot S\Delta\omega + 3,87 \cdot 10^{-7} \cdot V_p \cdot S\Delta\omega - 2,82 \cdot 10^{-5} \cdot (S\Delta\omega)^2 + 1,01 \cdot 10^{-9} \cdot V_p \cdot (S\Delta\omega)^2 + 7,45 \cdot 10^{-8} \cdot (S\Delta\omega)^3$, $\text{adj. } R^2 = 0,883$; b) kukurydzy: $\lambda_{80} = -9,00 + 0,48 \cdot V_p + 0,006 \cdot S\Delta\omega - 0,007 \cdot (V_p)^2 + 4,79 \cdot 10^{-4} \cdot V_p \cdot S\Delta\omega + 3,34 \cdot 10^{-5} \cdot (V_p)^3 - 3,92 \cdot 10^{-6} \cdot (V_p)^2 \cdot S\Delta\omega$, $\text{adj. } R^2 = 0,781$

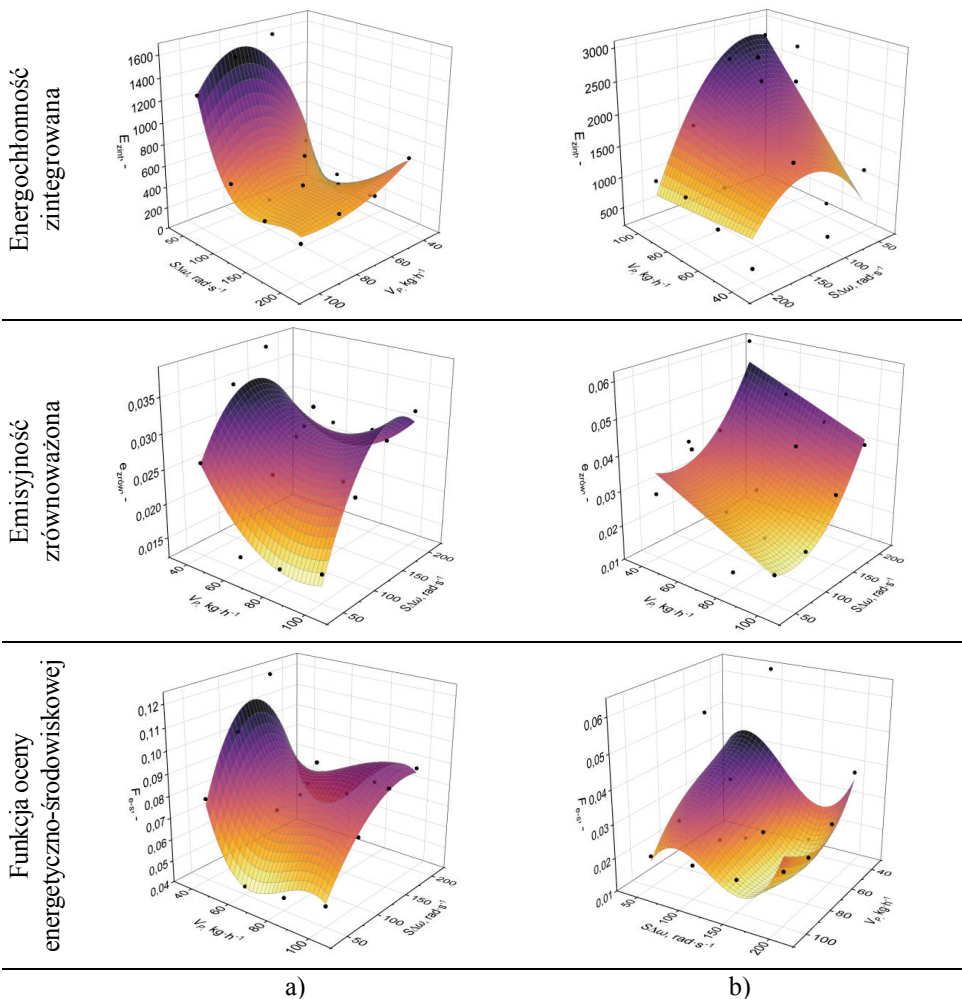
Na podstawie wyznaczonych wartości omówionych wcześniej wskaźników obliczono wartości wskaźników zintegrowanej energochłonności, emisyjności zrównoważonej i funkcji oceny energetyczno-środowiskowej rozdrabniania ziaren ryżu i kukurydzy (rys. 7.34) dla analizowanej konstrukcji rozdrabniacza wielotarczowego. Wyniki badań dla rozdrabniania ryżu wskazują, że zmniejszenie objętości dozowanego materiału do komory rozdrabniania skutkuje obniżeniem wartości zintegrowanej energochłonności, co spowodowane jest zmniejszeniem wydajności procesu i stopnia rozdrobnienia oraz wzrostem jednostkowego zapotrzebowania na energię wraz ze zmniejszaniem się ilości materiału w komorze rozdrabniania. W przypadku rozdrabniania obu ziaren zmniejszanie wartości sumarycznego przyrostu prędkości powodowało obniżenie zintegrowanej energochłonności. Najkorzystniejsze wartości wskaźnika zrównoważonej emisyjności (najmniejsze) dla obu ziaren występują wraz ze zwiększaniem się strumienia dozowania wsadu i zmniejszaniem się sumarycznego przyrostu prędkości na tarczach. Wraz ze wzrostem strumienia dozowania wsadu oraz zmniejszaniem się sumarycznego przyrostu prędkości kątowych tarcz malały wartości funkcji energetyczno-środowiskowej podczas rozdrabniania obu ziaren. W przypadku kukurydzy obszar o najniższych wartościach funkcji energetyczno-środowiskowej był ograniczony wartościami $S\Delta\omega$ w zakresie 100–175 $\text{rad} \cdot \text{s}^{-1}$ i wielkościami wydatku dozowania wsadu w zakresie 60–100 $\text{kg} \cdot \text{h}^{-1}$.

Zmiany emisyjności zrównoważonej, energochłonności zintegrowanej i funkcji energetyczno-środowiskowej rozdrabniania ziaren można opisać za pomocą ogólnego równania wielomianowego dwóch zmiennych intensywności dozowania wsadu V_p i sumarycznego przyrostu prędkości kątowych tarcz $S\Delta\omega$:

$$E_{zint}, e_{zrow}, F_{e-s}(V_p, S\Delta\omega) = A + BV_p + CS\Delta\omega + DV_p^2 + EV_pS\Delta\omega + F(S\Delta\omega)^2 + GV_p^3 + HV_p^2S\Delta\omega + IV_p(S\Delta\omega)^2 + J(S\Delta\omega)^3 \quad (7.22)$$

gdzie: V_p – intensywność dozowania wsadu, $\text{kg}\cdot\text{h}^{-1}$, $S\Delta\omega$ – sumaryczny przyrost prędkości na tarczach rozdrabniacza, $\text{rad}\cdot\text{s}^{-1}$, $A, B, C, D, E, F, G, H, I, J$ – współczynniki równania powierzchni wyznaczone na podstawie danych eksperymentalnych.

Parametry opisujące powierzchnie przedstawione na rysunku 7.34 zaprezentowano w tabeli 7.15.



Rys. 7.34. Zintegrowana energochłonność, emisyjność zrównoważona oraz funkcja oceny energetyczno-środowiskowej w funkcji strumienia dozowania wsadu oraz sumarycznego przyrostu prędkości na tarczach rozdrabniacza podczas rozdrabniania ziaren: a) ryżu, b) kukurydzy

Tabela 7.15. Zestawienie współczynników modeli powierzchni dopasowanych do danych eksperymentalnych przedstawionych na rysunku 7.34

Współczynnik	Ryż			Kukurydza		
	E_{zint}	$e_{zrów}$	F_{e-s}	E_{zint}	$e_{zrów}$	F_{e-s}
<i>A</i>	-1531,41	0,04	0,33	-2412,18	0,06	0,01
<i>B</i>	140,03	$-9,63 \cdot 10^{-4}$	-0,02	46,85	$-2,94 \cdot 10^{-4}$	$-8,11 \cdot 10^{-4}$
<i>C</i>	-34,43	$3,05 \cdot 10^{-4}$	0,002	41,77	$-2,84 \cdot 10^{-4}$	0,002
<i>D</i>	-0,90	$5,04 \cdot 10^{-6}$	$2,04 \cdot 10^{-4}$	-0,25	$2,65 \cdot 10^{-7}$	$1,46 \cdot 10^{-5}$
<i>E</i>	-0,78	$1,49 \cdot 10^{-6}$	$-5,22 \cdot 10^{-6}$	-0,12	$1,67 \cdot 10^{-6}$	$-1,15 \cdot 10^{-5}$
<i>F</i>	0,41	$-1,39 \cdot 10^{-6}$	$-1,12 \cdot 10^{-5}$	–	–	$-1,62 \cdot 10^{-5}$
<i>G</i>	–	–	$-8,48 \cdot 10^{-7}$	–	–	$-1,11 \cdot 10^{-7}$
<i>H</i>	0,005	–	$-9,20 \cdot 10^{-8}$	–	–	$9,54 \cdot 10^{-8}$
<i>I</i>	$-1,18 \cdot 10^{-4}$	–	$9,13 \cdot 10^{-8}$	–	–	$2,31 \cdot 10^{-10}$
<i>J</i>	$-8,39 \cdot 10^{-4}$	–	–	–	–	$4,59 \cdot 10^{-8}$
R^2	0,891	0,697	0,821	0,518	0,725	0,382
BIC	185,39	-149,96	-88,10	223,97	-142,78	-115,101

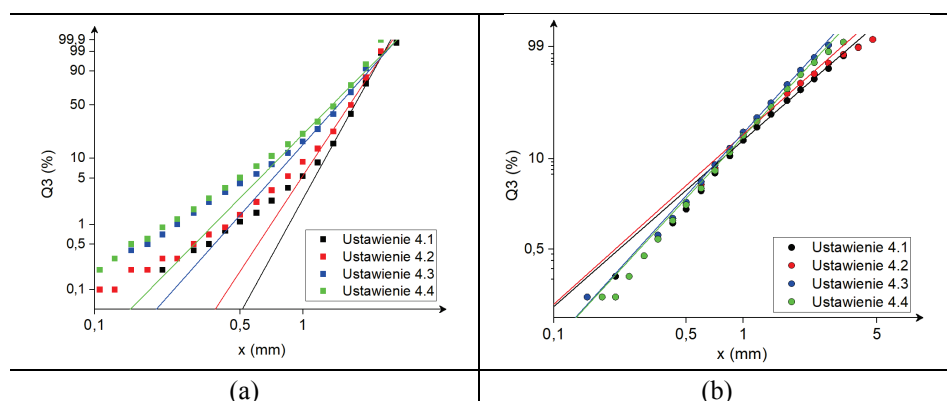
Przeprowadzone analizy i wyniki badań w trzech programach badawczych pozwoliły na scharakteryzowanie i wyznaczenie postaci matematycznych relacji zachodzących w piętrowej strukturze systemu rozdrabniania. Wykazano silną zależność pomiędzy wartościami wskaźników rozdrabniania, tj. wydajnością, stopniem rozdrobnienia, poborem mocy i jednostkowym zużyciem energii, a także wskaźnikami oceny energetyczno-środowiskowej procesu a parametrami procesu, tj. prędkością kątową tarcz, liczbą tarcz użytych do rozdrabniania i intensywności dozowania wsadu. Nieliniowość zależności, szczególnie pomiędzy wydajnością i jednostkowym zużyciem energii oraz stopniem rozdrobnienia a wydatkiem dozowania wsadu wskazują na potrzebę dalszych badań mających na celu identyfikację zjawisk zachodzących w komorze roboczej wielootworowych, wielotarczowych rozdrabniaczy biomasy. Zasadniczo współczynniki korelacji pomiędzy zmiennymi były niższe dla procesu rozdrabniania kukurydzy niż dla ryżu, co wynika z występującej nierównomierności podczas rozdrabniania tego ziarna. Zjawisko to zostało szczegółowo opisane we wcześniejszych pracach [31, 59, 304], gdzie zaobserwowano zmienną wydajność i problemy opróżniania procesowego komory roboczej przez rozdrobniony materiał ziaren kukurydzy, co miało wpływ m.in. na uzyskiwanie zróżnicowanych wydajności i wartości jednostkowego zużycia energii [12, 37].

Analiza wyników przeprowadzonych rozważań teoretycznych wskazuje na konieczność opisu przepływu materiału pomiędzy tarczami z uwzględnieniem jednoczesnego quasi-cięcia. W tym celu użyteczne może być wykorzystanie metod numerycznych oraz modelowania ruchu i rozdrabniania ziaren z wykorzystaniem metody elementów dyskretnych, co pozwoli na odwzorowanie przepływu materiału w komorze roboczej. Wówczas możliwa będzie optymalizacja cech konstrukcyjnych, m.in. liczby, kształtu, wielkości, rozmieszczenia otworów w stosunku do wielkości ziaren dozowanego materiału (który *de facto* zmniejsza się przy przejściach przez kolejne tarcze robocze), tak aby zapewnić jak największą wydajność i wyeliminować problemy z przepływem materiału przy jednoczesnej intensyfikacji i zwielokrotnieniu efektywnych zderzeń powodujących rozdrobnienie ziarna.

7.4. RELECCJE POMIĘDZY ENERGIĄ ROZDRABNIANIA A GRANULOMETRIĄ PRODUKTU

Relacje pomiędzy energią rozdrabniania a wielkością cząstek po rozdrobieniu opisują modele empiryczne omówione w rozdziale 5.1. Jak wskazano wcześniej, dla rozdrabniania uziarnionej biomasy z uwagi na zróżnicowanie właściwości nie udało się dotąd opracować modeli uniwersalnych mających zastosowanie dla wielu ziaren i konstrukcji rozdrabniających. W literaturze [26, 29, 30, 216, 258–262] podejmowano próby opisu relacji pomiędzy wielkością ziaren produktu a energią rozdrabniania dla różnych typów młynów, niedostępne są jednak opracowania tego typu dla rozdrabniaczy wielotarczowych.

Analiza wyników badań dotyczących wielkości cząstek po rozdrobieniu wykazała, że rozkład Rosina-Rammlera-Sperlinga-Benneta (RRSB) może być stosowany do opisu rozkładu wielkości cząstek produktu wielotarczowego, wielotworowego rozdrabniania (adj. $R^2 > 0,99$), co opisano m.in. w jednej z wcześniejszych prac autorki monografii [37]. Rysunek 7.35 przedstawia przykładowe krzywe rozkładów granulometrycznych produktu rozdrabniania ziaren ryżu i kukurydzy opisanych za pomocą rozkładu RRSB w skali logarytmicznej. Szczegółowe wartości parametrów rozkładu x_0 i k znajdują się w [37].



Rys. 7.35. Skumulowane rozkłady wielkości cząstek produktu rozdrabniania: a) ryżu, b) kukurydzy dla wybranych ustawień prędkości kątowej tarcz z IV programu badawczego wraz z krzywymi rozkładu RRSB (linie ciągłe)

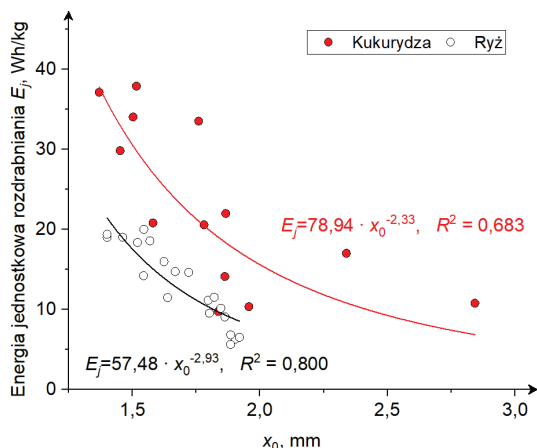
Posługując się średnią prędkością kątową tarcz rozdrabniacza ω_{sr} jako zmienną uogólniającą, parametr skali x_0 rozkładu RRSB można opisać funkcją liniową średniej prędkości kątowej tarcz [37]:

$$x_0 = a \cdot \omega_{sr} + c \quad (7.23)$$

przy czym a wynosi $-0,007$ i $-0,008$ odpowiednio dla kukurydzy i ryżu, a c jest równe odpowiednio $2,05$ i $2,10$ [37]. Zasadniczo, analiza zmian stopnia rozdrobienia oraz zmian składu granulometrycznego wykazała, że wzrost prędkości kątowych tarcz rozdrabniacza powoduje zmniejszanie się finalnych wymiarów

produktu, na co wskazują ujemne wartości współczynnika a w równaniu (7.23). Potwierdza to słuszność poczynionych założeń i obserwacji o wzroście stopnia rozdrobnienia wraz ze wzrostem energii i częstotliwości oddziaływań element roboczy-ziarno, przedstawianych m.in. w [217, 233, 241].

Analizując wartości stopnia rozdrobnienia uzyskanych we wszystkich czterech programach badawczych stwierdzono, że stopień rozdrobnienia ziaren ryżu był mały, mieścił się w przedziale (1,0–1,4), w porównaniu ze stopniem rozdrobnienia ziaren kukurydzy, który osiągał wartości pomiędzy 2,5 a 6. Relacja pomiędzy jednostkową energią rozdrabniania a wielkością cząstek po rozdrobieniu x_0 (ziarna o wielkości poniżej x_0 stanowią masowo 63,2%) wyznaczoną na podstawie aproksymacji rozkładów granulometrycznych rozkładem RRSB (rys. 7.36) wskazuje ponadto, że wielkość cząstek obu ziaren po rozdrobieniu była zbliżona ($1,370 \leq x_0 \leq 2,843$ dla kukurydzy i $1,401 \leq x_0 \leq 1,903$ dla ryżu [37]), przy niewiele wyższych jednostkowych nakładach energetycznych na rozdrabnianie kukurydzy.



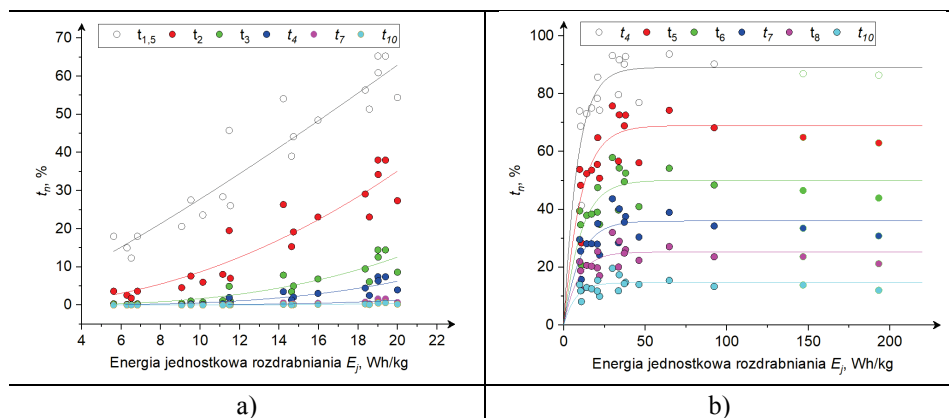
Rys. 7.36. Zależność pomiędzy parametrem skali rozkładu RRSB i energią jednostkową rozdrabniania

Wielkość ziaren d_{80} , na podstawie których wyznaczono 80% stopień rozdrobnienia λ_{80} dla rozdrabniania przez zestaw 5 tarcz we wszystkich programach badawczych z kolei zawierała się w przedziale (1,60–2,09) mm dla ryżu i (1,4–3,6) mm dla kukurydzy. Wskazuje to na znacznie większe zróżnicowanie w wielkości cząstek kukurydzy po rozdrobieniu w zależności od poziomu energii i ustawień parametrów procesowych analizowanej postaci konstrukcyjnej zespołu roboczego niż w przypadku ryżu. Ponadto małe wartości stopnia rozdrobnienia ryżu świadczą o niskiej skuteczności rozdrabniania tego ziarna w zespole pięciotarczowym. Ma to swoje uzasadnienie w relacji pomiędzy właściwościami materiału wsadowego a charakterystyką obciążeń, jakim jest on poddawany w młynie oraz parametrami przepływu masy, co związane jest m.in. z cechami konstrukcyjnymi [37]. W zespole tarczowym wielootworowym zachodzi zjawisko quasi-ścianania, które odnosi się do złożonego stanu naprężeń (ścianających,

ściskających, gnących i skręcających) wywoływanego w materiale rozdrabnianym, przy czym dominującą składową są naprężenia wynikające z technologicznego ścinania [38, 155, 323]. Szybki przepływ ziaren ryżu przez otwory oraz niewielki ich rozmiar w stosunku do średnicy otworów może powodować, że tylko niewielka część ziaren znajdujących się w otworze jest ścinana, a reszta poddawana jest obciążeniom udarowym wynikającym z ruchu obrotowego tarcz. Prędkość liniowa krawędzi otworów na tarczach mieści się w zakresie od 7,1 do 12,5 m·s⁻¹ przy prędkości kątowej 100 rad·s⁻¹, przy czym zakres ten zmniejsza się do 1,42–2,5 m·s⁻¹ przy prędkości kątowej 20 rad·s⁻¹. Z uwagi na skumulowanie masy ziaren dodatkowo energia przekazywana cząstkom podczas pojedynczych zderzeń będzie malała [47]. Jak wykazały badania dla ziaren ryżu [49] graniczna prędkość zderzeń, poniżej której nie następuje rozdrabnianie, wynosi 5,8 m·s⁻¹, w związku z tym ziarna nie zawsze będą rozdrabniane w pojedynczym uderzeniu o ściany otworów, lecz skutek zwielokrotnienia kontaktów, przy czym – jak wykazano w rozdziale 6 – zmniejszanie energii obciążeń skutkuje koniecznością zwiększenia ich liczby. W takiej sytuacji ziarna ryżu, przy większej odporności na obciążenia ściskające niż ścinające, na co także zwrócono uwagę w rozdziale 6, przy szybkim przepływie zmniejszającym prawdopodobieństwo ścięcia przez krawędzie otworów i niskich prędkościach oraz energiach zderzeń mogą pozostawać rozdrobnione w niewielkim stopniu. Istotną przy ścięciu jest także wielkość szczeliny międzyczarowej i jej stosunek do wielkości ziarna. W momencie gdy cząstki osiągną rozmiar mniejszy niż wielkość szczeliny międzyczarowej, wówczas ziarna opuszczają przestrzeń roboczą. Mniejsze niż kukurydza ziarna ryżu potrzebują mniejszej liczby cięć, by osiągnąć ten wymiar. Z uwagi na korzystniejszą relację wielkości ziaren do wielkości otworów (wolniejszy przepływ, większe prawdopodobieństwo ścięcia) i szczeliny międzyczarowej, rozdrabnianie kukurydzy może zachodzić intensywniej. Ponadto jak wykazano w jednym z wcześniejszych rozdziałów, energia jednostkowa ścięcia pojedynczego ziarna kukurydzy była niższa niż ryżu, co także tłumaczy jej lepsze rozdrobnienie. Przedziały wartości współczynników x_0 oraz wymiarów zastępczych d_{80} , ale także wartości współczynników kształtu k (co opisano w [37]) dla ryżu i kukurydzy pokrywają się, co można uznać za pewien charakterystyczny zakres uzyskiwanych wielkości cząstek (bez względu na wielkość początkową ziaren nadawy) dla analizowanej konstrukcji rozdrabniacza wielotarczowego w badanym zakresie prędkości kątowych tarcz i obecnej konfiguracji rozmieszczenia i wielkości otworów w tarczach [37].

Zależność pomiędzy wielkością ziarna po rozdrobnieniu a energią jednostkową rozdrabniania przyjmuje postać funkcji potęgowej (rys. 7.36) z ujemnym wykładnikiem potęgowym. Świadczy to o konieczności zastosowania większych nakładów energetycznych do uzyskania produktu o mniejszych rozmiarach, co pokrywa się z wynikami badań dla innych typów rozdrabniaczy, młynów kulowych [23], młotkowych, bijakowych [26, 27], nożowych [315] czy walcowych [24, 25]. Wzrost energii jednostkowej rozdrabniania powoduje zmiany składu granulometrycznego produktu, a mianowicie wraz ze wzrostem jednostkowego zużycia energii zwiększa się skumulowany udział procentowy cząstek t_n

o wymiarze mniejszym niż $1/n$, co pokazano na rysunku 7.37. Krzywe t_n charakteryzują zmiany uziarnienia produktu rozdrabniania w zależności od energii jednostkowej i reprezentują skumulowany udział procentowy ziaren o wielkości mniejszej niż $1/n$ wymiaru charakterystycznego nadawy [324]. Rodzina krzywych t_n pozwala na przewidywanie składu granulometrycznego produktu rozdrabniania w zależności od poziomu energii na podstawie znanej krzywej referencyjnej, tzw. krzywej t_{10} , określającej udział procentowy ziaren o wielkości $1/10$ wymiaru początkowego [325]. Najczęściej krzywe t_{10} wykorzystuje się do oznaczania i charakterystyki produktu rozdrabniania materiałów kruchych na podstawie testów uderowych dla pojedynczych cząstek [326]. Badanie przeprowadzone przez Deniza et al. [325] pokazało jednak, że możliwe jest opracowanie rodziny krzywych t_n dla rozdrabniania w kruszarce laboratoryjnej w zależności od średniej wielkości cząstek i znajomości indeksu Bonda dla materiałów rozdrabnianych.



Rys. 7.37. Udział procentowy cząstek t_n o wymiarze mniejszym od $1/n$ w zależności od energii rozdrabniania

Dla konstrukcji rozdrabniacza pięciotarczowego wyznaczono krzywe t_n w zależności od jednostkowego zużycia energii (rys. 7.37), które – jak wykazano – związane jest z parametrami procesowymi, m.in. prędkością kątową i intensywnością dozowania wsadu. Wyznaczone parametry krzywych zestawiono w tabeli 7.16. Dla kukurydzy zależność pomiędzy zawartością cząstek t_n a jednostkowym zużyciem energii przyjmuje postać eksponenty (zależność 7.24), zbieżnej z zależnością na t_{10} zaproponowaną przez Napiera i Munna [274] do opisu zależności pomiędzy zawartością cząstek o wielkości $1/10$ wymiaru początkowego cząstki a energią rozdrabniania, jednak nie oddaje sensu merytorycznego tej zależności z uwagi na inne warunki eksperymentu. Parametr a_n w zależności (7.24) wskazuje na maksymalny udział cząstek o wymiarze równym $1/n$ wymiaru początkowego. Z uwagi na szeroki zakres zmienności wymiarów początkowych ziaren kukurydzy i charakterystykę rozdrabniania w rozdrabniaczu wielotarczowym współczynnik dopasowania eksponenty wynosił 0,596 dla wyników t_4 , 0,590

dla wyników t_5 , 0,539 dla t_6 i 0,471 dla t_7 (tabela 7.16). Niewielki stopień dopasowania modelu dla krzywej t_8 i t_{10} wynika z małej zawartości cząstek drobnych i niewielkiej zmienności ich udziału wraz ze zmianami energii rozdrabniania. Ponadto badania dla materiałów różnego typu wykazały, że im większy zakres zmienności wymiarów nadawy, tym słabsze dopasowanie modelu do danych [324]. W pracy [324] podkreślono także, że funkcja eksponencjalna ma zastosowanie do ziaren o większych wymiarach, minimalnie kilku milimetrów. Stąd m.in. brak dopasowania funkcji eksponencjalnej do danych eksperymentalnych dla krzywych t_n rozdrabniania ryżu.

$$t_n = a_n \cdot (1 - e^{-s_n \cdot E_j}) \quad (7.24)$$

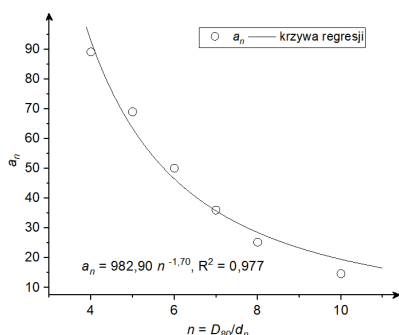
gdzie: a_n i s_n – współczynniki wyznaczone na podstawie danych eksperymentalnych.

Zauważalne jest, że gdy współczynnik a_n zmienia się wraz ze wzrostem n , natomiast wartość s_n zmienia się nieznacznie (tabela 7.16), można przyjąć, że jest stała dla danego $n = D_{80}/d_n$. Współczynnik a_n zmienia się wówczas zgodnie z zależnością potęgową przedstawioną na rysunku 7.38. Mając na uwadze powyższe, zależność (7.24) przyjmuje postać:

$$t_n = a_m \cdot \left(\frac{D_{80}}{d_n} \right)^\beta \cdot (1 - e^{-s_m E_j}) \quad (7.25)$$

gdzie: a_m, β – współczynniki wyznaczone doświadczalnie zależne od właściwości materiału i warunków procesu rozdrabniania, dla kukurydzy $a_m = 982,90$ i $\beta = -1,70$, s_m – współczynnik wyznaczany doświadczalnie, dla kukurydzy $s_m = s_n = 0,11$.

Znając zatem jednostkowe zapotrzebowanie na energię rozdrabniania kukurydzy możliwe jest wyznaczenie zawartości procentowej skumulowanego udziału frakcji o wymiarze mniejszym niż d_n , co pozwala na utworzenie rodziny krzywych t_n w zależności od poziomu energii i przewidywanie rozdrobnienia produktu w rozdrabniaczu pięciotarcowym.



Rys. 7.38. Zmiany współczynnika a_n w zależności od rozpatrywanego n

Zależność udziału procentowego t_n cząstek o wymiarze $1/n$ od jednostkowego zapotrzebowania na energię dla rozdrabniania ryżu w rozdrabniaczu pięciotarczowym opisuje funkcja potęgowa (równanie 7.26) o współczynnikach przedstawionych w tabeli 7.16.

$$t_n = G_n \cdot E_j^{p_n} \quad (7.26)$$

gdzie: G_n i p_n – współczynniki wyznaczone na podstawie danych eksperymentalnych.

Podobnie jak w przypadku maszynowo rozdrobnionych ziaren kukurydzy, dopasowanie funkcji do danych eksperymentalnych malało wraz ze zmniejszaniem się wymiaru $1/n$, co wynika z małej zmienności udziału procentowego ziaren o bardzo małych wymiarach wraz z energią jednostkową. Zauważa się, że współczynniki G_n i p_n zmieniają się wraz ze wzrostem n (tabela 7.16). Na rysunku 7.39 przedstawiono krzywe regresji opisujące zmiany współczynników G_n i p_n w zależności od rozpatrywanego n . Wówczas, biorąc pod uwagę zmienność G_n i p_n wraz z rozpatrywanym n wyznaczającym wielkość ziaren skumulowanego rozkładu wielkości cząstek produktu rozdrabniania, równanie 7.26 opisujące zmiany udziału procentowego cząstek o wymiarze $1/n$ dla zmiennego n przyjmie ogólną postać:

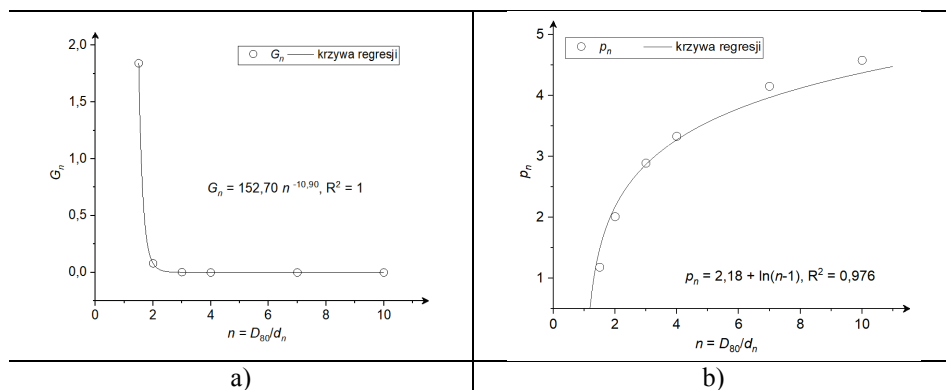
$$t_n = G_m \cdot \left(\frac{D_{80}}{d_n} \right)^\delta \cdot E_j^{p_m + \ln\left(\frac{D_{80}}{d_n} - 1\right)} \quad (7.27)$$

gdzie: G_m , p_m i δ – współczynniki zależne od właściwości materiału i warunków procesu rozdrabniania, dla ryżu $G_m = 152,70$, $\delta = -10,90$, $p_m = 2,18$.

