

POLITECHNIKA ŚLĄSKA

Wydział Inżynierii Środowiska i Energetyki

Instytut Maszyn i Urządzeń Energetycznych

Zakład Kotłów i Wytwornic Pary

STRESZCZENIE PRACY DOKTORSKIEJ

Indeks podatności przemiałowej biomasy

Mgr inż. Mateusz TYMOSZUK

Promotor:

Dr hab. inż. Sylwester KALISZ, prof. nadzw. w Pol. Śl.

Gliwice, 2017

Badania przedstawione w niniejszej pracy zostały zrealizowane ze wsparciem projektów badawczych:

- Advanced pretreatment and characterization of Biomass for Efficient Generation of Heat and Power (akronim BioEffGen, nr umowy STAIR/3/2016) – finansowanego przez Narodowe Centrum Badań i Rozwoju, w ramach polsko-niemieckiej współpracy na rzecz zrównoważonego rozwoju.
- Wyznaczenie indeksu podatności przemiałowej *BGI* (Biomass Grindability Index) dla wybranych rodzajów biomasy (nr umowy P17/2013/4200010855) – finansowanego przez EDF Polska S. A., w ramach umowy Konsorcjum Uczelni Polskich.

Spis treści

| | | |
|--------|--|----|
| 1. | WPROWADZENIE..... | 4 |
| 2. | CEL, ZAKRES I TEZY PRACY | 4 |
| 3. | OPRACOWANIE METODY WYZNACZANIA INDEKSU PODATNOŚCI PRZEMIAŁOWEJ DLA PALIW BIOMASOWYCH W MŁYNACH BIJAKOWYCH | 5 |
| 3.1. | Opis stanowiska badawczego okresowego młynka bijakowego..... | 5 |
| 3.2. | Metoda wyznaczania podatności przemiałowej biomasy oparta na założeniach czeskiej metody VUK | 7 |
| 3.2.1. | Założenia teoretyczne metody wyznaczania indeksu podatności przemiałowej biomasy opartej na czeskiej metodzie VUK..... | 8 |
| 3.2.2. | Charakterystyki badanych paliw | 9 |
| 3.2.3. | Wybrane wyniki testów podatności przemiałowej paliw dla biomas i węgla | 9 |
| 3.3. | Modyfikacja metody wyznaczania podatności przemiałowej biomasy..... | 10 |
| 3.3.1. | Charakterystyka badanych biomas | 12 |
| 3.3.2. | Testy podatności przemiałowej biomasy przy stałej masie próbki | 13 |
| 3.3.3. | Testy podatności przemiałowej biomasy przy różnej zawartości wilgoci w próbce | 16 |
| 3.3.4. | Testy podatności przemiałowej biomasy przy stałej objętości próbki | 16 |
| 3.3.5. | Wpływ składu ziarnowego próbki dla stałej objętości próbki | 17 |
| 3.4. | Przyjęta metoda wyznaczania podatności przemiałowej biomasy i podsumowanie badań laboratoryjnych | 18 |
| 4. | WERYFIKACJA PRZEMYSŁOWA INDEKSU PODATNOŚCI PRZEMIAŁOWEJ BIOMASY | 19 |
| 4.1. | Zakres pomiarów | 20 |
| 4.2. | Wyniki pomiarów młynów bijakowych oraz ich dyskusja..... | 21 |
| 4.3. | Podsumowanie wyników testów instalacji przemiałowej wyposażonej w młyny bijakowe..... | 27 |
| 5. | TESTY PORÓWNAWCZE PODATNOŚCI PRZEMIAŁOWEJ WYBRANYCH BIOMAS DLA ZADANEJ ENERGII ORAZ PRZY STAŁYM CZASIE TRWANIA TESTU | 28 |
| 5.1. | Charakterystyka badanych biomas | 29 |
| 5.2. | Wyniki testów porównawczych, ich dyskusja oraz rekomendowana metoda wyznaczania podatności przemiałowej biomasy..... | 29 |
| 6. | WNIOSKI | 31 |
| 7. | LITERATURA | 33 |

1. WPROWADZENIE

Konieczność zwiększania udziału energii ze źródeł odnawialnych oraz troska o środowisko naturalne skutkują coraz powszechniejszym wykorzystaniem biomasy pochodzenia leśnego i agrarnego w istniejących jednostkach energetycznych. Nowe europejskie ramy klimatyczno-energetyczne na lata 2020–2030 zakładają, że co najmniej 27 % zużywanej energii powinno pochodzić ze źródeł odnawialnych [1]. Zgodnie z projektem Ministerstwa Rozwoju [2], określającym m.in. polską politykę energetyczną na najbliższe lata, przewiduje się zwiększone wykorzystanie biomasy w celu zwiększenia ilości energii pozyskiwanej ze źródeł odnawialnych. Jedną z najczęściej stosowanych form produkcji energii z paliw biomasowych jest spalanie i współspalanie biomasy w pyłowych kotłach energetycznych. W związku z takim stanem rzeczy powstają problemy zapewnienia odpowiedniej zdolności przemiałowej instalacji proszkowania, wymaganej granulacji pyłu oraz właściwego działania kotła

Wielkością najlepiej oddającą odporność materiału na rozdrabnianie jest podatność przemiałowa. Podatność przemiałową (mielność) surowców, definiuje się jako stosunek nakładu energetycznego poniesionego w czasie mielenia do uzyskanego efektu tego procesu określanego przez takie wartości, jak pozostałość na sicie o określonym rozmiarze oczka, wzrost powierzchni mieliwa czy przyrost frakcji o odpowiednich rozmiarach. Znajomość właściwości mechanicznych materiałów, takich jak moduł sprężystości, ściśliwość, wytrzymałość i mikrotwardość nie wystarcza do określenia podatności na mielenie. Dlatego też, mielność paliw wyznaczana jest empirycznie w testerach, wykorzystując ten sam mechanizm mielenia co młyny rzeczywiste, a zależności ujmujące podatność przemiałową dla danego typu testera bazują na hipotezach rozdrabniania np. Rittinger'a, Kick'a czy Bond'a [3, 4, 5].

Obecnie nie istnieje żadna standardowa procedura pozwalająca na ocenę podatności przemiałowej biomasy. Niemożliwe jest zatem prawidłowe prognozowanie wydajności młynów podczas przemiału stałych paliw biomasowych, czy też ich właściwa ocena pod względem możliwości proszkowania w instalacjach przygotowania paliwa dla kotłów pyłowych.

2. CEL, ZAKRES I TEZY PRACY

Główny cel niniejszej pracy stanowi opracowanie metody wyznaczania podatności przemiałowej biomasy, pozwalającej na jednoznaczną klasyfikację różnych typów biopaliw stałych pod względem ich przemiałowości. Ze względu na szeroko rozpowszechnioną tendencję do rozdrabniania biomasy w młynach bijakowych, w badaniach postanowiono wykorzystać tester bazujący na tym samym mechanizmie rozdrabniania, co przemysłowe młyny bijakowe.

Realizacja założonego celu przewidywała ocenę możliwości adaptacji istniejących metod wyznaczania podatności przemiałowej węgla do oceny mielności biomasy. Początkowe badania oparto na czeskiej metodzie VUK, wykorzystującej jako tester młynek bijakowy oraz bazującej na teorii rozdrabniania zdefiniowanej przez Bond'a. W toku badań wybranych biomas metoda była modyfikowana w celu uzyskania jak najwyższej miarodajności opracowywanego indeksu, przy czym zakres testów laboratoryjnych wykonano dla 10 biomas i obejmował:

- badania wpływu prędkości obwodowej bijaków na stopień rozdrobnienia próbki i zużycie energii podczas testu,

- testy podatności przemiałowej biomasy przy stałej masie próbki i założonych czasach trwania testu,
- określenie wpływu wilgotności wybranych biomas na podatność przemiałową, przy stałej masie próbki,
- testy podatności przemiałowej biomasy przy stałej objętości próbki,
- określenie wpływu składu ziarnowego próbki wybranych biomas na podatność przemiałową, przy stałej objętości próbki,
- testy porównawcze podatności przemiałowej wybranych biomas (przy stałej objętości próbki) dla zadanej energii zużywanej przez silnik młynka testowego oraz przy stałym czasie trwania testu.

W ramach pracy zaplanowano także testy przemysłowe instalacji przemiału biomasy, wyposażonej w młyny bijakowe, mające w założeniu posłużyć do wyznaczenia *JZE* (jednostkowego zużycia energii na przemiał), a tym samym do weryfikacji zaproponowanego w pracy indeksu podatności przemiałowej dla biomasy. Podczas badań obiektowych testowano dwie mieszanki biomasy oraz jedną biomasę niezmieszaną. Otrzymane wyniki posłużyły do weryfikacji metody wyznaczania podatności przemiałowej biomasy.

Podstawowe tezy pracy to:

- Charakteryzację podatności przemiałowej różnych typów biomas można oprzeć o test ze stałą energią zużywaną podczas testu..
- Charakteryzację podatności przemiałowej różnych typów biomas można oprzeć o test ze stałym czasem trwania testu.

Jako cel poboczny pracy przebadano wpływ długości bijaków młyna przemysłowego na rozkład ziarnowy produkowanego pyłu i *JZE* (jednostkowe zużycie energii na przemiał).

3. OPRACOWANIE METODY WYZNACZANIA INDEKSU PODATNOŚCI PRZEMIAŁOWEJ DLA PALIWI BIOMASOWYCH W MŁYNACH BIJAKOWYCH

3.1. Opis stanowiska badawczego okresowego młynka bijakowego

Na potrzeby badań wykonano okresowy młynek bijakowy bez sita, przy czym rotor wyposażono w cztery bijaki w formie litery T, wirujące w cylindrycznej obudowie o średnicy 200 mm i szerokości 45 mm - **Rys. 3.1.**



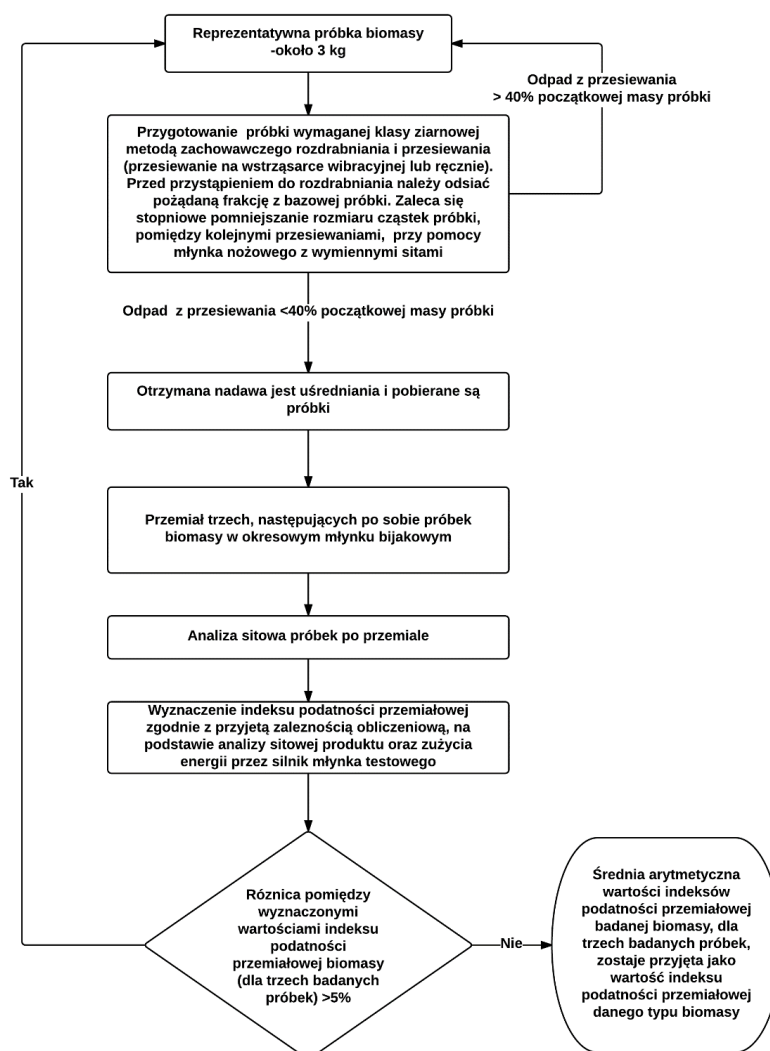
Rys. 3.1. Okresowy młynek bijakowy

Do napędu rotora młynka wykorzystano silnik trójfazowy o mocy 4 kW i obrotach 2900 min⁻¹ oraz przekładnię pasową klinową zwiększającą obroty w stosunku 1,24. Zespół silnika zasilanego przetwornikiem częstotliwości typu Micromaster 440, o maksymalnej dopuszczalnej mocy 7 kW, umożliwił regulację prędkości obwodowej bijaków do ok. 50 m/s. Oprogramowanie sterownika pozwoliło na nastawę wymaganej prędkości

obrotowej i obserwację zmian mocy, momentu i innych parametrów silnika oraz ich rejestrowanie w pliku, przy użyciu systemu sterowania i akwizycji danych, składającego się z komputera oraz sterownika Simatic S7–1200. Stanowisko badawcze wykonano na bazie korpusu istniejącego młynka młotkowego, w którym zainstalowano nowo zaprojektowany zespół mielący oraz zamkniętą komorę mielenia.

Klasy ziarnowe próbek biomasy przygotowano w rozdrabniaczu nożowym, z regulowaną prędkością obrotową i wymiennymi sitami (1 do 12,5 mm), metodą stopniowego rozdrabniania, z każdorazowym odsiewaniem wymaganej klasy ziarnowej próbek.

Po uruchomieniu młynka i ustawieniu żądanej prędkości obwodowej następowało otwarcie zasuwki zbiornika, do którego wcześniej wsypano próbkę. Po uderzeniu młotkiem gumowym we wlot młynka, dla całkowitego opróżnienia pojemnika, zamykano zasuwkę. Czas mielenia liczono od momentu otwarcia zasuwki. Po upływie ustalonego czasu testu, młynek zatrzymywano w ciągu ok. 5 s. Po otwarciu tzw. „drzwi młynka” komorę opróżniano przy użyciu pędzla na zamocowaną tacę. Próbki produktu ważono i w całości analizowano na sitach: 0,075; 0,09; 0,12; 0,20; 0,35; 0,50 i 1,00 mm, przy użyciu przesiewacza pneumatycznego.



Rys. 3.2 Schemat blokowy procedury wyznaczania indeksu podatności przemiałowej dla biomasy

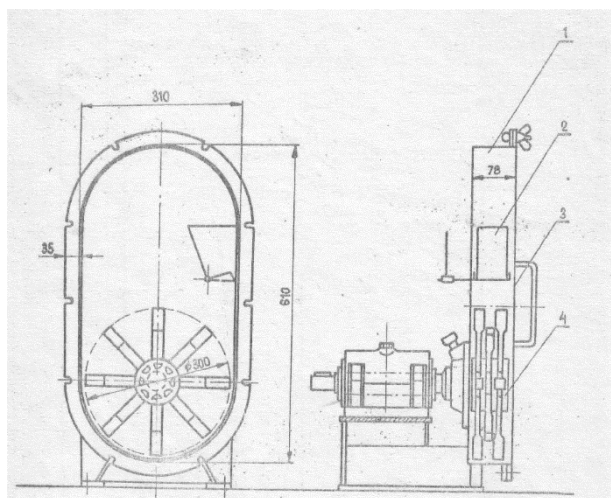
Ze względu na modyfikację warunków testu podczas prowadzonych badań (w toku badań zmieniano warunki testu w celu opracowania najbardziej miarodajnej procedury prowadzenia badań), procedurę wyznaczania indeksu podatności przemiałowej dla biomasy przedstawiono przy użyciu ogólnego schematu blokowego – **Rys. 3.2**.