Zależności opisujące skład granulometryczny produktu rozdrabniania dla badanej konstrukcji rozdrabniacza tarczowego wskazują, że udział procentowy ziaren t_n o wielkości poniżej $1/n$ wymiaru początkowego jest funkcją wymiaru początkowego ziarna D_{80} i jednostkowego zużycia energii (zależnego także od prędkości kątowych i intensywności dozowania wsadu), na co wskazywano w badaniach dla młynów przeznaczonych dla m.in. minerałów i rud [327]. Postać funkcji opisującej zależność pomiędzy zawartością procentową ziaren o wymiarze mniejszym niż $1/n$ wymiaru początkowego uzależniona jest od rodzaju materiału rozdrabnianego i jego właściwości, np. wilgotności, wymiaru początkowego czy właściwości wytrzymałościowych, ale także skuteczności rozdrabniania pod wpływem obciążeń występujących w danej konstrukcji młyna. Podobne spostrzeżenia przedstawili Eisenlauer i Teipel [26] wykazując, że podczas rozdrabniania różnych materiałów w tej samej maszynie otrzymuje się różne postaci zależności pomiędzy wielkością cząstki po rozdrobnieniu a jednostkowym zużyciem energii.

Tabela 7.16. Współczynniki równań 7.24 i 7.26 opisujące zależność pomiędzy t_n i jednostkowym zużyciem energii na rozdrabnianie w rozdrabniaczu pięciotarczowym

	Kukurydza			Ryż			
	a_n	s_n	R^2	G_n	p_n	R^2	
t_4	89,10	0,12	0,596	$t_{1,5}$	1,84	1,18	0,895
t_5	68,99	0,10	0,590	t_2	0,08	2,01	0,870
t_6	50,07	0,10	0,539	t_3	0,002	2,89	0,824
t_7	36,01	0,10	0,471	t_4	$2,95 \cdot 10^{-4}$	3,33	0,794
t_8	25,26	0,11	0,389	t_7	$5,14 \cdot 10^{-6}$	4,15	0,730
t_{10}	14,64	0,14	0,237	t_{10}	$5,47 \cdot 10^{-7}$	4,58	0,694

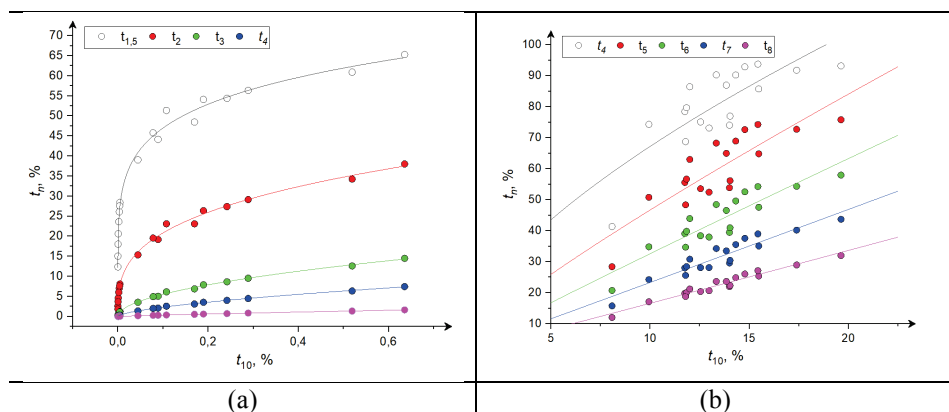


Rys. 7.39. Zależność współczynników a) G_n i b) p_n od rozpatrywanego n

Znając wartość jednej krzywej referencyjnej t_{10} możliwe jest wyznaczenie pozostałych krzywych z rodziny t_n (rys. 7.40), co pozwala na uzyskanie pełnego rozkładu granulometrycznego dla różnych poziomów energii opartego na znajomości jednej z wartości udziału procentowego [328]. Dla ziaren ryżu i kukurydzy zależność pomiędzy parametrem t_{10} a krzywymi t_n opisuje funkcja potęgowa postaci:

$$t_n = B_n \cdot t_{10}^{q_n} \quad (7.28)$$

gdzie: B_n i q_n to współczynniki wyznaczone na podstawie danych eksperymentalnych, których wartości przedstawiono w tabeli 7.17.



Rys. 7.40. Rodzina krzywych t_n w zależności od udziału procentowego produktu rozdrabniania o wymiarze mniejszym niż $1/10$ (t_{10}) wymiaru początkowego ziarna

Tabela 7.17. Wyznaczone współczynniki równania 7.28 opisujące zależności pomiędzy t_n i t_{10} dla rozdrabniania ziaren ryżu i kukurydzy w rozdrabniaczu pięciotarczowym

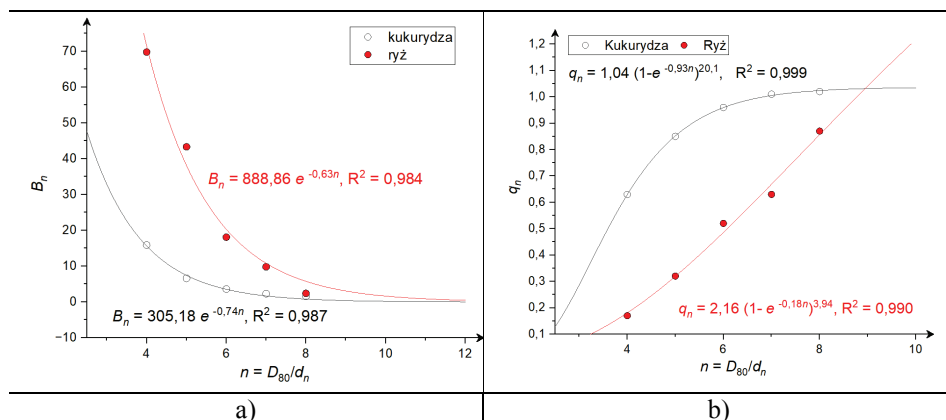
Kukurydza			Ryż				
	B_n	q_n	R^2		B_n	q_n	R^2
t_4	15,88	0,63	0,624	$t_{1,5}$	69,76	0,17	0,994
t_5	6,61	0,85	0,718	t_2	43,31	0,32	0,997
t_6	3,60	0,96	0,805	t_3	18,07	0,52	0,999
t_7	2,29	1,01	0,884	t_4	9,80	0,63	0,999
t_8	1,58	1,02	0,951	t_7	2,39	0,87	0,999

Podobnie jak w poprzednich równaniach, współczynniki B_n i q_n zmieniają się wraz ze wzrostem n (tabela 7.17). Na rysunku 7.41 przedstawiono krzywe regresji opisujące zmiany współczynników B_n i q_n w zależności od rozpatrywanego n . Równanie 7.28 opisujące zmiany udziału procentowego cząstek o wymiarze $1/n$ dla zmiennego n przy znajomości krzywej referencyjnej t_{10} przyjmie ogólną postać:

$$t_n = B_m \cdot e^{\alpha \cdot \left(\frac{D_{80}}{d_n}\right)} \cdot q_m \left(1 - e^{\chi \cdot \left(\frac{D_{80}}{d_n}\right)}\right)^\gamma \cdot t_{10} \quad (7.29)$$

gdzie: $B_m, q_n, \alpha, \chi, \gamma$ to współczynniki wyznaczone na podstawie danych eksperymentalnych. Dla kukurydzy wynoszą one odpowiednio: $B_m = 305,18$, $q_m = 1,04$, $\alpha = -0,74$, $\chi = -0,93$ i $\gamma = 20,1$, a dla ryżu: $B_m = 888,86$, $q_m = 2,16$, $\alpha = -0,63$, $\chi = -0,18$ i $\gamma = 3,94$.

Konieczne są dalsze badania weryfikujące słuszność zaproponowanych modeli dla innych typów materiałów i konstrukcji młynów i rozdrabniaczy w celu sformułowania uogólnień. Szczególnie istotne byłoby sprawdzenie adekwatności modelu do przewidywania udziałów procentowych cząstek drobnych, o wielkości poniżej 0,5 mm, co z uwagi na otrzymywane bardzo małe zawartości procentowe tych frakcji dla rozpatrywanej postaci konstrukcyjnej rozdrabniacza było niemożliwe.



Rys. 7.41. Zależność współczynników a) B_n i b) q_n od rozpatrywanego n

Szczegółowa analiza związków pomiędzy jednostkowym zużyciem energii a stopniem rozdrobnienia ziaren ryżu i kukurydzy w analizowanych warunkach konstrukcyjnych rozdrabniacza pięciotarczowego wykazała, że wraz ze wzrostem stopnia rozdrobnienia rośnie jednostkowe zużycie energii [37]. Zależność pomiędzy stopniem rozdrobnienia i jednostkowym zużyciem energii dla ziaren kukurydzy rozdrobnionych w zespole konstrukcyjnym pięciotarczowym przyjmuje postać funkcji liniowej [37]:

$$E_j = 6,97 \cdot \lambda_{80}, \quad R^2 = 0,92 \quad (7.30)$$

a dla ziaren ryżu postać funkcji kwadratowej:

$$E_j = -27,30 \cdot \lambda_{80} + 33,51 \cdot (\lambda_{80})^2, \quad R^2 = 0,98 \quad (7.31)$$

Wzrost energii rozdrabniania wraz ze wzrostem stopnia rozdrobnienia wykazywany był dla wielu różnych konstrukcji rozdrabniających i różnych typów materiałów [24, 25]. Ma to swoje uzasadnienie w istniejących teoriach rozdrabniania, m.in. Bonda, Kicka, Rittingera i innych będących ich modyfikacją, podsumowanych uogólnionym prawem zaproponowanym przez Walkera i in. [255]. Zgodnie z uogólnioną teorią rozdrabniania energia podziału ziarna zmienia się wraz z jego wielkością zgodnie z równaniem [255]:

$$dE = -K \frac{dx}{x^n} \quad (7.32)$$

gdzie: K, n – oznaczają stałe zależne od właściwości materiału i sposobu rozdrabniania.

Rozwiązanie tego równania przyjmuje kilka postaci w zależności od przyjętego wykładnika n . Całkując równanie w granicach wielkości wyznaczonych przez wielkość cząstek nadawy D i produktu d otrzymuje się równanie [255]:

$$E = \int_D^d -K \cdot x^{-n} dx \quad (7.33)$$

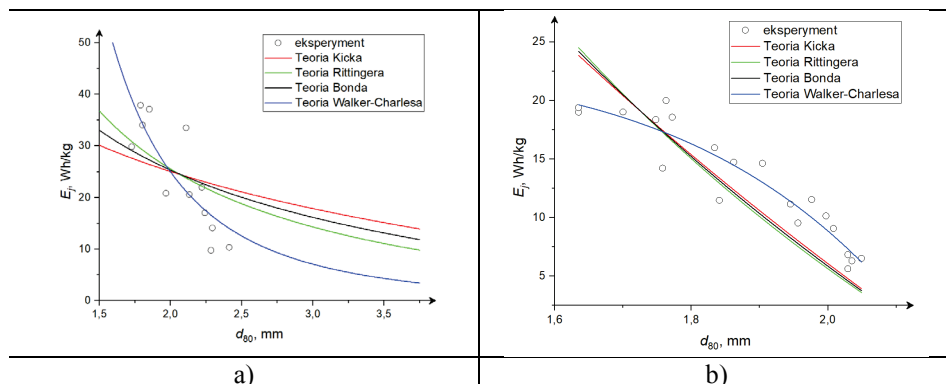
Dla $n = 1$ otrzymuje się zależność opracowaną przez Kicka, dla $n = 2$, zależność zaproponowaną przez Rittingera, a dla $n = 1,5$ równanie określające teorię Bonda (patrz tabela 5.1, rozdz. 5.1). Ogólna postać równania w dziedzinie całkowania dla $n > 1$ wyrażona jest zależnością Walkera-Charlesa [255]:

$$E = \left(\frac{K}{n-1} \right) \left(\frac{1}{d^{n-1}} - \frac{1}{D^{n-1}} \right) \quad (7.34)$$

Rysunek 7.42 przedstawia krzywe zależności jednostkowego zużycia energii rozdrabniania ziaren ryżu i kukurydzy w warunkach konstrukcyjnych zespołu pięciotarczowego wielootworowego od charakterystycznego wymiaru cząstek d_{80} po rozdrobnieniu, opracowane na podstawie wyżej wspomnianych teorii rozdrabniania. W przypadku ryżu zależność opisana przez Kicka wyjaśniała zmienność jednostkowego zużycia energii w zależności od wielkości cząstek w 69%, w przypadku kukurydzy tylko w 36% (tabela 7.18). To lepsze dopasowanie teorii Kicka do danych eksperymentalnych dla rozdrabniania ryżu jest spowodowane tym, że ziarna ryżu wykazywały większe powinowactwo właściwości mechanicznych do materiałów kruchych niż ziarna kukurydzy, podczas gdy teoria Kicka wykazuje dobre zdolności predykcyjne energii rozdrabniania dla rozdrabniania grubego materiałów kruchych. W przypadku rozdrabniania kukurydzy i ryżu model Walkera-Charlesa charakteryzował się najwyższym dopasowaniem do danych eksperymentalnych (odpowiednio R^2 równe 0,716 i 0,897). Wykładnik n w zależności Walkera-Charlesa opisującej związek wielkości cząstek po rozdrobnieniu i energii rozdrabniania dla kukurydzy był równy 4,02 a dla ryżu -6,04. Otrzymane wartości wykładników n w równaniach Walkera-Charlesa oraz postaci równań regresji opisującej zależność stopnia rozdrobnienia sugerują, że dla uziarnionych materiałów biologicznych słuszną jest teoria Hukkiego, zakładająca, że wykładnik n w równaniu Walkera-Charlesa jest bliżej nieokreśloną funkcją wielkości cząstek [216]:

$$dE = -K \frac{dx}{x^{f(x)}} \quad (7.35)$$

Badania prowadzone przez Morrella [329] wykazały ponadto, że również stała K zależna jest od wielkości cząstek. Konieczne są dalsze badania prowadzące do wyznaczenia postaci matematycznych tych funkcji dla ziaren biomasy.



Rys. 7.42. Jednostkowe zużycie energii na rozdrabnianie ziaren: a) kukurydzy, b) ryżu w rozdrabniaczu wielotarczowym w funkcji wymiaru charakterystycznego produktu d_{80} wraz z krzywymi wyznaczonymi na podstawie teorii Kicka, Bonda, Rittingera i Walkera-Charlesa

Tabela 7.18. Parametry krzywych zależności pomiędzy jednostkowym zużyciem energii na rozdrabnianie ziaren ryżu i kukurydzy a wielkością cząstek produktu rozdrabniania d_{80} w rozdrabniaczu pięciotarczowym wyznaczonych wg teorii Kicka, Rittingera, Bonda i Walkera-Charlesa

Teoria	Kukurydza			Ryż		
	Stała	n	R ²	Stała	n	R ²
Kicka	K = 17,71	1	0,298	K = 88,29	1	0,632
Rittingera	R = 67,51	2	0,491	R = 169,37	2	0,536
Bonda	W _i = 7,07	1,5	0,393	W _i = 24,48	1,5	0,586
Walkera-Charlesa	W-C = 623,89	4,03	0,716	W-C = 0,76	-6,04	0,897

Przeprowadzone badania wykazały, że dla każdego typu ziaren konieczne jest indywidualne podejście do oceny procesu rozdrabniania. Dedykowana postać narzędzi roboczych i wielkość parametrów konstrukcyjnych i procesowych wskazują także na różnorodność kształtów krzywych rozkładów granulometrycznych dla różnych ziaren, nawet przy zastosowaniu takich samych parametrów procesowych i konstrukcyjnych czy poziomów energii do rozdrobnienia materiału, co podkreśla piętrowy charakter struktury systemu rozdrabniania i znaczenie współzależności oraz wzajemnych interakcji występujących pomiędzy elementami, tj. materiałem, maszyną, procesem i celem. Należy stwierdzić, że niezbędna jest modyfikacja istniejących teorii, modeli rozdrabniania lub opracowanie nowych uniwersalnych zależności, które pozwoliłyby na przewidywanie energii rozdrabniania na podstawie założonego stopnia rozdrobnienia produktu.

8. AUTOREGULACJA – ZASTOSOWANIE SZTUCZNEJ INTELIGENCJI W PROJEKTOWANIU I ROZWOJU PROCESÓW ROZDRABNIANIA

Potrzeba rozwoju, monitorowania i adaptacyjnego sterowania procesami przemysłowymi wynika z aktualnej polityki państw Unii Europejskiej i przyjętej Agendy na rzecz zrównoważonego rozwoju 2030 [330, 331]. Znajduje się tutaj niemalże wprost odwołanie do modelu ewolucyjnego INTEGRONU wprowadzonego przez Jacoba [62] i opisanej w rozdziale 2. zasady autoregulacji. Kluczowe w tym aspekcie są: cel 9 – Budować stabilną infrastrukturę, promować zrównoważone przemysłowanie oraz wspierać innowacyjność (zadanie 9.4) oraz cel 12 – Zapewnić wzorce zrównoważonej konsumpcji i produkcji (zadanie 12.2) [330, 331]. Jednym z głównych założeń wprowadzonej Agendy jest osiągnięcie celów środowiskowych, co nie jest możliwe bez postępu technicznego, technologicznego, innowacyjności i wprowadzania rozwiązań zwiększających efektywność wykorzystania materiałów i energii, przy jednoczesnym minimalizowaniu odpadów, zanieczyszczeń, w ogólnym ujęciu degradacji środowiska dla poprawy standardów i jakości życia. W wielu branżach wymusiło to potrzebę kontrolowania poziomów emisji, zużycia energii, surowców mineralnych oraz wdrożenia programów mających na celu zmniejszenie energochłonności, materiałochłonności i emisyjności działań. Obserwowane zmiany dotyczą także procesów przetwórczych biomasy, wśród których znaczącą rolę odgrywają procesy maszynowego rozdrabniania.

W poprzednich rozdziałach wykazano piętrowość struktury systemu rozdrabniania i zidentyfikowano zależności pomiędzy parametrami materiałowymi, konstrukcyjnymi i procesowymi a wskaźnikami oceny dla rozdrabniania maszynowego. Zatem rozwój procesów rozdrabniania, w tym konstrukcji rozdrabniających możliwy jest, jeżeli rozpoznane zostaną te relacje oraz ustalone odpowiednie środki i sposoby pozwalające na ich identyfikację [332–335].

Jak wykazano [336–338], w przypadku materiałów biologicznych obserwuje się zmienność struktury, kształtu, wymiaru i właściwości fizycznych i mechanicznych pomiędzy poszczególnymi gatunkami, ale zmienność ta występuje także w obrębie jednego gatunku. Wspomniana różnorodność sprawia, że trudne jest uzyskanie wsadu o stabilnych parametrach w trakcie przetwórstwa. Z punktu widzenia procesów rozdrabniania, jak wykazano w poprzednich rozdziałach, zmiany właściwości materiału, kształtu, wilgotności, będą wpływać na wartości energii rozdrabniania, ale także na efekt finalny, tj. skład granulometryczny produktu. Aby ograniczyć wpływ zmiennych parametrów wsadu na przebieg procesu rozdrabniania, przy stałych parametrach konstrukcyjnych maszyny, parametry procesowe powinny podlegać autoregulacji, tj. stałej kontroli i bieżącemu dopasowywaniu do aktualnych parametrów wsadu w celu uzyskania możliwie najlepszych wartości wynikowych wskaźników oceny procesu: jednostkowego zapotrzebowania na energię, wydajności celowej czy stopnia rozdrobnienia

produktu, a także w przypadku zakładów przemysłowych poziomu emisji dwutlenku węgla [53, 231, 339]. Takie działania przyczyniłyby się do postulowanego przez Komisję Europejską obniżenia energochłonności i emisyjności procesu w myśl zasady energii minimum.

Współcześnie zagadnienia optymalizacji, komputerowej symulacji i aktywnego adaptacyjnego sterowania rozdrabnianiem są przedmiotem zainteresowań badawczych w obszarze nauki z zakresu inżynierii mechanicznej i przemysłu. Stworzone dotąd oprogramowania symulacyjno-optymalizacyjne zawierają pewne niedoskonałości, polegające na ograniczonych możliwościach rozwiązywania problemów w sposób numeryczny. Wiele zagadnień optymalizacyjnych w zakresie sterowania rozdrabniaczami trudno opisać klasycznymi metodami numerycznymi, dlatego zaczęto stosować metody wykorzystywane w zakresie sztucznej inteligencji, np. algorytmy genetyczne [335]. Zastosowanie, m.in. systemów uczących się, systemów inteligentnych pozwala na optymalizację procesu oraz jego pełną automatyzację [20, 340–342].

Z dostępnej literatury w zakresie wykorzystania metod sztucznej inteligencji, w tym algorytmów genetycznych, w procesach rozdrabniania wynika, że dodanie operacyjnej ‘inteligencji’ do systemu powoduje zwiększenie wydajności procesu [343]. Stwierdzono także, że dokładność szacowania energii i mocy rozdrabniania za pomocą sieci neuronowych jest większa niż za pomocą klasycznych metod statystycznych [344]. Prowadzone dotąd badania dotyczyły m.in. optymalizacji kosztów zakładów przemysłowych kruszenia skał i minerałów [345, 346], optymalizacji i wspomaganie rozwoju konstrukcji rozdrabniających [347, 348]. Inne prace dotyczyły metodyki inteligentnego sterowania i rozwoju rozdrabniania [349] oraz optymalizacji parametrów procesowych: zużycia energii, wielkości cząstek produktu itd. [334, 343, 344, 350, 351]. W tabeli 8.1 zestawiono badania prowadzone m.in. w zakresie monitorowania, sterowania procesami rozdrabniania z wykorzystaniem metod sztucznej inteligencji.

Tabela 8.1. Badania dotyczące wykorzystania sztucznej inteligencji w systemach rozdrabniania

Źródło	Materiał	Młyn	Metoda	Wnioski
Farzanegani Vahidipour [335]	minerały	młyn kulowy	Ball Milling Circuits Simulator (BMCS) opracowany w Matlabie wykorzystujący algorytmy ewolucyjne	za pomocą modelu można optymalizować warunki procesu (np. ustalić intensywność dozowania wsadu, ilość dodawanej wody, liczbę pracujących cyklonów), co pozwala na automatyczne, powtarzalne symulacje i szybkie znalezienie rozwiązań optymalnych
Per Svedensten i Evertsson [345]	rudy żelaza	kruszarcki Sandvik Hydrocone	aplikacja napisana w języku Visual C++ wykorzystująca algorytmy ewolucyjne	opracowana metoda może przyczynić się do poprawy wydajności ogólnej produkcji. Optymalizowane mogą być następujące kryteria oceny: zysk, zawartość frakcji celowej, jakość produktu, wydajność maszyny
Gupta i inni [346]	węgiel	kruszarcki	aplikacja w MATLAB wykorzystująca algorytmy genetyczne	możliwa jest maksymalizacja całkowitych przychodów procesów przygotowania węgla, uwzględniając w funkcji celu uzysk czystego węgla, zawartość popiołu, wartość opalową pozyskanego węgla oraz wielkość emisji SO ₂
While i inni [347]	minerały	kruszarcka stożkowa	wielokryterialny algorytm ewolucyjny	algorytm umożliwia tworzenie i ocenę geometrii kruszarki biorąc pod uwagę wiele kryteriów procesu rozdrabniania
Flizikowski i Kamyk [348]	kukurydza	rozdrabniacz wielotarczowy	IE_TEST-07_BIO wykorzystująca algorytmy genetyczne	aplikacja wspomaga proces konstruowania rozdrabniaczy wielotarczowych z uwzględnieniem wpływu cech konstrukcyjnych rozdrabniacza na parametry procesu
Flizikowski [349]	kukurydza, ryż, pszenica	rozdrabniacz wielotarczowy	system sterowania rozdrabnianiem za pomocą algorytmów genetycznych	algorytm pozwala na optymalizację nastaw procesu z uwzględnieniem wydajności, zużycia energii i wielkości cząstek
Stange i McInnes [350]	złoto	młyn wydobywczy	logika rozmyta i sieci neuronowe	zastosowanie inteligentnego systemu kontroli procesu rozdrabniania skał jest opłacalne ekonomicznie i zapewnia efektywne, elastyczne podejście do sterowania rozdrabnianiem

cd. tabeli 8.1

Źródło	Material	Młyn	Metoda	Wnioski
Moshgbar i Parkin [351]	–	kruszaraka stozkowa	technologia sztucznej inteligencji i kontrola adaptacyjna	możliwość bezproblemowej integracji modułów opartych na wiedzy umożliwia stopniowe wprowadzanie automatyzacji zgodnie z wymaganiami
Remes i inni [343]	ruda chromu	młyn prętowy i młyn kulowy	zintegrowana automatyzacja	dodanie operacyjnej 'inteligencji' do systemu powoduje zwiększenie wydajności procesu
Fang i inni [344]	pszenica	młyn walcowy	sieci neuronowe	dokładność szacowania energii i mocy rozdrabniania za pomocą sieci neuronowych jest większa niż za pomocą klasycznych metod statystycznych
Abdellahi i inni [334]	nanoproszki	młyn kulowy	Algorytm ABC (Artificial Bee Colony)	zoptymalizowano parametry procesu rozdrabniania, tak że skrócono czas produkcji proszków nanostrukturalnych

W zestawionych w tabeli 8.1 pracach podkreślano złożoność problemu optymalizacyjnego zarówno w odniesieniu do konfiguracji cech konstrukcyjnych młynów, jak i ustalenia właściwych, najlepszych wartości parametrów procesowych. Niezbędnym elementem tworzenia algorytmów dostępnych w literaturze była wiedza na temat konstrukcji rozdrabniaczy oraz relacji pomiędzy parametrami procesowymi, konstrukcyjnymi i materiałowymi. Konieczne w tym kontekście wydaje się systematyzowanie, tworzenie i aktualizowanie baz wiedzy, które w następstwie posłużą optymalizacji energetycznej, środowiskowej i ekonomicznej. Wprowadzanie innowacji i rozwój konstrukcji, środowiska rozdrabniania powinno być zatem ukierunkowane na: automatyzację, adaptacyjne sterowanie, inteligentną kontrolę procesu w celu poprawy jakości produktów rozdrabniania, racjonalną gospodarkę energią (oszczędność energii), poprawę bilansu ekologicznego systemu i proces rozdrabniania i spalania biomasy oraz dokładny i precyzyjny opis zjawisk w procesie rozdrabniania.

8.1. INTEGRACJA ELEMENTÓW STRUKTURY SYSTEMU ROZDRABNIANIA JAKO WARUNEK AUTOREGULACJI

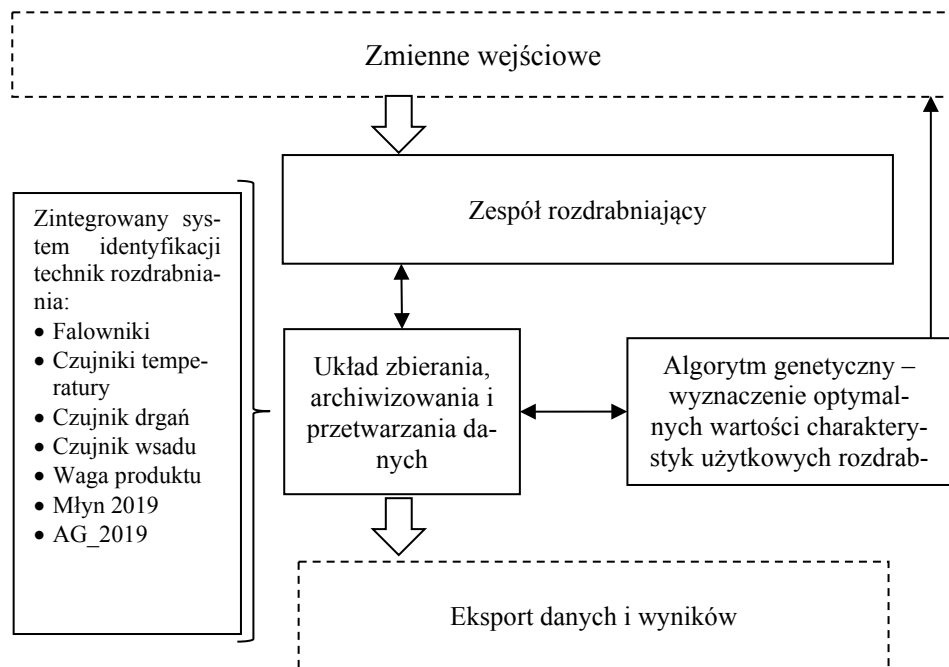
Wprowadzanie efektywnych systemów monitorowania i sterowania procesem rozdrabniania wymaga integracji podsystemów tworzących jego piętrową strukturę. Koncepcja integracji [61, 343] zakłada wprowadzenie odpowiednich funkcji sterowania i kontroli na potrzeby autoregulacji i automatyzacji, jako uzupełnienie urządzeń diagnozowania stanu, automatyki i sterowania, co prowadzi do połączenia podsystemów o odmiennych zadaniach na potrzeby realizacji określonego celu. Integracja podsystemów w maszynowym systemie rozdrabniania, w połączeniu z wykorzystaniem metod sztucznej inteligencji stanowi jedno z narzędzi poprawy wskaźników efektywności energetycznej, środowiskowej, a także jakości produktu [59].

Zintegrowanie poszczególnych podsystemów wymaga zastosowania teorii i metod monitorowania i diagnozowania stanu maszyny opartych na odpowiednim instrumentarium pomiarowym [334, 343, 344, 350, 351]. W odniesieniu do procesów rozdrabniania monitorowanie dotyczy najczęściej poboru mocy, prędkości (kątowych, liniowych, obrotowych) elementów konstrukcyjnych, rozdrabniających, momentów obrotowych, drgań, przepływów masowych wsadu, masy rozdrobnionego produktu, wielkości cząstek po rozdrobnieniu, hałasu, emisji frakcji pylistych, wilgotności wsadu, temperatury procesu lub temperatury medium itd. [61, 334, 341–344, 350, 351]. W zależności od przyjętej strategii wykonywania pomiarów i oceny stanu wyróżnia się cztery rodzaje monitorowania [58]: czynne, bierne, bierno-czynne i dozorujące, przy czym na potrzeby integracji systemowej monitorowanie czynne z możliwością kompensowania nieprawidłowości i zakłóceń jest najbardziej odpowiednie [40, 53, 333]. Zastosowanie systemu monitorowania w procesie integracji umożliwia zbieranie informacji na temat zmian parametrów wejściowych i wyjściowych procesu [40, 53].

W praktyce pozwala to na optymalizację systemów i procesów, poprawę stanów maszyny i otoczenia, tworzenie baz danych i wiedzy [40,53,59]. Niezbędne w procesie integracji modułów są systemy automatyki oraz systemy informatyczne do wykonywania operacji matematycznych na zbiorze parametrów wejściowych, obliczania wartości kryteriów oceny i przesyłania informacji zwrotnych do odpowiednich modułów wykonawczych.

Autoregulacja procesu rozdrabniania, poprzez wprowadzenie integracji i adaptacyjności systemu do aktualnych warunków otoczenia, stanowi podstawę realizacji inteligentnego, zrównoważonego rozwoju konstrukcji i środowiska rozdrabniania [59, 61]. W szerszej perspektywie prowadzi do optymalizacji, modernizacji i innowacji tych systemów [59, 61]. Zastosowanie rozwiązań sztucznej inteligencji w układach maszynowych ma na celu poszukiwanie rozwiązań problemów (określonych za pomocą wcześniej przyjętych kryteriów – funkcji celu) na podstawie parametrów zebranych w bazach danych, zapewniając tym samym adaptacyjność do przyjętych warunków brzegowych.