3.2. Metoda wyznaczania podatności przemiałowej biomasy oparta na założeniach czeskiej metody VUK

Punktem wyjścia dla opracowanie procedury wyznaczania indeksu podatności przemiałowej dla biomasy została oparta na czeskiej metodzie wyznaczania podatności przemiałowej *VUK*, stosowanej dla węgla brunatnych i lignitów mielonych w młynach wentylatorowych i bijakowych. Indeks w tej metodzie określano na bazie średnich rozmiarów cząstek próbki nadawy i produktu przy wykorzystaniu hipotezy Bond'a. W laboratoryjnym młynku młotkowym materiał rozdrabniano w wyniku uderzenia bijaków obracających się z dużą prędkością (1450 obr/min) [6, 7, 8, 9].

Przyjęcie metodyki *VUK*, jako podwalin pod wyznaczenie indeksu podatności przemiałowej dla biomasy, ugruntowane było tym, iż zarówno biomasa, jak i węgle brunatne oraz lignity rozdrabniane są w wielu zastosowaniach przemysłowych przy użyciu młynów uderzeniowych [10, 11].

Oznaczenia podatności przemiałowej węgla metodą *VUK* dokonuje się w laboratoryjnym młynku bijakowym z trzema szeregami po 4 bijaki (sumarycznie 12 bijaków), którego kształt i wymiary pokazano na **Rys. 3.3**. Młynek napędzany jest bezpośrednio poprzez sprzęgło trójfazowym silnikiem elektrycznym o mocy 1 kW i prędkości kątowej 152,2 rad/s (1450 obr/min) [6, 9]



Rys. 3.3 Młynek wykorzystywany w metodzie *VUK* [6]

1 – skrzynia mieląca, 2 – zbiornik, 3 – wieko młynka, 4 – wirnik wraz z młotkami

Procedura wyznaczania podatności przemiałowej metodą *VUK* przebiega następująco: powietrzno-suchą próbkę węgla o masie $200 \text{ g} \pm 1 \text{ g}$ i granulacji 0-1,5 mm wsypuje się do zbiornika posiadającego mechanizm zrzutowy. Po zamknięciu młynka i uzyskaniu przez silnik pełnych obrotów, dno zbiornika zostaje otwarte. Próbkę mieli się przez $5 \text{ min} \pm 1 \text{ s}$, a następnie powstały produkt jest dokładnie mieszany i z miejsc możliwie równomiernie rozmieszczonych w całej masie pobierane są trzy porcje, każda o masie $25 \text{ g} \pm 0,1 \text{ g}$. [6, 9].

Podatność przemiałowa według *VUK* obliczana jest na podstawie średniej masowej średnicy cząstki produktu (tj. wymiaru cząstki dla którego pozostałość sitowa $R_x = 50 \%$) według wzoru (3-3). Średnia masowa średnica

cząstki zostaje wyznaczona z pozostałości nadsitowych dla sit o oczku kwadratowym i wymiarach 0,09 oraz 0,2 mm.

3.2.1. Założenia teoretyczne metody wyznaczania indeksu podatności przemiałowej biomasy opartej na czeskiej metodzie VUK

Wychodząc z ogólnego równania rozdrabniania, opisującego nakład energii E przy zmniejszaniu rozmiaru cząstki x [12, 13]:

(3-1)

$$\frac{dE}{dx} = -Cx^{-n};$$

gdzie C – stała materiałowa,

po scałkowaniu równania (3-1) od wymiaru początkowego cząstek x_1 do wymiaru końcowego x_2 , zużycie energii E_{1-2} wyniesie:

(3-2)

$$E_{1-2} = \frac{C}{n-1} (x_2^{1-n} - x_1^{1-n})$$

Przy $n = 2$ równanie przybiera postać hipotezy Rittinger'a. W przypadku hipotezy Bond'a, na której bazuje metoda VUK, wykładnik potęgowy wynosi $n = 1,5$. Dla materiału odniesienia, o rozmiarze produktu $x_{50p,o} = 0,25$ mm i nadawy $x_{50w,o} = 1$ mm, zgodnie z wzorem (3-2) zużycie energii wyniesie $E_{1-2,o} = 2C$. Stąd dla próbek o założonym $x_{50w} = 1$ mm, otrzymuje się indeks VUK opisany zależnością:

(3-3)

$$K_{VUK} = I_L = \frac{E_{1-2}}{E_{1-2,o}} = \sqrt{\frac{1}{x_{p50}}} - 1$$

W zależności od rodzaju materiału (jego własności) może zmieniać się zarówno wykładnik n , zwykle w przedziale od 1,5 do 2, jak i wielkość stałej materiałowej C . Przykładowo, wartość C może wahać się w przedziale od ok. 12 do ok. 200 dla różnych gatunków i wilgotności zrębków drzewnych, przy adaptacji hipotezy Rittinger'a do opisu ich mielenia w młynku bijakowym [14]

W początkowych badaniach przyjęto wstępny indeks podatności przemiałowej oznaczony jako I_L i bazujący na indeksie VUK – zależność (3-3). Czas testu i granulacja próbki, podobnie jak w metodzie VUK, zostały ustalone kolejno jako 5 min oraz 0-1,5 mm. Testowano również różne masy próbek oraz prędkości obwodowe końców bijaków w zakresie od 25 do 40 m/s. Dodatkowo, oprócz testów dla biomasy, postanowiono także sprawdzić możliwość wyznaczania indeksu VUK dla węgla przy użyciu okresowego młynka bijakowego. Weryfikacja z użyciem rzeczywistego testera VUK była niemożliwa ze względu na niedostępność tego typu urządzenia w obrocie handlowym. Wstępne masy próbek do laboratoryjnego młynka bijakowego przyjęto na kryterium objętościowego wypełnienia komór obydwu młynków oraz powierzchni ich bijaków. Po pomiarach wstępnych do dalszych badań zostały ustalone masy próbek węglowych wielkości 60 g, a biomasowych 40 g (badane próbki biomasy posiadały zbliżoną gęstość nasypową) [15, 16].

3.2.2. Charakterystyki badanych paliw

Do testów podatności przemiałowej paliw wytypowano trzy rodzaje biomasy: pelety drzewne *B1* i brykiety drzewne barlinek *B2^w* (brykiet stosowany tylko w badaniach wstępnych), pelety słonecznika *B3* oraz cztery rodzaje węgla *W1*, *W2*, *W3* (kamienne) i *W4* (brunatny). Materiały były w stanie powietrzno-suchym, a podatności przemiałowe wg. Hardgrove'a, gęstości nasypowa i rzeczywista badanych paliw były mocno zróżnicowane. Przygotowany materiał próbek zawierał możliwie niskie zawartości frakcji pyłowych.

Gęstości nasypowe klasy < 1,5 mm próbek, ważne z uwagi na objętościowe wypełnienie komory młynka, mieściły się w przedziałach $\rho_n \approx 880-580 \text{ kg/m}^3$ (dla węgla) i $\rho_n \approx 400-385 \text{ kg/m}^3$ (dla toryfikatu i biomasy). Parametry badanych paliw przedstawiono w **Tab. 3-1**.

Tab. 3-1. Charakterystyka wybranych biomas i węgla

| Lp | Parametr | Symb. | Jedn. | <i>B1</i> | <i>B2^w</i> | <i>B3</i> | <i>W1</i> | <i>W2</i> | <i>W3</i> | <i>W4</i> |
|----|---|-------------|-------------------|-----------|-----------------------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| 1 | Wilgoć całkowita | W^r | % | 7,1 | 7,7 | 10,7 | 2,2 | 4,0 | 4,6 | 10,6 |
| 2 | Wilgoć analityczna | W^a | % | 6,8 | 7,4 | 9,5 | 1,1 | 2,8 | 4,2 | 10,1 |
| 3 | Zawartość popiołu | A^a | % | 0,7 | 5,2 | 4,6 | 27,2 | 21,3 | 5,7 | 10,1 |
| 4 | Gęstość nasypowa | ρ_p | kg/m ³ | 400 | 385 | 395 | 880 | 785 | 710 | 585 |
| 5 | Pod. Przemiałowa wg Hardgrove'a | HGI^* | °H | 18 | 16 | 32 | 102 | 65 | 53 | 66 |
| 6 | Granulacja klasy ziarnowej 0 – 1,5 mm (pozostałości nadsitowe dla nadawy) | $R_{0,075}$ | % | 98,1 | 99,4 | 97,9 | 88,2 | 87,5 | 93,4 | 95,4 |
| 7 | | $R_{0,09}$ | % | 97,4 | 99,1 | 97,2 | 85,5 | 84,7 | 92,1 | 93,7 |
| 8 | | $R_{0,12}$ | % | 96,3 | 98,2 | 96,4 | 81,5 | 81,1 | 90,1 | 91,8 |
| 10 | | $R_{0,20}$ | % | 93,2 | 95,6 | 94,3 | 74,3 | 75,0 | 86,4 | 88,1 |
| 11 | | $R_{0,30}$ | % | - | 89,4 | 90,4 | 65,1 | 68,4 | 81,4 | 82,7 |
| 12 | | $R_{0,50}$ | % | 73,9 | 75,6 | 82,4 | 54,1 | 60,4 | 74,1 | 75,6 |
| 13 | | $R_{1,00}$ | % | 13,9 | 32,9 | 53,3 | 28,0 | 38,1 | 50,1 | 50,0 |
| 14 | Śr. masowa średnica cząstki (wejściowa) | $x_{w,50}$ | mm | 0,68 | 0,79 | 1,08 | 0,57 | 0,73 | 1,02 | 1,02 |

* dla 25 g próbek biomasy

3.2.3. Wybrane wyniki testów podatności przemiałowej paliw dla biomas i węgla

Testy przemiałowe dla próbek o różnych masach wykazały, że zwiększenie masy próbki zwiększa stopień rozdrobnienia, a tym samym podwyższa wartości indeksu I_L . Towarzyszyło temu wyższe zapotrzebowanie mocy napędowej i intensywniejsze nagrzewanie się młynka. W przypadku biomasy drzewnej początkowa moc silnika młynka przekraczała poziom 5 kW przy aplikacji próbki > 40 g, stąd w dalszych testach przyjęto tę wielkość jako bazowy rozmiar próbki.

Wyniki badań przemiału biomasy w młynku testowym dla masy 40 g pokazano w **Tab. 3-2**. Otrzymane wyniki pozwoliły na jakościową ocenę zachowania się danej biomasy w trakcie mielenia. Również widoczne są jakościowe korelacje pomiędzy indeksami I_L a HGI (por. **Tab. 3-1** i **Tab. 3-2**). Brykiety drzewne *B2^w* charakteryzowały się najniższą podatnością, dla których stosunek wymiarów nadawy do produktu wynosił $S_{50} = 1,66$, a odpowiadający indeks $I_L = 0,45$, dla warunków zbliżonych do metody *VUK*. Również wartości I_L , jak

i HGI dla tego paliwa były najniższe. Wielkości te dla peletów słonecznika $B3$ były prawie dwukrotnie większe, a dla porównawczego węgla brunatnego $W4$ ponad trzykrotnie.

Zwiększenie masy próbki do 50 g, dla $W3$ i $W4$ (podczas gdy pozostałe parametry testu prócz prędkości obwodowych bijaków pozostały niezmiennione), nie spowodowało większych zmian w granulacji produktu a tym samym nie wpłynęło znacząco na wskaźnik podatności przemiałowej I_L - **Tab. 3-2**. Jednakże podniesienie masy próbki do 60 g spowodowało widoczny wzrost wartości indeksu I_L , przy zachowaniu tendencji do poprawnej klasyfikacji badanych węgli pod względem podatności przemiałowej. Każdorazowo obserwowano pozytywny efekt zwiększenia prędkości obwodowej na końcowe rozdrobnienie produktu. Należy zaznaczyć, że średni rozmiar obydwu próbek węgla kamiennego wynosił 1 mm, czyli dokładnie tyle ile założono w metodzie badań VUK .

Tab. 3-2. Wyniki wybranych badań podatności przemiałowej biomasy

| Lp. | Parametr | Symbol | Jedn. | $B1.1$ | $B1.2$ | $B2.1$ | $B2.2$ | $B3.1$ | $B3.2$ | $W3.5$ | $W3.6$ | $W4.6$ | $W4.7$ |
|-----|--|-------------|-------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| 1 | Masa próbki | m_L | g | 40 | 40 | 40 | 40 | 40 | 40 | 60,0 | 60,0 | 60,0 | 60,0 |
| 2 | Prędk. obwodowa | w_L | m/s | 25,0 | 35,0 | 25,0 | 35,0 | 25,0 | 35,0 | 25,0 | 35,0 | 25,0 | 35,0 |
| 3 | Granulacja produktu (pozostałości nadsitowe w próbce po zmieleniu) | $R_{0.075}$ | % | 83,7 | 73,1 | 88,8 | 82,2 | 80,3 | 75,6 | 66,2 | 63,9 | 50,6 | 47,3 |
| 4 | | $R_{0.09}$ | % | 82,1 | 71,5 | 87,8 | 80,9 | 78,6 | 72,9 | 62,2 | 54,2 | 47,6 | 44,8 |
| 5 | | $R_{0.12}$ | % | 79,1 | 68,7 | 86,2 | 78,6 | 75,4 | 69,4 | 56,7 | 53,4 | 44,0 | 41,2 |
| 6 | | $R_{0.20}$ | % | 71,8 | 61,7 | 81,0 | 72,2 | 66,9 | 59,6 | 48,2 | 45,3 | 38,9 | 36,2 |
| 7 | | $R_{0.30}$ | % | - | - | 68,6 | 58,5 | - | - | - | - | 33,4 | 31,4 |
| 8 | | $R_{0.50}$ | % | 42,4 | 35,6 | 48,8 | 38,4 | 38,6 | 33,0 | 34,1 | 32,7 | 27,6 | 25,9 |
| 9 | | $R_{1.00}$ | % | 11,5 | 9,7 | 9,6 | 6,2 | 13,9 | 13,6 | 19,7 | 18,2 | 13,2 | 11,0 |
| 10 | Śr. masowa średnica cząstki | $x_{p,50}$ | mm | 0,401 | 0,3071 | 0,478 | 0,375 | 0,352 | 0,282 | 0,181 | 0,130 | 0,074 | 0,059 |
| 11 | Stosunek $x_{w,50}/x_{p,50}$ | S_{50} | - | 1,69 | 2,21 | 1,66 | 2,12 | 3,08 | 3,84 | 5,63 | 7,83 | 13,8 | 17,4 |
| 12 | Indeks podatności | I_L | - | 0,58 | 0,81 | 0,45 | 0,63 | 0,68 | 0,88 | 1,35 | 1,77 | 2,68 | 3,13 |

Dodatkowo w celu porównania indeksów uzyskanych w młynku laboratoryjnym z danymi K_{VUK} zawartymi w [9], wykonano badania wybranych próbek węgla kamiennego i brunatnego. Parametry testów, tj. czas testu, prędkość obwodowa bijaków oraz granulacja próbek, pozostały takie same jak w metodzie VUK (5 min, 25 m/s, klasa ziarnowa 0-1,5 mm). Wyznaczone indeksy I_L leżą praktycznie w obszarze indeksów K_{VUK} wyznaczonych dla węgla czeskich, stąd przyjętą metodykę można uznać za porównywalną do metody VUK .