Z punktu widzenia funkcji realizowanej w systemie rozdrabniania wyróżnia się podsystem procesowy, zasilania, sterowania i logistyczny [59, 61]. Podsystem procesowy stanowi rozdrabniacz. Podsystem sterowania obejmuje elementy systemu monitorowania, tj. czujniki i urządzenia pomiarowe, układy archiwizacji i zbierania danych, układy automatyki wraz z algorytmami sterującymi (rys. 8.1).



Rys. 8.1. Schemat ideowy inteligentnego systemu monitorowania i sterowania charakterystykami użytkowymi rozdrabniania. Zaadaptowano z [61]

Głównym zadaniem modułu sterowniczego jest realizacja sterowania rozdrabniaczem poprzez adaptacyjną zmianę nastaw prędkości elementów rozdrabniających i intensywności podawania wsadu, a dodatkowo rejestracja i archiwizacja wartości parametrów pracy, takich jak: pobór mocy, wydajność, stopień rozdrobnienia produktu. W skład podsystemu logistycznego wchodzi urządzenie odprowadzenia produktu rozdrabniania oraz układy planowania dostaw i harmonogramu pracy. Podsystem zasilania odpowiada za dostarczenie wsadu do komory rozdrabniania, najczęściej w jego skład wchodzi podajniki, np. ślimakowe, taśmowe itp. oraz układ zasilania w energię elektryczną wraz z układem napędowym. Wprowadzanie efektywnych systemów monitorowania i sterowania procesem rozdrabniania wymaga integracji wyżej wymienionych podsystemów [59, 61].

8.2. ALGORYTM GENETYCZNY DLA MINIMALIZACJI ZUŻYCIA ENERGII I EMISJI ROZDRABNIANIA

Oryginalny, autorski system inteligentnego sterowania rozdrabniaczem wielotarczowym, wykorzystujący algorytmy genetyczne opracowano dla rozdrabniacza wielotarczowego RWT_KZ_5 w ramach projektu DI2016 001646 pt.: *Inteligentne monitorowanie charakterystyk rozdrabniania biomasy uziarnionej* na potrzeby realizacji zasady energii minimum modelu ewolucyjnego Integronu. W systemie wykorzystano algorytmy genetyczne z uwagi na zalety ich stosowania, tj. łatwość tworzenia funkcji celu i populacji osobników, elastyczność działania, rozwiązywanie adaptacyjne dla problemów zmiennych w czasie. Algorytmy genetyczne reprezentują grupę narzędzi optymalizacyjnych, które na podstawie analizy zbioru danych umożliwiają wskazanie najlepszego z możliwych, dostępnych rozwiązań postawionego problemu [352, 353]. Informacje dla algorytmu kodowane są w systemie binarnym w postaci łańcuchów i ciągów kodowych. Poprawność tworzonego kodu wpływa istotnie na wynik końcowy i możliwość znalezienia rozwiązania dla podejmowanego problemu [354]. Niepoprawnie sformułowany ciąg kodowy może być przyczyną braku rozwiązania lub wydłużenia czasu obliczeń [354]. Operacje obliczeniowe wykonywane są na określonym zbiorze danych (osobników) [355]. Podstawowe elementy struktury elementów algorytmów genetycznych przedstawiono w tabeli 8.2.

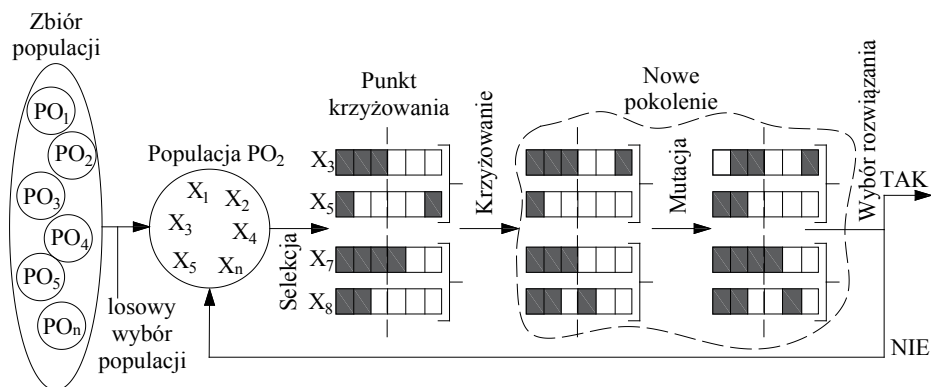
Wyboru rozwiązań optymalnych dokonuje się na podstawie funkcji przystosowania, funkcji celu, która stanowi najważniejsze kryterium optymalizacyjne [356]. W działaniu algorytmu genetycznego wyróżnia się następujące etapy [353] (rys. 8.2):

1. Losowy wybór populacji początkowej.
2. Wybór (selekcja) najlepszych osobników i ich reprodukcja.
3. Krzyżowanie lub/i mutacja osobników wybranych w procesie selekcji.
4. Tworzenie nowego pokolenia, w którym najlepsze osobniki są klonowane, a najgorsze odrzucane.

Tabela 8.2. Elementy strukturalne algorytmów genetycznych (opracowanie własne na podstawie [352, 353])

Element	Objaśnienie
Populacja osobników	n-elementowy zbiór danych
Osobnik	zakodowane rozwiązania, zbiór parametrów rozwiązywanego problemu
Gen	cecha, podstawowy element strukturalny genotypu
Chromosom	uporządkowany łańcuch genów
Genotyp	zespół chromosomów tworzących strukturę osobnika
Allel	wartość genu
Fenotyp	zestaw wartości rozwiązań danego genotypu, punkt przestrzeni poszukiwań
Locus	pozycja genu w chromosomie
Funkcja celu	funkcja oceny rozwiązań
Generacja	kolejne iteracje obliczeń
Pokolenie potomków	nowa generacja osobników
Krzyżowanie	utworzeniu nowego pokolenia poprzez połączenie wybranych kilku chromosomów z genotypu jednego rodzica i kilku chromosomów drugiego rodzica
Mutacja	w chromosomach mających utworzyć nowego osobnika wprowadzane są pewne losowe zmiany

Głównym celem opracowanego dla rozdrabniacza RWT_KZ_5 algorytmu genetycznego było uzyskanie obniżenia energochłonności i emisji CO₂ poprzez adaptacyjne sterowanie nastawami parametrów procesowych, tj. wielkością strumienia dozowania wsadu i prędkościami kątowymi tarcz, mając na uwadze opisane i zidentyfikowane w poprzednich rozdziałach relacje pomiędzy elementami piętrowej struktury systemu rozdrabniania. Szczegółowo strukturę i działanie algorytmu genetycznego opisano w pracach [59, 61], dlatego w niniejszym rozdziale przedstawiono tylko najważniejsze informacje dotyczące jego struktury i zasady działania. W wyniku działania algorytmu otrzymuje się zestaw parametrów, które zapewniają jednocześnie uzyskiwanie założonego stopnia rozdrobnienia, możliwie maksymalnej wydajności i efektywności energetyczno-środowiskowej przy możliwie najniższym zużyciu energii.



Rys. 8.2. Mechanizm działania algorytmów genetycznych. Zaadaptowano z [61]

Podczas obliczeń najlepsze możliwe rozwiązanie wybierane jest ze zbioru osobników stanowiących dziedzinę D . Dziedzina poszukiwań D jest ściśle zależna od przyjętych parametrów i warunków brzegowych. Dla rozpatrywanej konstrukcji rozdrabniacza pięciotarczowego dziedzina ograniczona jest poprzez możliwe minimalne ($20 \text{ rad}\cdot\text{s}^{-1}$) i maksymalne ($130 \text{ rad}\cdot\text{s}^{-1}$) prędkości kątowe tarcz rozdrabniających, które mogą być zastosowane podczas obciążenia wsadem przy istniejącej konfiguracji układu napędowego oraz wartościami strumienia dozowania wsadu do komory w zakresie od 50% do 100% maksymalnej wydajności zastosowanego podajnika ślimakowego. Jak wskazano w poprzednich rozdziałach, stosowanie małych wartości strumienia dozowania wsadu pogarszało wydajność i wartości jednostkowego zużycia energii podczas rozdrabniania [61].

Parametry sterujące, czyli nastawy prędkości kątowych tarcz i wartości strumienia dozowania wsadu zostały zakodowane za pomocą 6 genów, tworzących chromosom algorytmu genetycznego. Pięć genów w chromosomie odpowiada prędkościom dla każdej z pięciu tarcz rozdrabniacza pięciotarczowego, a jeden gen reprezentuje wartość strumienia dozowania wsadu. Geny zakodowano w systemie binarnym. Na każdy gen prędkości kątowej tarczy składa się sześć bitów, co pozwala na kodowanie prędkości kątowych w przybliżeniu do $2 \text{ rad}\cdot\text{s}^{-1}$ (dokładnie $1,72 \text{ rad}\cdot\text{s}^{-1}$) w zakresie od $20 \text{ rad}\cdot\text{s}^{-1}$ do $130 \text{ rad}\cdot\text{s}^{-1}$. Wartości strumienia dozowania wsadu zmieniają się co 1,5% poprzez zakodowanie wartości na pięciu bitach. Liczba możliwych konfiguracji różnych ustawień prędkości kątowych tarcz i wartości strumienia dozowania wsadu jest wówczas równa $2^{5\cdot6+5} = 2^{35}$, co w przybliżeniu daje 34,3 mld rozwiązań.

Zgodnie z wymienionymi etapami działania algorytmów genetycznych, w pierwszej kolejności, spośród zbioru dostępnych konfiguracji wybieranych jest losowo $k = 10$ chromosomów tworzących populację początkową (rys. 8.3). Wybrane ustawienia zostają zdekodowane i uruchomione na rozdrabniaczu, przy czym następuje rejestracja parametrów wejściowych i odpowiadających im wskaźników wyjściowych, koniecznych do obliczenia funkcji celu. Następnie chromosomy poddawane są ocenie. Jeżeli wśród rozwiązań jest rozwiązanie najlepsze, algorytm zatrzymuje się, jeżeli nie – na podstawie $b=4$ najlepszych ciągów kodowych tworzona jest nowa populacja o liczebności $2b=8$. Do nowej populacji klonowany jest najlepszy z wybranych b ciągów kodowych, a pozostałe podlegają operacjom krzyżowania i mutacji. Do operacji krzyżowania losowanych jest b -krotnie ze zwracaniem i bez powtórzeń b par ciągów kodowych, które zostają ze sobą skrzyżowane w losowym punkcie tworząc nowe ustawienia do testowania w kolejnej generacji i . W tak wybranej populacji dochodzi do mutacji z prawdopodobieństwem p w przedziale od 0 do 1. Po mutacji do nowego pokolenia przechodzi $2b-1$ (tj. siedem) najlepszych ciągów kodowych, a operacje algorytmu powtarzane są i razy, aż do znalezienia najlepszego rozwiązania [61].

Autoregulacja procesu rozdrabniania następuje w wyniku wyboru najlepszego rozwiązania spośród dostępnych, na podstawie opracowanej przez autorkę monografii funkcji celu w postaci [61, 199]:

$$F_{e-s} = K_E \cdot K_e = \frac{1}{E_{zint}} \cdot \frac{1}{e_{zrów}} \quad (8.1)$$

gdzie: $K_E, K_E = \frac{1}{E_{zint}}$ – kryterium energochłonności, $K_e, K_e = e_{zrów}$ – kryterium emisyjności, E_{zint} – zintegrowana energochłonność, $e_{zrów}$ – zrównoważona emisyjność.

Istotą opracowanej funkcji celu jest wskazanie nastaw rozdrabniacza zapewniających możliwie niską energochłonność i emisyjność procesu rozdrabniania przy jednoczesnym możliwie najwyższym stopniu rozdrobnienia, wydajności masowej i najniższym poborze mocy, dlatego kryteria energochłonności i emisyjności są wypadkową mierzalnych wartości wyjściowych. Niższa wartość funkcji celu oznacza proces lepszy pod względem energetyczno-środowiskowym, tj. mniej energochłonny z mniejszymi emisjami.

Za kryterium energochłonności przyjęto energochłonność zintegrowaną, szczegółowo opisaną we wcześniejszych pracach autorki [31, 199]. Energochłonność zintegrowana (zależność 8.2) obliczana jest na podstawie wyznaczonych dla każdej analizowanej konfiguracji wartości wydajności rozdrabniania, zapotrzebowania mocy, jednostkowego zapotrzebowania na energię i stopnia rozdrobnienia [199, 357]. Mając na uwadze, że stanem postulowanym rozdrabniania jest zmniejszanie poboru mocy i jednostkowego zapotrzebowania na energię oraz zwiększanie wydajności i stopnia rozdrobnienia, procesem lepszym pod względem energochłonności w ujęciu zintegrowanym będzie proces o wyższej wartości wskaźnika energochłonności zintegrowanej [199, 357].

$$E_{zint} = K_{Q_r} \cdot K_P \cdot K_{E_j} \cdot K_i \quad (8.2)$$

gdzie: $K_{Q_r}, K_{Q_r} = Q_r$ – wydajność rozdrabniania, $K_P, K_P = 1/P_r$ – kryterium zapotrzebowania mocy, $K_{E_j}, K_{E_j} = 1/E_j$ – kryterium jednostkowego zapotrzebowania na energię, $K_i, K_i = i_{80}$ – stopień rozdrobnienia.

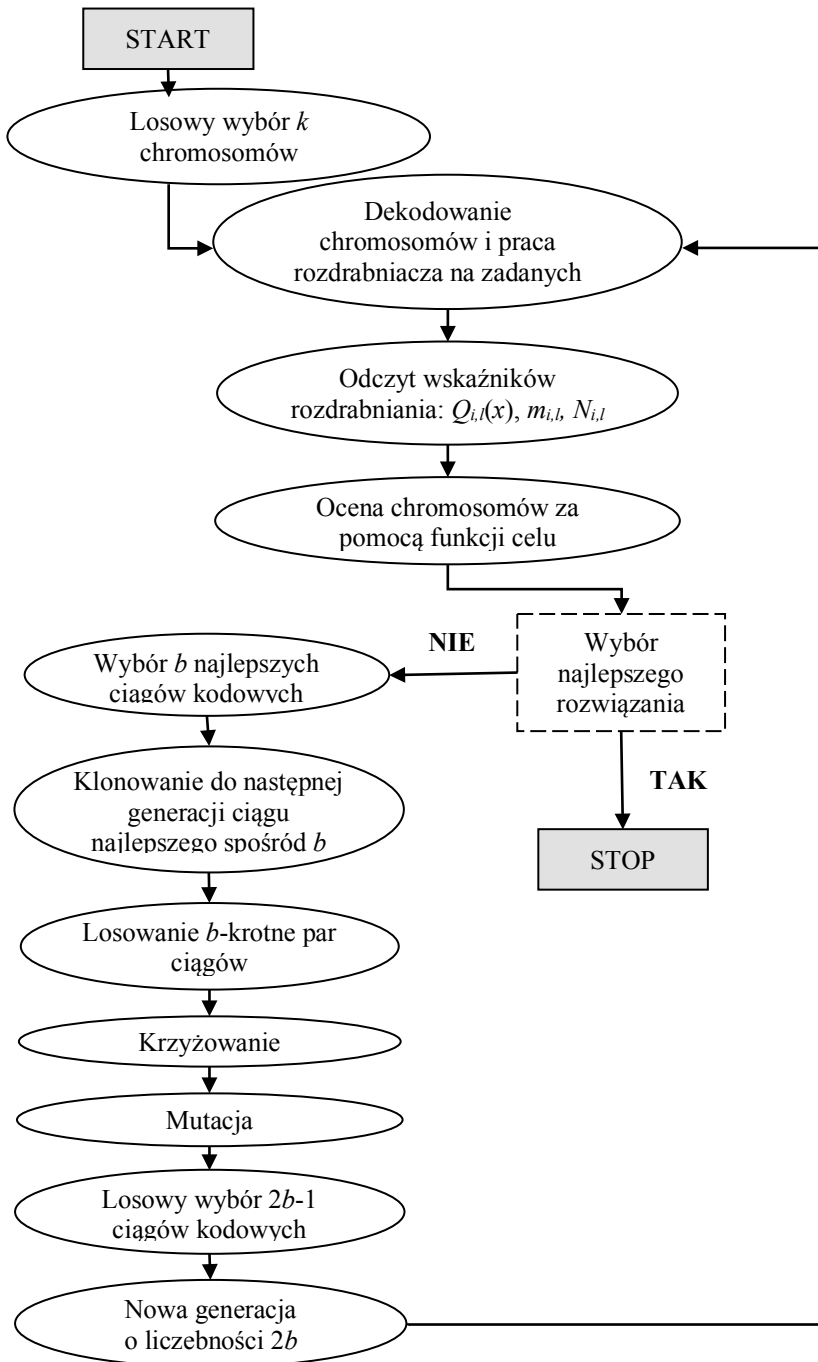
Emisyjność zrównoważona jako kryterium emisyjności obejmuje pobór mocy na rozdrabnianie P_R , korzyści środowiskowe z rozdrabniania biomasy energetycznej ΔE_{eco} oraz czas rozdrabniania t_R (zależności 8.3–8.5) [199, 357]. Zakładając, że dla rozdrabniania dąży się do zmniejszania poboru mocy oraz zwiększania korzyści ekologicznych i czasu procesu, zmniejsza się wartość emisyjności [199, 357].

$$e_{zrów} = P_R \cdot \frac{1}{\Delta E_{eco}} \cdot \frac{1}{t_R} \quad (8.3)$$

$$\Delta E_{eco} = E_{es} - E_{Rt} \quad (8.4)$$

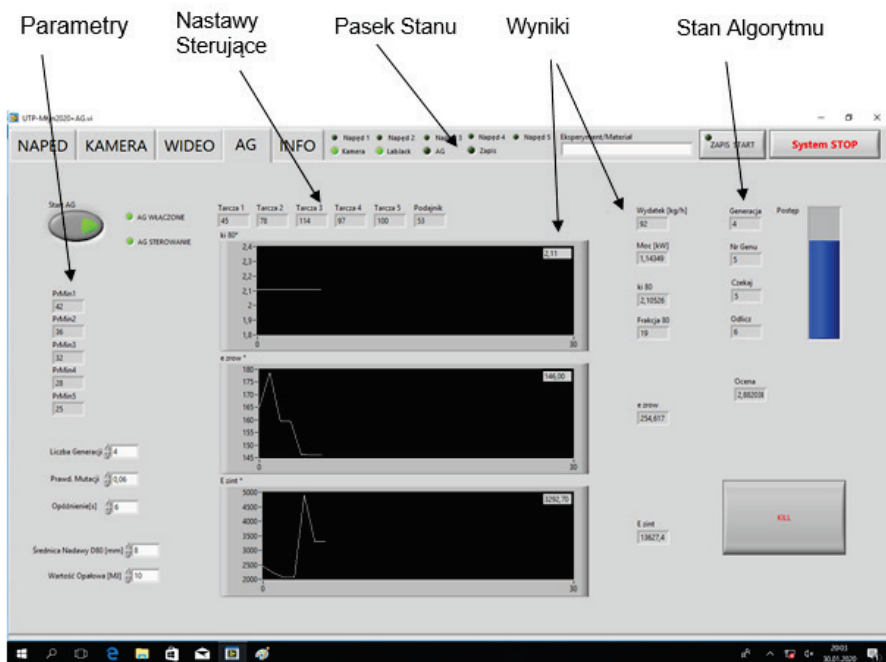
$$E_{es} = W_i \cdot Q_r \cdot t_R \cdot k_e \quad (8.5)$$

gdzie: E_{es} – energia elektryczna wytworzona ze spalania rozdrobnionej biomasy, kWh, E_{Rt} – energia elektryczna zużyta w procesie rozdrabniania, kWh, E_s – energia ze spalania biomasy, kWh, W_i – wartość opałowa rozdrobnionej biomasy, kWh·kg⁻¹, Q_r – wydajność masowa rozdrabniania, kg, k_e – współczynnik kogeneracji, $k_e = 0,4$ [301].



Rys. 8.3. Schemat działania algorytmu genetycznego poszukiwań optymalnych nastaw parametrów rozdrabniacza (zaadaptowano z [61])

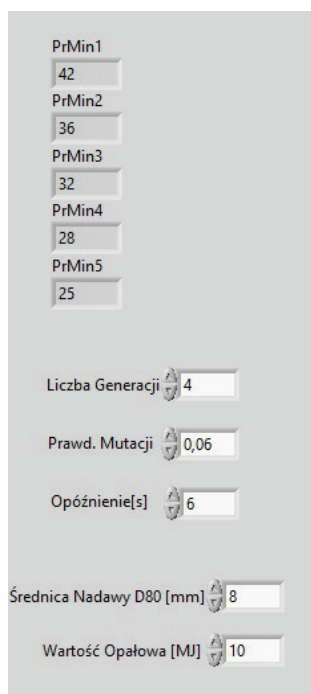
W systemie sterowania rozdrabniaczem wielotarczowym opisanym w rozdziale 7.1 zaimplementowano metodę oceny energetyczno-środowiskowej z zastosowaniem algorytmów genetycznych. Algorytm wykorzystuje informacje o mocy pobieranej na poszczególnych tarczach rozdrabniacza, masie rozdrobnionego produktu, rozkładzie granulometrycznym produktu rozdrabniania, zebrane i zarchiwizowane przez dedykowany system monitorowania i automatyki procesu rozdrabniania. Uruchomienie i zarządzanie eksperymentem z algorytmami genetycznymi możliwe jest z panelu sterowania w aplikacji MŁYN-2019 w zakładce AG (rys. 8.4). Aplikacja z algorytmami genetycznymi przeznaczona jest do wyszukiwania nastaw procesowych młyna (prędkości kątowych tarcz rozdrabniacza, wydatku masowego podawania wsadu) wg kryterium optymalizacyjnej funkcji celu – funkcji oceny energetyczno-środowiskowej.



Rys. 8.4. Interfejs sterowania rozdrabniaczem z pomocą algorytmów genetycznych

Danymi wejściowymi dla algorytmu są informacje o stanie (włączeniu/wyłączeniu) napędu dla wszystkich tarcz, parametry eksperymentu (liczba generacji, prawdopodobieństwo mutacji, opóźnienie, średnica nadawy, wartość opałowa), okresowo odczytywane wartości wydajności masowych w poszczególnych przedziałach średnic rozdrobnionego produktu (frakcjach) oraz wartość energii pobieranej przez napędy. Na rysunku 8.5 przedstawiono interfejs komunikacyjny pozwalający na zmianę parametrów eksperymentu z AG. W oknach PrMin1, PrMin2, ... PrMin5 wyświetlane są informacje o nastawionej minimalnej

prędkości kątowej tarcz rozdrabniacza [$\text{rad}\cdot\text{s}^{-1}$] (rys. 8.5). Przed rozpoczęciem eksperymentu należy ustalić parametry początkowe dla algorytmu genetycznego, takie jak: liczba generacji, tj. iteracji programu (wartość domyślna 4, w pierwszej generacji ocenianych jest 10 ciągów kodowych, w każdej kolejnej 6); prawdopodobieństwo mutacji, czyli częstość, z jaką modyfikowane będą ciągi kodowe (domyślnie 0,06, możliwość wyboru w zakresie 0–1); opóźnienie będące czasem oczekiwania na ustabilizowanie procesu rozdrabniania (domyślnie: 6 s, zalecane: min 20 s), średnica nadawy D80 określająca wymiar otworu sita, przez które przechodzi 80% ziaren nadawy, wyznaczona wcześniej eksperymentalnie dla danego materiału wsadowego oraz wartość opałowa nadawy, która również musi być wyznaczona wcześniej dla danego materiału wsadowego.



The image shows a software interface for setting parameters. It consists of several input fields, each with a label and a numerical value:

- PrMin1: 42
- PrMin2: 36
- PrMin3: 32
- PrMin4: 28
- PrMin5: 25
- Liczba Generacji: 4
- Prawd. Mutacji: 0,06
- Opóźnienie[s]: 6
- Średnica Nadawy D80 [mm]: 8
- Wartość Opałowa [MJ]: 10

Rys. 8.5. Interfejs komunikacyjny parametrów eksperymentu AG

W trakcie trwania eksperymentu algorytm dokonuje autoregulacji, wyboru wartości nastaw prędkości kątowych tarcz nr 1,2,3,4 i 5 oraz wydatku masowego podajnika. Zgodnie z zadaną liczbą generacji program wykonuje cykle podawania parametrów dla układu napędowego i odczytów istotnych parametrów procesu rozdrabniania. Po każdorazowej zmianie nastaw parametrów pracy młyna i ustaleniu procesu mierzony i obliczany jest wydatek (wydajność rozdrabniania, $\text{kg}\cdot\text{h}^{-1}$), sumaryczna moc napędu rozdrabniacza, stopień rozdrobnienia $ki80$, emisyjność zrównoważona $e_zrów$ oraz zintegrowana energochłonność E_zint , a ich wartości wyświetlane są w oknie interfejsu komunikacyjnego (rys. 8.6).

Po zakończeniu serii testów dla każdej generacji następuje porównanie wyników wg kryterium minimalizacji funkcji celu. Najlepsze wyniki tworzą kolejne punkty wykresów.



Rys. 8.6. Okno oceny i wizualizacji wartości składowych funkcji celu

Dane wyjściowe, które otrzymuje się z aplikacji, to: stan cyklu obliczeń (uruchomienie/zakończenie), zestaw najlepszych wyszukanych rozwiązań w obrębie zadanej dziedziny i wykonanej liczby iteracji oraz wyników pomiarów (zdekodowane nastawy prędkości tarcz i podajnika, wydajność rozdrabniacza, moc napędów, 80% stopień rozdrobnienia, emisyjność zrównoważona, zintegrowana energochłonność, wartość funkcji celu), możliwych do wyeksportowania w formacie xls.

Każdorazowe uruchomienie eksperymentu generuje raport w postaci pliku w formacie xls. Nazwy plików zawierają datę, godzinę i minutę rozpoczęcia eksperymentu. Zastosowanie ustawień domyślnych pozwala na przetestowanie 34 kombinacji nastaw parametrów procesowych młyna. Liczba kombinacji dla ustawień domyślnych została dobrana doświadczalnie w taki sposób, aby możliwe było przeprowadzenie całego eksperymentu, biorąc pod uwagę wielkość zasobnika i wymagany czas opóźnienia dla stabilizacji procesu. Znaleziony zestaw nastaw powinien odpowiadać wartości funkcji celu z błędem nieprzekraczającym 10% zakresu zmienności funkcji celu.

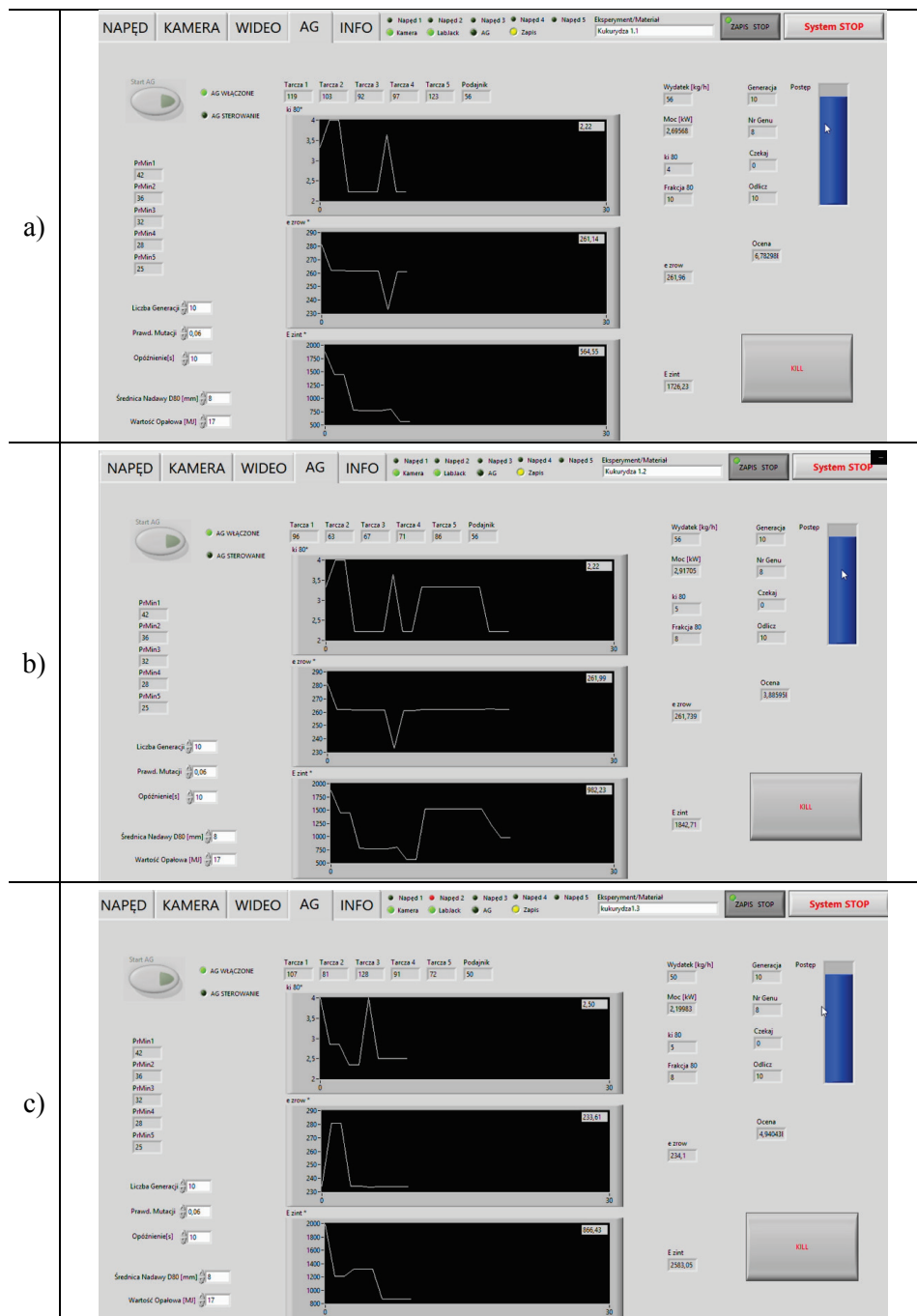
8.3. AUTOREGULACJA NASTAW PROCESOWYCH ROZDRABNIANIA Z WYKORZYSTANIEM INTELIAGENTNEGO SYSTEMU MONITOROWANIA

W celu autoregulacji ustawień prędkości kątowych tarcz rozdrabniacza oraz intensywności dozowania wsadu, gwarantujących jednocześnie możliwie najmniejszą energochłonność i emisyjność, przeprowadzono eksperyment na rozdrabniaczu pięcioletnicowym z wykorzystaniem inteligentnego systemu monitorowania z algorytmami genetycznymi. Badania obejmowały 6 eksperymentów: po 3 dla ziaren kukurydzy i 3 dla ziaren ryżu. W tabeli 8.3 przedstawiono parametry wejściowe zastosowane w aplikacji MŁYN-2019 w zakładce AG.

Tabela 8.3. Dane wejściowe dla algorytmów genetycznych

Parametr	Kukurydza	Ryż
Liczba generacji	10	10
Prawdopodobieństwo mutacji	0,6	0,6
Opóźnienie, s	10	10
Średnica nadawy, mm	8	2
Wartość opałowa, MJ	17	16

Na rysunku 8.7 przedstawione są graficzne wyniki eksperymentów przeprowadzonych dla kukurydzy. Widoczne są nim wykresy zmian zintegrowanej energochłonności i emisyjności zrównoważonej dla ocenionych genów. Tabele 8.4–8.6 przedstawiają przetestowane ustawienia parametrów pracy rozdrabniacza wraz z wartościami zintegrowanej energochłonności, emisyjności zrównoważonej i funkcji oceny energetyczno-środowiskowej dla eksperymentów rozdrabniania ziarniaków kukurydzy. Spośród badanych ustawień najlepsze pod względem energochłonności i emisyjności (najniższa wartość funkcji oceny energetyczno-środowiskowej) w eksperymencie 1., w którym materiałem rozdrabnianym była kukurydza, okazały się następujące parametry: $\omega_1 = 70 \text{ rad}\cdot\text{s}^{-1}$, $\omega_2 = 91 \text{ rad}\cdot\text{s}^{-1}$, $\omega_3 = 95 \text{ rad}\cdot\text{s}^{-1}$, $\omega_4 = 41 \text{ rad}\cdot\text{s}^{-1}$, $\omega_5 = 45 \text{ rad}\cdot\text{s}^{-1}$, $V_P = 97\%$ ($115 \text{ kg}\cdot\text{h}^{-1}$) (tabela 8.4, kolor zielony, $F_{e-s} = 0,210\cdot 10^{-2}$). W eksperymencie 2. dla kukurydzy najniższe wartości funkcji oceny energetyczno-środowiskowej zapewniało następujące ustawienie: $\omega_1 = 102 \text{ rad}\cdot\text{s}^{-1}$, $\omega_2 = 112 \text{ rad}\cdot\text{s}^{-1}$, $\omega_3 = 83 \text{ rad}\cdot\text{s}^{-1}$, $\omega_4 = 51 \text{ rad}\cdot\text{s}^{-1}$, $\omega_5 = 28 \text{ rad}\cdot\text{s}^{-1}$, $V_P = 94\%$ ($111 \text{ kg}\cdot\text{h}^{-1}$) (tabela 8.5, kolor zielony, $F_{e-s} = 0,243\cdot 10^{-2}$). W eksperymencie 3. dla kukurydzy najniższe wartości funkcji oceny energetyczno-środowiskowej wystąpiły dla: $\omega_1 = 128 \text{ rad}\cdot\text{s}^{-1}$, $\omega_2 = 39 \text{ rad}\cdot\text{s}^{-1}$, $\omega_3 = 108 \text{ rad}\cdot\text{s}^{-1}$, $\omega_4 = 91 \text{ rad}\cdot\text{s}^{-1}$, $\omega_5 = 59 \text{ rad}\cdot\text{s}^{-1}$, $V_P = 77\%$ ($92 \text{ kg}\cdot\text{h}^{-1}$) (tabela 8.6, kolor zielony, $F_{e-s} = 0,340\cdot 10^{-2}$). Spośród trzech przeprowadzonych eksperymentów najniższą wartość funkcji oceny energetyczno-środowiskowej uzyskano w eksperymencie 1.: $\omega_1 = 70 \text{ rad}\cdot\text{s}^{-1}$, $\omega_2 = 91 \text{ rad}\cdot\text{s}^{-1}$, $\omega_3 = 95 \text{ rad}\cdot\text{s}^{-1}$, $\omega_4 = 41 \text{ rad}\cdot\text{s}^{-1}$, $\omega_5 = 45 \text{ rad}\cdot\text{s}^{-1}$, $V_P = 97\%$ ($115 \text{ kg}\cdot\text{h}^{-1}$) (tabela 8.4, kolor zielony, $F_{e-s} = 0,210\cdot 10^{-2}$).



Rys. 8.7. Wyniki autoregulacji ustawień parametrów pracy rozdrabniacza podczas rozdrabniania kukurydzy: a) eksperyment 1., b) eksperyment 2., c) eksperyment 3.

Tabela 8.4. Wyniki autoregulacji ustawień parametrów pracy rozdrabniacza (kukurydza) – eksperyment 1.

ω_1	ω_2	ω_3	ω_4	ω_5	V_P	$e_{zrów}$	E_{zint}	F_{e-s}
rad·s ⁻¹	rad·s ⁻¹	rad·s ⁻¹	rad·s ⁻¹	rad·s ⁻¹	%	·10 ⁻⁴	–	·10 ⁻²
70	91	95	41	45	97	455,974	10463	0,210
121	45	83	28	32	89	271,94	3962,32	0,928
51	45	83	28	110	97	456,363	8878,9	0,247
128	88	67	97	32	89	417,99	5147,74	0,465
68	45	92	31	49	55	258,17	9720,97	0,398
76	115	105	61	32	73	342,91	3747,34	0,778
110	103	121	71	86	60	281,03	1872,89	1,900
128	121	121	81	113	68	318,47	4414,09	0,711
85	60	41	120	123	69	323,34	2787,49	1,109
121	118	73	97	93	87	408,11	3614,22	0,678
110	103	121	71	123	56	261,71	1446,44	2,642
85	60	41	38	89	60	281,47	4105,8	0,865
99	121	92	84	103	58	271,22	1616,67	2,281
96	115	92	61	32	73	342,86	4254,14	0,686
121	121	105	35	32	73	343,08	5807,52	0,502
76	115	70	81	103	58	271,57	2314,02	1,591
110	103	95	67	123	56	261,87	3234,06	1,181
99	121	92	84	103	58	271,37	5962,47	0,618
110	103	121	58	86	60	281,07	2112,56	1,684
76	51	70	81	103	58	271,63	1827,26	2,015
76	115	117	44	86	53	248,17	3518,17	1,145
110	103	121	87	103	58	271,27	1282,53	2,874
87	121	92	84	123	26	261,66	778,31	4,910
110	97	121	54	59	60	281,23	1475,89	2,409
76	51	70	77	86	60	281,22	2913,17	1,221
110	103	70	100	103	58	271,11	4997,73	0,738
87	121	124	87	103	58	271,28	2684,56	1,373
110	103	92	84	123	56	233,42	1205,73	3,553
110	97	121	54	59	60	281,25	4497,44	0,791
110	103	121	54	59	60	281,31	3549,2	1,002
110	97	121	71	123	56	261,80	1532,87	2,492
87	121	92	84	123	56	261,62	1364,64	2,801

cd. tabeli 8.4.

110	63	121	67	123	50	233,67	1453,27	2,945
110	103	121	94	103	58	270,98	1714,66	2,152
87	103	127	87	103	58	271,1	1859,34	1,984
110	103	121	54	123	50	233,47	1560,27	2,745
110	103	70	84	123	56	261,60	1490,05	2,565
87	121	92	84	123	56	261,51	1410,1	2,712
110	63	121	67	69	50	234,04	1637,28	2,610
42	121	92	84	69	56	262,44	4262,56	0,894
110	75	121	91	123	56	261,41	1324,82	2,887
87	121	92	127	123	50	233,02	927,86	4,625
121	103	86	84	123	56	261,58	2206,19	1,733
87	121	92	84	123	56	261,61	1504,97	2,540
87	121	92	127	123	50	232,92	799,49	5,370
110	75	121	91	123	56	261,637	3440,63	1,111
87	124	92	127	128	56	261,37	1937	1,975
110	63	108	91	123	50	233,04	1175,12	3,652
119	103	92	97	123	56	261,14	564,55	6,783
96	109	92	127	123	50	232,85	936,25	4,587
87	121	92	84	123	56	261,46	1369,92	2,792
110	63	108	91	123	50	233,19	2590,77	1,655
87	121	117	91	123	50	233,01	1540,59	2,786
110	63	83	84	123	56	261,68	1411,3	2,708
119	103	117	97	123	50	232,99	1307,38	3,283
87	121	92	127	123	56	261,41	1195,58	3,200
110	97	92	84	123	56	261,25	722,60	5,297
96	121	92	127	123	50	233,03	720,24	5,958
110	103	92	127	123	50	233,02	929,32	4,618
96	109	92	84	42	56	261,96	1726,23	2,211

Tabela 8.5. Wyniki autoregulacji ustawień parametrów pracy rozdrabniacza (kukurydza) – eksperyment 2.

ω_1	ω_2	ω_3	ω_4	ω_5	V_P	$e_{zrów}$	E_{zint}	F_{e-s}
rad·s ⁻¹	rad·s ⁻¹	rad·s ⁻¹	rad·s ⁻¹	rad·s ⁻¹	%	·10 ⁻⁴	–	·10 ⁻²
82	88	48	44	93	63	261,96	1726,23	2,211
51	39	127	97	120	55	318,66	2105,48	1,490
96	63	67	71	86	56	257,32	8916,35	0,436
42	103	102	58	62	97	262,03	1520,43	2,510
102	115	79	35	39	58	456,24	6601,37	0,332
56	42	64	64	28	81	271,96	2638,64	1,394
102	112	83	51	28	94	381,06	10809,6	0,243
59	63	67	51	113	53	442,01	7879,9	0,287
96	63	98	94	127	76	248,163	4096,66	0,984
93	63	117	71	32	56	318,60	6023,93	0,521
99	115	79	61	39	58	262,47	2625,25	1,451
59	63	67	51	86	53	271,83	2350,84	1,565
102	63	67	51	113	53	248,44	6792,56	0,593
59	118	79	128	66	58	247,88	4145,67	0,973
96	63	67	71	42	58	271,27	3343,18	1,103
99	115	79	61	89	56	271,80	3595,39	1,023
68	103	51	97	93	68	261,99	1611,94	2,368
79	63	117	71	32	56	318,55	5834,25	0,538
68	103	51	97	35	58	262,4	2464,57	1,546
93	112	117	71	93	68	271,85	2656,68	1,385
121	115	79	61	89	56	318,49	2799,74	1,121
59	69	67	87	86	56	261,95	2149,03	1,776
99	115	76	61	39	58	262,104	1605,14	2,377
79	63	117	71	32	82	271,71	2933,19	1,255
53	63	117	71	32	56	385,22	8412,22	0,309
48	115	54	74	45	56	262,68	2700,97	1,409
90	63	67	58	86	56	262,58	2914,56	1,307
59	69	67	81	86	56	262,15	2861,47	1,333
99	115	79	61	89	60	262,17	1692,64	2,253
121	109	79	61	89	73	280,97	1654,28	2,151
99	115	79	61	116	60	342,19	2460,02	1,188
127	115	79	54	89	69	280,74	2270,33	1,569

cd. tabeli 8.5.

53	69	67	87	86	56	323,50	3136,12	0,986
90	103	67	44	69	56	262,11	1760	2,168
59	69	97	81	35	69	262,31	3803,56	1,002
127	115	79	61	52	60	323,91	4979,48	0,620
59	81	41	94	86	60	281,02	2032,55	1,751
99	118	76	61	89	56	281,17	1939,08	1,834
96	63	95	71	86	56	261,92	2784,75	1,371
59	69	67	87	89	60	262,14	2213,59	1,723
53	69	67	87	86	56	281,04	5680,12	0,626
59	78	41	120	86	60	262,12	2166,54	1,761
53	69	92	94	113	60	281,21	2915,44	1,220
59	75	67	87	86	56	280,83	1488,74	2,392
59	69	92	94	113	60	262,01	2997,17	1,273
96	112	67	44	69	56	280,684	1582,63	2,251
68	69	95	87	86	56	262,27	1225,38	3,112
53	69	67	117	86	56	261,87	1466,55	2,604
59	69	64	87	32	56	262,20	1302,86	2,927
76	69	67	87	86	56	262,22	1956,92	1,949
96	63	67	114	86	56	261,88	2717,15	1,405
59	118	67	44	123	56	261,89	1492,71	2,558
68	69	95	87	86	76	262,21	1497,92	2,546
96	63	67	71	86	56	356,30	1999,45	1,404
104	69	98	71	86	82	261,99	982,23	3,886
96	63	67	87	86	56	384,81	9121,37	0,285
96	63	64	71	69	56	261,92	5574,72	0,685
96	112	67	71	86	50	262,16	1257,04	3,034
53	69	67	114	113	56	233,47	1388,35	3,085
96	63	67	114	86	56	261,99	1963,65	1,944
53	63	67	114	86	56	261,81	1415,9	2,698
119	69	117	114	86	56	262,26	1818,48	2,097
96	63	67	71	86	56	261,74	1842,71	2,073

Tabela 8.6. Wyniki autoregulacji ustawień parametrów pracy rozdrabniacza (kukurydza) – eksperyment 3.

ω_1	ω_2	ω_3	ω_4	ω_5	V_P	$e_{zrów}$	E_{zint}	F_{e-s}
rad·s ⁻¹	rad·s ⁻¹	rad·s ⁻¹	rad·s ⁻¹	rad·s ⁻¹	%	·10 ⁻⁴	-	·10 ⁻²
87	51	51	117	32	50	356,06	3972,67	0,707
65	127	128	91	79	60	234,05	1980,79	2,157
121	36	102	58	89	95	280,86	3935,44	0,905
128	39	108	97	59	77	446,63	6590,33	0,340
102	94	98	64	103	61	361,35	3296,87	0,839
42	45	86	104	69	61	285,53	4892,71	0,716
48	109	108	51	59	55	286,09	2816,67	1,241
87	51	79	91	110	82	257,86	4703,09	0,825
87	51	86	104	69	61	384,72	4847,93	0,536
42	45	51	117	32	50	285,68	1831,84	1,911
65	128	128	117	79	60	234,59	2003,04	2,128
128	39	57	97	59	77	280,64	1209,08	2,947
65	127	111	97	59	77	361,68	6833,98	0,405
128	45	128	91	79	60	361,12	2555,39	1,084
65	36	128	117	79	73	281,04	1415,91	2,513
45	45	128	91	79	60	342,52	3167,12	0,922
87	51	51	117	45	50	281,31	1891,37	1,879
42	45	51	114	32	50	233,93	1782,09	2,399
87	51	51	117	32	50	234,67	3767,99	1,131
42	94	51	117	32	52	234,09	5147,22	0,830
87	45	128	91	79	82	243,88	3854,72	1,064
87	128	128	117	76	60	384,91	4329,72	0,600
87	51	51	117	45	50	280,58	4040,84	0,882
45	45	128	91	79	60	234,19	1319,52	3,236
87	51	54	117	110	60	281,45	4027,93	0,882
45	45	128	91	49	50	280,81	2373,1	1,501
110	51	54	117	79	60	234,315	5074,68	0,841
76	128	128	91	72	50	280,95	3534,08	1,007
127	57	128	87	25	60	233,48	1793,83	2,388
87	51	54	117	110	60	281,424	1753,25	2,027
128	45	105	117	116	60	280,87	2842,11	1,253
87	75	79	38	79	60	280,53	1310,36	2,720

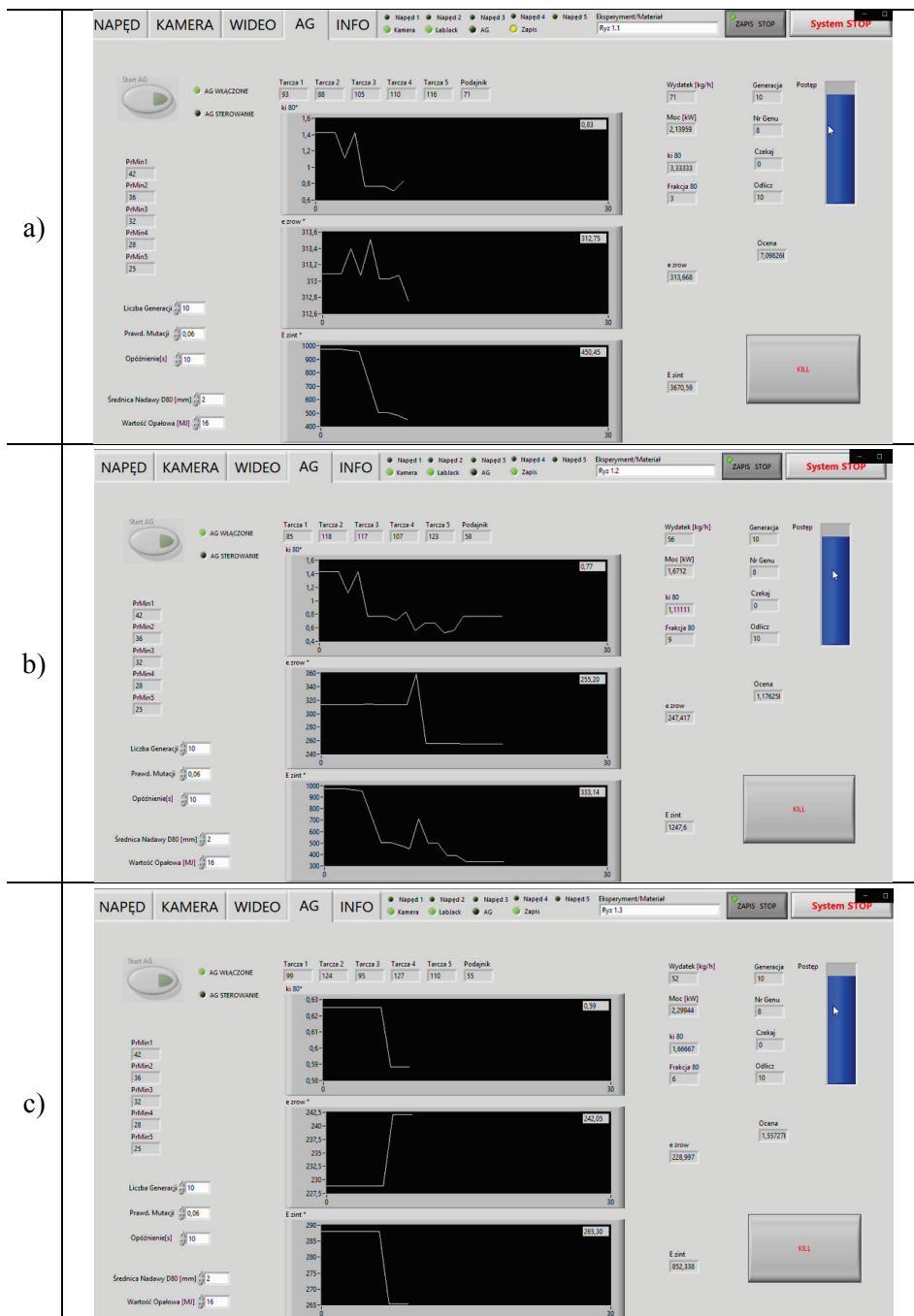
cd. tabeli 8.6.

87	51	51	117	79	60	281,25	2083	1,707
128	42	105	117	116	60	233,86	1528,95	2,797
107	128	128	91	72	50	280,68	1729,65	2,060
128	45	105	117	39	50	233,55	1322,96	3,236
96	128	79	87	83	61	234,09	2045,95	2,088
93	51	102	117	110	50	285,59	3419,33	1,024
107	81	128	91	72	50	233,55	2197,9	1,948
65	128	128	117	45	76	281,38	3367,12	1,055
65	36	128	117	45	50	356,65	3620,58	0,774
107	81	128	91	72	50	280,81	1191,14	2,990
107	128	79	91	72	50	233,64	2353,62	1,819
65	81	128	117	79	56	234,17	1705,64	2,504
90	51	32	117	76	60	262,102	2746,94	1,389
65	128	105	117	45	50	281,46	3259,51	1,090
42	128	105	64	100	50	233,80	1233,36	3,468
107	81	128	91	72	50	234,07	1825,02	2,341
62	128	79	91	72	50	233,49	1586,44	2,700
107	128	128	87	72	50	233,80	2292,87	1,865
107	128	79	91	45	76	233,66	1096,32	3,904
107	128	128	91	72	50	356,65	2786,27	1,006
107	128	117	35	72	50	233,64	1179,89	3,628
107	81	128	67	72	50	234,172	2207,81	1,934
107	128	128	91	72	50	233,91	2181,17	1,960
65	128	105	117	45	50	233,60	1366,66	3,132
124	128	128	38	72	50	233,88	3425,13	1,248
65	128	105	64	49	50	234,10	1591,42	2,684
107	81	128	91	72	50	234,10	2583,05	1,654

Na rysunku 8.8 przedstawiono graficzne wyniki eksperymentów przeprowadzonych dla rozdrabniania ziaren ryżu. Widoczne są na nim wykresy zmian zintegrowanej energochłonności i emisyjności zrównoważonej dla ocenionych genów. W tabelach 8.7–8.9 zestawiono wyniki przetestowanych ustawień parametrów pracy rozdrabniacza wraz z wartościami zintegrowanej energochłonności, emisyjności zrównoważonej i funkcji oceny energetyczno-środowiskowej dla eksperymentów rozdrabniania ryżu. Spośród badanych ustawień najlepsze pod względem energochłonności i emisyjności (najniższa wartość funkcji oceny

energetyczno-środowiskowej) w eksperymencie 1., w którym materiałem rozdrabnianym był ryż, okazały się następujące parametry: $\omega_1 = 51 \text{ rad}\cdot\text{s}^{-1}$, $\omega_2 = 112 \text{ rad}\cdot\text{s}^{-1}$, $\omega_3 = 114 \text{ rad}\cdot\text{s}^{-1}$, $\omega_4 = 58 \text{ rad}\cdot\text{s}^{-1}$, $\omega_5 = 113 \text{ rad}\cdot\text{s}^{-1}$, $V_P = 71 \%$ ($85 \text{ kg}\cdot\text{h}^{-1}$) (tabela 8.7, kolor zielony, $F_{e-s} = 0,327 \cdot 10^{-2}$). W eksperymencie 2. dla ryżu najniższe wartości funkcji oceny energetyczno-środowiskowej zapewniało następujące ustawienie: $\omega_1 = 42 \text{ rad}\cdot\text{s}^{-1}$, $\omega_2 = 54 \text{ rad}\cdot\text{s}^{-1}$, $\omega_3 = 114 \text{ rad}\cdot\text{s}^{-1}$, $\omega_4 = 100 \text{ rad}\cdot\text{s}^{-1}$, $\omega_5 = 49 \text{ rad}\cdot\text{s}^{-1}$, $V_P = 68\%$ ($82 \text{ kg}\cdot\text{h}^{-1}$) (tabela 8.8, kolor zielony, $F_{e-s} = 0,609 \cdot 10^{-2}$). W eksperymencie 3. dla ryżu najniższe wartości funkcji oceny energetyczno-środowiskowej wystąpiły dla: $\omega_1 = 87 \text{ rad}\cdot\text{s}^{-1}$, $\omega_2 = 124 \text{ rad}\cdot\text{s}^{-1}$, $\omega_3 = 95 \text{ rad}\cdot\text{s}^{-1}$, $\omega_4 = 74 \text{ rad}\cdot\text{s}^{-1}$, $\omega_5 = 106 \text{ rad}\cdot\text{s}^{-1}$, $V_P = 52\%$ ($62 \text{ kg}\cdot\text{h}^{-1}$) (tabela 8.9, kolor zielony, $F_{e-s} = 0,303 \cdot 10^{-2}$). Spośród trzech przeprowadzonych eksperymentów najniższą wartość funkcji oceny energetyczno-środowiskowej uzyskano w eksperymencie 3.: $\omega_1 = 87 \text{ rad}\cdot\text{s}^{-1}$, $\omega_2 = 124 \text{ rad}\cdot\text{s}^{-1}$, $\omega_3 = 95 \text{ rad}\cdot\text{s}^{-1}$, $\omega_4 = 74 \text{ rad}\cdot\text{s}^{-1}$, $\omega_5 = 106 \text{ rad}\cdot\text{s}^{-1}$, $V_P = 52\%$ ($62 \text{ kg}\cdot\text{h}^{-1}$) (tabela 8.9, kolor zielony, $F_{e-s} = 0,303 \cdot 10^{-2}$).

Podczas przeprowadzonych eksperymentów dokonano autoregulacji pod względem energochłonności i emisyjności parametrów pracy rozdrabniacza wielotarczowego w zakresie określonej dziedziny poszukiwań. Należy podkreślić, że otrzymane optymalne wartości z punktu widzenia przyjętego kryterium, funkcji oceny energetyczno-środowiskowej, w przeprowadzonym eksperymencie są jednymi z możliwych rozwiązań w przeszukiwanej przestrzeni dostępnych rozwiązań (34 mln możliwości) przy założonych warunkach działania algorytmu. Przeprowadzone eksperymenty obejmowały 10 generacji, zwiększenie tej liczby prowadziło do otrzymania rozwiązania lepszego, bardziej dokładnego. Zadanie większego opóźnienia dla algorytmu (czasu stabilizacji procesu i zbierania wyników) również może wpływać na uzyskane wyniki, ponieważ przejścia materiału, zwłaszcza wilgotnego przez komorę roboczą, nie są jednorodne w czasie. Jak wskazano we wcześniejszych rozdziałach, podczas rozdrabniania biomasy (szczególnie o wysokiej wilgotności) może dochodzić do zaburzeń przepływu materiału w komorze roboczej (m.in. przez zaleganie materiału w komorze), co będzie wywierać negatywny wpływ na pomiary wydajności i spowoduje błędy w oszacowaniu parametrów.



Rys. 8.8. Wyniki autoregulacji ustawień parametrów pracy rozdrabniacza podczas rozdrabniania ryżu: a) eksperyment 1., b) eksperyment 2., c) eksperyment 3.

Tabela 8.7. Wyniki autoregulacji ustawień parametrów pracy rozdrabniacza (ryż) – eksperyment 1.

ω_1	ω_2	ω_3	ω_4	ω_5	V_P	$e_{zrów}$	E_{zint}	F_{e-s}
rad·s ⁻¹	rad·s ⁻¹	rad·s ⁻¹	rad·s ⁻¹	rad·s ⁻¹	%	·10 ⁻⁴	–	·10 ⁻²
82	94	51	48	49	53	304,48	2015,71	1,629
121	115	114	58	113	71	349,12	932,90	3,070
85	75	92	87	116	69	313,09	972,70	3,284
76	115	45	110	39	79	442,56	6627,44	0,341
93	78	117	58	113	71	349,15	2491,87	1,149
51	57	89	120	86	69	313,29	1595,62	2,000
121	51	95	64	86	100	304,59	2197,92	1,494
73	57	92	107	86	95	442,43	4465,58	0,506
99	39	95	77	86	74	419,95	3311,23	0,719
121	115	117	110	39	79	326,71	2289,35	1,337
104	88	54	58	42	71	348,80	3094,16	0,927
93	78	117	58	113	71	313,89	1521,65	2,094
93	78	92	67	86	73	420,64	4873,82	0,488
121	115	114	58	113	84	313,38	2145,56	1,487
104	78	54	117	45	66	370,87	1854,84	1,454
107	88	54	58	42	71	291,33	1447,00	2,372
59	78	117	58	113	71	313,92	4719,51	0,675
104	54	117	58	113	69	313,40	964,04	3,310
51	88	54	58	42	71	304,48	2675,71	1,227
59	127	117	58	106	71	314,05	962,48	3,308
51	88	54	54	113	71	313,35	1670,70	1,910
121	115	114	58	113	71	313,59	2572,01	1,240
104	88	54	110	25	85	313,01	1289,46	2,478
99	115	114	58	42	76	375,87	2951,02	0,902
93	88	54	110	116	71	336,01	2305,39	1,291
93	88	41	110	116	71	313,07	957,31	3,337
59	78	67	58	113	71	313,05	1321,46	2,417
51	88	54	58	42	71	313,51	732,56	4,354
121	66	114	58	42	71	314,20	4847,26	0,657
51	112	114	58	113	71	313,95	1044,71	3,049
121	91	54	58	42	71	313,57	911,45	3,499
59	78	67	71	113	71	313,91	2004,32	1,589

cd. tabeli 8.7.

51	112	114	58	113	71	313,53	9739,15	0,327
79	88	54	110	116	71	313,25	967,37	3,300
59	78	114	58	113	71	313,03	501,85	6,366
93	81	117	58	127	71	313,46	1307,91	2,439
62	88	48	110	116	71	313,27	1559,29	2,047
79	78	67	58	113	84	313,34	826,09	3,863
59	88	54	110	116	71	371,21	751,25	3,586
62	88	48	110	116	71	313,25	856,38	3,728
51	112	89	58	113	71	313,28	985,31	3,240
56	81	114	58	86	71	313,51	3180,01	1,003
51	118	48	110	116	71	313,69	1128,24	2,826
79	39	54	58	113	71	313,39	1074,24	2,970
59	78	67	110	116	71	313,85	876,48	3,635
59	85	105	110	116	71	313,23	1263,13	2,527
79	78	41	58	113	84	313,07	480,70	6,645
53	88	54	110	116	97	371,45	2470,68	1,090
79	78	67	71	113	58	428,98	1700,58	1,371
59	85	54	110	116	71	255,51	1101,4	3,553
93	88	105	110	116	71	313,26	645,79	4,943
59	78	79	58	113	71	312,75	450,45	7,098
124	39	54	58	113	97	313,49	936,61	3,406
79	39	54	58	113	71	313,49	721,73	4,420
93	88	105	110	116	71	313,67	3670,59	0,869

Tabela 8.8. Wyniki autoregulacji ustawień parametrów pracy rozdrabniacza (ryż) – eksperyment 2.

ω_1	ω_2	ω_3	ω_4	ω_5	V_P	$e_{zrów}$	E_{zint}	F_{e-s}
rad·s ⁻¹	rad·s ⁻¹	rad·s ⁻¹	rad·s ⁻¹	rad·s ⁻¹	%	·10 ⁻⁴	–	·10 ⁻²
68	57	79	61	120	69	313,67	3670,59	0,869
110	60	73	127	59	97	304,79	2646,02	1,240
116	75	124	35	76	74	429,20	2305,54	1,011
102	60	45	87	96	81	327,23	2113,51	1,446
121	51	73	51	123	97	358,02	710,03	3,934
42	54	114	100	49	68	429,34	3825,32	0,609
113	85	83	127	39	73	300,65	1762,16	1,888
121	63	127	51	28	69	322,46	2643,21	1,173
70	48	117	107	39	58	305,33	1738,16	1,884
121	124	127	77	69	77	256,11	1366,42	2,858
124	112	127	77	69	77	340,04	818,99	3,591
99	60	45	87	103	81	340,23	1643,79	1,788
70	48	117	114	66	58	358,33	2436,29	1,145
42	54	114	100	49	74	255,87	500,72	7,805
56	57	108	100	49	68	327,34	980,26	3,116
85	118	117	107	39	58	300,55	2095,26	1,588
70	118	11	107	39	58	255,75	519,49	7,527
82	48	117	114	39	84	255,91	1297,65	3,011
70	60	45	71	96	81	371,68	3086,67	0,872
121	124	127	77	69	77	358,33	1557,92	1,791
102	60	45	87	59	84	340,08	1270,96	2,314
121	124	127	77	86	81	371,68	2313,27	1,163
70	48	117	107	39	58	357,61	1827,81	1,530
85	118	117	114	66	58	255,85	389,62	10,032
73	118	111	107	66	58	255,83	485,15	8,057
121	124	127	77	69	76	255,69	712,24	5,491
82	118	111	54	69	77	335,77	2232,55	1,334
127	124	127	127	39	58	340,42	977,77	3,004
70	48	117	107	120	58	255,84	2429,07	1,609
85	112	117	114	39	58	255,62	667,14	5,864
70	48	117	114	66	58	255,30	936,65	4,182
85	118	117	107	39	58	255,78	693,42	5,638

cd. tabeli 8.8.

70	118	117	51	39	58	255,79	387,81	10,081
85	48	117	114	66	58	256,22	2161,17	1,806
85	48	67	107	39	52	255,90	859,64	4,546
65	118	117	107	39	58	229,49	1038,43	4,196
85	118	117	114	66	84	255,92	1965,82	1,988
70	48	117	107	120	58	371,19	2968,55	0,908
85	118	117	107	123	58	255,89	636,99	6,135
70	48	117	114	66	58	255,20	333,14	11,762
85	118	117	107	123	58	255,93	888,11	4,400
70	48	127	107	39	61	255,84	1466,68	2,665
70	48	117	107	120	58	269,46	2678,38	1,386
70	48	117	51	116	58	255,52	370,14	10,573
85	69	45	107	120	58	255,90	552,24	7,076
70	48	45	107	123	58	255,48	538,03	7,275
85	118	67	107	39	58	255,79	1395,17	2,802
70	48	117	107	120	58	255,40	999,27	3,918
85	118	117	107	120	58	255,563	956,41	4,091
70	54	117	107	116	58	255,23	885,13	4,427
85	118	117	107	123	52	255,56	820,40	4,770
70	48	117	50	120	58	228,46	669,91	6,534
85	69	48	54	120	58	255,99	1054,47	3,705
102	54	117	107	116	71	255,84	665,42	5,874
85	69	32	107	116	58	313,22	1885,05	1,694
70	54	117	107	120	56	255,80	542,01	7,213
85	118	117	107	120	58	246,65	525,37	7,717
70	48	117	107	123	58	255,22	2204,03	1,778
70	54	117	107	120	56	255,58	484,48	8,076
85	97	32	107	116	58	246,65	657,90	6,163
70	54	117	107	89	58	255,73	829,27	4,715
85	69	32	107	39	56	255,83	1036,08	3,773

Tabela 8.9. Wyniki autoregulacji ustawień parametrów pracy rozdrabniacza (ryż) – eksperyment 3.