3.3. Modyfikacja metody wyznaczania podatności przemiałowej biomasy

W toku badań stwierdzono, iż wykorzystanie zasad metody VUK nie jest do końca uzasadnione. Oparta na hipotezie Bond'a (wykładnik $n = 1,5$) metoda odnosi się raczej do materiałów kruchych, gdzie o przebiegu procesu może decydować długość pęknięć. Przy materiałach biomasowych posiadających anizotropową, włóknistą strukturę [17, 18], mechanizm destrukcji będzie bardziej energochłonny niż w przypadku węgla (metoda VUK), co odpowiada wyższym wykładnikom w równaniu (3-2) - $n \geq 2$. Również rzeczywisty średni wymiar (nadawy)

próbki klasy 0-1,5 mm do młynka nie zawsze odpowiadał zakładanemu 1 mm, a dążenie do jego uzyskania byłoby procesem bardzo pracochłonnym. Ponadto w większości istniejących metod wyznaczania podatności przemiałowej materiałów stosowane są odpowiednio preparowane próbki bez lub z określoną zawartością frakcji pyłowych, co pozwala na prostsze wyznaczenie przyrostu zawartości frakcji pyłowych w produkcie. W założeniu istniejące sprawdzone metody wyznaczania indeksu opierają się na zasadzie oceny zużycia energii utrzymując ten sam stopień rozdrobnienia próbki (metoda Bond'a *BWT*) lub dostarczenia tej samej energii i określeniu stopnia rozdrobnienia – ilości wytworzonego pyłu (metoda Hardgrove'a).

Moc zużywana w okresowym młynku bijakowym zmieniała się (spadała) wraz ze zmniejszaniem się granulacji próbki w trakcie rozdrabniania, przy czym dla większości próbek w końcowej fazie testu osiąga praktycznie moc biegu jałowego.

Analiza danych uzyskanych dla przebadanych próbek biomasy wskazuje, że udziały nowopowstałego pyłu $D_{0,5} = 1 - R_{0,5}$ są do siebie zbliżone w odróżnieniu od zmian wielkości zużywanej mocy czy energii. Małe zmiany klasy 0-0,5 mm w produkcie były spowodowane mechanizmem działania młynka. Naprężenia destrukcyjne w materiale wynikają ze zmiany pędu cząstek i zależą od względnej prędkości (różnicy prędkości bijaka i cząstek) i rozmiaru cząstek. Stosunkowo grube cząstki są łatwo rozdrabniane natomiast cząstki drobne poruszające się z niższą prędkością względną mogą nie osiągać warunków rozdrabniania. Widoczne jest to w przebiegu rejestrowanej chwilowej mocy młynka. Po pewnym czasie testu, kiedy grubsze cząstki zostały rozdrobnione proces mielenia praktycznie ustaje, na co wskazywało ustalenie się mocy praktycznie na poziomie mocy biegu jałowego. Z tego powodu wprowadzono krótszy czas testu. Stąd za wskaźnik podatności może być przyjęta bezpośrednio wielkość zużytej energii (lub średniej mocy przy tym samym czasie testu), ewentualnie energia odniesiona do ilości nowopowstałego pyłu, np. wielkości $D_{0,5}$.

Z analizy publikacji [3, 5, 14, 12] wynika, że istotą metody wyznaczania podatności przemiałowej materiału powinno być określenie relacji pomiędzy zużyciem energii a rozdrobnieniem próbki w tych samych warunkach prowadzenia testu – wielkości próbki i ustalonego jej składu ziarnowego oraz bezpośredniego pomiaru zużywanej mocy podczas trwania testu, najlepiej przy utrzymaniu tego samego rozdrobnienia produktu (lub ilości uzyskanego pyłu). Mniejsze znaczenie ma prawo rozdrabniania które jest uzgadniane (weryfikowane) dopiero po uzyskaniu danych.

W celu modyfikacji przyjętej metody wyznaczania podatności przemiałowej biomasy postanowiono przeprowadzić badania dla następujących założeń:

- a) Próbki klasy ziarnowej 0,5-1,5 mm (dodatkowo 0,6-1,2 mm) o dotychczas stosowanej masie $m_L = 40$ g i przy stałej objętości $v_L = 90$ cm³ (wg kryterium objętościowego zapelnienia młynka),
- b) Prędkość obwodowa bijaków $w_L = 35$ i 25 m/s, czas mielenia $t_L = 3$ i 5 minut,
- c) Rejestrowanie w pliku chwilowych danych mocy dla wyznaczenia wartości średniej mocy N_L i zużycia energii podczas testu E_{1-2} ,
- d) Analiza sitowa dla określenia średniego masowego wymiaru nadawy, produktu – $x_{50w}, x_{50p}, 0-0,5$ mm – $D_{0,5}$ i innych parametrów,
- e) Wyznaczenie indeksu podatności z wykorzystaniem hipotezy Rittinger'a I_{LR} (analogicznego do metody *VUK*), dla celów porównawczych. Przy założeniu, że dla materiału odniesienia, o rozmiarze produktu $x_{50p,o} = 0,5$ mm i nadawy $x_{50w,o} = 1$ mm, zgodnie z wzorem (3-2) zużycie energii wyniesie $E_o = C_R$. Stąd otrzymuje się zależność na indeks I_{LR} opisaną wzorem (3-4):

(3-4)

$$I_{RL} = \frac{E_{1-2}}{E_o} = \frac{1}{x_2} - \frac{1}{x_1}$$

f) Przyjęcie nowych formuł opisu wskaźników podatności przemiałowej (3-5) i (3-6), zdefiniowanych stosunkiem zużytej podczas testu energii do ilości wytworzonego pyłu (nowopowstałej klasy ziarnowej produktu 0-0,5 mm – $(100 \cdot D_{0.5})$ oraz $(m_L \cdot D_{0.5})$). Wskaźniki te są w pewnej mierze porównywalne do indeksu *HWI* [5] ze względu na uwzględnienie energii potrzebnej do rozdrobnienia próbki. Można je opisać zależnościami:

(3-5)

$$I_{LE} = \frac{E_{1-2}}{100 \cdot D_{0.5}}$$

(3--6)

$$I_E = \frac{E_{1-2}}{m_L \cdot D_{0.5}}$$

3.3.1. Charakterystyka badanych biomas

W badaniach głównych wykorzystano pięć biomas peletyzowanych: pelety drzewne szwedzkie *B1*, pelety słomy zbożowej *B2*, pelety słonecznika *B3* i zielne *B4* oraz mieszanek peletów słonecznika i zielnych *B5* i *B6* (stosowanych w późniejszych badaniach, ze względu na pobór próbek na obiekcie). W **Tab. 3-3** zamieszczono parametry stosowanych paliw biomasowych: zawartość wilgoci w peletach w stanie roboczym W_t^r , zawartość popiołu A^a i części lotnych V^a w stanie analitycznym, podatność przemiałową *HGI* oraz gęstość nasypową próbek do testów ρ_n (gęstość nasypowa próbek biomasy została podana jako zakres przez wzgląd na różne zakresy granulacji próbek oraz zawartości wilgoci stosowane w prezentowanych badaniach).

Tab. 3-3. Charakterystyka badanych biomas

| Lp. | Parametr | Symb. | Jedn. | Pelet drzewny | Pelet słomy | Pelet słonecz. | Pelet zielny | M. pelet 1 | M. pelet 2 |
|-----|--------------------|--------------------------|-------------------|---------------|-------------|----------------|--------------|------------|------------|
| | | | | <i>B1</i> | <i>B2</i> | <i>B3</i> | <i>B4</i> | <i>B5</i> | <i>B6</i> |
| 1 | Wilgoć całkowita | W^r | % | 6,9 | 9,4 | 9,7 | 13,2 | 12,2 | 10,5 |
| 2 | Wilgoć analityczna | W^a | % | 6,1 | 8,3 | 8,9 | 7,2 | 8,2 | 8,0 |
| 3 | Zawartość popiołu | A^a | % | 0,7 | 8,8 | 4,7 | 12,3 | 6,4 | 5,5 |
| 4 | Części lotne | V^a | % | 76,9 | 65,5 | 67,7 | 64,2 | 67,5 | 68,4 |
| 5 | Gęstość nasypowa | ρ_n | kg/m ³ | 434-460 | 315-335 | 425-450 | 388-450 | 421-445 | 407-423 |
| 6 | Pod. przemiałowa | <i>HGI</i> ^{*)} | °H | 17 | 20 | 22 | 30 | 27 | 30 |

**HGI* dla 25 g próbki

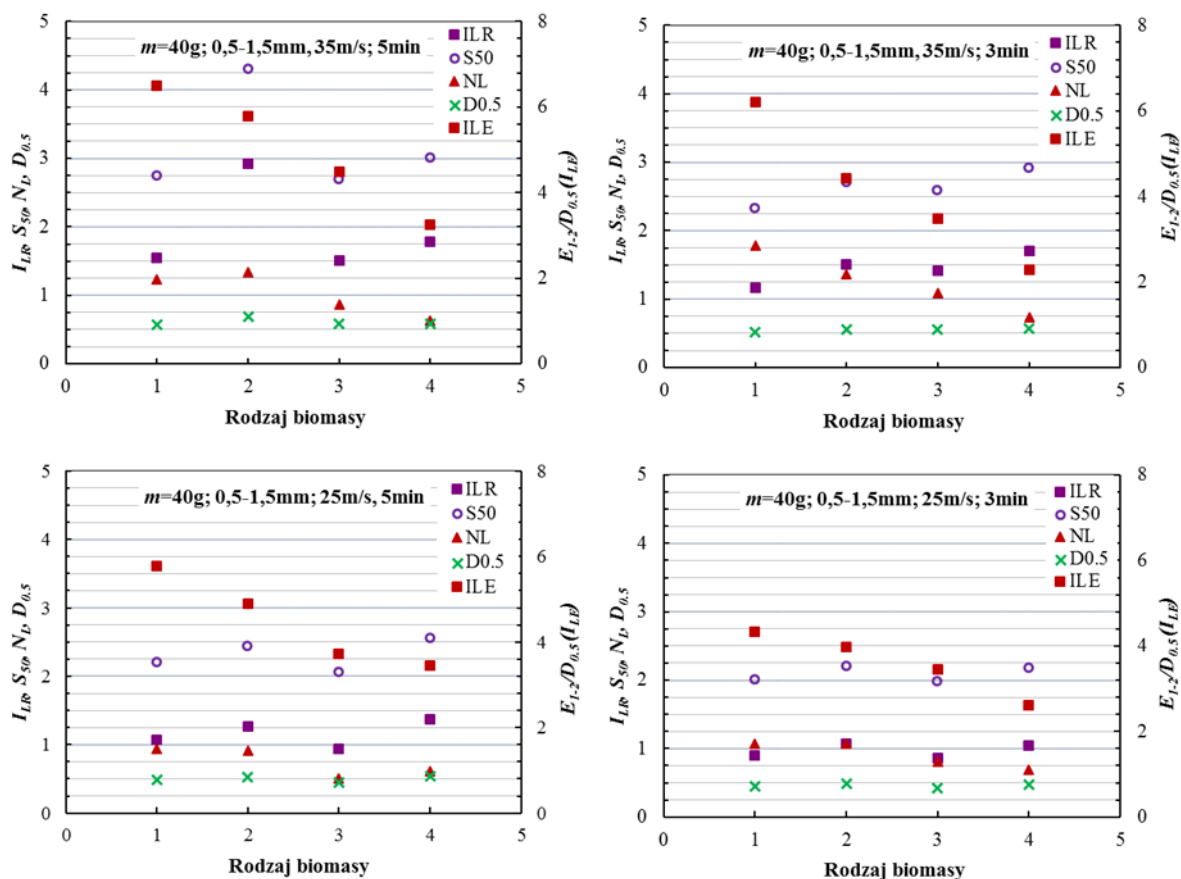
Z uwagi na duży zakres danych, wybrane ważniejsze wyniki zilustrowano na wykresach, dla ułatwienia ich porównania i analizy. Na osiach odciętych biomasę oznaczono zgodnie z przyjętą nomenklaturą bez poprzedzenia jej nazw literą *B*. Na wykresach naniesiono określone wartości: indeksu obliczonego na bazie hipotezy Rittinger'a I_{LR} , obecnie wprowadzonych wskaźników energetycznego I_{LE} oraz I_E , stosunku średnich masowych średnic cząstek nadawy i produktu S_{50} , średniej mocy zużywanej podczas testu N_L i udziału frakcji 0-0,5 mm (pyłu) w próbce $D_{0.5}$.

3.3.2. Testy podatności przemiałowej biomasy przy stałej masie próbki

W aktualnych badaniach, analogicznie jak w etapie poprzednim, wykorzystano również pelety drzewne (szwedzkie) *B1* i pelety słonecznika *B3*. Ze względu na wykonanie pełnego zakresu analizy sitowej dla próbek ztestów wstępnych, możliwe było wyznaczenie dla nich indeksu I_{LR} (podatność przemiałowa wyznaczana na podstawie stopnia rozdrobnienia produktu, dla zadanych warunków testu). Obecne wyniki przy obydwu prędkościach obwodowych 25 i 35 m/s, dla próbek klasy ziarnowej 0,5-1,5 mm (bez frakcji pyłowej), w zakresie indeksu podatności I_{LR} i związanego z nim stopnia rozdrobnienia S_{50} były zbliżone i wykazywały podobne tendencje klasyfikacji biomas, w odniesieniu do wcześniejszych rezultatów badań, tzn. pelety słonecznika wykazywał wyższą podatność przemiałową niż pelety drzewne.

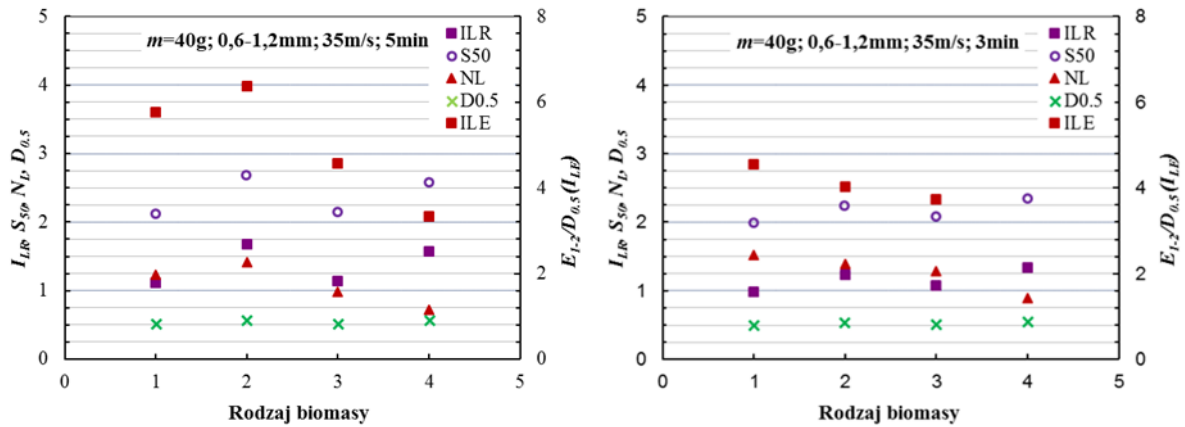
Wyniki I_{LE} uzyskane dla stałej masy próbki ($m = 40g$) były jakościowo zbieżne z dostępnymi danymi literaturowymi dla biomasy drzewnej i słomy [10, 19, 20] – **Rys. 3.4**. Podobne tendencje w podatności przemiałowej wykazały zarówno I_{LE} , jak i wskaźnik I_{LR} na bazie hipotezy Rittinger'a, za wyjątkiem peletów słonecznika *B3*. Może to wynikać po części z właściwości lepkich tej biomasy. Wg indeksu I_{LR} własności przemiałowe słonecznika były porównywalne do biomasy drzewnej, ze względu na porównywalne rozdrobnienie próbek *B1* i *B3* ($D_{0.5} = 0,56-0,58\%$). Taki stan rzeczy nie odpowiada rzeczywistości, gdyż zużycie energii (średniej mocy N_L) w testach było prawie dwukrotnie niższe w przypadku próbek peletu łuski słonecznika. Dlatego wskaźnik I_{LR} , obliczony tylko na bazie średnich wymiarów cząstek próbki i produktu, nie może być uznany za wiarygodny. Należy także zwrócić uwagę, że wskaźnik energetyczny I_{LE} rośnie wraz z pogarszaniem się właściwości przemiałowych biomasy, natomiast indeks I_{LR} zachowuje się odwrotnie. Wyznaczone indeksy I_{LE} oraz I_{LR} – dla peletów zielnych *B4* wskazały na lepsze ich własności przemiałowe niż peletów słonecznika *B3*. W przypadku peletów słomy otrzymane wyniki mogą być zaniżone, ze względu na zbyt dużą objętość próbki w stosunku do pozostałych biomas, co objawiało się nadmiernym nagrzewaniem młynka testowego. Fakt ten był szczególnie widoczny przy czasie testu równym 5 min, podczas którego zużycie energii przez młynek oraz końcowe rozdrobnienie produktu były wyższe w odniesieniu do pozostałych typów biomasy (N_L oraz $D_{0.5}$). Rezultaty testów dla badanych próbek biomasy korelują z danymi literaturowymi dotyczącymi węgla [21, 22], potwierdzając, iż proces mielenia silnie zależy od objętościowego wypełnienia komory młyna.