ω_1	ω_2	ω_3	ω_4	ω_5	V_P	$e_{zrów}$	E_{zint}	F_{e-s}
rad·s ⁻¹	rad·s ⁻¹	rad·s ⁻¹	rad·s ⁻¹	rad·s ⁻¹	%	·10 ⁻⁴	–	·10 ⁻²
59	124	102	74	89	100	233,58	1493,62	2,866
90	66	98	51	86	65	442,69	7418,89	0,304
128	109	73	67	72	66	287,16	1830,34	1,903
59	69	98	120	103	73	291,55	1341,45	2,557
124	72	121	54	72	87	322,48	1789,77	1,733
76	97	41	120	28	90	384,98	1261,19	2,060
56	48	38	35	113	89	398,55	2346,81	1,069
87	124	95	74	106	52	394,33	8374,63	0,303
127	75	79	54	39	50	228,87	288,11	15,165
110	124	79	54	39	50	220,72	1470,52	3,081
127	75	67	74	106	52	220,66	918,98	4,931
110	42	41	120	62	53	229,16	369,11	11,822
128	109	73	67	72	50	233,94	1444,19	2,960
110	42	54	120	116	53	220,29	1122,56	4,044
128	109	73	67	72	53	233,55	365,64	11,710
87	42	67	74	106	52	233,72	1365,88	3,133
127	94	95	67	106	52	229,31	980,68	4,447
110	42	54	120	116	53	228,92	2400,47	1,820
110	124	79	54	39	50	233,65	1069,2	4,003
116	124	79	54	39	50	220,32	659,73	6,880
110	42	54	120	116	53	220,68	939,25	4,825
87	121	95	74	106	58	233,55	729,70	5,868
42	81	67	74	106	52	255,51	392,83	9,963
110	124	67	67	39	50	229,32	1380,07	3,160
110	42	79	127	62	53	220,54	1030,51	4,400
110	124	35	120	39	53	233,75	704,53	6,072
121	91	57	54	39	50	233,86	1587,76	2,693
85	124	95	74	106	52	220,79	1608,45	2,816
127	75	67	74	106	52	229,09	790,19	5,524
87	121	95	74	106	58	229,04	1323,44	3,299
110	42	79	127	62	53	255,58	1454,78	2,690
87	121	95	74	106	71	233,50	932,50	4,593

cd. tabeli 8.9.

65	42	79	127	62	53	313,32	1352,05	2,361
87	72	67	74	106	52	233,85	556,50	7,684
127	121	95	127	106	52	229,11	1134,08	3,849
65	42	79	114	62	79	228,48	309,03	14,163
85	100	95	74	106	52	349,27	1545,58	1,852
65	42	79	127	62	56	228,87	458,41	9,531
85	124	95	74	106	55	247,20	1252,69	3,229
99	124	95	127	110	52	242,26	760,21	5,430
127	121	95	74	106	52	228,72	453,95	9,631
127	75	67	74	106	55	228,97	997,39	4,379
85	66	95	74	106	52	242,44	446,94	9,229
127	97	95	74	106	55	229,12	950,64	4,591
82	75	60	77	106	52	242,34	1140,41	3,618
87	121	95	127	106	52	229,13	5762,81	0,757
85	124	67	74	106	50	228,83	494,84	8,831
99	124	95	127	110	52	220,16	415,10	10,942
127	75	67	74	106	55	228,78	610,73	7,157
99	124	95	127	110	55	242,43	774,78	5,324
127	124	67	74	106	52	242,05	265,30	15,572
99	124	95	120	110	52	229,00	736,43	5,930
87	124	95	74	106	81	228,77	529,60	8,254
124	121	95	127	120	52	357,76	2563,71	1,090
85	124	67	74	106	50	228,60	931,67	4,695
127	121	67	74	106	50	220,11	297,64	15,264
85	124	95	127	106	77	220,17	2513,53	1,807
73	127	95	127	110	52	339,78	2012,09	1,463
85	124	67	67	120	53	228,70	361,62	12,092
87	124	95	67	106	52	233,43	478,46	8,954
93	124	95	94	110	52	229,03	1315,96	3,318
87	124	98	127	110	52	228,78	474,46	9,213
99	124	95	67	106	52	228,67	488,75	8,948
99	124	95	127	110	55	228,99	852,34	5,124

Przeprowadzone eksperymenty dowodzą skuteczności przyjętego algorytmu w zakresie autoregulacji nastaw parametrów procesowych rozdrabniacza prowadzących do zmniejszenia energochłonności procesu i jego emisyjności. Zaproponowany system monitorowania, sterowania i rejestracji procesu wielotarczowego rozdrabniania w zespole rozdrabniającym stanowi cenne narzędzie do przemysłowej aplikacji w zakładach przetwórstwa biomasy (lub innych materiałów) na cele energetyczne, paszowe i inne. Szczególne znaczenie może mieć w przetwórnictwach przemysłowych, gdzie nie można zapewnić stabilnych parametrów surowcowych (zmienna wilgotność, skład chemiczny i surowcowy wsadu), wówczas system z algorytmami genetycznymi mógłby na bieżąco analizować wartości wskaźników rozdrabniania i dobierać, wdrażać takie parametry nastaw młyna, aby dążyć do realizacji zasady energii minimum – tj. minimalizowania energochłonności i emisyjności procesu przy zachowaniu wysokiej, najwyższej wydajności i pożądanego stopnia przemiału, jako parametru oceny jakości produktu. Samą metodykę oceny energetyczno-środowiskowej można zaaplikować także do innych procesów przemysłowych, odpowiednio modyfikując zależności, np. na wydajność, jednostkowe zużycie energii odpowiednio do specyfiki branży, czy zastępując stopień rozdrobnienia, korzyści środowiskowe specyficznymi dla danej branży wskaźnikami.

9. PODSUMOWANIE I WNIOSKI

Zagadnienia rozwoju inżynierii mechanicznej rozdrabniania biomateriałów stanowią istotny obszar naukowy z punktu widzenia poprawy wydajności, zmniejszania energochłonności i szkodliwości środowiskowej oddziaływań tego procesu, głównie w kontekście idei, założeń i celów przedstawianych w Agendzie na rzecz zrównoważonego rozwoju 2030 [330, 331]. W wyniku badań studialnych w zakresie inżynierii mechanicznej rozdrabniania, a w szczególności mechanizmów rozdrabniania, konstrukcji zespołów mielących oraz czynników wpływających na przebieg tego procesu uporządkowano i poszerzono wiedzę w zakresie wzajemnych relacji pomiędzy czynnikami materiałowymi, procesowymi i maszynowymi oraz wskaźnikami rozdrabniania, przedstawiając poznana/odkrytą, nową wiedzę w zakresie przedmiotowych relacji jako element niezbędny do opisów zjawisk zachodzących podczas maszynowego rozdrabniania, tworzenia modeli matematycznych na potrzeby rozwoju konstrukcji rozdrabniających i procesu rozdrabniania w ogóle. Za podstawę rozwoju maszyn i urządzeń procesów rozdrabniania przyjęto model INTEGRONU, który wskazuje metodologicznie celowość i zasadność procesu, konstrukcji, systemu, dążenie do minimalizacji energii, autoregulację i piętrową strukturę jako warunki konieczne rozwoju. W konsekwencji realizacji badań własnych udowodniono słuszność takiego podejścia. Opisano m.in. nieodkryte dotychczas w inżynierii mechanicznej współzależności pomiędzy wspomnianymi warunkami, podkreślając istotę badań zmian stanu maszyn, parametrów i wskaźników projektowych i eksploatacyjnych dla formułowania zaleceń ulepszających konstrukcję, sprawność, efektywność i skuteczność rozdrabniaczy biomasy.

Zrealizowane postępowanie badawcze w zakresie badań fenomenów, obciążeń modelowych ścinania i ściskania oraz maszynowego rozdrabniania biomateriałów ziarnistych doprowadziło do osiągnięcia celów pracy polegających na: (I) usystematyzowaniu, uporządkowaniu i poszerzeniu stanu wiedzy i techniki w zakresie badań i opisów inżynierii rozdrabniania biomateriałów ziarnistych; (II) eksperymentalnym wyznaczeniu wpływu wybranych cech materiału rozdrabnianego (wielkości ziarna, wilgotności) oraz warunków obciążenia (różny rodzaj obciążeń: ściskanie i ścinanie, wielokrotność obciążania) na energię i prawdopodobieństwo rozdrabniania; (III) eksperymentalnym wyznaczeniu zależności pomiędzy prędkością elementów rozdrabniających i objętością dozowanego wsadu a wybranymi wskaźnikami oceny rozdrabniania, (IV) opracowaniu postaci matematycznych modeli prawdopodobieństwa rozdrabniania dla ziaren ryżu i kukurydzy oraz modeli rozdrabniania dla rozdrabniaczy wielotarczowych.

Badania fenomenów rozdrabniania w procesach modelowych ściskania i ścinania ziaren ryżu i kukurydzy dostarczyły odpowiedzi na postawione problemy badawcze (problemy 1–3) dotyczące możliwości stosowania modeli

statystycznych prawdopodobieństwa w odniesieniu do rozdrabniania biomasy oraz zmian tego prawdopodobieństwa w zależności od poziomu energii odkształcenia, zmiennych właściwości ziaren (wielkości i wilgotności) oraz warunków obciążenia przejawiających się w rodzaju naprężeń indukowanych w materiale (ścinające, ściskające) i krotności obciążeń. Wykazano, na przykładzie ziaren ryżu i kukurydzy, że prawdopodobieństwo rozdrabniania uziarnionej biomasy można opisać za pomocą statystycznych rozkładów, log-normalnego i Weibulla, przy czym rozkład log-normalny dla większości prób badawczych okazał się rozkładem o najlepszym dopasowaniu do danych eksperymentalnych. Tym samym potwierdzono zależności obserwowane dla innych materiałów, np. skał, rud i minerałów, że wraz ze wzrostem energii odkształceń prawdopodobieństwo rozdrabniania ziaren rośnie. Większe nakłady energii do podziału ziaren ryżu i kukurydzy występowały podczas ściskania, w związku z tym przy założeniu takiej samej energii jednostkowej odkształceń, ziarna z większym prawdopodobieństwem ulegną rozdrobnieniu podczas ścinania. Zatem, biorąc pod uwagę kryterium energii minimum modelu INTEGRONU rozwoju konstrukcji maszyn i urządzeń procesów rozdrabniania, ziarna zbóż powinny być poddawane obciążeniom ścinającym dla zapewnienia jak najniższej energochłonności procesu rozdrabniania. Wynika stąd, że rozdrabniacze dedykowane powyższym celom powinny być konstruowane z założeniem, że dzielenie materiału wsadowego odbywa się pod wpływem obciążeń ścinających.

Badania własne dowiodły, że postać geometryczna ziaren (ich grubość) oraz wilgotność stanowią istotne parametry materiałowe wpływające na proces rozdrabniania, a przede wszystkim na zapotrzebowanie energetyczne procesu. Potwierdzono przedstawiane w literaturze hipotezy, założenia i zależności dla ziaren pszenicy, ryżu oraz materiałów niebiologicznych, pelletów z żelaza, że wielkość ziaren wpływa na energię rozdrabniania, a związki te opisuje malejąca funkcja potęgowa. Z kolei zmiany wilgotności skutkowały odmiennym charakterem zmian jednostkowej energii rozdrabniania dla ziaren ryżu i kukurydzy, co podkreśla konieczność uwzględniania właściwości, przede wszystkim mechanicznych, ale także strukturalnych, które w pewien sposób odpowiadają za właściwości mechaniczne, w modelowaniu procesów przetwórczych i doskonaleniu konstrukcji maszyn rozdrabniających. Energia jednostkowa podczas statycznego ściskania kukurydzy rosła wraz ze wzrostem wilgotności, natomiast dla ziaren ryżu energia jednostkowa malała. W obu przypadkach energia jednostkowa ściskania przyjmuje postać funkcji kwadratowej lub potęgowej wilgotności. Obserwowane zależności pomiędzy energią jednostkową a właściwościami ziaren prowadziły do zmian prawdopodobieństwa rozdrobnienia pod wpływem przyłożonych obciążeń. Ziarna o mniejszej grubości ulegały rozdrobnieniu z mniejszym prawdopodobieństwem niż ziarna o większej grubości przy jednakowym

poziomie energii odkształceń. Wzrost wilgotności powodował natomiast, że prawdopodobieństwo rozdrobnienia ziaren kukurydzy malało, a dla ryżu prawdopodobieństwo rozdrobnienia rosło. Na podstawie uzyskanych rozkładów prawdopodobieństwa wyznaczono minimalne wartości energii rozdrabniania (wartości energii minimum w myśl założeń Integronu), które należy dostarczyć, aby doszło do zewnętrznego pęknięcia ziarna. Dla kukurydzy, w zależności od wilgotności, minimalne wartości energii zawierały się w przedziale $2,45 \text{ J}\cdot\text{kg}^{-1}$ dla ziaren o wilgotności 10% do $60,30 \text{ J}\cdot\text{kg}^{-1}$ dla ziaren o wilgotności 22%. Dla ziaren ryżu minimalna energia jednostkowa, przy której następował podział ziarna, mieściła się w przedziale $2,63 \text{ J}\cdot\text{kg}^{-1}$ dla ziaren o wilgotności 26% do $15,37 \text{ J}\cdot\text{kg}^{-1}$ dla ziaren o wilgotności 10%. W zakresie poniżej wspomnianych wartości energii pojedyncze obciążenia są nieefektywne, tzn. nie prowadzą do podziału ziarna i z tego względu konieczne jest zwielokrotnienie oddziaływań. W zakresie obciążeń nieefektywnych, krotność obciążeń skutkująca rozdrobnieniem zmienia się w zależności od energii odkształceń, od rodzaju (tj. właściwości mechanicznych) wielkości i wilgotności ziarna. Na podstawie badań fenomenologicznych modelowego ściskania ziaren ryżu i kukurydzy wykazano, że wzrost cykli obciążeń powoduje wzrost prawdopodobieństwa rozdrobnienia. Ziarna o mniejszej grubości wymagały większej liczby cykli obciążeń do rozdrobnienia niż ziarna o większej grubości. Ponadto zwiększanie wilgotności powodowało zwiększanie liczby cykli potrzebnych do rozdrobnienia ziaren kukurydzy, przy czym dla ziaren ryżu obserwowano zależność odwrotną. Analiza rozwoju pęknięcia ziarna i zmian energii odkształceń w kolejnych cyklach obciążeń dostarczyła nowej, ważnej wiedzy w zakresie mechanizmów rozdrabniania materiałów wykazujących właściwości wiskoplastyczne podczas obciążania, niezbędnej w procesach konstruowania rozdrabniaczy wielotarczowych i innych.

Na podstawie otrzymanych wyników opracowano matematyczne modele potęgowe wiążące mediany rozkładów prawdopodobieństwa z wielkością ziaren, wilgotnością i liczbą cykli obciążeń. Ma to istotne znaczenie praktyczne dla projektowania i konstruowania maszyn rozdrabniających, ich użytkowania, w tym modelowania energochłonności oraz stopnia rozdrobnienia produktu. Opracowane modele i wyznaczone wartości jednostkowej energii minimalnej i liczby cykli obciążeń, przy których następuje pęknięcie, gdy energia pojedynczego obciążenia jest niższa od energii podziału, mogą znaleźć zastosowanie także w projektowaniu innych maszyn i urządzeń przetwórczych, również transportowych, dla zmniejszenia strat ziaren biomasy na skutek niepożądanych uszkodzeń oraz poprawy wydajności procesu ekstrakcji skrobi. Wyniki badań stanowią podstawę dalszego rozwoju opisów mechanizmu maszynowego rozdrabniania materiałów wykazujących właściwości wiskoplastyczne w maszynach rozdrabniających, co przyczyni się do opracowania skutecznego modelu rozdrabniania do zastosowań

w symulacjach optymalizacji konstrukcji z wykorzystaniem metody elementów dyskretnych (DEM).

Badania eksperymentalne rozdrabniania przeprowadzone dla rozdrabniacza pięciotarczowego z tarczami wielootworowymi potwierdziły założenie o piętrowości struktury systemu rozdrabniania i doprowadziły do wyznaczenia relacji pomiędzy elementami struktury, tj. parametrami pracy maszyny rozdrabniającej a wskaźnikami ich oceny, istotnych pod względem budowy i eksploatacji rozdrabniaczy. Wyznaczono zależności liniowe i nieliniowe, ważne z punktu widzenia projektowego i eksploatacyjnego, opisujące wydajność, pobór mocy, stopień rozdrobnienia, jednostkowe zużycie energii, energochłonność zintegrowaną, emisyjność zrównoważoną i funkcją oceny energetyczno-środowiskowej zmiennych w funkcji sumarycznego przyrostu prędkości kątowych tarcz, wydatku dozowania wsadu i krotności rozdrabniania wyrażanego liczbą tarcz biorących udział w rozdrabnianiu w zależności od przyjętego programu badawczego, rozwiązując tym samym czwarty i piąty problem badawczy.

W konsekwencji przeprowadzonych działań naukowych, dla rozdrabniacza pięciotarczowego sformułowano następujące prawidłowości i uogólnienia:

- Zwiększanie krotności przejścia materiału przez zespół roboczy, wyrażanego poprzez zwiększenie liczby tarcz podczas rozdrabniania powoduje wzrost poboru mocy, jednostkowego zużycia energii, stopnia rozdrobnienia ziaren ryżu i kukurydzy.
- Wydajność rozdrabniania ryżu w rozdrabniaczu wielotarczowym malała, a kukurydzy rosła, gdy zwiększano liczbę tarcz biorących udział w rozdrabnianiu, co związane jest z parametrami przepływu obu ziaren warunkowanych ich wielkością i relacją pomiędzy wielkością ziarna a wielkością otworu w tarczy przepustowo-tnącej.
- Zwiększanie prędkości kątowych tarcz rozdrabniacza powodowało wzrost poboru mocy, wzrost jednostkowego zużycia energii i stopnia rozdrobnienia.
- Wydajność rozdrabniania zmieniała się nieliniowo (funkcje wielomianowe trzeciego stopnia) wraz ze wzrostem prędkości kątowych tarcz i uzależniona była silnie od intensywności dozowania wsadu, przy czym wartości te muszą być ze sobą odpowiednio skorelowane, gdyż jak wykazały badania dla rozdrabniania tylko przez tarczę pierwszą wydajność początkowo rosła wraz ze wzrostem prędkości kątowych, aż do osiągnięcia maksimum dla pewnej wartości krytycznej prędkości kątowej, a następnie malała. Wartość krytyczna prędkości kątowej, przy której następowała zmiana gradientu wydajności, zależna była ściśle od intensywności dozowania wsadu. Zasadniczo przy niższych prędkościach kątowych obserwowano większe wartości wydajności, co spowodowane jest zwiększeniem czasu napełniania i opróżniania otworów i mniejszymi zaburzeniami przepływu ziaren.

- Najkorzystniejsze wartości wskaźnika zrównoważonej emisyjności (najmniejsze) dla obu ziaren występują wraz ze zwiększaniem się strumienia dozowania wsadu i zmniejszaniem się sumarycznego przyrostu prędkości na tarczach.
- Zwiększanie wydatku dozowania ziaren ryżu do przestrzeni roboczej, gdy rozdrabnianie zachodzi przez pięć tarcz, powoduje wzrost poboru mocy na skutek zwiększania się ilości materiału jednocześnie ścinanego pomiędzy tarczami. Zależność ta jest odwrotna niż obserwowana dla rozdrabniania ryżu przez jedną tarczę z uwagi na zmianę dynamiki przepływu ziaren.
- Zwiększanie strumienia dozowania wsadu wpływało nieliniowo na zmianę wydajności, jednostkowego zużycia energii i stopnia rozdrobnienia, przy czym charakter zmian zależał od prędkości kątowych tarcz i przepływu ziaren przez zespół roboczy.
- Rozkład Rosina-Rammlera-Sperlinga-Benneta (RRSB) może być stosowany do opisu rozkładu wielkości cząstek produktu wielotarczowego, wielootworowego rozdrabniania.
- Wzrost prędkości kątowych tarcz rozdrabniacza powoduje zmniejszanie się finalnych wymiarów produktu, a zależność pomiędzy wielkością ziarna po rozdrobnieniu a energią jednostkową rozdrabniania przyjmuje postać funkcji potęgowej z ujemnym wykładnikiem potęgowym, co świadczy o konieczności zastosowania większych nakładów energetycznych do uzyskania produktu o mniejszych rozmiarach.
- Wzrost energii jednostkowej rozdrabniania powoduje zmiany składu granulometrycznego produktu, a mianowicie wraz ze wzrostem jednostkowego zużycia energii, zwiększa się skumulowany udział procentowy cząstek t_n o wymiarze mniejszym niż $1/n$.
- Model Walkera-Charlesa zależności pomiędzy energią rozdrabniania a wielkością cząstek po rozdrobnieniu charakteryzował się najwyższym dopasowaniem do danych eksperymentalnych (odpowiednio R^2 równe 0,716 i 0,897 dla kukurydzy i ryżu).
- Wykładnik n w zależności Walkera-Charlesa opisującej związek wielkości cząstek po rozdrobnieniu i energii rozdrabniania dla kukurydzy był równy 4,02 a dla ryżu -6,04, co sugeruje, że dla materiałów biologicznych słuszną jest teoria Hukkiego zakładająca, że wykładnik n w równaniu Walkera-Charlesa jest bliżej nieokreśloną funkcją wielkości cząstek.

Wyniki analiz wskazują, że procesy rozdrabniania uziarnionej biomasy (ryżu i kukurydzy) różnią się pod względem wydajności, poboru mocy, stopnia rozdrobnienia, jednostkowego zużycia energii, zintegrowanego wskaźnika energochłonności, emisyjności zrównoważonej i funkcji oceny energetyczno-środowiskowej. W przypadku kukurydzy proces rozdrabniania jest bardziej nierównomierny, co wynika głównie z dużego zróżnicowania właściwości

(mechanicznych i geometrycznych, jak np. wielkość) ziaren jednego gatunku, które obserwowano również w innych badaniach. Wpływ na występujące różnice ma także stosunek wielkości ziaren do wielkości otworów, które wpływają na dynamikę przepływu ziaren przez rozdrabniacz oraz na prawdopodobieństwo występowania efektywnych zderzeń ziarno-element rozdrabniający. Dla badanej konstrukcji wyznaczono zakresy charakterystycznych wielkości cząstek po rozdrobnieniu x_0 , dla których 63% masy cząstek ma wymiar mniejszy niż x_0 i jest to odpowiednio: $1.370 \leq x_0 \leq 2.843$ dla kukurydzy i $1.401 \leq x_0 \leq 1.903$ dla ryżu. Podczas rozdrabniania kukurydzy obserwowano zjawisko dławienia (wzrost poboru mocy przy obniżeniu wydajności i niewielkich zmianach stopnia rozdrobnienia) występujące, gdy rozdrabniane ziarna osiągnęły pewien krytyczny wymiar, który wynosił $d_{80} < 2,20$ mm. Dla badanej konstrukcji rozdrabniacza opracowano modele relacji pomiędzy skumulowanym udziałem procentowym cząstek t_n o wymiarze mniejszym niż $1/n$ w zależności od jednostkowego zużycia energii i znajomości krzywej referencyjnej t_{10} , co pozwoli na przewidywanie stopnia rozdrobnienia ziaren i składu granulometrycznego cząstek po rozdrobnieniu.

Opracowane zależności mają kluczowe znaczenia dla rozwoju i poprawy efektywności działania wielotarczowych konstrukcji rozdrabniających. Dla poprawy wskaźników procesu rozdrabniania ziaren ryżu w wielotarczowym zespole rozdrabniającym postuluje się zwiększenie liczby otworów z jednoczesnym zmniejszeniem ich średnicy, co doprowadziłoby do zwielokrotnienia zderzeń przyczyniając się do poprawy stopnia rozdrobnienia ziaren. Konieczne jest ustalenie optymalnej liczby, kształtu, wielkości, rozmieszczenia otworów w tarczach w stosunku do wielkości ziaren dozowanego materiału (który *de facto* zmniejsza się po przejściach przez kolejne tarcze robocze), tak aby zapewnić jak największą wydajność i wyeliminować problemy z przepływem materiału przy jednoczesnej intensyfikacji i zwielokrotnieniu efektywnych zderzeń powodujących rozdrobnienie ziarna. Ponadto, aby rozdrabnianie zachodziło efektywnie, parametry dozowania wsadu, ale także parametry ruchu tarczy roboczej muszą być ze sobą odpowiednio skorelowane. Wówczas możliwe jest jednoczesne skuteczne przemieszczanie materiału w przestrzeni otworowej z jednoczesnym cięciem. Co ważne, parametry te powinny być tak dobrane, aby dwie realizowane funkcje cięcia i transportu nie oddziaływały na siebie destrukcyjnie. Wyniki badań wskazują także, że intensywność podawania wsadu nie powinna przekraczać wartości natężenia przepływu ziaren przez rozdrabniacz, gdyż może to skutkować obniżeniem wydajności. Dla rozwoju rozdrabniaczy wielotarczowych konieczne są dalsze badania nad przepływem materiału pomiędzy tarczami z uwzględnieniem jednoczesnego cięcia, powodującego zmniejszenie cząstek w komorze rozdrabniacza. Należy dokonać opisu zmian zachodzących w ilości kontaktów i energii zderzeń pomiędzy materiałem rozdrabnianym a elementami rozdrabniającymi,

z uwzględnieniem wpływu wypełnienia otworów w zależności od intensywności dozowania wsadu i prędkości kątowych tarcz, co pozwoliłoby na bardziej precyzyjne modelowanie poboru mocy, wydajności i stopnia rozdrobnienia.

Jako element niezbędny rozwoju konstrukcji rozdrabniaczy biomasy zgodnie z zasadą autoregulacji i hierarchicznej struktury w modelu INTEGRONU wskazano integrację modułów (podsystemów) sterowniczego, logistycznego i zasilającego. Integracja powyższych modułów jest konieczna do stworzenia systemowych podstaw inteligentnego monitorowania i sterowania maszynowymi procesami rozdrabniania. W ramach tego postępowania opracowano aplikacyjny, inteligentny system monitorowania i sterowania, wykorzystujący algorytmy genetyczne do poszukiwania optymalnych nastaw procesowych rozdrabniacza, oparty na autorskich wskaźnikach oceny energetyczno-środowiskowej rozdrabniania. Przeprowadzone eksperymenty dowodzą skuteczności przyjętego algorytmu w zakresie doboru nastaw parametrów procesowych młyna, prowadzących do zmniejszenia energochłonności procesu i jego emisyjności. Zaproponowany system stanowi cenne narzędzie do przemysłowej aplikacji w zakładach przetwórstwa biomasy (lub innych materiałów) na cele energetyczne. Szczególne znaczenie może mieć w zakładach, gdzie nie można zapewnić stabilnych parametrów surowcowych (zmienna wilgotność, skład chemiczny i rodzaj wsadu), wówczas system sterowania wspomagany algorytmami genetycznymi mógłby na bieżąco analizować wartości wskaźników rozdrabniania i dobierać takie parametry nastaw młyna, aby dążyć do zmniejszania energochłonności i emisyjności procesu przy zachowaniu wysokiej wydajności i pożądanego stopnia przemiału. Samą metodykę oceny energetyczno-środowiskowej można zaaplikować także do innych procesów przemysłowych, odpowiednio modyfikując zależności np. na wydajność, jednostkowe zużycie energii odpowiednio do specyfiki branży czy zastępując stopień rozdrobnienia, korzyści środowiskowe specyficznymi dla danej branży wskaźnikami.

W szerszym kontekście, osiągnięcia niniejszej monografii, w wyniku poprawy i rozwoju procesów i konstrukcji rozdrabniaczy, przyczynią się do eksploatacyjnego zmniejszenia emisji gazów cieplarnianych powstających w wyniku strat energii i nieefektywnie wykorzystanych zasobów oraz realizacji celów zrównoważonego rozwoju, tj. celu 12.2 [330,331]: *Do 2030 roku zapewnić zrównoważone zarządzanie i efektywne zużycie zasobów naturalnych* i celu 9.4 [330,331]: *Do 2030 roku podwyższyć jakość infrastruktury i wprowadzić zrównoważony rozwój przemysłu przez zwiększenie efektywności wykorzystania zasobów oraz stosowanie czystych i przyjaznych dla środowiska technologii i procesów produkcyjnych, przy udziale wszystkich krajów, zgodnie z ich możliwościami*, wytyczonych przez Agendę na Rzecz Zrównoważonego Rozwoju 2030.

LITERATURA

1. Bochat, A.; Zastempowski, M. Impact of the beater shredder design on the granulometric composition of the shredded grain material. *Przemysł Chem.* **2019**, *98*, 1499–1504, doi:10.15199/62.2019.9.35.
2. Jewiarz, M.; Wróbel, M.; Mudryk, K.; Szufa, S. Impact of the Drying Temperature and Grinding Technique on Biomass Grindability. *Energies* **2020**, *13*, 3392, doi:10.3390/en13133392.
3. Otwinowski, H. Energy and Population Balances in Comminution Process Modelling Based on the Informational Entropy. *Powder Technol.* **2006**, *167*, 33–44, doi:10.1016/j.powtec.2006.05.011.
4. Chen, Z.; Wassgren, C.; Ambrose, R.P.K. Measured Damage Resistance of Corn and Wheat Kernels to Compression, Friction, and Repeated Impacts. *Powder Technol.* **2021**, *380*, 638–648, doi:10.1016/j.powtec.2020.11.012.
5. Chen, Z.; Wassgren, C.; Ambrose, K. A Review of Grain Kernel Damage: Mechanisms, Modeling, and Testing Procedures. *Trans. ASABE* **2020**, *63*, 455–475, doi:10.13031/trans.13643.
6. Otwinowski, H.; Zbroński, D.; Urbaniak, D. Experimental Identification of Entropy Model of Comminution Process. *Granul. Matter* **2007**, *9*, 377–386.
7. Pandiselvam, R.; Thirupathi, V.; Mohan, S. Engineering Properties of Rice. *Agric. Eng.* **2015**, *XL*, 69–78.
8. Romański, L.; Stopa, R.; Niemiec, A.; Wiercioch, M. Energy Consumption of Wheat Grain during Static Shearing Process. *Inż. Rol.* **2006**, 153–159.
9. Figiel, A.; Szychaj, R.; Gil, Z.; Bojarczuk, J. Właściwości mechaniczne ziarna polskiej pszenicy twardej. *Inż. Rol.* **2011**, *R. 15, nr 9*, 23–30.
10. Tomporowski, A. Stream of Efficiency of Rice Grains Multi-Disc Grinding. *Eksploat. Niezawodn. - Maint. Reliab.* **2012**, *14*, 150–153.
11. Tomporowski, A.; Flizikowski, J. Motion Characteristics of a Multi-Disc Grinder of Biomass Grain. *Przem. Chem.* **2013**, *92*, 498–503.
12. Kruszelnicka, W.; Hlostá, J.; Diviš, J.; Gierz, Ł. Study of the Relationships between Multi-Hole, Multi-Disc Mill Performance Parameters and Comminution Indicators. *Sustainability* **2021**, *13*, 8260, doi:10.3390/su13158260.
13. Mannheim, V. Empirical and Scale-up Modeling in Stirred Ball Mills. *Chem. Eng. Res. Des.* **2011**, *89*, 405–409, doi:10.1016/j.cherd.2010.08.002.
14. Mannheim, V. Life Cycle Assessment Model of Plastic Products: Comparing Environmental Impacts for Different Scenarios in the Production Stage. *Polymers* **2021**, *13*, 777, doi:10.3390/polym13050777.
15. Bembenek, M. Exploring Efficiencies: Examining the Possibility of Decreasing the Size of the Briquettes Used as the Batch in the Electric Arc Furnace Dust Processing Line. *Sustainability* **2020**, *12*, 6393, doi:10.3390/su12166393.
16. Kasner, R.; Bałdowska-Witos, P. Evaluating the Technology Readiness of a Ribbon-Blade Wind Turbine Using NASA's TRL Method. *Materials* **2021**, *14*, 7709, doi:10.3390/ma14247709.

17. Maj, G.; Szyszlak-Barglowicz, J.; Zajac, G.; Slowik, T.; Krzaczek, P.; Piekarski, W. Energy and Emission Characteristics of Biowaste from the Corn Grain Drying Process. *Energies* **2019**, *12*, 4383, doi:10.3390/en12224383.
18. Kłos, Z. Classification and Measurement of Innovations. *J. Mech. Transp. Eng.* **2016**, *68*, 27–42, doi:10.21008/j.2449-920X.2016.68.4.03.
19. Kłos, Z. O Kształtowaniu Proinnowacyjnych i Projakościowych Postaw. *J. Mech. Transp. Eng.* **2013**, *65*, 53–63.
20. Kruszelnicka, W.; Tomporowski, A.; Flizikowski, J.; Kasner, R.; Cyganiuk, J. Basis of Biomass Grinders Sustainable Designing. *Syst. Saf. Hum. - Tech. Facil. - Environ.* **2019**, *1*, 542–549, doi:10.2478/czoto-2019-0069.
21. Flizikowski, J.; Kamyk, W. Efektywność energetyczna specjalnego systemu rozdrabniania. *Teka Kom Bud Ekspl Masz Elektrotech. Bud* **2008**, 17–22.
22. 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, doi:10.1016/S0032-5910(05)80006-3.
23. Sabah, E.; Ozdemir, O.; Koltka, S. Effect of Ball Mill Grinding Parameters of Hydrated Lime Fine Grinding on Consumed Energy. *Adv. Powder Technol.* **2013**, *24*, 647–652, doi:10.1016/j.appt.2012.12.001.
24. Fang, C.; Campbell, G.M. On Predicting Roller Milling Performance IV: Effect of Roll Disposition on the Particle Size Distribution from First Break Milling of Wheat. *J. Cereal Sci.* **2003**, *37*, 21–29, doi:10.1006/jcrs.2002.0475.
25. Voicu, G.; Biris, S.-S.; Stefan, E.-M.; Constantin, G.-A.; Ungureanu, N. Grinding Characteristics of Wheat in Industrial Mills. *Food Ind.* **2013**, doi:10.5772/53160.
26. Eisenlauer, M.; Teipel, U. Comminution Energy and Particulate Properties of Cutting and Hammer-Milled Beech, Oak, and Spruce Wood. *Powder Technol.* **2021**, *394*, 685–704, doi:10.1016/j.powtec.2021.03.072.
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, doi:10.1080/02726351.2013.772546.
28. Klichowicz, M.; Reichert, M.; Lieberwirth, H.; Mütze, T. *Self-Similarity and Energy-Size Relationship of Coarse Particles Comminuted in Single Particle Mode*; 2014;
29. Jiang, J.; Wang, J.; Zhang, X.; Wolcott, M. Characterization of Micronized Wood and Energy-Size Relationship in Wood Comminution. *Fuel Process. Technol.* **2017**, *161*, 76–84, doi:10.1016/j.fuproc.2017.03.015.
30. Moiceanu, G.; Paraschiv, G.; Voicu, G.; Dinca, M.; Negoita, O.; Chitoiu, M.; Tudor, P. Energy Consumption at Size Reduction of Lignocellulose Biomass for Bioenergy. *Sustain. Switz.* **2019**, *11*, doi:10.3390/su11092477.
31. Kruszelnicka, W.; Kasner, R.; Baldowska-Witos, P.; Flizikowski, J.; Tomporowski, A. The Integrated Energy Consumption Index for Energy Biomass Grinding Technology Assessment. *Energies* **2020**, *13*, 1417, doi:10.3390/en13061417.

32. Bitra, V.S.P.; Alvin, R.; Chevanan, N.; Sokhansanj, S. Comminution Properties of Biomass in Hammer Mill and Its Particle Size Characterization. In Proceedings of the American Society of Agricultural and Biological Engineers Annual International Meeting 2008, ASABE 2008; 2008; Vol. 3, pp. 1779–1800.
33. Bayram, M.; Öner, M.D. Bulgur Milling Using Roller, Double Disc and Vertical Disc Mills. *J. Food Eng.* **2007**, *79*, 181–187, doi:10.1016/j.jfoodeng.2006.01.042.
34. Flizikowski, J.; Sadkiewicz, J.; Tomporowski, A. Functional Characteristics of a Six-Roller Mill for Grainy or Particle Materials Used in Chemical and Food Industries. *Przem. Chem.* **2015**, *94*, 69–75, doi:10.15199/62.2015.1.9.
35. Campbell, G.M.; Sharp, C.; Wall, K.; Mateos-Salvador, F.; Gubatz, S.; Huttly, A.; Shewry, P. Modelling Wheat Breakage during Roller Milling Using the Double Normalised Kumaraswamy Breakage Function: Effects of Kernel Shape and Hardness. *J. Cereal Sci.* **2012**, *55*, 415–425, doi:10.1016/j.jcs.2012.02.002.
36. Patwa, A.; Ambrose, R.P.K.; Casada, Mark.E. Discrete Element Method as an Approach to Model the Wheat Milling Process. *Powder Technol.* **2016**, *302*, 350–356, doi:10.1016/j.powtec.2016.08.052.
37. Kruszelnicka, W.; Opielak, M.; Ambrose, K.; Pukalskas, S.; Tomporowski, A.; Walichnowska, P. Energy-Dependent Particle Size Distribution Models for Multi-Disc Mill. *Materials* **2022**, *15*, 6067, doi:10.3390/ma15176067.
38. Tomporowski, A. *Studium efektywności napędu i rozwiązań innowacyjnych konstrukcji wielotarczowych rozdrabniaczy ziaren biomasy*; Lubelskie Towarzystwo Naukowe: Lublin, 2011.
39. Macko, M. *Wpływ cech konstrukcyjnych zespołu wielotarczowego na charakterystyki użytkowe procesu rozdrabniania rurowych recyklatów tworzyw sztucznych. Rozprawa doktorska*; Akademia Techniczno-Rolnicza w Bydgoszczy: Bydgoszcz, 2000.
40. Flizikowski, J.; Bielinski, K. *Technology and Energy Sources Monitoring: Control, Efficiency, and Optimization*; IGI Global: USA, 2012; ISBN 978-1-4666-2664-5.
41. 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.
42. Gil, M.; Luciano, E.; Arauzo, I. Approach to the Breakage Behavior of Comminuted Poplar and Corn Stover under Single Impact. *Fuel Process. Technol.* **2015**, *131*, 142–149, doi:10.1016/j.fuproc.2014.11.020.
43. Patrino, L.E.; Dorao, C.A.; Svendsen, H.F.; Jakobsen, H.A. Analysis of Breakage Kernels for Population Balance Modelling. *Chem. Eng. Sci.* **2009**, *64*, 501–508, doi:10.1016/j.ces.2008.09.029.
44. Cavalcanti, P.P.; Tavares, L.M. Statistical Analysis of Fracture Characteristics of Industrial Iron Ore Pellets. *Powder Technol.* **2018**, *325*, 659–668, doi:10.1016/j.powtec.2017.11.062.

45. Tavares, L.M.; Cavalcanti, P.P.; de Carvalho, R.M.; da Silveira, M.W.; Bianchi, M.; Otaviano, M. Fracture Probability and Fragment Size Distribution of Fired Iron Ore Pellets by Impact. *Powder Technol.* **2018**, *336*, 546–554, doi:10.1016/j.powtec.2018.06.036.
46. Kruszelnicka, W. Study of Selected Physical-Mechanical Properties of Corn Grains Important from the Point of View of Mechanical Processing Systems Designing. *Materials* **2021**, *14*, 1467, doi:10.3390/ma14061467.
47. Chen, Z.; Wassgren, C.; Ambrose, R.P.K. Development and Validation of a DEM Model for Predicting Impact Damage of Maize Kernels. *Biosyst. Eng.* **2022**, *224*, 16–33, doi:10.1016/j.biosystemseng.2022.09.012.
48. Han, Y.; Zhao, D.; Chu, Y.; Zhen, J.; Li, G.; Zhao, H.; Jia, F. Breakage Behaviour of Single Rice Particles under Compression and Impact. *Adv. Powder Technol.* **2021**, *32*, 4635–4650, doi:10.1016/j.appt.2021.10.017.
49. Han, Y.; Li, G.; Jia, F.; Meng, X.; Chu, Y.; Chen, P.; Bai, S.; Zhao, H. Analysis of Breakage Behavior of Rice under Impact. *Powder Technol.* **2021**, *394*, 533–546, doi:10.1016/j.powtec.2021.08.084.
50. Zeng, Y.; Mao, B.; Jia, F.; Han, Y.; Li, G. Modelling of Grain Breakage of in a Vertical Rice Mill Based on DEM Simulation Combining Particle Replacement Model. *Biosyst. Eng.* **2022**, *215*, 32–48, doi:10.1016/j.biosystemseng.2021.12.022.
51. Zeng, Y.; Jia, F.; Xiao, Y.; Han, Y.; Meng, X. Discrete Element Method Modelling of Impact Breakage of Ellipsoidal Agglomerate. *Powder Technol.* **2019**, *346*, 57–69, doi:10.1016/j.powtec.2019.01.082.
52. Eisenlauer, M.; Teipel, U. Comminution of Wood – Influence of Process Parameters. *Chem. Eng. Technol.* **2020**, *43*, 838–847, doi:10.1002/ceat.201900488.
53. 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.
54. Flizikowski, J. Integron – model konstrukcji rozdrabniacza. *Inż. Rol.* **2005**, *R. 9, nr 9*.
55. Flizikowski, J. *Rozprawa o konstrukcji*; ATR Bydgoszcz, Instytut Technologii Eksploatacji w Radomiu: Radom, 2002; ISBN 978-83-7204-280-4.
56. Flizikowski, J.B.; Al-Zubiedy, A.A.M. Design Model of Corn Granulation and Grinding Process. *Acta Agrophysica* *4*, 645–659.
57. Tomporowski, A. *Rozdrabnianie alternatywnych nośników energii*; Wydawnictwa Uczelniane Uniwersytetu Technologiczno-Przyrodniczego w Bydgoszczy: Bydgoszcz, 2018.
58. 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.
59. Kruszelnicka, W. Inteligentne monitorowanie jako skuteczna metoda podwyższenia efektywności i jakości procesu rozdrabniania. *Przem. Chem.* **2021**, *1*, 112–117, doi:10.15199/62.2021.5.12.

60. Kruszelnicka, W. Monitoring and Analysis of the Multi-Disc Comminution Characteristics. *J. Phys. Conf. Ser.* **2022**, 2212, 012027, doi:10.1088/1742-6596/2212/1/012027.
61. Kruszelnicka, W.; Kasner, R. Intelligent Control and Monitoring of Biomass Comminution Process with the Use of Genetic Algorithms. In *Advanced Energy Technologies and Systems I*; Zaporozhets, A., Ed.; Studies in Systems, Decision and Control; Springer International Publishing: Cham, 2022; pp. 45–69 ISBN 978-3-030-85746-2.
62. Elżanowski, A. *Struktura i Historia Według François Jacoba. Ewolucja Biologiczna*; Ossolineum PAN, 1974;
63. Arce, C.; Kratky, L. Mechanical Pretreatment of Lignocellulosic Biomass toward Enzymatic/Fermentative Valorization. *iScience* **2022**, 25, doi:10.1016/j.isci.2022.104610.
64. Jeswiet, J.; Szekeres, A. Energy Consumption in Mining Comminution. *Procedia CIRP* **2016**, 48, 140–145, doi:10.1016/j.procir.2016.03.250.
65. Wójcicki, T. Inteligentne monitorowanie i adaptacyjne wspomaganie eksploatacji maszyn elektrycznych. *Masz. Elektr. Zesz. Probl.* **2014**, Nr 3(103).
66. Flizikowski, J.; Kruszelnicka, W.; Macko, M. The Development of Efficient Contaminated Polymer Materials Shredding in Recycling Processes. *Polymers* **2021**, 13, 713, doi:10.3390/polym13050713.
67. Młyńczak, M. *Metodyka badań eksploatacyjnych obiektów mechanicznych*; Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej: Wrocław, 2012; ISBN 978-83-7493-683-5.
68. Żółtowski, B.; Landowski, B.; Przybyliński, B. *Projektowanie eksploatacji maszyn*; Instytut Technologii Eksploatacji-PIBw Radomiu: Radom, 2012.
69. Davies, T.; Phillips, C.; Warburton, J. 7.15 Processes, Transport, Deposition, and Landforms: Flow. In *Treatise on Geomorphology*; Shroder, J.F., Ed.; Academic Press: San Diego, 2013; pp. 158–170 ISBN 978-0-08-088522-3.
70. Ozkahraman, H.T. Breakage Mechanisms and an Encouraging Correlation between the Bond Parameters and the Friability Value. *J. South. Afr. Inst. Min. Metall.* **2010**, 110, 153–159.
71. Manouchehri, H.R.; Christiffersson, A.; Nillson-Wulf, T. Energy Efficiency in Comminution - Getting More from the Crushing Stage. *IMPC 2016 XXVIII Int. Miner. Process. Congr. Proc.* **2016**, 1–12.
72. Anderson, T.L. *Fracture Mechanics: Fundamentals and Applications*; 4th ed.; CRC Press: Boca Raton, 2017; ISBN 978-1-315-37029-3.
73. Semsari Parapari, P. Effects of Loading Mechanisms and Texture on Ore Breakage – A Multidimensional Study. **2020**.
74. Hamdi, P.; Stead, D.; Elmo, D. Characterizing the Influence of Stress-Induced Microcracks on the Laboratory Strength and Fracture Development in Brittle Rocks Using a Finite-Discrete Element Method-Micro Discrete Fracture Network FDEM-MDFN Approach. *J. Rock Mech. Geotech. Eng.* **2015**, 7, 609–625, doi:10.1016/j.jrmge.2015.07.005.

75. Wang, B.; Wang, J. Mechanical Properties of Maize Kernel Horny Endosperm, Floury Endosperm and Germ. *Int. J. Food Prop.* **2019**, *22*, 863–877, doi:10.1080/10942912.2019.1614050.
76. Siebenmorgen, T.J.; Qin, G.; Jia, C. Influence of drying on rice fissure formation rates and mechanical strength distributions. *Trans. ASAE* **2005**, *48*, 1835–1841, doi:10.13031/2013.19981.
77. Buggenhout, J.; Brijs, K.; Celus, I.; Delcour, J.A. The Breakage Susceptibility of Raw and Parboiled Rice: A Review. *J. Food Eng.* **2013**, *117*, 304–315, doi:10.1016/j.jfoodeng.2013.03.009.
78. Paulsen, M.R.; Singh, M.; Singh, V. Chapter 7 - Measurement and Maintenance of Corn Quality. In *Corn (Third Edition)*; Serna-Saldivar, S.O., Ed.; AACC International Press: Oxford, 2019; pp. 165–211 ISBN 978-0-12-811971-6.
79. Sharma, A.D.; Kunze, O.R.; Sarker, N.N. Impact Damage on Rough Rice. *Trans. ASAE* **1992**, *35*, 1929–1934.
80. Dong, P.; Xie, R.; Wang, K.; Ming, B.; Hou, P.; Hou, J.; Xue, J.; Li, C.; Li, S. Kernel Crack Characteristics for X-Ray Computed Microtomography (MCT) and Their Relationship with the Breakage Rate of Maize Varieties. *J. Integr. Agric.* **2020**, *19*, 2680–2689, doi:10.1016/S2095-3119(20)63230-0.
81. Fan, Y.; Yang, L.; Yin, C.; Song, S.; Wang, D.; Zhang, Y.; Liu, X. Tribological Properties and Damage Behavior of Brown Rice Based on Milling Process. *Tribol. Int.* **2022**, *167*, 107353, doi:10.1016/j.triboint.2021.107353.
82. 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.
83. Gunasekaran, S.; Paulsen, M.R. Breakage resistance of corn as a function of drying rates. *Trans. - Am. Soc. Agric. Eng. Gen. Ed.* **1985**, *28*, 2071–2076.
84. Li, D.; Wang, L.-J.; Wang, D.-C.; Dong Chen, X.; Mao, Z.-H. Microstructure Analysis of Rice Kernel. *Int. J. Food Prop.* **2007**, *10*, 85–91, doi:10.1080/10942910600754683.
85. Chandra, H. Mechanical Fracture Characterization of Rice Kernel under Milling Process. *J. Phys. Conf. Ser.* **2019**, *1198*, 042011, doi:10.1088/1742-6596/1198/4/042011.
86. Hwang, S.-S.; Cheng, Y.-C.; Chang, C.; Lur, H.-S.; Lin, T.-T. Magnetic Resonance Imaging and Analyses of Tempering Processes in Rice Kernels. *J. Cereal Sci.* **2009**, *50*, 36–42, doi:10.1016/j.jcs.2008.10.012.
87. Jurga, R. *Przetwórstwo zbóż*; Wydawnictwa Szkolne i Pedagogiczne, 1994; ISBN 978-83-02-05448-8.
88. Counce, P.A.; Moldenhauer, K.A.K. Morphology of Rice Seed Development and Its Influence on Grain Quality. In *Rice Grain Quality: Methods and Protocols*; Sreenivasulu, N., Ed.; Methods in Molecular Biology; Springer: New York, NY, 2019; pp. 57–74 ISBN 978-1-4939-8914-0.

89. Szymanek, M.; Niedziółka, I.; Dobrzański, B. *Właściwości fizyczne ziarna kukurydzy cukrowej w aspekcie jego mechanicznego odcinania*; Instytut Agrofizyki im. Bohdana Dobrzańskiego PAN w Lublinie: Lublin, 2004.
90. Frączek, J.; Kaczorowski, J.; Ślipek, Z.; Horabik, J.; Molenda, M. *Standaryzacja Metod pomiaru właściwości fizyczno-mechanicznych roślinnych materiałów ziarnistych*; Instytut Agrofizyki im. Bohdana Dobrzańskiego PAN w Lublinie: Lublin, 2003.
91. American Society of Agricultural and Biological Engineers ASAE S368.4 DEC2000 (R2008): Compression Test of Food Materials of Convex Shape 2008.
92. Zhang, H. The Basic Properties of Building Materials. In: *Building Materials in Civil Engineering*; Zhang, H., Ed.; Woodhead Publishing Series in Civil and Structural Engineering; Woodhead Publishing, 2011; pp. 7–423 ISBN 978-1-84569-955-0.
93. Saiedirad, M.H.; Tabatabaefar, A.; Borghei, A.; Mirsalehi, M.; Badii, F.; Varnamkhasi, M.G. Effects of Moisture Content, Seed Size, Loading Rate and Seed Orientation on Force and Energy Required for Fracturing Cumin Seed (*Cuminum Cyminum* Linn.) under Quasi-Static Loading. *J. Food Eng.* **2008**, *86*, 565–572, doi:10.1016/j.jfoodeng.2007.11.021.
94. Zareiforush, H.; Komarizadeh, M.H.; Alizadeh, M.R.; Tavakoli, H.; Masoumi, M. Effects of Moisture Content, Loading Rate, and Grain Orientation on Fracture Resistance of Paddy (*Oryza Sativa* L.) Grain. *Int. J. Food Prop.* **2012**, *15*, 89–98, doi:10.1080/10942911003754643.
95. Chandio, F.A.; Li, Y.; Ma, Z.; Ahmad, F.; Syed, T.N.; Shaikh, S.A.; Tunio, M.H. Influences of Moisture Content and Compressive Loading Speed on the Mechanical Properties of Maize Grain Orientations. *Int. J. Agric. Biol. Eng.* **2021**, *14*, 41–49, doi:10.25165/ijabe.v14i5.6072.
96. Frączek, J.; Reguła, T. Metoda oceny podatności ziarna pszenicy orkiszowej na uszkodzenia mechaniczne w czasie omlotu. *Inż. Rol.* **2010**, *R. 14*, nr 4, 51–58.
97. Su, Y.; Cui, T.; Zhang, D.; Xia, G.; Gao, X.; He, X.; Xu, Y. Effects of Shape Feature on Compression Characteristics and Crack Rules of Maize Kernel. *J. Food Process. Preserv.* **2020**, *44*, e14307, doi:10.1111/jfpp.14307.
98. Kruszelnicka, W.; Marczuk, A.; Kasner, R.; Bałdowska-Witos, P.; Piotrowska, K.; Flizikowski, J.; Tomporowski, A. Mechanical and Processing Properties of Rice Grains. *Sustainability* **2020**, *12*, 552, doi:10.3390/su12020552.
99. Warechowska, M. Some Physical Properties of Cereal Grain and Energy Consumption of Grinding. *Agric. Eng.* **2014**, 239–249, doi:10.14654/ir.2014.149.025.
100. Dziki, D.; Cacak-Pietrzak, G.; Miś, A.; Jończyk, K.; Gawlik-Dziki, U. Influence of Wheat Kernel Physical Properties on the Pulverizing Process. *J. Food Sci. Technol.* **2014**, *51*, 2648–2655, doi:10.1007/s13197-012-0807-8.
101. Werechowska, M. Some Physical Properties of Cereal Grain and Energy Consumption of Grinding. *Agric. Eng.* **2014**, 239–249, doi:10.14654/ir.2014.149.025.

102. Zeng, Y.; Jia, F.; Xiao, Y.; Han, Y.; Meng, X. Discrete Element Method Modelling of Impact Breakage of Ellipsoidal Agglomerate. *Powder Technol.* **2019**, *346*, 57–69, doi:10.1016/j.powtec.2019.01.082.
103. Sadeghi, M.; Araghi, H.A.; Hemmat, A. Physico-Mechanical Properties of Rough Rice (*Oryza sativa* L.) Grain as Affected by Variety and Moisture Content. *Agric. Eng. Int. CIGR J.* **2010**, *12*, 129–136.
104. Cao, W.; Nishiyama, Y.; Koide, S. Physicochemical, Mechanical and Thermal Properties of Brown Rice Grain with Various Moisture Contents. *Int. J. Food Sci. Technol.* **2004**, *39*, 899–906, doi:10.1111/j.1365-2621.2004.00849.x.
105. Greffeuille, V.; Abecassis, J.; Barouh, N.; Villeneuve, P.; Mabilie, F.; Bar L'Helgouac'h, C.; Lullien-Pellerin, V. Analysis of the Milling Reduction of Bread Wheat Farina: Physical and Biochemical Characterisation. *J. Cereal Sci.* **2007**, *45*, 97–105, doi:10.1016/j.jcs.2006.07.003.
106. Greffeuille, V.; Mabilie, F.; Rousset, M.; Oury, F.-X.; Abecassis, J.; Lullien-Pellerin, V. Mechanical Properties of Outer Layers from Near-Iso-genic Lines of Common Wheat Differing in Hardness. *J. Cereal Sci.* **2007**, *45*, 227–235, doi:10.1016/j.jcs.2006.09.002.
107. Tavakoli, H.; Mohtasebi, S.S.; Rajabipour, A.; Tavakoli, M. Effects of Moisture Content, Loading Rate, and Grain Orientation on Fracture Resistance of Barley Grain. *Res. Agric. Eng.* **2009**, *55*, 85–93, doi:10.17221/6/2009-RAE.
108. Ponce-García, N.; Ramírez-Wong, B.; Torres-Chávez, P.I.; de Dios Figueroa-Cárdenas, J.; Serna-Saldívar, S.O.; Cortez-Rocha, M.O. Effect of Moisture Content on the Viscoelastic Properties of Individual Wheat Kernels Evaluated by the Uniaxial Compression Test Under Small Strain. *Cereal Chem. J.* **2013**, *90*, 558–563, doi:10.1094/CCHEM-12-12-0166-R.
109. Hebda, T.; Frączek, J. Effect of Selected Factors on Seed Elasticity Index. *Inżynieria Rol.* **2005**, *71*, 171–180.
110. Zdunek, A.; Gancarz, M.; Cybulska, J.; Ranachowski, Z.; Zgórska, K. Turgor and Temperature Effect on Fracture Properties of Potato Tuber (*Solanum Tuberosum* Cv. Irga)*. *Int. Agrophysics* **2008**, *22*, 89–97.
111. Dziki, D.; Laskowski, J. Influence of Wheat Kernel Geometrical Properties on the Mechanical Properties and Grinding Ability. *Acta Agrophysica* **2003**, *2*, 735–742.
112. Politiek, R.G.A.; Bruins, M.E.; Keppler, J.K.; Schutyser, M.A.I. Effect of Oil Content on Pin-Milling of Soybean. *J. Food Eng.* **2022**, *334*, 111149, doi:10.1016/j.jfoodeng.2022.111149.
113. Qiao, M.; Xia, G.; Cui, T.; Xu, Y.; Gao, X.; Su, Y.; Li, Y.; Fan, H. Effect of Moisture, Protein, Starch, Soluble Sugar Contents and Microstructure on Mechanical Properties of Maize Kernels. *Food Chem.* **2022**, *379*, 132147, doi:10.1016/j.foodchem.2022.132147.

114. Oppong Siaw, M.; Wang, Y.-J.; McClung, A.M.; Mauromoustakos, A. Porosity and Hardness of Long-Grain Brown Rice Kernels in Relation to Their Chemical Compositions. *LWT* **2021**, *144*, 111243, doi:10.1016/j.lwt.2021.111243.
115. Hou, J.; Zhang, Y.; Jin, X.; Dong, P.; Guo, Y.; Wang, K.; Fan, Y.; Li, S. Structural Parameters for X-Ray Micro-Computed Tomography (MCT) and Their Relationship with the Breakage Rate of Maize Varieties. *Plant Methods* **2019**, *15*, 161, doi:10.1186/s13007-019-0538-1.
116. Chu, Y.; Han, Y.; Jia, F.; Wang, Y.; Chen, P.; Meng, X.; Zhang, J.; Li, A. Analysis of the Impact Hulling Behaviour of Paddy Grains. *Biosyst. Eng.* **2022**, *220*, 243–257, doi:10.1016/j.biosystemseng.2022.06.005.
117. Salman, A.D.; Ghadiri, M.; Hounslow, M. *Particle Breakage*; Elsevier: Amsterdam, Oxford, 2007; ISBN 978-0-08-055346-7.
118. Tavares, L.M. Optimum Routes for Particle Breakage by Impact. *Powder Technol.* **2004**, *142*, 81–91, doi:10.1016/j.powtec.2004.03.014.
119. Weibull, W. *A Statistical Theory of the Strength of Materials*; Generalstabens litografiska anstalts förlag, 1939.
120. George, K.P. Statistical theory of size effect on material strength - a review. In *Fracture 84*; Valluri, S.R., Taplin, D.M.R., Rao, P.R., Knott, J.F., Dubey, R., Eds.; Pergamon, 1984; pp. 3549–3556 ISBN 978-1-4832-8440-8.
121. Tavares, L.M. Analysis of Particle Fracture by Repeated Stressing as Damage Accumulation. *Powder Technol.* **2009**, *190*, 327–339.
122. Zok, F.W. On Weakest Link Theory and Weibull Statistics. *J. Am. Ceram. Soc.* **2017**, *100*, 1265–1268, doi:10.1111/jace.14665.
123. Kuźniar, P.; Jarecki, W.; Bobrecka-Jamro, D. Właściwości mechaniczne nasion wybranych roślin strączkowych a ich masa i grubość. *Inż. Rol.* **2013**, *R. 17, nr 4, t. 1*.
124. Han, Y.; Zhao, D.; Chu, Y.; Zhen, J.; Li, G.; Zhao, H.; Jia, F. Breakage Behaviour of Single Rice Particles under Compression and Impact. *Adv. Powder Technol.* **2021**, *32*, 4635–4650, doi:10.1016/j.appt.2021.10.017.
125. LeFord, D.R.; Russell, W.A. Evaluation of Physical Grain Quality in the BS17 and BSI (HS)CI Synthetics of Maize1. *Crop Sci.* **1985**, *25*, doi:10.2135/cropsci1985.0011183X002500030010x.
126. Kruszelnicka, W.; Chen, Z.; Ambrose, K. Moisture-Dependent Physical-Mechanical Properties of Maize, Rice, and Soybeans as Related to Handling and Processing. *Materials* **2022**, *15*, 8729, doi:10.3390/ma15248729.
127. Witczak, T. Temperatura przejścia szklistego i krytyczne parametry przechowywania skrobi ziemniaczanej i jej pochodnych. Polskie Towarzystwo Technologów Żywności Wydawnictwo Naukowe. *ŻYWNOSĆ Nauka Technol. Jakość* **2017**, *24*, 51–66.
128. Qiao, M.; Xu, Y.; Xia, G.; Su, Y.; Lu, B.; Gao, X.; Fan, H. Determination of Hardness for Maize Kernels Based on Hyperspectral Imaging. *Food Chem.* **2022**, *366*, 130559, doi:10.1016/j.foodchem.2021.130559.

129. Kaliniewicz, Z.; Markowska-Mendik, A.; Warechowska, M. An Analysis of the Correlations between the Hardness Index and Selected Physicochemical Properties of Wheat Grain. *J. Cereal Sci.* **2023**, 103643, doi:10.1016/j.jcs.2023.103643.
130. Sfayhi-Terras, D.; Hadjyahia, N.; Zarroug, Y. Effect of Soaking Time and Temperature on Water Absorption Capacity and Dimensional Changes of Bulgur. *Cereal Chem.* **2021**, 98, 851–857, doi:10.1002/cche.10427.
131. Babic, L.J.; Radojcin, M.; Pavkov, I.; Babic, M.; Turan, J.; Zoranovic, M.; Stanisic, S. Physical Properties and Compression Loading Behaviour of Corn Seed. *Int. Agrophysics* **2013**, 27, 119–126.
132. Davydov, S.Ya.; Valiev, N.G.; Tauger, V.M. Effect of the Flow of Transported Bulk Material on Design Features of a Belt Conveyor. *Refract. Ind. Ceram.* **2019**, 60, 10–13, doi:10.1007/s11148-019-00301-5.
133. Barletta, D.; Berry, R.J.; Larsson, S.H.; Lestander, T.A.; Poletto, M.; Ramírez-Gómez, Á. Assessment on Bulk Solids Best Practice Techniques for Flow Characterization and Storage/Handling Equipment Design for Biomass Materials of Different Classes. *Fuel Process. Technol.* **2015**, 138, 540–554, doi:10.1016/j.fuproc.2015.06.034.
134. Salman *Breakage Probability of Repeated Stressing of Granules by Configuring the Stressing Points*; University of Magdeburg, 2014;
135. Dobrzański, B. *The Cracking Mechanisms of the Legume Seeds*; Instytut Agrofizyki im. Bohdana Dobrzańskiego PAN w Lublinie: Lublin, 1998;
136. Mancera-Rico, A.; Garcia-de-los-Santos, G.; Zavaleta Mancera, H.A.; Carrillo-Salazar, J.A.; Gonzalez-Estrada, E.; Villasenor-Perea, C.A. Moisture and Rupture Models for Corn (*Zea Mays*) Seeds of Different Endosperm Types. *Trans. ASABE* **2019**, 62, 913–918.
137. Stefan, E.-M.; Voicu, G.; Constantin, G.; Munteanu, M.G.; Ionescu, M. *Effects of Wheat Seeds Characteristics on Roller Milling Process – a Review. In Proceedings of the 7th International Conference on Thermal Equipment, Renewable Energy and Rural Development*; Editura Politehnica Press: Romania, 2018; pp. 361–366.
138. Braun, M.; Dunmire, K.; Evans, C.; Stark, C.; Woodworth, J.; Paulk, C. Effects of Grinding Corn with Different Moisture Content on Subsequent Particle Size and Flowability. *Processes* **2021**, 9, 1372, doi:10.3390/pr9081372.
139. Jung, H.; Lee, Y.J.; Yoon, W.B. Effect of Moisture Content on the Grinding Process and Powder Properties in Food: A Review. *Processes* **2018**, 6, 69, doi:10.3390/pr6060069.
140. Saeidi, F.; Yahyaei, M.; Powell, M.; Tavares, L.M. Investigating the Effect of Applied Strain Rate in a Single Breakage Event. *Miner. Eng.* **2017**, 100, 211–222, doi:10.1016/j.mineng.2016.09.010.
141. Han, J.; Fitzpatrick, J.; Cronin, K.; Miao, S. Dairy Powder Breakage: Mechanisms, Characterization Methods, Impacted Properties and Influencing Factors. *Trends Food Sci. Technol.* **2021**, 114, 608–624, doi:10.1016/j.tifs.2021.05.043.