W warunkach obniżenia prędkości obwodowej bijaków młynka do 25 m/s ogólne tendencje zmian analizowanych wielkości w zależności od rodzaju biomasy są utrzymane, jednak ich wartości i zakres zmian są mniejsze. Ze względu na taki stan rzeczy przyjęto w dalszych testach stałą prędkość 35 m/s.



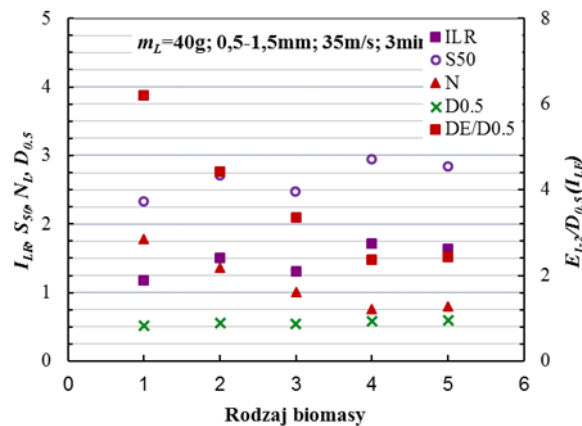
Rys. 3.4. Wyniki testów: $m=40$ g, próbki 0,5-1,5 mm, $w_L = 35$ i 25 m/s, czas $t_L=3$ i 5 min (powyżej)

Jakościowo podobne wyniki testów uzyskano dla próbek o granulacji cząstek 0,6-1,2 mm - **Rys. 3.5**. Względnie niskie wielkości zużywanej mocy N_L i wskaźnika I_{LE} , szczególnie dla biomasy drzewnej $B1$, wskazywały na wzrost podatności przemiałowej prawdopodobnie spowodowanej zbyt dużą destrukcją klasy ziarnowej próbek podczas jej przygotowania, przy użyciu młynka nożowego. Podobnie jak przy testach dla frakcji ziarnowej 0,5-1,5 mm, widoczny jest efekt zbyt dużego zapelnienia młynka przy próbkach słomy $B2$, który oddziałuje w kierunku obniżenia podatności przemiałowej poprzez zwiększenie energochłonności procesu. Tendencje zmian analizowanych wielkości dla pozostałych rodzajów biomasy są zbliżone do testów próbek 0,5-1,5 mm.



Rys. 3.5. Wyniki testów: $m=40$ g, próbki 0,6-1,2 mm, $w_L = 35$ m/s, czas $t_L = 3$ i 5 min (powyżej)

Wyniki uzyskane dla próbek klasy 0,5 – 1,5 mm mielonych przy prędkości $w_L = 35$ m/s w okresie 3 minut pozwoliły na osiągnięcie relatywnie wysokich bezwzględnych wartości, jak i zakresów zmian indeksu I_{LE} (stosunku zużytej energii do ilości pyłu w próbce po zmieleniu – $D_{0.5}$) dla testowanych biomas, jednocześnie korelując z danymi literaturowymi JZE podobnych typów biomas. Czas 3 minut został przyjęty za optymalny gdyż w przypadku testów przemiałowych biomas trwających 5 minut zużycie energii rosło nie przynosząc znaczącej poprawy jakości przemiału próbki (praca na biegu jałowym młynka). W związku z tym można uznać, iż takie warunki testu dla stałej masy próbki umożliwiają odpowiednie zróżnicowanie biomas o podobnych gęstościach pod względem ich podatności przemiałowej - Rys. 3.6.



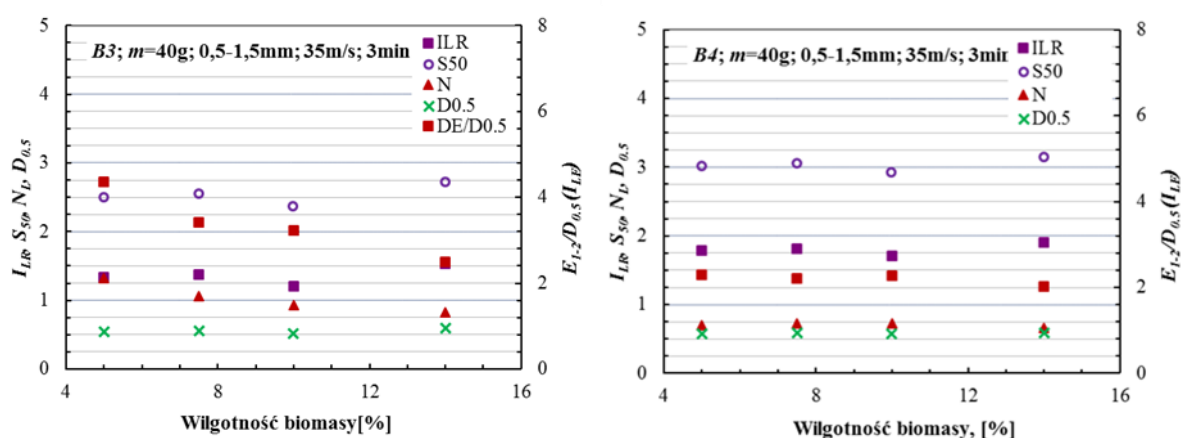
Rys. 3.6. Wyniki badań podatności przemiałowej biomas dla przyjętych warunków testu i stałej masy próbki $m = 40$ g

Wykres uzupełniono o wyniki badań dla mieszanki peletu zielnego i słonecznika – B5 pobranej na obiekcie przemysłowym. Podatności przemiałowe dla B5 były zbliżone do wyników dla peletu zielnego, co wskazuje na to iż mieszanka zawierała przewagę biomasy zielnej (pelety pobrane z silosu na obiekcie przemysłowym, możliwa mała homogenizacja mieszanki).

3.3.3. Testy podatności przemiałowej biomasy przy różnej zawartości wilgoci w próbce

W badaniach wpływu wilgotności biomasy na jej podatność przemiałową skupiono się na następujących typach biomasy: pelety słonecznika *B3*, pelety zielne *B4*. Przyjęty zakres wilgotność próbek 5-14%, wynikał z uwarunkowań stawianych przez międzynarodowe standardy jakości peletów [23, 24, 25] (wilgość < 10-12% w stanie roboczym) oraz wymagań stawianych przez odbiorców peletów biomasowych (wilgość < 15% w stanie roboczym). Dla biomasy w stanie surowym ograniczeniem jest zakres dopuszczalnej wilgotności paliwa dla danego rozdrabniacza np. młyny nożowe do 10-15% i bijakowe do 15-20% (stan roboczy). W przypadku peletów słonecznika, przy zmianie wilgotności próbki z 5 do 14 % (w stanie roboczym) obserwowany był wzrost podatności wykazanej spadkiem zużywanej średniej mocy napędowej - **Rys. 3.7**.

Natomiast w przypadku peletów zielnych wskaźniki podatności i pozostałe wielkości zmieniały się w bardzo niewielkim zakresie w zależności od zawartości wilgoci w próbkach - **Rys. 3.7**.



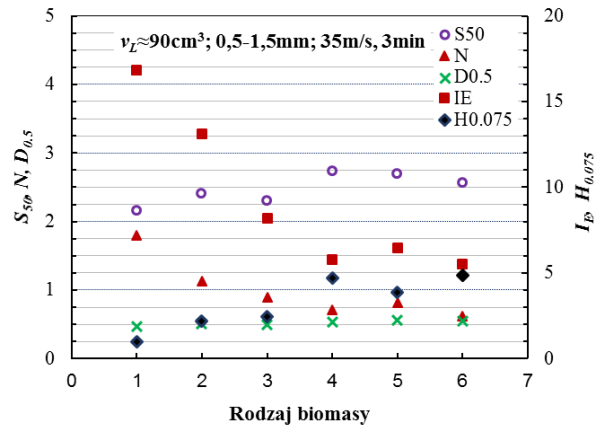
Rys. 3.7. Wpływ wilgotności peletów słonecznika (*B3*) i peletów zielnych (*B4*) na podatność przemiałową

Uzyskane wyniki pozwalają wnioskować, iż zawartość wilgoci ma niejednoznaczny wpływ na podatność przemiałową biomasy, niekoniecznie ściśle korelujący z danymi zawartymi w literaturze. Badania przedstawione w [14, 20, 26, 27, 28] wskazują na rosnącą energię właściwą procesu mielenia (*JZE*), przy wzrastającej zawartości wilgoci (przy niezmiennych pozostałych parametrach testu), dla takich rodzajów biomasy jak: słoma jęczmienna, słoma kukurydzy, kaczany kukurydzy, proso różgowe, zrębki dębowe, zrębki bukowe, zrębki świerkowe, zrębki sosnowe, pelety drzewne, ziarno żyta, ziarno jęczmienia oraz nasiona roślin strączkowych i kukurydzy. Zakres wilgotności testowanych biomas zawierał się w przedziale od 8 do 23% (w stanie roboczym), co wynikało zapewne z zalecanej maksymalnej wilgotności biomasy dla młynów bijakowych i nożowych [10]. Należy zaznaczyć, że w prezentowanych badaniach widoczna była tendencja do zmniejszania się zawartości drobnych frakcji wraz ze wzrostem wilgotności nadawy, co spowodowane mogło być wyższą kohezją wilgotnych cząsteczek biomasy oraz spadkiem ich kruchości [29, 30, 31].

3.3.4. Testy podatności przemiałowej biomasy przy stałej objętości próbki

W nowych warunkach testu powtórzono serię dla stosowanych biomas z uwzględnieniem dwóch pobranych na obiekcie przemysłowym mieszanek peletów *B5* i *B6* (pelet słonecznika i pelet zielny) dla dwóch objętości

próbki $v_L = 85$ i 95 cm^3 . Odpowiadające masy próbek wynosiły od ok. 30 g dla słomy do ok. 41 g dla biomasy drzewnej i słonecznika. Zastosowanie różnej objętości nie powodowało znaczących zmian w indeksie I_E , uwzględniającym masę wytworzonego pyłu m_L . Zwiększenie objętości (równocześnie masy) zwiększało zużycie energii, ale przy tym również ilości frakcji $<0,5 \text{ mm}$ w próbce tak, że wyznaczone wskaźniki I_E były porównywalne. Uśrednione wyniki zilustrowano na **Rys. 3.8**.



Rys. 3.8. Wyniki badań peletów drzewnych (B1), słomy (B2), słonecznika (B3), zielnych (B4) oraz mieszanek słonecznika i zielnych (B5, B6) przy stałej objętości próbki $v_L \approx 90 \text{ cm}^3$

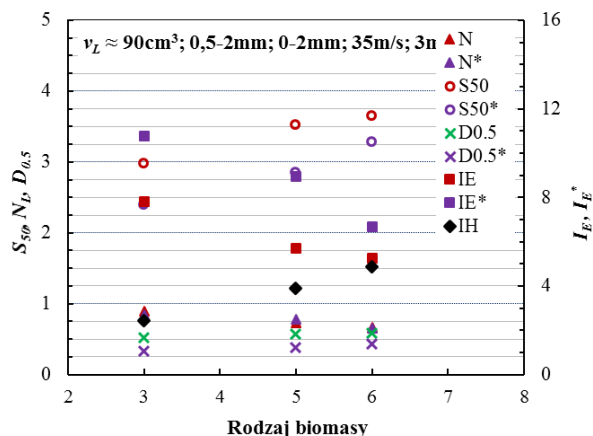
Na **Rys. 3.8** zamieszczono również udziały procentowe frakcji 0-0,075 mm ($H_{0,075}$) wyznaczone w młynku Hardgrove'a przy masie próbki 25 g badanych biomas. Na podstawie masy frakcji $<0,075 \text{ mm}$ wyznaczono indeks HGI (**Tab. 3-3**). Jak wynika z powyższego wykresu wskaźniki $H_{0,075}$ zasadniczo korelują z indeksem wyznaczonym w laboratoryjnym młynku bijakowym. Wyjątkiem są dane dla słonecznika B3, które wykazały właściwości przemiałowe gorsze niż dla indeksu I_E . Z drugiej strony biomasa B6 stanowiąca mieszanekę peletów słonecznika z małym udziałem peletów zielnych wykazała dobre cechy przemiałowe. Wynika stąd, iż taka sama nazwa handlowa nie oznacza tej samej charakterystyki paliwa. Jak wynika z i analizowanych danych, paliwa te mogą znacznie się różnić.

3.3.5. Wpływ składu ziarnowego próbki dla stałej objętości próbki

Dla określenia wpływu granulacji próbki na zmiany indeksów wykonano testy trzech wybranych biomas dla dwóch klas ziarnowych 0,5-2 mm i 0-2 mm. Przy rozdrobnieniu peletów do wymiaru cząstek $<2 \text{ mm}$ destrukcja cząstek ich struktury wewnętrznej była znikoma, co wpływa pozytywnie na otrzymanie wyników bliższych warunkom rzeczywistym. Dane próbek całej klasy 0 - 2 mm na **Rys. 3.9** oznaczono indeksem „*”.

Uzyskane wyniki dla próbek klasy ziarnowej 0,5-2 mm korelowały z danymi dla klasy 0,5-1,5 mm. Natomiast indeksy podatności dla próbek bez odsiania frakcji $<0,5 \text{ mm}$ wykazały gorsze właściwości przemiałowe spowodowane mniejszą intensywnością rozdrabniania w młynku, wynikającą z obecności drobnych frakcji. Przy praktycznie tym samym zużyciu mocy (energii) przyrost wytworzonego produktu (w tym przypadku różnicy zawartości frakcji 0-0,5 mm w próbce po i przed zmieleniem) był mniejszy. Zauważono przy tym, że próbki peletów słonecznika były drobniejsze niż pozostałe, pomimo identycznej procedury przygotowania wszystkich

próbek biomasy. Średnie masowe średnice cząstek dla próbek klasy 0-2 mm do młynka d_{50} wyniosły odpowiednio: 0,77mm (B3), 0,98mm (B5) i 1,05mm (B6), co odpowiadało praktycznie wymiarom struktury peletów.