142. Anticoi, H.; Guasch, E.; Hamid, S.A.; Oliva, J.; Alfonso, P.; Garcia-Valles, M.; Bascompta, M.; Sanmiquel, L.; Escobet, T.; Argelaguet, R.; et al. Breakage Function for HPGR: Mineral and Mechanical Characterization of Tantalum and Tungsten Ores. *Minerals* **2018**, *8*, 170, doi:10.3390/min8040170.
143. Francioli, D.M. *Effect of operational variables on ball milling*. Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2015.
144. Salman; Aman, S.; Tomas, J. Breakage Probability of Granules by Repeated Stressing. *Chem. Ing. Tech.* **2012**, *84*, 1594–1598, doi:https://doi.org/10.1002/cite.201100219.
145. Salman; Aman, S.; Tomas, J. Breakage Probability of Stressed Granules Using a Degradation Model. *Chem. Eng. Technol.* **2014**, *37*, 1949–1958, doi:10.1002/ceat.201400230.
146. Aman, S.; Tomas, J.; Müller, P.; Kalman, H.; Rozenblat, Y. The Investigation of Breakage Probability of Irregularly Shaped Particles by Impact Tests. *KONA Powder Part. J.* **2011**, *29*, 224–235, doi:10.14356/kona.2011023.
147. Tavares, L.M. Chapter 1 Breakage of Single Particles: Quasi-Static. In *Handbook of Powder Technology*; Salman, A.D., Ghadiri, M., Hounslow, M.J., Eds.; Particle Breakage; Elsevier Science B.V., 2007; Vol. 12, pp. 3–68.
148. Tavares, L.M.; King, R.P. Modeling of Particle Fracture by Repeated Impacts Using Continuum Damage Mechanics. *Powder Technol.* **2002**, *123*, 138–146, doi:10.1016/S0032-5910(01)00438-7.
149. Salman; Russell, A.; Aman, S.; Tomas, J. Breakage Probability of Granules during Repeated Loading. *Powder Technol.* **2015**, *269*, 541–547, doi:10.1016/j.powtec.2014.09.044.
150. Shelef, L.; Mohsenin, N.N. Effect of Moisture Content on Mechanical Properties of Shelled Corn. *Cereal Chem.* **1969**, *46*, 242–252.
151. Ren, H.; Tang, Z.; Li, X.; Li, Y.; Liu, X.; Zhang, B.; Li, Y. Method for Measuring Rice Grain Internal Damage Degree Undergoing Threshing Force. *Int. J. Agric. Biol. Eng.* **2021**, *14*, 63–73, doi:10.25165/j.ijabe.20211401.5750.
152. Romański, L.; Stopa, R.; Niemiec, A.; Wiercioch, M. Wpływ Wilgotności i Temperatury Ziarniaków Pszenicy Na Energochłonność Zgniatania. *Inż. Rol.* **2006**, 147–152.
153. Aradwad, P.P.; T v, A.K.; Sahoo, P.K.; Mani, I. Key Issues and Challenges in Spice Grinding. *Clean. Eng. Technol.* **2021**, *5*, 100347, doi:10.1016/j.clet.2021.100347.
154. Romański, L.; Stopa, R. Energy Consumption of Wheat Grain during Shearing Dynamic Process. *ACTA Tech. Agrar.* **2003**, *2*, 33–41.
155. Kruszelnicka, W. *Energetyczno-środowiskowe problemy rozdrabniania biomateriałów*; Wydawnictwa Uczelniane Uniwersytetu Technologiczno-Przyrodniczego w Bydgoszczy: Bydgoszcz, 2020.

156. Schwartzman, M. *The Fatigue Function for Population Balance Model*; Ben-Gurion University of the Negev: Beer-Szew, Izrael, 2008.
157. Eksi, D.; Hakan Benzer, A.; Sargin, A.; Genc, O. A New Method for Determination of Fine Particle Breakage. *Miner. Eng.* **2011**, *24*, 216–220, doi:10.1016/j.mineng.2010.08.006.
158. Molland, A.F.; Turnock, S.R. Chapter 6 - Rudder Experimental Data. In *Marine Rudders, Hydrofoils and Control Surfaces (Second Edition)*; Molland, A.F., Turnock, S.R., Eds.; Butterworth-Heinemann: Oxford, 2022; pp. 105–296 ISBN 978-0-12-824378-7.
159. Gomes-Junior, F.G.; Cicero, S.M.; Vaz, C.M.P.; Lasso, P.R.O. X-Ray Microtomography in Comparison to Radiographic Analysis of Mechanically Damaged Maize Seeds and Its Effect on Seed Germination. *Acta Sci. Agron.* **2019**, *41*, e42608, doi:10.4025/actasciagron.v41i1.42608.
160. Shi, H.; Siebenmorgen, T.; Luo, H.; Odek, Z. Fissure Detection and Measurement in Rough Rice Using X-Ray Imaging. *Trans. ASABE* **2019**, *62*, 859–866, doi:10.13031/trans.13043.
161. Odek, Z.R. Application of X-Ray Imaging as a Technique for Fissure Detection in Rough Rice Kernels. *Grad. Theses Diss.* <https://scholarworks.uark.edu/etd/2422>.
162. Behera, B.K.; Arora, M.; Sharma, D.K. Scanning Electron Microscopic (SEM) Studies on Structural Architecture of Lignocellulosic Materials of Calotropis Procera during Its Processing for Saccharification. *Bioresour. Technol.* **1996**, *58*, 241–245, doi:https://doi.org/10.1016/S0960-8524(96)00039-9.
163. Tavakoli, H.; Rajabipour, A.; Mohtasebi, S.S. Moisture-Dependent Some Engineering Properties of Soybean Grains. *Agric. Eng. Int. CIGR J.* **2009**, *XI*, 1110.
164. Flizikowski, J. *Badania i Podstawy Konstrukcyjne Wielotarczowych Rozdrabniaczy Nasion*; Akademia Techniczno-Rolnicza w Bydgoszczy: Bydgoszcz, 1990.
165. Szala, G. Technologiczne ścinanie i obserwacja przełomów ziarniaków pszenicy odmiany Izolda. *Inż. Apar. Chem.* **2009**, *Nr 2*, 127–128.
166. Sutherland, L.S.; Guedes Soares, C. The Use of Quasi-Static Testing to Obtain the Low-Velocity Impact Damage Resistance of Marine GRP Laminates. *Compos. Part B Eng.* **2012**, *43*, 1459–1467, doi:10.1016/j.compositesb.2012.01.002.
167. Petit, H.A.; Philippe, A.; Thomazini, A.D.; Tavares, L.M. Modeling Breakage by Impact of Fragments of Fired Iron Ore Pellets. *Powder Technol.* **2022**, *398*, 117059, doi:10.1016/j.powtec.2021.117059.
168. Wang, L.G.; Ge, R.; Chen, X. On the Determination of Particle Impact Breakage in Selection Function. *Particuology* **2022**, *65*, 117–132, doi:10.1016/j.partic.2021.08.003.

169. Mwanga, A.; Rosenkranz, J.; Lamberg, P. Testing of Ore Comminution Behavior in the Geometallurgical Context—A Review. *Minerals* **2015**, *5*, 276–297, doi:10.3390/min5020276.
170. Tavares, L.; King, R.P. Single-Particle Fracture under Impact Loading. *Int. J. Miner. Process.* **1998**, *54*, 1–28, doi:10.1016/S0301-7516(98)00005-2.
171. Tavares, L.M. Energy Absorbed in Breakage of Single Particles in Drop Weight Testing. *Miner. Eng.* **1999**, *12*, 43–50, doi:10.1016/S0892-6875(98)00118-6.
172. Shahbazi, F.; Dolwlatah, A.; Valizadeh, S. Mechanical Damage to Wheat and Triticale Seeds Related to Moisture Content and Impact Energy. *Agric. Eng. Int. CIGR J.* **2012**, *14*, 150–155.
173. Benjamin, K.; Paul, N.; Samon, J.B.; Wolfgang, N.; Denis, T.-T.; Ali, A. Investigation on Single-Particle Impact Breakage Functions of a « shaba » Hybrids Variety of Maize Kernel by Drop-Weight Technique. *Int. J. Sci. Res. Publ. IJSRP* **2021**, *11*, 320–326, doi:10.29322/IJSRP.11.11.2021.p11940.
174. Shahbazi, F. A Study on the Seed Susceptibility of Wheat (*Triticum Aestivum* L.) Cultivars to Impact Damage. *J. Agr. Sci. Tech.* **2012**, *14*, 505–512.
175. Shahbazi, F. Impact Damage to Chickpea Seeds as Affected by Moisture Content and Impact Velocity. *Appl. Eng. Agric.* **2011**, *27*, 771–775, doi:10.13031/2013.39557.
176. Fengnian, S.; Kojovic, T. Validation of a Model for Impact Breakage Incorporating Particle Size Effect. *Int. J. Miner. Process.* **2007**, *82*, 156–163.
177. Martin, C.R.; Converse, H.H.; Z. Czuchajowska; F. S. Lai; Y. Pomeranz. Breakage Susceptibility and Hardness of Corn Kernels of Various Sizes and Shapes. *Appl. Eng. Agric.* **1987**, *3*, 104–113, doi:10.13031/2013.26655.
178. Guo, Y.; Hou, L.; Li, L.; Gao, S.; Hou, J.; Ming, B.; Xie, R.; Xue, J.; Hou, P.; Wang, K.; et al. Study of Corn Kernel Breakage Susceptibility as a Function of Its Moisture Content by Using a Laboratory Grinding Method. *J. Integr. Agric.* **2022**, *21*, 70–77, doi:10.1016/S2095-3119(20)63250-6.
179. Wang, Y.; Li, L.; Gao, S.; Guo, Y.; Zhang, G.; Ming, B.; Xie, R.; Xue, J.; Hou, P.; Wang, K.; et al. Evaluation of Grain Breakage Sensitivity of Maize Varieties Mechanically-Harvested by Combine Harvester. *Int. J. Agric. Biol. Eng.* **2020**, *13*, 8–16, doi:10.25165/ijabe.v13i5.6037.
180. Su, Y.; Xu, Y.; Cui, T.; Gao, X.; Xia, G.; Li, Y.; Qiao, M.; Yu, Y. Handy: A Device for Assessing Resistance to Mechanical Crushing of Maize Kernel. *Plant Methods* **2021**, *17*, 44, doi:10.1186/s13007-021-00729-2.
181. Chen, Z. *Developing a Validated Model for Predicting Grain Damage Using DEM*, Master Thesis.; School of Agricultural & Biological Engineering, Purdue University: West Lafayette, USA, 2019.
182. Kim, T.H., Physical Changes in Maize (*Zea Mays* L.) Grains during Post-harvest Drying; Massey University, Nowa Zelandia, 2000, 239.
183. Tang, J.; Sokhansanj, S.; Sosulski, F. Determination of the Breakage Susceptibility of Lentil Seeds. *Cereal Chem.* **1991**, *68*, 647–650.

184. Pasha, M.; Hare, C.; Ghadiri, M.; Gunadi, A.; Piccione, P.M. Effect of Particle Shape on Flow in Discrete Element Method Simulation of a Rotary Batch Seed Coater. *Powder Technol.* **2016**, *296*, 29–36, doi:10.1016/j.powtec.2015.10.055.
185. Singh S.S.; Finner, F.M. A Centrifugal Impacter for Damage Susceptibility Evaluation of Shelled Corn. *Trans. ASAE* **1983**, *26*, 1858–1863, doi:10.13031/2013.33856.
186. Pasha, M. *Analysis of Flow, Breakage and Coating of Corn Seeds in a Mixer*; The University of Leeds: Leeds, Great Britain, 2015.
187. Hashemifard, S.A.; Khosravi, A.; Abdollahi, F.; Alihemati, Z.; Rezaee, M. Chapter 11– Synthetic Polymeric Membranes for Gas and Vapor Separations. In *Synthetic Polymeric Membranes for Advanced Water Treatment, Gas Separation, and Energy Sustainability*; Ismail, A.F., Salleh, W.N.W., Yusof, N., Eds.; Elsevier, 2020; pp. 217–272 ISBN 978-0-12-818485-1.
188. Flizikowski, J.; Szala, G.; Sadkiewicz, J.; Kruszelnicka, W. Innovation and Wheat Corn Mill Process Control – Part I: Theoretical Basis Knowledge. In *Modelling Of Elements Of Machinery Driving Units*; Wydawnictwo Wydziału Zarządzania Politechniki Częstochowskiej: Częstochowa, 2016; pp. 150–161.
189. Flizikowski, J.; Szala, G.; Sadkiewicz, J.; Kruszelnicka, W. Innovation and Wheat Corn Mill Process Control – Part II: Research. In *Modelling Of Elements Of Machinery Driving Units*; Wydawnictwo Wydziału Zarządzania Politechniki Częstochowskiej: Częstochowa, 2016; pp. 162–178.
190. Gunasekaran, S.; Deshpande, S.S.; Paulsen M.R.; Shove G.C. Size Characterization of Stress Cracks in Corn Kernels. *Trans. ASAE* **1985**, *28*, 1668–1672, doi:10.13031/2013.32496.
191. Dang, J.M.; Copeland, L. Studies of the Fracture Surface of Rice Grains Using Environmental Scanning Electron Microscopy. *J. Sci. Food Agric.* **2004**, *84*, 707–713, doi:10.1002/jsfa.1671.
192. Barrera, G.N.; Calderón-Domínguez, G.; Chanona-Pérez, J.; Gutiérrez-López, G.F.; León, A.E.; Ribotta, P.D. Evaluation of the Mechanical Damage on Wheat Starch Granules by SEM, ESEM, AFM and Texture Image Analysis. *Carbohydr. Polym.* **2013**, *98*, 1449–1457, doi:10.1016/j.carbpol.2013.07.056.
193. Zawada, J. *Wstęp do mechaniki procesów kruszenia*; Wydawnictwo Technologii Eksploatacji: Radom, 1998.
194. Shah, K.S.; Hashim, M.H. bin M.; Emad, M.Z.; Ariffin, K.S. bin; Junaid, M.; Khan, N.M. Effect of Particle Morphology on Mechanical Behavior of Rock Mass. *Arab. J. Geosci.* **2020**, *13*, 708, doi:10.1007/s12517-020-05680-5.
195. Chaloupkova, V.; Ivanova, T.; Havrland, B. Sieve Analysis of Biomass: Accurate Method for Determination of Particle Size Distribution. *Proceedings of 15th International Scientific Conference Engineering for Rural Development*; 2016; pp. 1012–1017.

196. Chaloupková, V.; Ivanova, T.; Krepl, V. *Particle Size and Shape Characterization of Feedstock Material for Biofuel Production*. **2019**, 766.2Kb, doi:10.15159/AR.19.152.
197. Kruszelnicka, W.; Madej, O. Analysis the Size and Shape of Biomass Particles after Grinding with Using Digital Image Processing. *Her. Khmelnytskyi Natl. Univ.* **2016**, 107–114.
198. Dodds, J. 13 - Techniques to Analyse Particle Size of Food Powders. In *Handbook of Food Powders*; Bhandari, B., Bansal, N., Zhang, M., Schuck, P., Eds.; Woodhead Publishing Series in Food Science, Technology and Nutrition; Woodhead Publishing, 2013; pp. 309–338 ISBN 978-0-85709-513-8.
199. Kruszelnicka, W. *Analiza Procesu Wielotarczowego Rozdrabniania Biomasy w Ujęciu Energochłonności i Emisji CO₂*. *Rozprawa Doktorska*; Uniwersytet Technologiczno-Przyrodniczy im. J.J. Śniadeckich w Bydgoszczy: Bydgoszcz, 2019.
200. Whittle, D.; Wooller, R. Maximising the Economic Performance of Your Comminution Circuit through Cut-off Optimization. *Int. J. Surf. Min. Reclam. Environ.* **1999**, 13, 147–153, doi:10.1080/09208119908944240.
201. Saramak, D.; Foszcz, D.; Gawenda, T.; Konieczny, A.; Pawlos, W. Influence of Type of Lining in High-Pressure Grinding Rolls on Effectiveness of Copper Ore Comminution. *Physicochem. Probl. Miner. Process.* **2016**, 52, 182–192, doi:10.5277/ppmp160116.
202. Zare, S.; Maleki Moghaddam, M.; Pourshaabadi, J. Low-Cost Approaches to Promote Performance of Comminution Circuit at Steel-Sirjan Iron Ore Complex. *J. Min. Environ.* **2021**, 12, 1065–1076, doi:10.22044/jme.2021.11143.2094.
203. Tomporowski, A.; Flizikowski, J.; Kruszelnicka, W. A new concept of roller-plate mills. *Przem. Chem.* **2017**, 96, 1750–1755, doi:10.15199/62.2017.8.29.
204. 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.
205. Kruszelnicka, W.; Tomporowski, A.; Flizikowski, J.; Mroziński, A. Analiza procesu rozdrabniania biomateriałów w młynie walcowym z płytą międzywalcową w ujęciu emisji CO₂. Cz. 1, Składowe modelu. *Przem. Chem.* **2020**, T. 99, nr 6, doi:10.15199/62.2020.6.21.
206. 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, doi:10.5897/JETR2016.0593.
207. 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, doi:10.1111/ijfs.12525.

208. 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, doi:10.1016/j.jfoodeng.2014.11.027.
209. Dabbour, M.; Bahnasawy, A.; Ali, S.; El-Haddad, Z. Grinding Parameters and Their Effects on the Quality of Corn for Feed Processing. *J. Food Process. Technol.* **2015**, *6*, 1–7, doi:10.4172/2157-7110.1000482.
210. Dziki, D.; Laskowski, J. Influence of Selected Factors on Wheat Grinding Energy Requirements. *TEKA Kom Mot Energ Roln* **2005**, *5*, 56–64.
211. Mroziński, A.; Flizikowski, J.; Macko, M. *Inżynieria Rozdrabniania Biomasy*; Grafpol: Wrocław, 2016; ISBN 978-83-64423-35-2.
212. Steyn, C.W. *Optimisation of a Fully Autogenous Comminution Circuit*, University of Pretoria: Pretoria, RPA, 2013.
213. AusIMM. *Cost Estimation Handbook-Monograph 27*, The Australasian Institute of Mining and Metallurgy: Carlton, Australia, 2012.
214. Duroudier, J.-P. 5 – Choice in Comminution Equipment: Mechanical Plant Processing. In *Size Reduction of Divided Solids*; Duroudier, J.-P., Ed.; Elsevier, 2016; pp. 147–166 ISBN 978-1-78548-185-7.
215. Rajaonarivony, K.R.; Mayer-Laigle, C.; Piriou, B.; Rouau, X. Comparative Comminution Efficiencies of Rotary, Stirred and Vibrating Ball-Mills for the Production of Ultrafine Biomass Powders. *Energy* **2021**, *227*, 120508, doi:10.1016/j.energy.2021.120508.
216. Temmerman, M.; Jensen, P.D.; Hébert, J. Von Rittinger Theory Adapted to Wood Chip and Pellet Milling, in a Laboratory Scale Hammermill. *Biomass Bioenergy* **2013**, *56*, 70–81, doi:10.1016/j.biombioe.2013.04.020.
217. Gil, M.; Arauzo, I. Hammer Mill Operating and Biomass Physical Conditions Effects on Particle Size Distribution of Solid Pulverized Biofuels. *Fuel Process. Technol.* **2014**, *127*, 80–87, doi:10.1016/j.fuproc.2014.06.016.
218. Mani, S.; Tabil, L.G.; Sokhansanj, S. Grinding Performance and Physical Properties of Wheat and Barley Straws, Corn Stover and Switchgrass. *Biomass Bioenergy* **2004**, *27*, 339–352, doi:https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2004.03.007.
219. Marks, N. Wpływ wilgotności na zużycie energii bezpośredniej w procesie rozdrabniania ziarna żyta i pszenżyta. *Inż. Rol.* **2010**, *125*, 6.
220. Probst, K.V.; Ambrose, R.P.K.; Pinto, R.L.; Bali, R.; Krishnakumar, P.; Ileleji, K.E. The Effect of Moisture Content on the Grinding Performance of Corn and Corncobs by Hammermilling. *Trans. ASABE* **2013**, *56*, 1025–1033.
221. Tomporowski, A. Badanie Użyteczności Rozdrabniania Ziaren Ryżu. Część I-Model Badawczy. *Inż. Apar. Chem.* **2010**, 119–120.
222. Romański, L.; Niemiec, A. Analysis of the effect of moisture contents of grain on energy consumption of roller mill. *Acta Agrophysica*, **2001**, *46*, 153–158.

223. Romański, L.; Niemiec, A. Badanie wpływu wilgotności ziarna pszenicy na energię rozdrabniania w gniotowniku modelowym. *Acta Agrophysica* **2001**, 153–158.
224. Williams, O.; Eastwick, C.; Lester, E.; Giddings, D.; Byrne, N. The impact of moisture on the milling behaviour of different biomasses. In: 22nd European Biomass Conference and Exhibition, 23-26 czerwca 2014, Hamburg, Niemcy.
225. Diani, M.; Colledani, M. Energy Consumption Assessment and Modeling of a Comminution Process: The Glass Fibers Reinforced Composites Case-Study. *Procedia CIRP* **2020**, 90, 483–487, doi:10.1016/j.procir.2020.01.117.
226. Williams, O.; Newbolt, G.; Eastwick, C.; Kingman, S.; Giddings, D.; Lormor, S.; Lester, E. Influence of Mill Type on Densified Biomass Comminution. *Appl. Energy* **2016**, 182, 219–231, doi:https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2016.08.111.
227. Ämmälä, A.; Pääkkönen, T.M.; Illikainen, M. Role of Screen Plate Design in the Performance of a Rotor Impact Mill in Fine Grinding of Biomass. *Ind. Crops Prod.* **2018**, 122, 384–391, doi:https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2018.06.021.
228. Bergström, D.; Di Fulvio, F. Review of Efficiencies in Comminuting Forest Fuels. *Int. J. For. Eng.* **2019**, 30, 45–55, doi:10.1080/14942119.2019.1550314.
229. 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, doi:https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2010.12.016.
230. Spinelli, R.; Cavallo, E.; Facello, A.; Magagnotti, N.; Nati, C.; Paletto, G. Performance and Energy Efficiency of Alternative Comminution Principles: Chipping versus Grinding. *Scand. J. For. Res.* **2012**, 27, 393–400.
231. Eisenlauer, M.; Teipel, U. Comminution of Biogenic Materials. *Can. J. Chem. Eng.* **2017**, 95, 1236–1244, doi:10.1002/cjce.22792.
232. Vigneault, C.; Rothwell, T.M.; Bourgeois, G. Hammermill Grinding Rate and Energy Requirements for Thin and Conventional. *Can. Agric. Eng.* **1992**, 34.
233. Bitra, V.S.P.; Womac, A.R.; Chevanan, N.; Miu, P.I.; Igathinathane, C.; Sokhansanj, S.; Smith, D.R. Direct Mechanical Energy Measures of Hammer Mill Comminution of Switchgrass, Wheat Straw, and Corn Stover and Analysis of Their Particle Size Distributions. *Powder Technol.* **2009**, 193, 32–45, doi:https://doi.org/10.1016/j.powtec.2009.02.010.
234. Yıldırım, A.; Bayram, M.; Öner, M.D. Bulgur Milling Using a Helical Disc Mill. *J. Food Eng.* **2008**, 87, 564–570, doi:10.1016/j.jfoodeng.2008.01.010.
235. Yıldırım, A.; Bayram, M.; Öner, M.D. Ternary Milling of Bulgur with Four Rollers. *J. Food Eng.* **2008**, 84, 394–399, doi:10.1016/j.jfoodeng.2007.05.032.

236. Gawenda, T. Problematyka doboru maszyn kruszących w instalacjach produkcji kruszyw mineralnych. *Gór. Geoinżynieria* **2010**, *34*, 195–209.
237. Gawenda, T. Główne aspekty rozdrabniania twardych surowców mineralnych w wysokociśnieniowych prasach walcowych. *Gór. Geoinżynieria* **2009**, *33*, 89–100.
238. Colorado-Arango, L.; Menéndez-Aguado, J.M.; Osorio-Correa, A. Particle Size Distribution Models for Metallurgical Coke Grinding Products. *Metals* **2021**, *11*, 1288, doi:10.3390/met11081288.
239. Sadkiewicz, J.; Flizikowski, J. Konstrukcyjne Podwyższanie Wydajności Wielotarczowych Rozdrabniaczy Ziaren Zbóż. *Inż. Przetwórstwa Spoż.* **2014**, *3*, 20–24.
240. Austin, L.G. A Preliminary Simulation Model for Fine Grinding in High Speed Hammer Mills. *Powder Technol.* **2004**, *143–144*, 240–252, doi:10.1016/j.powtec.2004.04.017.
241. Fu, J.; Xue, Z.; Chen, Z.; Ren, L. Experimental Study on Specific Grinding Energy and Particle Size Distribution of Maize Grain, Stover and Cob. *Int. J. Agric. Biol. Eng.* **2020**, *13*, 135–142, doi:10.25165/ijabe.v13i4.5327.
242. Bitra, V.S.P.; Womac, A.R.; Igathinathane, C.; Sokhansanj, S. Knife Mill Comminution Energy Analysis of Switchgrass, Wheat Straw, and Corn Stover and Characterization of Particle Size Distributions. *Trans. ASABE* **2010**, *53*, 1639–1651.
243. Liu, Y.; Wang, J.; Wolcott, M.P. Assessing the Specific Energy Consumption and Physical Properties of Comminuted Douglas-Fir Chips for Bioconversion. *Ind. Crops Prod.* **2016**, *94*, 394–400, doi:10.1016/j.indcrop.2016.08.054.
244. Karinkanta, P.; Ämmälä, A.; Illikainen, M.; Niinimäki, J. Fine Grinding of Wood – Overview from Wood Breakage to Applications. *Biomass Bioenergy* **2018**, *113*, 31–44, doi:10.1016/j.biombioe.2018.03.007.
245. Kumar, C.S.; Malleshi, N.G.; Bhattacharya, S. A Comparison of Selected Quality Attributes of Flours: Effects of Dry and Wet Grinding Methods. *Int. J. Food Prop.* **2008**, *11*, 845–857, doi:10.1080/10942910701657686.
246. Rosa-Sibakov, N.; Sibakov, J.; Lahtinen, P.; Poutanen, K. Wet Grinding and Microfluidization of Wheat Bran Preparations: Improvement of Dispersion Stability by Structural Disintegration. *J. Cereal Sci.* **2015**, *64*, 1–10, doi:10.1016/j.jcs.2015.04.002.
247. Ogonowski, S.; Wołosiewicz-Głąb, M.; Ogonowski, Z.; Foszcz, D.; Pawelczyk, M. Comparison of Wet and Dry Grinding in Electromagnetic Mill. *Minerals* **2018**, *8*, 138, doi:10.3390/min8040138.
248. Suresh, D.S.; Aashitosh, A.I. Application of Eight-Roller Mill in Wheat Flour Milling Process. *Indian Food Ind.* **2011**, *30*, 1–6.
249. Famurewa, J., Alaba, V. The Development and Evaluation of a Four-Roller Flour Mill with Parallelogram Configuration. *Int. J. Food Eng.* **2007**, *3*, doi:10.2202/1556-3758.1056.

250. De Bondt, Y.; Liberloo, I.; Roye, C.; Windhab, E.J.; Lamothe, L.; King, R.; Courtin, C.M. The Effect of Wet Milling and Cryogenic Milling on the Structure and Physicochemical Properties of Wheat Bran. *Foods* **2020**, *9*, 1755, doi:10.3390/foods9121755.
251. Hemery, Y.; Chaurand, M.; Holopainen, U.; Lampi, A.-M.; Lehtinen, P.; Piironen, V.; Sadoudi, A.; Rouau, X. Potential of Dry Fractionation of Wheat Bran for the Development of Food Ingredients, Part I: Influence of Ultra-Fine Grinding. *J. Cereal Sci.* **2011**, *53*, 1–8, doi:10.1016/j.jcs.2010.09.005.
252. Goswami, T.K.; Singh, M. Role of Feed Rate and Temperature in Attrition Grinding of Cumin. *J. Food Eng.* **2003**, *59*, 285–290, doi:10.1016/S0260-8774(02)00469-7.
253. Wang, L.G. Particle Breakage Mechanics in Milling Operation. Uniwersytet w Edynburgu, Edynburg, **2017**.
254. Brach, I. *Podstawowe problemy w procesach rozdrabniania minerałów*; Ośrodek Wydawnictw IOMB: Warszawa, 1963.
255. Walker, W. *Principles Of Chemical Engineering*; 1937.
256. Cho, H.; Austin, L.G. An Equation for the Breakage of Particles under Impact. *Powder Technol.* **2003**, *132*, 161–166, doi:10.1016/S0032-5910(03)00057-3.
257. Petukhov, Y.; Kalman, H. Empirical Breakage Ratio of Particles Due to Impact. *Powder Technol.* **2004**, *143–144*, 160–169, doi:10.1016/j.powtec.2004.04.009.
258. Kratky, L.; Jirout, T. Modelling of Particle Size Characteristics and Specific Energy Demand for Mechanical Size Reduction of Wheat Straw by Knife Mill. *Biosyst. Eng.* **2020**, *197*, 32–44, doi:10.1016/j.biosystemseng.2020.06.005.
259. Ghorbani, Z.; Masoumi, A.A.; Hemmat, A. Specific Energy Consumption for Reducing the Size of Alfalfa Chops Using a Hammer Mill. *Biosyst. Eng.* **2010**, *105*, 34–40, doi:10.1016/j.biosystemseng.2009.09.006.
260. Naimi, L.J.; Collard, F.; Bi, X.; Lim, C.J.; Sokhansanj, S. Development of Size Reduction Equations for Calculating Power Input for Grinding Pine Wood Chips Using Hammer Mill. *Biomass Convers. Biorefinery* **2016**, *6*, 397–405, doi:10.1007/s13399-015-0195-1.
261. Tangirala, A.D. Srikanth.; Charithkumar, K.; Goswami, T.K. Modeling of size reduction, particle size analysis and flow characterisation of spice powders ground in hammer and pin mills. *Int. J. Res. Eng. Technol.* **2014**, *03*, 296–309, doi:10.15623/ijret.2014.0312042.
262. Tymoszek, M.; Mroczek, K.; Kalisz, S.; Kubiczek, H. An Investigation of Biomass Grindability. *Energy* **2019**, *183*, 116–126, doi:https://doi.org/10.1016/j.energy.2019.05.167.
263. Weichert, R. Theoretical Prediction of Energy Consumption and Particle Size Distribution in Grinding and Drilling of Brittle Materials. *Part. Part. Syst. Charact.* **1991**, *8*, 55–62, doi:10.1002/ppsc.19910080111.

264. Vogel, L.; Peukert, W. Breakage Behaviour of Different Materials—Construction of a Mastercurve for the Breakage Probability. *Powder Technol.* **2003**, *129*, 101–110, doi:10.1016/S0032-5910(02)00217-6.
265. Vogel, L.; Peukert, W. Characterisation of Grinding-Relevant Particle Properties by Inverting a Population Balance Model. *Part. Part. Syst. Charact.* **2002**, *19*, 149–157, doi:10.1002/1521-4117(200207)19:3<149::AID-PPSC149>3.0.CO;2-8.
266. Aman, S.; Tomas, J.; Kalman, H. Monte-Carlo-Simulation der Bruchwahrscheinlichkeit bei der Prallbeanspruchung irregulär geformter Partikel. *Chem. Ing. Tech.* **2011**, *83*, 704–709, doi:10.1002/cite.201000152.
267. Kruszelnicka, W.; Diviš, J.; Hlosta, J.; Gierz, Ł.A.; Žurovec, D. Calibration of Selected Bulk Biomaterials Parameters for DEM Simulation of Comminution Process. Case Study: Corn and Rice Grains. *Adv. Sci. Technol. Res. J.* **2022**, *16*, 64–77, doi:10.12913/22998624/152990.
268. Zeng, Y.; Mao, B.; Li, A.; Han, Y.; Jia, F. DEM Investigation of Particle Flow in a Vertical Rice Mill: Influence of Particle Shape and Rotation Speed. *Powder Technol.* **2022**, *399*, 117105, doi:10.1016/j.powtec.2021.117105.
269. Paluszny, A.; Tang, X.; Nejati, M.; Zimmerman, R.W. A Direct Fragmentation Method with Weibull Function Distribution of Sizes Based on Finite- and Discrete Element Simulations. *Int. J. Solids Struct.* **2016**, *80*, 38–51, doi:10.1016/j.ijsolstr.2015.10.019.
270. Gil, M.; Luciano, E.; Arauzo, I. Population Balance Model for Biomass Milling. *Powder Technol.* **2015**, *276*, 34–44, doi:https://doi.org/10.1016/j.powtec.2015.01.060.
271. Cotabarren, I.; Fernández, M.P.; Di Battista, A.; Piña, J. Modeling of Maize Breakage in Hammer Mills of Different Scales through a Population Balance Approach. *Powder Technol.* **2020**, *375*, 433–444, doi:10.1016/j.powtec.2020.08.016.
272. Naimi, L.J.; Sokhansanj, S.; Womac, A.R.; Bi, X.; Lim, C.J.; Igathinathane, C.; Lau, A.K.; Sowlati, T.; Melin, S.; Emami, M.; et al. Development of a Population Balance Model to Simulate Fractionation of Ground Switchgrass. *Trans. ASABE* **2011**, *54*, 219–227.
273. Xiao, Y.-C.; Li, S.; Gao, Z. A Continuum Damage Mechanics Model for High Cycle Fatigue. *Int. J. Fatigue* **1998**, *20*, 503–508, doi:10.1016/S0142-1123(98)00005-X.
274. Napier-Munn, T.J. *Mineral Comminution Circuits: Their Operation and Optimisation*; Julius Kruttschnitt Mineral Research Centre, 1996; ISBN 978-0-646-28861-1.
275. Womac, A.R.; Igathinathane, C.; Bitra P.; Miu P.; Yang, T.; Sokhansanj S.; Narayan, S. Biomass Pre-Processing Size Reduction with Instrumented Mills.; American Society of Agricultural and Biological Engineers, 2007.
276. Bayram, M.; Öner, M.D. Stone, Disc and Hammer Milling of Bulgur. *J. Cereal Sci.* **2005**, *41*, 291–296, doi:10.1016/j.jcs.2004.12.004.

277. Chandravarman, P.; Agyei, D.; Ali, A. Green and Sustainable Technologies for the Decontamination of Fungi and Mycotoxins in Rice: A Review. *Trends Food Sci. Technol.* **2022**, *124*, 278–295, doi:10.1016/j.tifs.2022.04.020.
278. Chhabra, N.; Kaur, A. Studies on Physical and Engineering Characteristics of Maize, Pearl Millet and Soybean. *J. Pharmacogn. Phytochem.* **2017**, *6*, 1–5.
279. Kibar, H.; Öztürk, T. Physical and Mechanical Properties of Soybean. *International Agrophysics* **2008**, *22*(3), 239–244.
280. Grain Production Worldwide by Type 2021/22 Available online: <https://www.statista.com/statistics/263977/world-grain-production-by-type/> (accessed on 14 June 2022).
281. Jiao, Y.; Chen, H.-D.; Han, H.; Chang, Y. Development and Utilization of Corn Processing By-Products: A Review. *Foods* **2022**, *11*, 3709, doi:10.3390/foods11223709.
282. *Ziarno zbóż i przetwory zbożowe - Pobieranie próbek PN-EN ISO 24333*; Polska, Ed.; Polski Komitet Normalizacyjny: Warszawa, 2012; ISBN 978-83-275-0086-1.
283. Ștefan, E.-M.; Voicu, G.; Constantin, G.-A.; Stoica, D. Variation of Crushing Characteristics by Compression of Wheat Seeds. *Metal. Int.* **2013**, *18*, 71–77.
284. Baumgardt, S. *On the Comparison of Results in Single Grain Crushing Under Different Kinds of Load*; Istituto di Arte Mineraria, Cagliari, 1975.
285. American Society of Agricultural and Biological Engineers ASAE S352.2 R2017 Moisture Measurement – Unground Grain And Seeds 2017.
286. Portnikov, D.; Kalman, H.; Aman, S.; Tomas, J. Investigating the Testing Procedure Limits for Measuring Particle Strength Distribution. *Powder Technol.* **2013**, *237*, 489–496, doi:10.1016/j.powtec.2012.12.025.
287. Sun, H.; Zeng, Y.; Ren, S.; Ye, Y.; Chen, X. Breakage Probability of Marble Spheres under Normal, Repeated Impacts. *Int. J. Impact Eng.* **2019**, *130*, 68–78, doi:10.1016/j.ijimpeng.2019.04.004.
288. Sarker, M.S.H.; Hasan, S.M.K.; Ibrahim, M.N.; Aziz, N.A.; Punan, Mohd.S. Mechanical Property and Quality Aspects of Rice Dried in Industrial Dryers. *J. Food Sci. Technol.* **2017**, *54*, 4129–4134, doi:10.1007/s13197-017-2856-5.
289. Tavares, L.M.; de Almeida, R.F. Breakage of Green Iron Ore Pellets. *Powder Technol.* **2020**, *366*, 497–507, doi:10.1016/j.powtec.2020.02.074.
290. Yamamoto, M.; Tanaka, M.; Furukimi, O. Hardness–Deformation Energy Relationship in Metals and Alloys: A Comparative Evaluation Based on Nanoindentation Testing and Thermodynamic Consideration. *Materials* **2021**, *14*, 7217, doi:10.3390/ma14237217.
291. Yun, H.; Modarres, M. Measures of Entropy to Characterize Fatigue Damage in Metallic Materials. *Entropy* **2019**, *21*, 804, doi:10.3390/e21080804.
292. Li, X.; Yao, Z.; Liu, X.; Huang, X. Energy Evolution and Damage Mechanism of Fractured Sandstone with Different Angles. *Energies* **2022**, *15*, 1518, doi:10.3390/en15041518.

293. Bwalya, M.M.; Chimwani, N. Development of a More Descriptive Particle Breakage Probability Model. *Minerals* **2020**, *10*, 710, doi:10.3390/min10080710.
294. Turnbull, K.-M.; Rahman, S. Endosperm Texture in Wheat. *J. Cereal Sci.* **2002**, *36*, 327–337, doi:10.1006/jcrs.2002.0468.
295. Wiercioch, M.; Niemiec, A. Energochłonność procesu rozdrabniania pszenicy ozimej o różnej szklistości przy stosowaniu gniotownika i śrutownika walcowego. *Inż. Rol.* **2006**, *R. 10, nr 11(86)*, 511–518.
296. Tavares, L.M. Review and Further Validation of a Practical Single-Particle Breakage Model. *KONA Powder Part. J.* **2022**, *39*, 62–83, doi:10.14356/kona.2022012.
297. Urbaniak, D.; Otwinowski, H.; Wyleciał, T.; Zhukov, V.P.; Barochkin, A.Y.; Boryca, J. Research on the Grinding Energy Density in a Jet Mill. *Materials* **2021**, *14*, 2008, doi:10.3390/ma14082008.
298. Li, X.; Du, Y.; Liu, L.; Mao, E.; Yang, F.; Wu, J.; Wang, L. Research on the Constitutive Model of Low-Damage Corn Threshing Based on DEM. *Comput. Electron. Agric.* **2022**, *194*, 106722, doi:10.1016/j.compag.2022.106722.
299. Pichler, B.; Hellmich, Ch.; Mang, H.A. Impact of Rocks onto Gravel Design and Evaluation of Experiments. *Int. J. Impact Eng.* **2005**, *31*, 559–578, doi:10.1016/j.ijimpeng.2004.01.007.
300. Flizikowski, J.; Tomporowski, A.; Mroziński, A. Patent UPRP Nr P.221397: Zespół Napędowy i Sterujący Wielotarczowego Wielootworowego Rozdrabniacza Materiałów Kawalkowych, 2011.
301. Dańko, R.; Szymała, K.; Holtzer, M.; Holtzer, G. Skojarzone wytwarzanie energii elektrycznej i ciepła w systemie kogeneracji. *Arch. Foundry Eng.* **2012**, *12*, 6.
302. ISO 13322-2:2006 Particle Size Analysis — Image Analysis Methods — Part 2: Dynamic Image Analysis Methods 2006.
303. Trubetskaya, A.; Poyraz, Y.; Weber, R.; Wadenbäck, J. Secondary Commi-nution of Wood Pellets in Power Plant and Laboratory-Scale Mills. *Fuel Process. Technol.* **2017**, *160*, 216–227, doi:10.1016/j.fuproc.2017.02.023.
304. Kruszelnicka, W. A New Model for Environmental Assessment of the Comminution Process in the Chain of Biomass Energy Processing. *Energies* **2020**, *13*, 330, doi:https://doi.org/10.3390/en13020330.
305. Nad, A.; Brożek, M. Application of Three-Parameter Distribution to Approximate the Particle Size Distribution Function of Comminution Products of Dolomitic Type of Copper Ore. *Arch. Min. Sci.* **2017**, *62*, 411–422, doi:10.1515/amsc-2017-0031.
306. Khodier, K.; Sarc, R. Distribution-Independent Empirical Modeling of Particle Size Distributions—Coarse-Shredding of Mixed Commercial Waste. *Processes* **2021**, *9*, 414, doi:10.3390/pr9030414.

307. Guilford, J. P. *Fundamental Statistics in Psychology and Education*. New York (330 West 42nd Street): McGraw-Hill Book Company, 1956. 565 P. \$6.25. *Sci. Educ.* **1957**, *41*, 244–244, doi:10.1002/sce.3730410357.
308. Kusińska, E.; Olejarczyk, P. Wpływ geometrycznych parametrów otworu i średnicy zastępczej materiału roślinnego na objętościowe natężenie przepływu. *MOTROL Motoryzacja i Energetyka Rolnictwa* **2004**, *6*, 114–122.
309. Horabik, J.; Molenda, M.; Ross, I.J. Load distribution in a model grain bin during partial fill and unload. *Acta Agrophysica* **2020**, *2000*, 51–60.
310. Niedostatkiewicz, M. Influence of geometry and wall roughness of silo wall on bottom vertical pressure. *Acta Agrophysica* **2008**, *13*, 195–210.
311. Tomporowski, A.; Opielak, M.; Kowalik, K.; Sykut, B. Analiza Nierównomierności Rozdrabniania Biomasy. Część I: Podstawy Teoretyczne. *Inż. Apar. Chem.* **2013**, *52*, 42–43.
312. Taner, H.A.; Toroglu, I. Effect of Operational Parameters on the Particle Size Distribution of Marble Wastes in Stirred Media Mill. *Mine Planning and Equipment Selection* **2014**, 1091–1100.
313. Ghayour, H.; Abdellahi, M.; Bahmanpour, M. Optimization of the High Energy Ball-Milling: Modeling and Parametric Study. *Powder Technol.* **2016**, *291*, 7–13, doi:10.1016/j.powtec.2015.12.004.
314. Paraschiv, G.; Moiceanu, G.; Voicu, G.; Chitoiu, M.; Cardei, P.; Dinca, M.N.; Tudor, P. Optimization Issues of a Hammer Mill Working Process Using Statistical Modelling. *Sustainability* **2021**, *13*, 973, doi:10.3390/su13020973.
315. Voicu, G.; Constantin, G.-A.; Stefan, E.-M.; Tudor, P.; Munteanu, M.G. Aspects Regarding Particle Size Distribution and Energy Consumption When Grinding Husked Rice Seeds.; May 20 2020.
316. Opielak, M.; Tomporowski, A. Structural Features versus Multi-Hole Grinding Efficiency. *Eksploat. Niezawodn. - Maint. Reliab.* **2012**, *14*, 222–227.
317. Huang, N.; Ovarlez, G.; Bertrand, F.; Rodts, S.; Coussot, P.; Bonn, D. Flow of Wet Granular Materials. *Phys. Rev. Lett.* **2005**, *94*, 028301, doi:10.1103/PhysRevLett.94.028301.
318. Badetti, M.; Fall, A.; Roux, J.-N. Rheology of Wet Granular Materials in Shear Flow: Experiments and Discrete Simulations. *E3S Web Conf.* **2016**, *9*, 14008, doi:10.1051/e3sconf/20160914008.
319. Hlosta, J.; Jezerská, L.; Rozbroj, J.; Žurovec, D.; Nečas, J.; Zegzulka, J. DEM Investigation of the Influence of Particulate Properties and Operating Conditions on the Mixing Process in Rotary Drums: Part 1—Determination of the DEM Parameters and Calibration Process. *Processes* **2020**, *8*, 222, doi:10.3390/pr8020222.
320. Gierz, Ł.; Warguła, Ł.; Kukla, M.; Koszela, K.; Zwiachel, T.S. Computer Aided Modeling of Wood Chips Transport by Means of a Belt Conveyor with Use of Discrete Element Method. *Appl. Sci.* **2020**, *10*, 9091, doi:10.3390/app10249091.

321. Biyika, S.; Aydinb, M. The Effect of Milling Speed on Particle Size and Morphology of Cu25W Composite Powder. *Acta Phisica Polonica A* **2015**, *127(4)*, 1255-1260.
322. Mukhtar, N.Z.F.; Borhan, M.Z.; Rusop, M.; Abdullah, S. Effect of Milling Time on Particle Size and Surface Morphology of Commercial Zeolite by Planetary Ball Mill. *Adv. Mater. Res.* **2013**, *795*, 711–715, doi:10.4028/www.scientific.net/AMR.795.711.
323. Flizikowski, J.; Bieliński, K.; Bieliński, M. *Podwyższanie energetycznej efektywności wielotarczowego rozdrabniania nasion zbóż na paszę*; Wydawnictwa Akademii Techniczno-Rolniczej: Bydgoszcz, 1994.
324. Yu, P.; Xie, W.; Liu, L.X.; Powell, M.S. The Development of the Wide-Range 4D Appearance Function for Breakage Characterisation in Grinding Mills. *Miner. Eng.* **2017**, *110*, 1–11, doi:10.1016/j.mineng.2017.04.004.
325. Deniz, V.; Akkurt, Y.; Umucu, Y. A New Model on Breakage Behaviour of A Laboratory Impact Mill. The 19th International mining congress of Turkey, Izmir, 2005, 229-232
326. Duan, J.; Lu, Q.; Zhao, Z.; Wang, X.; Zhang, Y.; Wang, J.; Li, B.; Xie, W.; Sun, X.; Zhu, X. Grinding Behaviors of Components in Heterogeneous Breakage of Coals of Different Ash Contents in a Ball-and-Race Mill. *Minerals* **2020**, *10*, 230, doi:10.3390/min10030230.
327. Genç, Ö.; Ergün, L.; Benzer, H. Single particle impact breakage characterization of materials by drop weight testing. *Physicochem. Probl. Miner. Process.* 2004, *38(1)*, 241–255
328. Zhou, Q.; Guo, Q.; Pan, Y.; Zhu, C.; Wei, Y. Experimental Research on Energy-Size Distribution Model of Coal Particle Bed Comminution. *Physicochem. Probl. Miner. Process.* **2020**, *56*, 772–783, doi:10.37190/ppmp/125266.
329. Morrell, S. An Alternative Energy–Size Relationship to That Proposed by Bond for the Design and Optimisation of Grinding Circuits. *Int. J. Miner. Process.* **2004**, *74*, 133–141, doi:10.1016/j.minpro.2003.10.002.
330. Organizacja Narodów Zjednoczonych About the Sustainable Development Goals. *U. N. Sustain. Dev.* 2020.
331. Organizacja Narodów Zjednoczonych Przekształcamy Nasz Świat: Agenda na Rzecz Zrównoważonego Rozwoju 2030. ONZ, 2015.
332. Kruszelnicka, W.; Flizikowski, J.; Tomporowski, A. Auto-Monitoring System of Grainy Biomass Comminution Technology. *IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng.* **2018**, *393*, 012076, doi:10.1088/1757-899X/393/1/012076.
333. Tomporowski, A.; Flizikowski, J.; Al-Zubiedy, A. An Active Monitoring of Biomaterials Grinding. *Przem. Chem.* **2018**, *97*, 250–257, doi:10.15199/62.2018.2.13.
334. Abdellahi, M.; Bahmanpour, M.; Bahmanpour, M. The Use of Artificial Bee Colony Algorithm to Speed up the Nanopowders Synthesis during High Energy Ball Milling. *Powder Technol.* **2014**, *264*, 61–70, doi:10.1016/j.powtec.2014.05.014.

335. Farzanegan, A.; Vahidipour, S.M. Optimization of Comminution Circuit Simulations Based on Genetic Algorithms Search Method. *Miner. Eng.* **2009**, *22*, 719–726, doi:10.1016/j.mineng.2009.02.009.
336. Flizikowski, J.B.; Kruszelnicka, W.; Tomporowski, A.; Mrozinski, A. A Study of Operating Parameters of a Roller Mill with a New Design. *AIP Conf. Proc.* **2019**, *2077*, 020018, doi:10.1063/1.5091879.
337. Dal-Pastro, F.; Facco, P.; Bezzo, F.; Thomas, H.; Zamproga, E.; Barolo, M. Data-Based Multivariate Modeling of a Grain Comminution Process. In *Computer Aided Chemical Engineering*; Gernaey, K.V., Huusom, J.K., Gani, R., Eds.; 12 International Symposium on Process Systems Engineering and 25 European Symposium on Computer Aided Process Engineering; Elsevier, 2015; Vol. 37, pp. 2219–2224.
338. Naimi, L.J.; Sokhansanj, S.; Bi, X.; Lim, C.J.; Womac, A.R.; Lau, A.K.; Melin, S. Development of Size Reduction Equations for Calculating Energy Input for Grinding Lignocellulosic Particles. *Appl. Eng. Agric.* **2013**, *29*, 93–100, doi:10.13031/2013.42523.
339. Barnhart, B.L.; Sawicz, K.A.; Ficklin, D.L.; Whittaker, G.W. Moesha: A Genetic Algorithm for Automatic Calibration and Estimation of Parameter Uncertainty and Sensitivity of Hydrologic Models. *Trans. ASABE* **2017**, *60*, 1259–1269, doi:10.13031/trans.12179.
340. Tomporowski, A.; Flizikowski, J.; Kasner, R.; Kruszelnicka, W. Environmental Control of Wind Power Technology. *Rocz. Ochr. Śr.* **2017**, *19*, 694–714.
341. Kruszelnicka, W.; Tomporowski, A.; Flizikowski, J.; Kasner, R. Control System of Multi-Disc Mill with a New Structural Solution. *J. Phys. Conf. Ser.* **2020**, *1426*, 012007, doi:10.1088/1742-6596/1426/1/012007.
342. Kruszelnicka, W.; Tomporowski, A.; Flizikowski, J.; Kasner, R. Control and Monitoring of Multi-Disc Comminution Process. *J. Phys. Conf. Ser.* **2020**, *1426*, 012006, doi:10.1088/1742-6596/1426/1/012006.
343. Remes, A.; Karesvuori, J.; Pekkarinen, H.; Jämsä-Jounela, S.-L. Integrated Approach to Monitoring and Control of Mineral Grinding Processes. *IFAC Proc. Vol.* **2006**, *39*, 124–129.
344. Fang, Q.; Hanna, M.A.; Haque, E.; Spillman, C.K. Neural Network Modeling of Energy Requirements for Size Reduction of Wheat. *Trans. ASAE* **2000**, *43*, 947–952, doi:10.13031/2013.2991.
345. Svedensten, P.; Evertsson, C.M. Crushing Plant Optimisation by Means of a Genetic Evolutionary Algorithm. *Miner. Eng.* **2005**, *18*, 473–479, doi:10.1016/j.mineng.2004.08.008.
346. Gupta, V.; Mohanty, M.; Mahajan, A.; Biswal, S.K. Genetic Algorithms — A Novel Technique to Optimize Coal Preparation Plants. *Int. J. Miner. Process.* **2007**, *84*, 133–143, doi:10.1016/j.minpro.2007.05.006.
347. While, L.; Barone, L.; Hingston, P.; Huband, S.; Tuppurainen, D.; Bearman, R. A Multi-Objective Evolutionary Algorithm Approach for Crusher Optimisation and Flowsheet Design. *Miner. Eng.* **2004**, *17*, 1063–1074, doi:10.1016/j.mineng.2004.06.018.

348. Flizikowski, J.; Kamyk, W. Algorytmy genetyczne w konstrukcji rozdrabniaczy wielotarazowych ziarna kukurydzy. *Inż. Apar. Chem.* **2005**, Nr 1–2, 48–49.
349. Flizikowski, J. Test Methods for the Intelligent Development of Grinding Processes. *Inż. Apar. Chem.* **2016**, 55, 90–92.
350. Stange, W.; McInnes, C. The Intelligent Control of an ROM Milling Circuit. *IFAC Proc. Vol.* **1995**, 28, 359–365, doi:10.1016/S1474-6670(17)46785-1.
351. Moshgbar, M.; Parkin, R.M. An Intelligent Distributed System for Real-Time Control of Cone Crushers. *Microprocess. Microsyst.* **1994**, 18, 377–383, doi:10.1016/0141-9331(94)07037-7.
352. Meyer-Baese, A.; Schmid, V. Chapter 5 – Genetic Algorithms. In *Pattern Recognition and Signal Analysis in Medical Imaging (Second Edition)*; Meyer-Baese, A., Schmid, V., Eds.; Academic Press: Oxford, 2014; pp. 135–149 ISBN 978-0-12-409545-8.
353. Goldberg, D.E. *Algorytmy Genetyczne i Ich Zastosowanie*; WNT: Warszawa, 2003;
354. Yang, X.-S. Chapter 5 – Genetic Algorithms. In *Nature-Inspired Optimization Algorithms*; Yang, X.-S., Ed.; Elsevier: Oxford, 2014; pp. 77–87 ISBN 978-0-12-416743-8.
355. Gupta, S.K.; Garg, S. Chapter 4 – Multiobjective Optimization Using Genetic Algorithm. In *Advances in Chemical Engineering*; Pushpavanam, S., Ed.; Control and Optimisation of Process Systems; Academic Press, 2013; Vol. 43, pp. 205–245.
356. Winiczenko, R. Algorytmy genetyczne i ich zastosowania. *Postępy Tech. Przetwórstwa Spoż.* **2008**, nr 1, 107–110.
357. Kruszelnicka, W.; Bałdowska-Witos, P.; Kasner, R.; Flizikowski, J.; Tomporowski, A.; Rudnicki, J. Evaluation of Emissivity and Environmental Safety of Biomass Grinders Drive. *Przem. Chem.* **2019**, 98, 1494–1498.

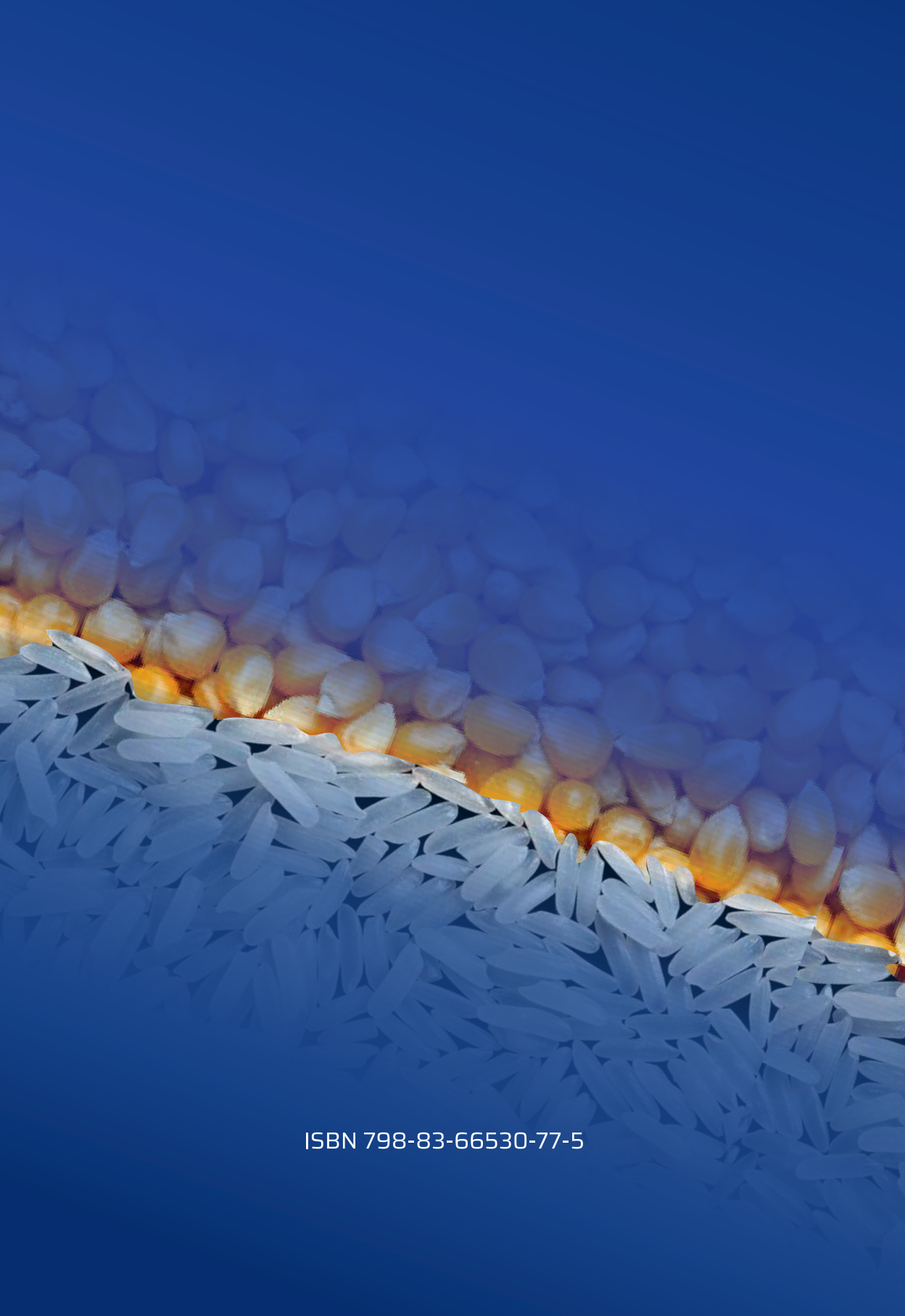
STRESZCZENIE

Rozdrabnianie stanowi istotny element procesów przetwórczych materiałów biologicznych w różnych sektorach przemysłowych. Rozwój procesów i maszyn rozdrabniających uwarunkowany jest w przeważającej mierze postanowieniami Parlamentu Europejskiego w zakresie efektywności energetycznej, poszanowania zasobów naturalnych i jakości życia ludzi, które wyznaczają kierunki i kryteria poszukiwań nowych wysokowydajnych, wysokoefektywnych rozwiązań technologicznych. Celem niniejszej monografii jest uporządkowanie dotychczasowej i zdobycie nowej wiedzy z badań i opisów inżynierii rozdrabniania biomateriałów ziarnistych do wyznaczenia wpływu wybranych cech materiału rozdrabnianego, warunków obciążenia na energię i prawdopodobieństwo rozdrabniania oraz zależności pomiędzy parametrami procesowymi rozdrabniania a wybranymi wskaźnikami oceny. Realizacja celów była możliwa poprzez przeprowadzenie badań studialnych i eksperymentalnych na przykładzie ziaren ryżu i kukurydzy. Badania eksperymentalne dotyczyły dwóch aspektów: rozdrabniania jako fenomenu oraz rozdrabniania maszynowego jako procesu, pewnego systemu wzajemnych powiązań i relacji parametrów procesowych, materiałowych i konstrukcyjnych, zgodnie z modelem INTEGRONU. Na przykładzie modelowych procesów cięcia i ściskania dowiedziono, że postać geometryczna i materiałowa ziaren i krotność obciążeń wpływają istotnie na zapotrzebowanie mocy, zużycie energii procesu i jego efektywność. W badaniach maszynowych dla rozdrabniacza pięcioletarczowego wyznaczono zależności opisujące wydajność, pobór mocy, stopień rozdrobnienia, jednostkowe zużycie energii, energochłonność zintegrowaną, emisyjność zrównoważoną i funkcją oceny energetyczno-środowiskowej zmierzających w funkcji sumarycznego przyrostu prędkości kątowych tarcz, intensywności dozowania wsadu i krotności rozdrabniania wyrażanego liczbą tarcz biorących udział w rozdrabnianiu. Badania rozdrabniania miały charakter programowy. Opracowano modele relacji pomiędzy skumulowanym udziałem procentowym cząstek t_n o wymiarze mniejszym niż $1/n$ w zależności od jednostkowego zużycia energii i znajomości krzywej referencyjnej t_{10} , co pozwala na przewidywanie stopnia rozdrobnienia ziaren i składu granulometrycznego cząstek po rozdrobnieniu. W wyniku badań i analiz opracowano inteligentny system monitorowania i sterowania rozdrabniaczem, wykorzystujący algorytmy genetyczne do poszukiwania optymalnych nastaw procesowych rozdrabniacza, oparty na autorskich wskaźnikach oceny energetyczno-środowiskowej rozdrabniania. Zaproponowany system stanowi cenne narzędzie do przemysłowej aplikacji w przetwórstwie biomasy, odpadów poużytkowych (lub innych materiałów) na cele energetyczne.

SUMMARY

INTEGRATED ENGINEERING OF MACHINERY AND EQUIPMENT OF THE BIOMASS GRAINS COMMUNITION PROCESSES

Comminution is an important part of the processing of biological materials in various industrial sectors. The development of grinding processes and machines is largely conditioned by the provisions of the European Parliament in the field of energy efficiency, respect for natural resources and the quality of people's lives, which set the directions and criteria for the search for new high-performance, high-efficiency technological solutions. The purpose of this monograph is to organize the existing and acquire new knowledge from research and descriptions of the comminution engineering of granular biomaterials to determine the impact of the crushed material selected features and the load conditions on the energy and probability of breakage and the relationship between grinding process parameters and selected comminution indicators. The achievement of the goals was possible by carrying out the study and experimental research on the example of rice and corn grains. Experimental research concerned two aspects: the study of comminution as a phenomenon and machine comminution as a process, certain system of interconnections and relations of process (operational), material and design features in accordance with the INTEGRON model. On the example of model processes of cutting and compression, it was proved that the geometric and material form of the grains and the multiplicity of loads significantly affect the power demand and energy consumption of the process and its efficiency. In the machine tests for the five-disc grinder, relations were determined describing the throughput, power consumption, size reduction ratio, specific energy consumption, integrated energy consumption, sustainable emissivity and the function of energy and environmental assessment as a function of the total increase in angular speeds of the disks, the feed dosing speed and the multiplicity of grinding expressed by the number of disks involved in grinding. The grinding studies were programmed. Relationship models were developed between the cumulative percentage t_n of particles with a size smaller than $1/n$ depending on the specific energy consumption and the knowledge of the t_{10} reference curve, which allow to predict the size reduction ratio and particle size distribution after grinding. As a result of research and analysis, an intelligent system for monitoring and controlling the grinder was developed, using genetic algorithms to search for the optimal grinder operational parameters settings based on developed indicators of energy and environmental assessment of comminution. The proposed system is a valuable tool for industrial application in biomass-for-energy (or other materials) processing plants.



ISBN 798-83-66530-77-5