Rys. 3.9. Wyniki badań wybranych peletów słonecznika (B3) i mieszanek słonecznika i zielnych (B5, B6) przy stałej objętości próbki $v_L \approx 90 \text{ cm}^3$

3.4. Przyjęta metoda wyznaczania podatności przemiałowej biomasy i podsumowanie badań laboratoryjnych

Za miarę indeksu podatności przemiałowej przyjęto indeks I_E , czyli stosunek zużycia energii młynka do masy wytworzonego podczas testu pyłu (klasy ziarnowej 0-0,5 mm) w próbce nadawy 0,5-1,5(2) mm (przy czym indeks I_E rośnie wraz z pogorszącą się podatnością przemiałową):

$$I_E = \frac{E_{1-2}}{m_L \cdot D_{0,5}}$$

Ponieważ bezwzględne wartości, jak i zakres zmian tego wskaźnika przy prędkości bijaków $w_L = 35 \text{ m/s}$ w okresie testu 3 minuty dla próbek o ustalonej objętości $v_L=90\text{cm}^3$ korelowały z danymi literaturowymi JZE zbliżonych typów paliw biomasowych [14, 19, 20, 32, 33], te warunki testu zaakceptowano do przemysłowej weryfikacji opracowanego indeksu.

- Wskaźniki I_L i I_{LR} obliczone na bazie x_{w50} i x_{p50} , były mało zróżnicowane i niejednoznaczne w ocenie właściwości przemiałowych np. peletów słonecznika. Natomiast indeksy podatności przemiałowej dla badanych biomas, wyznaczone w młynku Hardgrove'a, jakościowo lepiej różnicowały cechy przemiałowe, lecz były obarczone błędem wynikającym z zróżnicowanej gęstości testowanych biomas oraz mechanizmu działania młynka Hardgrove'a.
- Indeksy podatności I_E i I_{LE} dla badanych paliw biomasowych wykazały najniższą podatność biomasy drzewnej a najwyższą peletów zielnych. Jednakże wskaźnik I_{LE} , nie uwzględnia masy produkowanego pyłu, a co za tym idzie będzie pozwalał na osiągnięcie zadowalających wyników jedynie przy zbliżonej

gęstości badanych biomas. Można wnioskować, iż przyjęty wskaźnik I_E lepiej klasyfikuje własności przemiałowe różnych rodzajów biomasy.

- c) Wilgotność biomasy może mieć zróżnicowany wpływ na właściwości przemiałowe biomasy. Przy zmianie wilgotności próbki peletów słonecznika z 5 do 14 % (stan roboczy) obserwowano wzrost podatności wykazanej spadkiem zużywanej średniej mocy napędowej. Natomiast w przypadku peletów zielnych podatność przemiałowa praktycznie nie zależała od zawartości wilgoci. Na podstawie badań podatności przemiałowej peletu słonecznika *B3*, peletu zielnego *B4* oraz badań przedstawionych w literaturze można stwierdzić, iż:
- Indeks podatności przemiałowej stosowany w badaniach wpływu wilgotności na mielność biomasy powinien ujmować zarówno zużycie energii na przemiał, jak i końcowe rozdrobnienie produktu (dla nadawy o określonym zakresie wielkości cząstek) lub przyrost wydzielonej frakcji ziarnowej nie występującej w nadawie.
 - Wpływ wilgotności na podatność przemiałową biomasy powinien być badany w zakresie wilgotności stosowanej w danym typie rozdrabniacza. Należy zaznaczyć, że wilgotność biomasy peletyzowanej praktycznie nie przekracza 13%. Przy wilgotniejszym materiale może spadać skuteczność rozdrabniania, wystąpić zatykanie się sit czy nadmierny wzrost oporów przepływu podczas transportu pyłu do kotła.
- d) Wysoka moc silnika młynka testowego podczas mielenia próbek biomasy może wynikać ze zbyt dużego napięcia pasa klinowego łączącego silnik z młynkiem. Ponadto w przypadku zamkniętej komory młynka bijakowego nie występuje odbiór przemielonych frakcji produktu, co wpływa na dużą energochłonność procesu.

4. WERYFIKACJA PRZEMYSŁOWA INDEKSU PODATNOŚCI PRZEMIAŁOWEJ BIOMASY

Celem badań było wyznaczenie zależności jednostkowego zapotrzebowania energii (JZE) od granulacji produkowanego pyłu przy przemiale spalanych w elektrociepłowni dwóch mieszanek peletów słonecznika i zielnych – oznaczonych przez *B5* i *B6* (parametry paliw w **Tab. 3-3**). W zamierzeniu testy miały posłużyć do weryfikacji indeksu podatności przemiałowej biomasy. Na obiekcie pobrano próbki biomasy, które posłużyły do wyznaczenia podatności przemiałowej mieszanek *B5*, *B6* oraz peletu zielnego, na stanowisku badawczym laboratoryjnego młynka bijakowego (dane przedstawione w rozdziale **3.3**).

Instalacja przemiałowa biomasy dla kotła OP-380 (realizującego współspalanie biomasy i węgla), usytuowana w oddzielnym budynku, jest wyposażona w 3 młyny młotkowe *MP* typu DFZC-1265 N firmy Bühler AG [34] o wydajności maksymalnej ok. 10 t/h każdy. Badane młyny wyposażono w młotki długości nominalnej (prostokątne płytki o długości 160 mm) przy zamontowanych sitach wymiaru $\phi 4$ mm i $\phi 2$ mm oraz młyn z młotkami skróconymi (prostokątne płytki o długości 140 mm) z sitami $\phi 4$ mm. Paliwo biomasowe zgromadzone w głównym zasobniku paliwa *ZP* jest transportowane podajnikiem zgrzeblowym *PZ* do mniejszych zbiorników młynowych *L*, z których podajnikami spiralnymi *PS* jest dostarczane do młynów *MP*. Po rozdrobnieniu i odsianiu na sicie otaczającym komorę młyna, produkt jest transportowany pneumatycznie do filtrocyklonu *FA* w celu oddzielenia pyłu od gazu przy użyciu wentylatora odciągowego *WPA*.

Sproszkowana biomasa z filtrocyklonu każdego młyna jest transportowana pneumatycznie dmuchawami *DM* do zasobnika gotowego produktu (pyłu) *ZBK* usytuowanego obok kotłowni. Z kolei pył z zasobnika głównego poprzez przykotłowe zbiorniki retencyjne *ZZB*, przynależne do danej instalacji przemiałowej węgla, jest podawany do palników pyłowych węglowo – biomasowych kotła OP-380. Zasobnik *ZBK* jest wyposażony w system pomiaru masy gotowego produktu m_K kg i strumienia masy pyłu podawanego do kotła B_K t/h.

Młyny młotkowe typu DFZC-1265 N mają zamontowane 76 szt. bijaków o długości nominalnej lub skróconych. Całkowita powierzchnia sita komory mielenia wynosi 200 dcm². Stosowane są wymienne sita o średnicy otworów $\phi 2 - \phi 4$ mm.

4.1. Zakres pomiarów

Ze względu na dostępność badanych biomas oraz konieczność dostosowania się do planów produkcyjnych elektrociepłowni testy zostały zaplanowane na 3 dni pomiarowe, w dalszej części pracy oznaczone jako *Test 1*, *Test 2* oraz *Test 3*. Należy zaznaczyć, iż nie było możliwości powtórzenia któregokolwiek z testów w okresie późniejszym.

Testy przemiałowe dla peletu zielnego *B4* planowano przeprowadzić na trzech wymiennie pracujących młynach – *Test 1*. Obsługa elektrociepłowni udostępniła do testów trzy młyny wyposażone w sita o oczkach wymiaru $\phi 4$ mm, przy czym młyny *MP1* i *MP2* miały zamontowane bijaki skrócone (140 mm), a młyn *MP3* bijaki standardowe (160 mm). Awaria napędu podajnika młyna *MP3* nie pozwoliła na wykonanie pomiarów przy standardowej długości bijaków. Dla pozostałych młynów przeprowadzono testy w zakresie wysterowania podajnika młynowego 40-80%. Kierując się informacjami przekazanymi przez obsługę nastawni przemiatu biomasy elektrociepłowni oraz na podstawie doświadczeń własnych nie przekraczano 80 % wysterowania podajnika.

Badania przemiatu mieszanki peletów słonecznika i zielnych *B5* – *Test2*, prowadzono na dwóch wymiennie pracujących młynach *MP1* i *MP3* wyposażonych odpowiednio w bijaki skrócone i nominalne. Młyn *MP2* nie był sprawny. Początkowo w obu młynach były zamontowane sita o oczkach wymiaru $\phi 4$ mm. Po wykonaniu testów młyna *MP3* sita zostały zmienione na $\phi 2$ mm. Testy prowadzono w zakresie wysterowania podajnika (wydajności) w granicach 40-70 %. Ze względu na niedostatecznie sprawny filtrocyklon młyna *MP1* (przekroczenia dopuszczalnego spadku ciśnienia na tkaninie filtracyjnej) nie było możliwości wyższego obciążenia młyna.

W kolejnych pomiarach – *Test 3*, podczas sproszkowania mieszanki *B6* wykorzystano młyny *MP2* i *MP3* wyposażone w bijaki o długości nominalnej z tym, że młyn drugi miał zamontowane sita o oczkach wymiaru $\phi 4$ mm, a trzeci sita o oczkach $\phi 2$ mm. Według obsługi nastawni młyny zasilane były mieszanką z dużym udziałem peletów słonecznika.

Próbki biomasy do badań laboratoryjnych w ilości ok. 30 kg były pobierane z zasobnika paliwa *ZP* bezpośrednio przed pomiarami. W czasie testów były rejestrowane: parametry młyna i podajnika biomasy, prądy *A* pobierane przez silniki wentylatora *WPA*, dmuchawy *DM* tłoczącej mieszankę do zasobnika głównego pyłu *ZBK*, masa kg pyłu w zasobniku przykotłowym *ZZB* i strumień masy pyłu podawanego do kotła B_K t/h (wyznaczany na podstawie wskazań ruchowych przyrządów). Dla kontroli procesu, odczytywano również wartości innych parametrów, jak ciśnienia i temperatury w wybranych punktach instalacji. Większość danych

mogła być odczytana w nastawni przemiału biomasy. Pobierana moc silników napędowych N została obliczona na podstawie zależności przesunięcia fazowego prądu względem napięcia ($\cos \varphi$) od ich obciążenia prądowego.

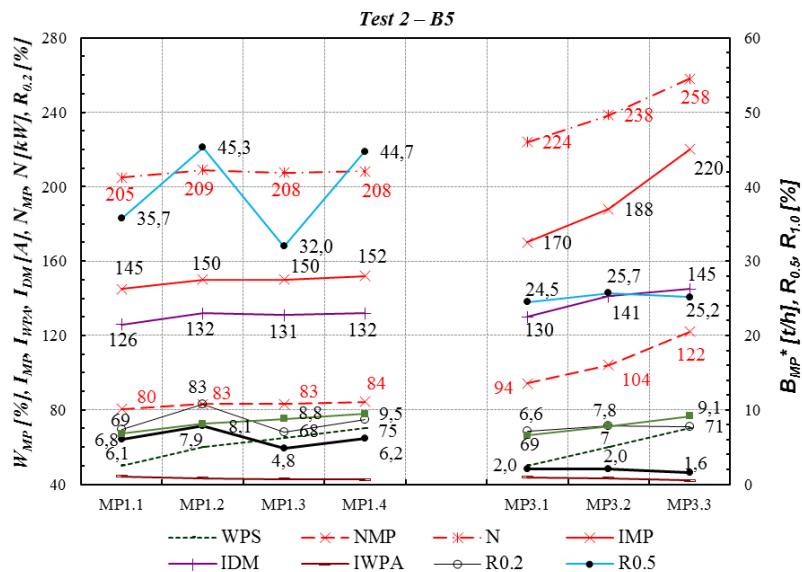
4.2. Wyniki pomiarów młynów bijakowych oraz ich dyskusja

Wyniki pracy instalacji przy przemiale mieszanek peletów słonecznika i zielnych B5 oraz B6 przedstawiają kolejno **Rys. 4.1**, **Rys. 4.2**, **Rys. 4.3**. Wykresy ilustrują wpływysterowania podajnika WPS (tym samym wyznaczone podczas pomiarów wydajności młynów BMP*) na pobór energii (prądów młyna MP, wentylatora WPA i dmuchawy tłoczącej DM) zasadniczych napędów w instalacji i granulację produkowanego pyłu. Jednostkowe zużycie energii młyna (JZE) obliczono i oznaczono na pods jako $e_{MP} = N_{MP} / B_{MP}^*$, natomiast całkowite zużycie energii przez instalację przemiałową jako $e = N / B_{MP}^* = (N_{MP} + N_{WPA} + N_{DM} + N_{PZ}) / B_{MP}^*$, gdzie N_{xx} moce poszczególnych silników urządzeń instalacji.

Podczas testów obserwowano nieznaczłą tendencję do pogarszanie się jakości pyłu ze wzrostem wydajności młyna. Granulacja pyłu praktycznie zmieniała się w bardzo małym zakresie od obciążenia młyna, a zależała głównie od długości bijaków i wymiaru oczka sita. Instalacja nie posiadała możliwości regulacji podciśnienia odciągu pyłu z komory mielenia młyna (sterowania wentylatora WPA), o czym świadczy spadek jego mocy wraz z obciążeniem młyna. Wynikający stąd spadek prędkości odsysania pyłu z młyna oddziałuje w kierunku obniżenia granulacji pyłu i podwyższenia akumulacji w komorze mielenia, która prowadzi do wzrostu poboru mocy silnika młyna.

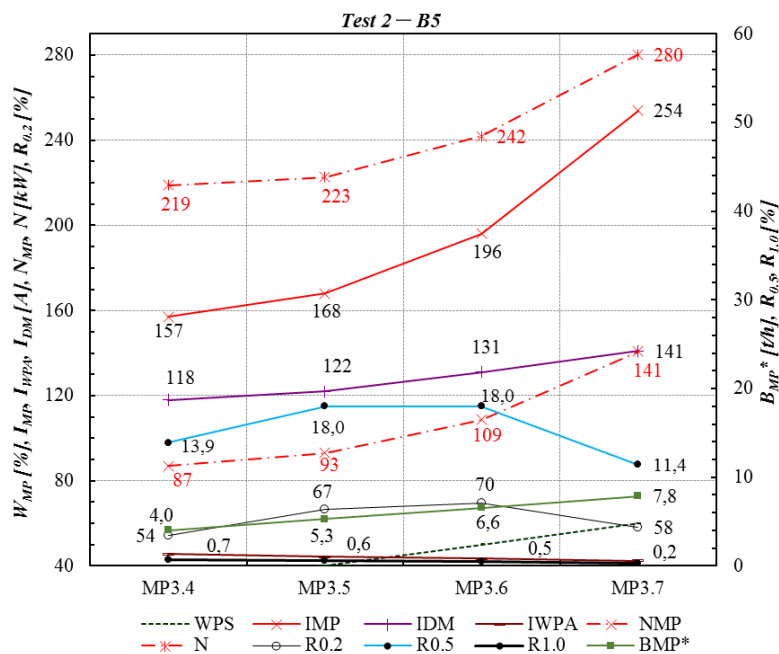
Na **Rys. 4.1** porównano wyniki pracy młyna MPI (bijaki skrócone) i MP3 (z bijakami standardowymi) przy zamontowanych jednakowych sitach $\phi 4$ mm dla mieszanki B5. Zmiany mocy (prądu) silnika młyna MPI były niewielkie i na niższym poziomie, przy produkcji średnio grubszego pyłu w stosunku do wyników młyna z bijakami standardowymi. Całkowita energia proszkowania peletów jest sumą energii rozdzielenia cząstek ich struktury (składnik stały ok. 2,5 Wh/kg dla peletów drzewnych) i energii rozdrobnienia tych cząstek do rozmiaru pyłu. Jak wynika z publikacji [14], prawie jednakowe JZE – ok. 2,5 Wh/kg było osiągnięte po zastosowaniu sit wymiaru ≥ 5 mm dla różnych typów peletów drzewnych. Pomimo zastosowania sit $\phi 4$ mm, zmniejszenie efektu rozdrabniania przez bijaki krótsze mogło spowodować podobny efekt w badanym młynie MPI. Obserwowane wahania granulacji pyłu w instalacji z MPI mogły być wywołane także nierównym podawaniem, zróżnicowanymi własnościami paliwa lub warunkami poboru próbek pyłu (brak możliwości montażu króćców pomiarowych niezbędnych do izokinetycznej aspiracji pyłu biomasowego).

Przy tym samymysterowaniu podajników obu młynów na 70 % (wydajności ok. 9,5 t/h), nastąpił spadek pobieranej mocy o ok. 25 % i wzrost pozostałości nadsitowej w pyłe $R_{0.5}$ z ok. 25 % do ok. 40 % oraz $R_{1.0}$ z 2 % do ok. 6 % w pyłe w instalacji z młynem MPI. Zbliżone wyniki uzyskano w badaniach podczas Testu 1. Wymaganą granulację produkowanego pyłu $R_{0.12} \leq 88$ % (ze względu na stabilność płomienia) i $R_{1.0} \leq 5$ % (właściwe wypalenie cząstek) przyjęto jak przy przemiale zrębków drzewnych [19]. Wg tych zaleceń wyniki uzyskane w młynie z krótszymi bijakami praktycznie spełniały te kryteria. O ile jakość przemiału w tym przypadku nie powinna pogorszyć procesu spalania, skrócenie bijaków pozwala zmniejszyć zużycie energii proszkowania oraz koszty wymiany elementów mielących.



Rys. 4.1. Wyniki badań młynów *MP* z sitami $\phi 4\text{mm}$ dla *B5* (*MP1* bijakami skróconymi, *MP3* z bijakami standardowymi)

Jednostkowe zużycie energii (obliczone wg rejestrowanych prądów) młynów *MP1* i *MP3* wyniosło odpowiednio $e_{MP1} = 8,9 \text{ kWh/t}$ i $e_{MP3} = 13,2 \text{ kWh/t}$ przy ich wysterowaniu na 70 %. Podane obliczeniowe zapotrzebowania energii można łatwo skorygować uwzględniając rzeczywiste wartości $\cos\phi$ dla mierzonego prądu silnika danego urządzenia.

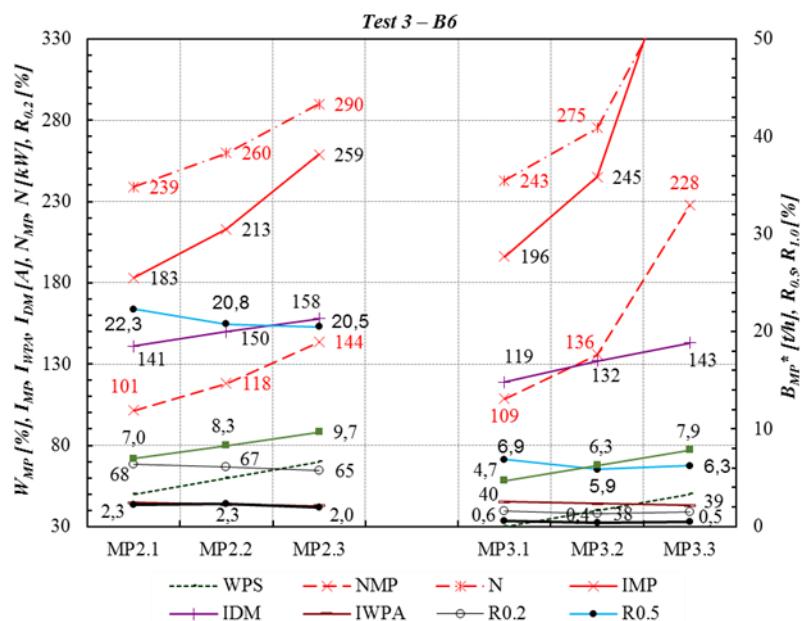


Rys. 4.2. Wyniki badań młyna *MP3* z sitami $\phi 2\text{mm}$ i bijakami standardowymi dla *B5*

Badania młyna bijakowego *MP3* (**Rys. 4.2**) wyposażonego w bijaki standardowe i sita $\phi 2 \text{ mm}$ przeprowadzono głównie w celu zdobycia wiedzy o wpływie granulacji produkowanego pyłu na poziom zużycia

energii w możliwie dużym zakresie granulacji. Z uwagi na mały rozmiar oczka sita, testy wykonano w zakresie wysterowania podajnika 30-60 %, jednak przy najwyższym obciążeniu była już widoczna ciągła akumulacja mielniwa w komorze młyna -powolny wzrost mocy silnika w trakcie pomiaru. Zwiększenie prędkości odsysania (wysterowania wentylatora odciągowego WPA) spowolniłoby ten proces, przy czym poziom zużywanej mocy młyna byłby niższy w tym przypadku, kosztem zwiększenia mocy WPA. Zmiana sita na drobniejsze w młynie MP3 spowodowała znaczny wzrost zapotrzebowania energii młyna przy podwyższeniu mialkości produkowanego pyłu (Rys. 4.2).

Na Rys. 4.3 przedstawiono wyniki Testu 3 badań przemiału mieszanki peletów słonecznika i zielnych (B6) w młynach z bijakami standardowymi wyposażonych w sita $\phi 4$ mm (MP2) oraz $\phi 2$ mm (MP3). Zastosowane wydajności podajników przy przemiale mieszanki B6 były porównywalne do omówionych wcześniej. Jednak prądy (energije) obu porównywanych młynów były wyższe w tym przypadku. Należy zwrócić uwagę, że wydajność młyna MP3 była wyższa niż wynikająca z wysterowania jego podajnika. Przy wysterowaniu podajnika na 50% - $B^* = 7.9$ t/h (pomiar MP3.3), w końcowej fazie testu prąd silnika osiągnął dopuszczalną wartość ok. 440 A, po czym został odciążony. Ze względu na szybko postępującą akumulację mielniwa – przekroczenie zdolności przemiałowej młyn mógł pracować tylko pół godziny. Oznacza to, że wydajność maksymalna MP3 (z sitami $\phi 2$ mm) zmniejszyła się w porównaniu z osiąganą przy mieszance peletów B5.



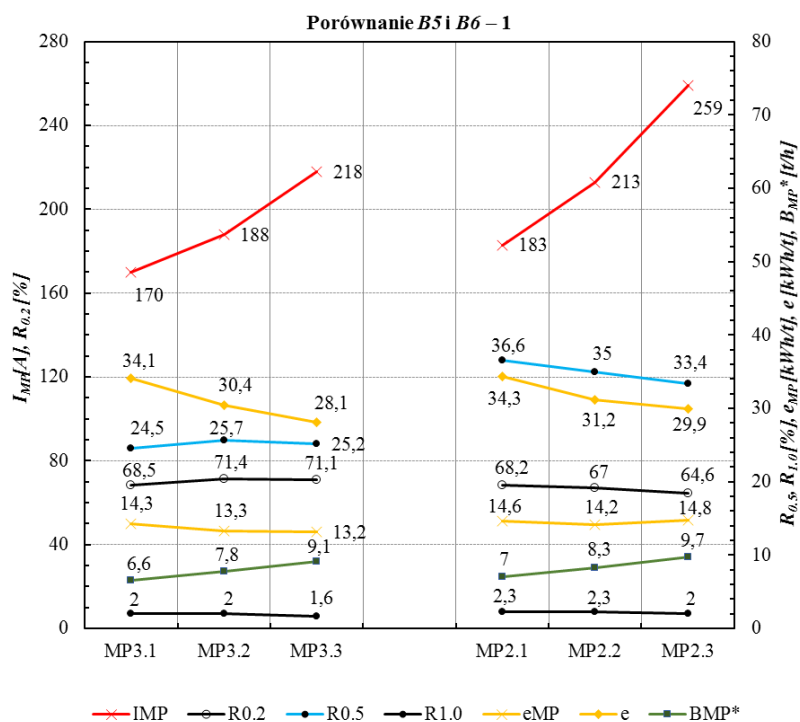
Rys. 4.3. Wyniki badań młynów z bijakami standardowymi dla B6: przy sitach $\phi 4$ mm (MP2) i $\phi 2$ mm (MP3)

Zużycie mocy zależy od wydajności podajnika, jakości przemiału związanej z wymiarem sita, podatności przemiałowej biomasy jak i stopnia zużycia młyna (stanu technicznego). Odmienne wyniki pracy młyna MP3 z sitami $\phi 2$ mm przy przemiale mieszanek peletów B5 i B6 mogą być związane z różnym stopniem zużycia bijaków i sit. Efektem zużycia bijaków jest zmniejszenie ilości produkowanego pyłu, co przy tej samej wydajności podajnika zwiększa cyrkulację w młynie – pobór mocy. Zużycie sita – zaokrąglenie krawędzi otworów (utworzenie wgłębienia wokół oczka), z jednej strony zmniejsza efekt ścinania krawędzi sita, a z drugiej strony może utrudniać wydostawanie się cząstek dostatecznie rozdrobnionych poruszających się prawie równolegle do powierzchni wewnętrznej sita. Te zjawiska przyczyniają się do dodatkowego wzrostu cyrkulacji, a tym samym do

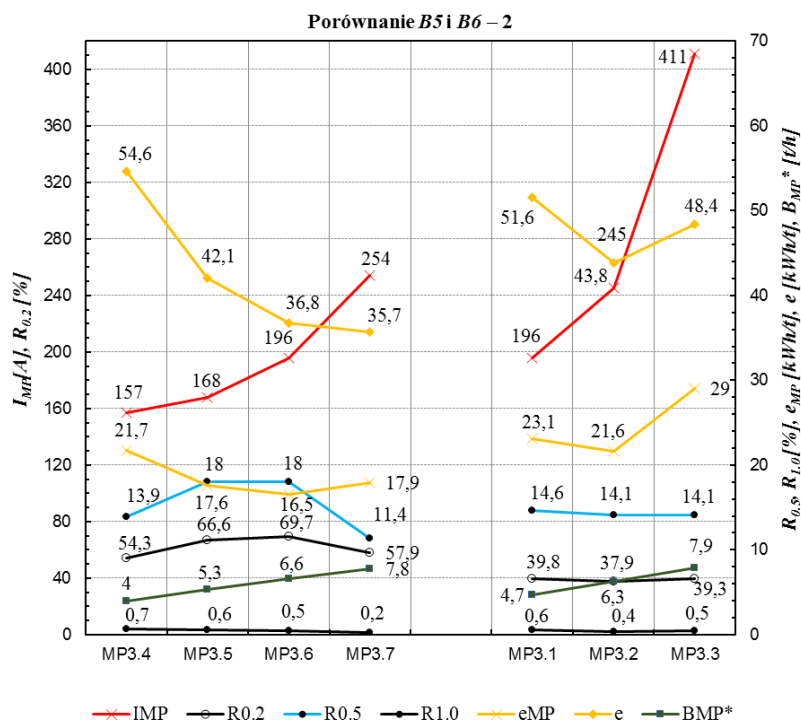
obniżenia wydajności młyna (przy czym wymianę sita w młynie bijakowym zaleca się przy spadku wydajności młyna o 15-20% [35]). O gorszym opróżnianiu cząstek właściwie rozdrobnionych z komory młyna może świadczyć znacząca poprawa jakości przemiału w tym przypadku. Przy tej samej wydajności podajników – ok 6.5 t/h analizowanego młyna, granulacja pyłu obniżyła się z poziomu $R_{0,2}$ ok. 65 % do ok. 40 % i $R_{0,5}$ z ok. 15 % do ok. 6 %. W tych warunkach JZE wzrosło z wartości 16,5 do 21,6 kWh/t (co zgadza się z tendencjami opisanymi w [36, 35, 37]).

Wyznaczona w laboratoryjnym młynie bijakowym podatność przemiałowa mieszanki peletów $B6$ były nieznacznie lepsza niż mieszanki $B5$ (pkt. 3.3.4). Podczas odpowiadających sobie testów przemysłowych, zarówno w przypadku bijaków standardowych oraz sita o oczku $\phi 4$ mm (Rys. 4.4) jak i bijaków standardowych i sita o oczku $\phi 2$ mm (Rys. 4.5), mieszanka peletów $B6$ wykazywała porównywalne lub nieco gorsze własności przemiałowe względem mieszanki $B5$. Należy jednak zaznaczyć, że podczas badań mieszanki $B5$ młyn $MP3$ był wyposażony w nowe sito o oczku $\phi 2$ mm oraz bijaki standardowej długości. Przy analogicznych testach mieszanki $B6$ (bijaki standardowe, sito $\phi 2$ mm), można zauważyć symptomy świadczące o wysokim zużyciu elementów młyna $MP3$, a mianowicie wysoki prąd silnika młyna oraz drobniejsza granulacja produkowanego pyłu.

Poziom zużycia elementów badanych młynów podczas pozostałych pomiarów nie mógł zostać określony, ze względu na rygor pracy bloku.



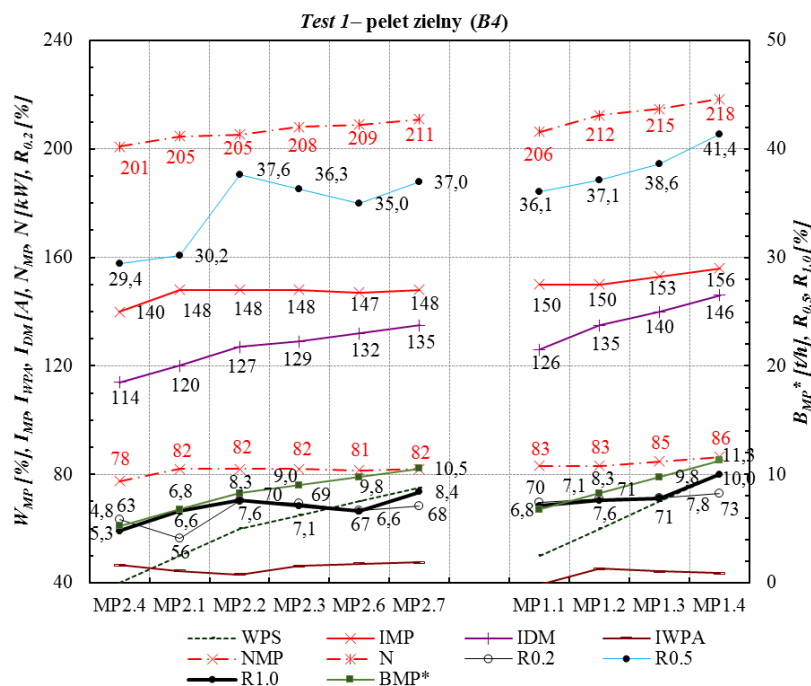
Rys. 4.4. Porównanie wyników badań młynów z bijakami standardowymi i sitami $\phi 4$ mm, przy przemiale mieszanki peletów $B5$ ($MP3$) i $B6$ ($MP2$)



Rys. 4.5. Porównanie wyników badań młynów z bijakami standardowymi i sitami $\phi 2$ mm, przy przemiale mieszanek peletów B5 i B6 (MP3)

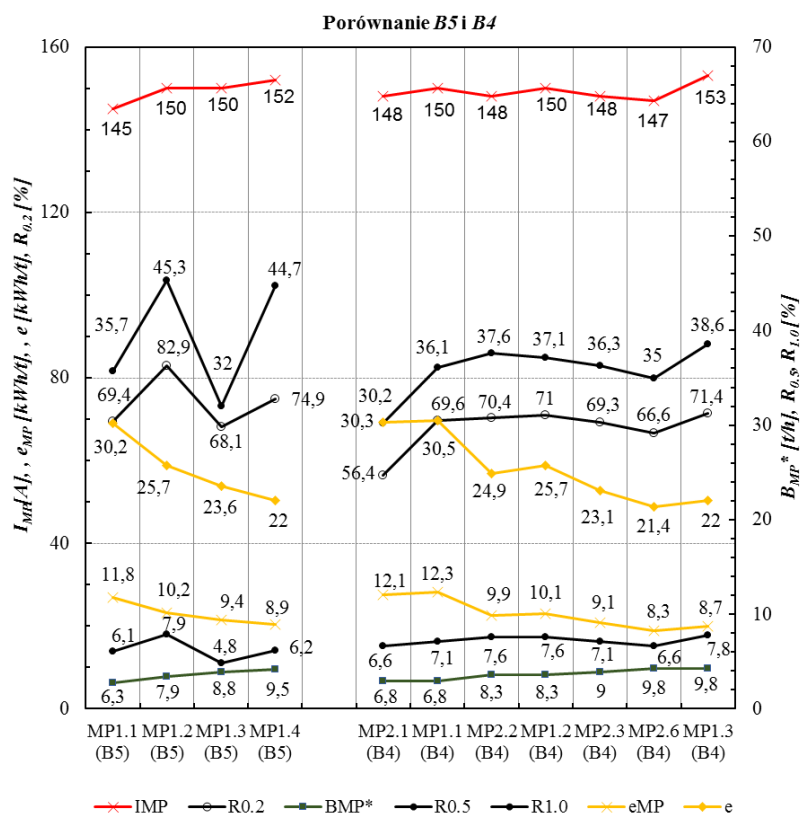
Badania przemiału peletów zielnych (B4) wykonano tylko w instalacjach młynowych wyposażonych w bijaki skrócone. Awaria napędu podajnika młynowego z bijakami standardowymi nie pozwoliła na wykonanie zaplanowanych testów. Młyn MPI był wyposażony w nowe skrócone bijaki - **Rys. 4.6**.

Wyniki przemiału peletu zielnego (B4) w instalacjach z MPI i MP2 były porównywalne. Moc silnika była mało zmienna wraz z wysterowaniem podajnika, przy widocznej tendencji do pogrubiania się produkowanego pyłu. Przy nastawie podajników obu młynów na 75 % (wydajności ok. 10 t/h) pozostałości na sitach 0,12 i 1,0 mm w pyłu wyniosły odpowiednio $R_{0,12} = 80 - 82$ % oraz $R_{1,0} \approx 8$ %. Zgodnie z przyjętymi kryteriami jakości pyłu, udział cząstek większych od 1 mm, warunkujący odpowiednie wypalenie się pyłu, przekraczał przyjętą granicę $R_{1,0} = 5$ %.



Rys. 4.6. Wyniki badań młynów *MP2* i *MP1* z bijakami skróconymi i sitami $\phi 4$ mm, przy przemiale peletu zielnego

W stosunku do przemiału *B5* w młynie *MP1* (*Test 2*, bijaki skrócone, sito $\phi 4$ mm), jakość przemiału peletu zielnego *B4* w młynach *MP2* i *MP1* (*Test 1*, bijaki skrócone, sito $\phi 4$ mm) była średnio nieco wyższa, dla zbliżonych poziomów zużywanej energii elektrycznej podstawowych napędów instalacji - **Rys. 4.7**. Inna tendencja wystąpiła przy wydajności podajników młynów 8,3-8,8 t/h, pozostałości na sitach 0,12 i 1,0 mm w pyłe wyniosły odpowiednio *B5* - $R_{0,12} \approx 79$ % oraz $R_{1,0} \approx 4,8$ %, pelet zielny- $R_{0,12} \approx 80$ -82 % oraz $R_{1,0} \approx 7,6$ %. Trzeba jednak zaznaczyć, iż w przypadku *B5* występowały duże wahania w rozkładzie ziarnowym próbek pyłu, które mogły być spowodowane stanem technicznym młyna lub nierównym podawaniem biomasy przez podajnik.



Rys. 4.7. Porównanie wyników badań młynów z bijakami skróconymi i sitami $\phi 4$ mm, przy przemiele mieszanki peletów B5 i peletów zielnych B6

4.3. Podsumowanie wyników testów instalacji przemiałowej wyposażonej w młyny bijakowe

Na podstawie przeprowadzonych testów przemysłowych na młynach bijakowych można wysnuć następujące wnioski:

- Opierając się na danych pozyskanych podczas przemysłowych testów peletu zielnego B4, mieszanek słonecznika i zielnego B5, B6 można zauważyć, iż badane typy biomasy wykazują bardzo podobne własności przemiałowe. Otrzymane wyniki korelują z wartościami indeksu podatności przemiałowej wyznaczonymi w (rozdz. 3.3.4). W przypadku testów przemysłowych dane wskazują na nieznacznie lepsze cechy przemiałowe peletu zielnego B4 i mieszanki peletów B5, w stosunku do mieszanki B6. Podczas testów laboratoryjnych to mieszanka B6 wykazywała najlepsze własności przemiałowe, należy jednak nadmienić, iż różnice w wartości indeksów podatności przemiałowej były minimalne. Na uzyskane wyniki mogły wpłynąć różny stan zużycia elementów młynów podczas testów oraz sposób poboru próbek pyłu biomasowego (brak możliwości montażu króćców do izokinetycznej aspiracji pyłu).
- Testy obiektowe potwierdziły nieznacznie lepsze własności przemiałowe peletu zielnego w stosunku do mieszanki z przewagą słonecznika (por. wyników B4 i B5), co zgadza się z wartościami indeksów otrzymanymi podczas badań laboratoryjnych.

- Zdolność przemiałowa młyna młotkowego jest zależna od długości bijaków, wymiaru zastosowanych sit, właściwości przemiałowych (indeksu podatności) biomasy oraz jego stopnia zużycia. Badania wykazały, że skrócenie bijaków do 140 mm obniżało zapotrzebowanie mocy napędowej kosztem dopuszczalnego pogorszenia się jakości przemiału
- Stan techniczny, stopień zużycia młotków i sit (ostrość krawędzi otworów) oraz prędkość odsysania pyłu z komory młyna ma wpływ na osiąganą wydajność młyna i zużycie energii. Dla kontroli prędkości odsysania należałoby rozważyć zainstalowanie pomiaru podciśnienia za sitami. Zużycie erozyjne sit zależy od udziału tzw. wolnej krzemionki (piasku) w biomacie, która powinna być uwzględniana w ocenie jakości dostarczanego paliwa.
- Pomiary pokazały że w miarę zużycia bijaków i sit spada wydajność maksymalna z równoczesną poprawą jakości przemiału. Skutkuje to ograniczaniem zdolności przemiałowej instalacji i niepotrzebnie wyższym zapotrzebowaniem energii. Jednak wyznaczone zależności jednostkowego zużycia energii w funkcji granulacji pyłu były porównywane przy przemiale dwóch badanych mieszanek peletów pomimo różnego stopnia zużycia młynów. Efekt niedużego zróżnicowania indeksów podatności obu mieszanek peletów był praktycznie niezauważalny w poziomie *JZE*. Czynnikiem dominującym w *JZE* była granulacja pyłu.

5. TESTY PORÓWNAWCZE PODATNOŚCI PRZEMIAŁOWEJ WYBRANYCH BIOMAS DLA ZADANEJ ENERGII ORAZ PRZY STAŁYM CZASIE TRWANIA TESTU

W celu dalszego doskonalenia opracowanego indeksu podatności przemiałowej biomasy zmodyfikowano istniejący system sterowania laboratoryjnego młynka bijakowego, co pozwoliło na automatyczne wyłączenie młynka po zużyciu zadanej wartości energii przez silnik młynka testowego. Dzięki temu przeprowadzono testy porównawcze dla indeksu podatności przemiałowej biomasy I_E , przy :

- Zadanej energii $E_{1-2} \approx 100$ kJ zużywanej przez silnik laboratoryjnego młynka bijakowego podczas testu, stałej objętości próbki $v_L = 90$ cm³, klasy ziarnowej nadawy 0,5-2 mm, prędkości obwodowej bijaków $w_L = 35$ /s. W tym wypadku czas trwania testu t_L będzie różny dla każdego rodzaju badanej biomasy (gdyż wynika z mocy pobieranej przez młynek testowy, większa moc pobierana – krótszy czas testu).
- Stałego czasu trwania testu $t_L = 3$ min, stałej objętości próbki $v_L = 90$ cm³, klasy ziarnowej nadawy 0,5-2 mm, prędkości obwodowej bijaków $w_L = 35$ /s. W tym wypadku energia zużywana przez silnik młynka będzie E_{1-2} różna dla każdego rodzaju badanej biomasy (gdyż wynika z mocy pobieranej przez młynek testowy oraz różnego czasu osiągnięcia przez silnik młynka biegu jałowego).

5.1. Charakterystyka badanych biomas

Testy porównawcze przeprowadzono dla nowych rodzajach biomasy, gdyż większość próbek wykorzystywanych we wcześniejszych testach została zużyta lub uległa rozkładowi biologicznemu. Zachowały się jedynie próbki peletu drzewnego *B1* oraz peletu słonecznika *B3*, nowe typy biomasy zastosowane w testach oznaczono jako: *B7* – pelet mieszanki słomy pszenicznej (95%) i jęczmiennej (5%), *B8* – pelet zielny (produkowany z pozostałości innych upraw niż pelet *B4*), *B9* – brykiet miskantu olbrzymiego, *B10* – łuska olejowca gwinejskiego (PKS – Palm Kern Shell). Podstawowe parametry badanych paliw przedstawiono w **Tab. 5-1**.

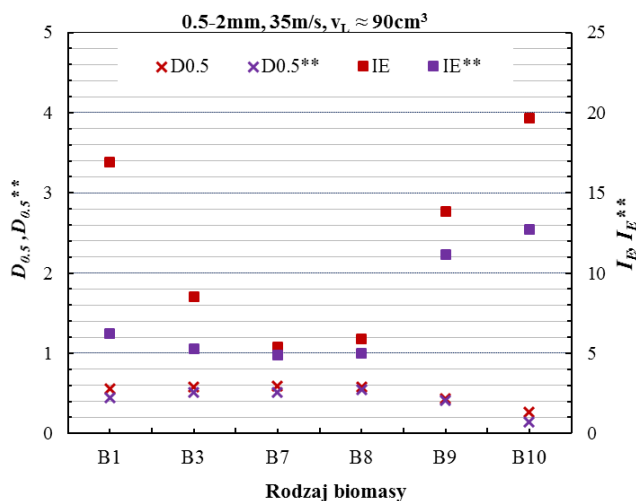
Tab. 5-1. Charakterystyka badanych biomas dla testów założonej energii oraz stały czasie

| Lp. | Parameter | Symb. | Unit. | Wood pellet | Pelet słonecznika | Pelet mieszanki słomy | Pelet zielny | Brykiet miskantu | PKS |
|-----|---|------------|-------------------|-------------|-------------------|-----------------------|--------------|------------------|------------|
| | | | | <i>B1</i> | <i>B3</i> | <i>B7</i> | <i>B8</i> | <i>B9</i> | <i>B10</i> |
| 1 | Wilgoć całkowita | W^r | % | 7,3 | 9,7 | 11,6 | 9,6 | 10,6 | 18 |
| 2 | Wilgoć analityczna | W^a | % | 5,9 | 8,9 | 8,8 | 8,6 | 5,8 | 9,9 |
| 3 | Zawartość popiołu | A^a | % | 0,7 | 4,7 | 11,3 | 4,6 | 4,6 | 2,7 |
| 4 | Części lotne | V^a | % | 76,9 | 67,7 | 77,2 | 78,3 | 80,5 | 65,8 |
| 5 | Gęstość nasypowa | ρ_n | kg/m ³ | 439 | 417 | 422 | 433 | 244 | 667 |
| 6 | Granulacja klasy ziarnowej 0,5 – 2 mm (pozostałości nadsitowe dla nadawy) | $R_{0.6}$ | % | 79,9 | 71,6 | 87,1 | 77,5 | 80,2 | 96,2 |
| 7 | | $R_{0.8}$ | % | 59,9 | 57,9 | 75,4 | 60,4 | 63,8 | 90,5 |
| 8 | | $R_{1.0}$ | % | 42,6 | 45,8 | 63,6 | 46,6 | 48,8 | 83,2 |
| 9 | | $R_{1.2}$ | % | 28,4 | 36,7 | 50,9 | 33,1 | 30,5 | 72,7 |
| 10 | | $R_{1.5}$ | % | 14,3 | 19,9 | 32,3 | 16,2 | 15,9 | 8,1 |
| 11 | Śr. średnica cząstki (wejściowa) | $x_{w,50}$ | mm | 0,91 | 0,93 | 1,19 | 0,95 | 0,98 | 1,32 |

5.2. Wyniki testów porównawczych, ich dyskusja oraz rekomendowana metoda wyznaczania podatności przemiałowej biomasy

Z uwagi na duży zakres danych wybrane ważniejsze wyniki zilustrowano na wykresach dla ułatwienia ich porównania i analizy. Wyniki otrzymane dla zadanej energii zużywanej przez silnik młynka podczas testu oznaczono indeksem „**”. Na osiach odciętych umieszczono oznaczenia kolejnych rodzajów biomas. Na wykresach naniesiono określone wartości: I_E – indeksu podatności przemiałowej biomasy przy stałym czasie testu $t_L = 3$ min, I_E^{**} – indeksu podatności przemiałowej biomasy przy stałej energii zużytej podczas testu $E_{1-2} \approx 100$ kJ, udziału frakcji 0-0,5 mm (pyłu) w próbce $D_{0.5}$ – dla stałego czasu oraz $D_{0.5}^{**}$ – dla stałej energii.

Uśrednione wyniki testów przemiałowych dla trzech próbek każdej z badanych biomas przedstawiono na **Rys. 5.1**.



Rys. 5.1. Wyniki testów przemiałowych wybranych biomas dla założonej energii używanej przez silnik młynka testowego $E_{1-2} \approx 100$ kJ oraz przy stałym czasie trwania testu $t_L = 3$ min

Na podstawie otrzymanych indeksów podatności przemiałowej biomasy można wnioskować, iż założenie lepszej kategoryzacji różnych rodzajów biomasy pod względem ich mielności przy zastosowaniu indeksu, opartego o założoną energię zużywaną przez silnik młynka podczas testu, było błędne. Wynika to z mechanizmu rozdrabniania młynka bijakowego, gdzie zużywana moc napędowa silnie zależy od chwilowej granulacji próbki w trakcie testu (dyskusja w rozdz. 3.3). Tempo spadku mocy zależy głównie od wytrzymałości danego materiału na uderzenie. Po pewnym czasie trwania testu osiągnięta jest praktycznie moc biegu jałowego, co oznacza zahamowanie procesu mielenia. Potwierdzały to zbliżone granulacje produktu badanych biomas uzyskane zarówno dla czasu 3, jak i 5 min (rozdział 3.3.2).

Z uwagi na duże zróżnicowanie własności wytrzymałości biomasy (np. drewna i odpadów słonecznika), zapotrzebowanie energii, a także czas procesu (związany z kinetyką rozdrabniania [38]) będą znacząco różne dla zapewnienia odpowiedniego stopnia rozdrobnienia próbki. Przy czym błąd wynikający z przyjęcia stałego czasu testu (zużycia energii na bieg jałowy młynka, po wymieleniu próbki biomasy o wysokiej podatności przemiałowej), będzie wydatnie mniejszy niż błąd wynikający z przyjęcia stałej energii używanej podczas testu. Należy zaznaczyć, że stosowane dla węgla testy Bond'a i inne semi-przepływowe [39, 40], jako metody uważane za najbardziej wiarygodne, utrzymują te same rozdrobnienie próbki, jednakże skomplikowałyby to mocno procedurę wyznaczania podatności przemiałowej biomasy. Przy stałej energii używanej podczas testu, np. dla próbki drewna B1, znacząco skracamy czas testu przy względnie niskim jej rozdrobnieniu, natomiast dla materiału miękkiego (peletu mieszanki słom B7) nadmiernie go wydłużamy.

Tendencje dla indeksu opartego o zadaną moc i stały czas korelują ze sobą w pewnym stopniu, lecz bezwzględne wartości, jak i zakres zmian wartości indeksu podatności przemiałowej oraz stopnia rozdrobnienia produktu $D_{0,5}$ są wyższe dla indeksu I_E opartego na stałym czasie trwania testu.

Ponadto w przypadku testów dla stałego czasu trwania przemiału używana przez młynek energia zawsze przekraczała poziom 100 kJ. Zwiększenie poziomu energii, używanej przez silnik młynka podczas testu dla

zadanego zużycia energii, mogłoby doprowadzić do znaczącego wydłużenia czasu mielenia dla bardziej podatnych typów biomasy, a tym samym do znacznego zafałszowania otrzymanych wyników, ze względu na długi czas pracy młynka przy mocy zbliżonej do biegu jałowego. Przyjęta metoda dla ustalonego czasu 3 min jest pewnym kompromisem pomiędzy dokładnością a komplikacją testu.

Na podstawie uzyskanych wyników rekomenduje się wyznaczanie podatności przemiałowej różnych typów biomasy poprzez indeks I_E (opisany zależnością (3--6)), dla następujących warunków testu: czasu trwania testu $t_L = 3$ min, klasy ziarnowej nadawy 0,5-2 mm, prędkości obwodowej bijaków $w_L = 35$ m/s, stałej objętości próbki $v_L = 90$ cm³ (w przypadku zastosowania młynka o innej objętości komory mielenia, objętość próbki także musi ulec zmianie).

6. WNIOSKI

Wyniki uzyskane w toku rozważań prowadzonych podczas realizacji pracy pozwalają na wyciągnięcie następujących wniosków:

- Wyniki testów laboratoryjnych i przemysłowych wskazują, iż podatność przemiałową różnych rodzajów biomasy, mielonej w młynach bijakowych, można jednoznacznie określić poprzez indeks I_E (im wyższa jest wartość indeksu, tym gorsza jest podatność przemiałowa badanej biomasy), wyrażony jako stosunek zużycia energii na przemiał próbki do masy wytworzonego podczas testu pyłu (klasy ziarnowej 0-0,5 mm):
- Badania wskazują, iż optymalne parametry testu to: klasa ziarnowa nadawy 0,5-2 mm, prędkość obwodowa bijaków $w_L = 35$ m/s, czas testu $t_L = 3$ minuty oraz stała objętość próbki nadawy.
- Otrzymane rezultaty testów przemysłowych, mielenia peletu zielonego B4 oraz mieszanek peletu zielonego i słonecznika B5 i B6 w młynach bijakowych, korelują z wartościami indeksu podatności przemiałowej I_E , wyznaczonymi przy użyciu laboratoryjnego młynka bijakowego, tym samym wskazując na praktyczną użyteczność zaproponowanego wskaźnika.
- Ze względu na zróżnicowany zakres gęstości paliw biomasowych, celowe jest stosowanie w teście podatności przemiałowej biomasy próbek o stałej objętości, zamiast próbek o stałej masie, czego dowiodły testy przemiałowe dla badanej gamy biomas.
- Uwzględnienie w indeksie I_E masy produkowanego pyłu m_L wynika z wymagań stawianych przez producentów energii elektrycznej względem spalanych biomas. Jednym z głównych parametrów przydatności paliwa do zastosowań energetycznych jest osiągany masowy strumień paliwa (pyłu) doprowadzanego do kotła (zasobnika biomasy). W przypadku biomas o niskiej gęstości istnieje ryzyko niedotrzymania wymaganego strumienia produkowanego pyłu przez instalacje przemiałową.
- Wskaźniki mielności (oparte na hipotezie Rittinger'a), były mało zróżnicowane i niejednoznaczne w ocenie właściwości przemiałowych np. peletów słonecznika. Natomiast indeksy podatności przemiałowej dla badanych biomas, wyznaczone w młynku Hardgrove'a, jakościowo lepiej różnicowały cechy przemiałowe, lecz były obarczone błędem wynikającym ze zróżnicowanej gęstości testowanych biomas. Ponadto sytuowały się poza zakresem stosowanej skali - $\leq 30^\circ\text{H}$. Test Hardgrove'a został opracowany do wyznaczania podatności przemiałowej węgla w młynach miazdzących, przez co nie oddaje w sposób właściwy procesu przemiału biomasy w młynach bijakowych.

- Zawartość wilgoci w biomacie może mieć zróżnicowany wpływ na właściwości przemiałowe odmiennych typów biomas. Przy zmianie wilgoci próbki peletów słonecznika z 5 do 14 % (stan roboczy) obserwowano wzrost podatności przemiałowej wykazanej spadkiem zużywanej średniej mocy napędowej. Natomiast w przypadku peletów zielnych podatność przemiałowa praktycznie nie zależała od zawartości wilgoci.
- Indeks podatności przemiałowej stosowany w badaniach wpływu wilgoci na mielność biomasy powinien ujmować zarówno zużycie energii na przemiał, jak i końcowe rozdrobnienie produktu (dla nadawy o określonym zakresie wielkości cząstek) lub przyrost wydzielonej frakcji ziarnowej nie występującej w nadawie. Wzrost zawartości wilgoci w próbce może powodować zmniejszenie się liczby drobnych cząstek w produkcie końcowym, a co za tym idzie indeksy podatności przemiałowej oparte tylko na końcowym rozdrobnieniu produktu (czy przyroście wydzielonej frakcji) mogą okazać się niemiarodajne.
- Przeprowadzone badania wykazały iż niecelowym jest stosowanie w testach na podatność przemiałową biomasy próbek o zbyt dużym stopniu rozdrobnienia próbki wejściowej. W przypadku klasy ziarnowej biomasy 0,6-1,2 mm wartość indeksu podatności przemiałowej ulegała zafałszowaniu ze względu na większy stopień destrukcji struktury materiału niż dla wyższych zakresów wielkości cząstek próbki np. 0,5-2mm i oraz 0-2mm. Zrezygnowano z zastosowania frakcji 0-2mm w przyjętych warunkach testu wyznaczania indeksu I_E przez wzgląd na zachowanie prostoty proponowanej metody określania podatności przemiałowej biomasy.
- Założenie o lepszej kategoryzacji różnych rodzajów biomasy pod względem mielności przez indeks oparty o zadaną energię zużywaną przez silnik młynka podczas testu, było niewłaściwe. Zarówno bezwzględne wartości, jak i zakres zmian wartości indeksu podatności przemiałowej oraz stopień rozdrobnienia produktu $D_{0,5}$ są wyższe dla indeksu podatności przemiałowej I_E wyznaczonego dla stałego czasu trwania testu $t_L = 3$ minuty. Ułatwia to kategoryzację biomas.
- Przedstawione w pracy badania mogą stanowić cenny materiał porównawczy dla badań przemiałowych biomas, ponieważ w literaturze nie występują badania nad podatnością przemiałową biomasy w okresowych młynkach bijakowych.

7. LITERATURA

- [1] Communication from the Commission to the European Parliament, the Council, the European Economic and Social Committee and the Committee of the Regions: A policy framework for climate and energy in the period from 2020 up to 2030. COM/2014/015 final .
- [2] Projekt Ministerstwa Rozwoju: Strategia na Rzecz Odpowiedzialnego Rozwoju. 29 lipiec 2016.
- [3] Jankovic A., Dundar H., Mehta R.: Relationships between comminution energy and product size for a magnetite ore. *Journal of the South African Institute of Mining and Metallurgy* 2010, Volume 110, Issue 3, pp. 141-146.
- [4] Tora B., Fecko P., Nowak A., Tajchman Z.: Badanie zależności podatności na mielenie od wybranych parametrów węgla kamiennego. *Górnictwo i Geoinżynieria* 2010, R. 34, z. 4/1.
- [5] Van Essendelft D. T., Zhou X., Kang B. S. –J.: Grindability determination of torrefied biomass materials using the Hybrid Work Index. *Fuel* 2013, Volume 105, pp. 103–111.
- [6] PN-77/G-04529.: Węgiel kamienny i brunatny - Oznaczanie podatności przemiałowej metodą VUK.
- [7] Vodáček O.: Melitelnost tuhých paliv. *Energetika, Odborný časopis pro elektrárrenství teplárrenství a použití energie.* 1955, č 5.
- [8] Stuchlik V.: Melitelnost černých uhlí. *Hutnické listy, časopis Českoslovesnkých hutí n.p. a Československého odborného spolku slévárenského.* 1974, č 1.
- [9] Vodáček O.: Určování melitelnosti uhlí a jiných látek metodou VUK. *STROJÍRENSTVÍ* 1966, č. 10.
- [10] Kratky L., Jirout T.: Biomass Size Reduction Machines for Enhancing Biogas Production. *Chemical Engineering Technology* 2011, Volume 34, No. 3, pp. 391-399.
- [11] Rayaprolu K.: *Boilers: A Practical Reference.* CRC Press 2012.
- [12] Hukki R.T.: Proposal for a solomnic settlement between theories of von Rittinger. *Kick and Bond. Transactions of AIME* 1962, Volume 223, pp. 403-408.
- [13] Reddy I.G.: Energy requirements in size reduction of solids. *Proceddings of National Seminar on Mineral Processing and IX Annual Technical Convention of the Indian Institute of Mineral Engineers, 11th & 12th March 1985, National Metallurgical Laboratory (CSIR), Jamshedpru.*
- [14] Temmerman M., Daugbjerg Jensen P., Hérbert J.: Von Rittinger theory adapted to wood chip and pellet milling, in a laboratory scale hammer mill. *Biomass and Bioenergy* 2013, Volume 56, pp. 70-81.
- [15] Mroczek K., Tymoszuik M., Mędrych J.: Opracowanie metodyki i wyznaczenie indeksu podatności przemiałowej BGI dla wybranych rodzajów biomasy przy użyciu laboratoryjnego młynka bijakowego. Raport Wykonany na Wydziale Inżynierii Środowiska i Energetyki Politechniki Śląskiej w Gliwicach w ramach umowy ramowej EDF Polska S.A. oraz Konsorcjum Uczelni Polskich Technicznych, Gliwice 2013.
- [16] Mroczek K., Tymoszuik M., Kubiczek H.: Methodology of biomass grindability determination. *12th International Conference on Boiler Technology, Szczyrk 2014, Conference materials,* pp. 311-312.
- [17] Tumuluru J.S., Wright C.T., Hess J.R., Kenney K. L.: A review of biomass densification systems to develop uniform feedstock commodities for bioenergy application. *Biofuels, Bioproducts and Biorefining* 2011, Volume 5, pp. 683-707.
- [18] Yu M., Womac A. R., Pordesimo L. O.: Review of Biomass Size Reduction Technology. *ASAE Annual International Meeting 2003, Las Vegas, Nevada.*
- [19] Esteban L.S., Carrasco J.E.: Evaluation of different strategies for pulverization of forest biomasses. *Power Technology* 2006, Volume 166, pp. 139-151.
- [20] Mani S., Tabil L.G., Sokhansanj S.: Grinding performance and physical properties of wheat and barley straws, corn stover and switchgrass. *Biomass and Bioenergy* 2004, Volume 27, pp. 339-352.
- [21] Agus F., Waters P.L.: Determination of the grindability of coal, shale and other minerals by a modified Hardgrove machine method. *Fuel* 1971, Volume 50, pp. 405–431.
- [22] Hardgrove Grindability Index Report. *Australian Coal Association Research Program* 2008.
- [23] ONORM M 7135.: 2000: Presslingeaus naturbelassenem Holz oder naturbelassener Rinde, Pelletsund Briketts; Anforderungen und Prubestimmungen.
- [24] DIN 51731.: Prufungfester Brennstoffe — Prefilinge aus naturbelassenem Holz - Anforderungen und Prufung.
- [25] SS 18 71 20. 1998: Biobranslen och torv-Branslepellets-Klassificering. (Biofuels and peat-Fuel pellets-Classification). *Swedish Standards Institution. Stockholm: SIS.Standard*
- [26] Laskowski J., Lysiak G., Melcion J. P.: Cereal grain resistance analysis in the aspect of energy utilization in the process of disintegration. *International Agrophysics* 1998; Volume 12, pp. 205-208.

-
- [27] Laskowski J., Lysiak G.: Use of compression behaviour of legume seeds in view of impact grinding prediction. *Powder Technology* 1999, Volume 105, pp. 83-88.
- [28] Probst K. V., Kingsly A. R. P., Pinto R. L., Bali R., Krishnaumar P., Ileleji K. E.: The effect of moisture content on the grinding performance of corn and corncobs by hammermilling. *Transactions of ASABE* 2013, Volume 56 (3), pp. 1025-1033.
- [29] Schofield C.: Dust generation and control in materials handling. *Bulk Solids Handling* 1981, Volume 1(3), pp. 419-427.
- [30] Plinke M. A. E., Leith, D. M. Boundy, and F. Loffler. Dust generation from handling powders in industry. *American Ind. Hyg. Assoc. J.* 1995, Volume 56(3), pp. 251-257.
- [31] Pujara, C., Kildsig D. O.: Effect of individual particle characteristics on airborne emissions. In *Containment in the Pharmaceutical Industry 2001*, J. P. Wood, ed. New York, N.Y.: Marcel Dekker, 29-55.
- [32] Cadoche L., López G. D.: Assessment of size reduction as a preliminary step in the production of ethanol from lignocellulosic wastes. *Biological Wastes* 1989, Volume 30, pp. 153–157.
- [33] Williams O., Newbolt G., Eastwick C., Kingman S., Giddings D., Lormor S., Lester E.: Influence of mill type on densified biomass comminution. *Applied Energy* 2016, Volume 182, pp. 219-231.
- [34] Młyn młotkowy DFZC-66504 – instrukcja obsługi.
- [35] Heimann M.: *Hammermill maintenance for top grinding performance at a lower operating cost.* CSC Publishing 2014.
- [36] Molendowski F.: *Energy consumed in the disintegration process of raw plant material on the example of corn cob pith*, Institute of Agricultural Engineering, Wrocław 2005.
- [37] *Economics of Grinding for Pelleted Feeds.* CPM Roskamp Champion brochure.
- [38] Austin L. G., Shah J., Wang J., Gallagher E., Luckie P. T.: An analysis of Ball-and-Race milling, Part I: The Hardgrove Mill. *Powder Technology* 1981, Volume 29, pp. 263-275.
- [39] Bond, F.C.: The third theory of comminution. *Trans. AIME* 1952, vol. 193, pp. 484–494.
- [40] Werner V., Żelkowski J., Schoöner K.: Lab-scale roller table mill for investigating the grinding behavior of coal. *Powder Technology* 1999, Vol. 105, pp. 30-38.