

Dariusz URBANIAK<sup>1</sup>, Tomasz WYLECIAŁ<sup>2</sup>, Monika ZAJEMSKA<sup>2</sup>

e-mail: urbaniak@imc.pcz.czest.pl

<sup>1</sup> Instytut Maszyn Ciepłych, Wydział Inżynierii Mechanicznej i Informatyki, Politechnika Częstochowska, Częstochowa<sup>2</sup> Zakład Pieców Przemysłowych i Ochrony Środowiska, Wydział Inżynierii Procesowej, Materiałowej i Fizyki Stosowanej, Politechnika Częstochowska, Częstochowa

## Prognozowanie uziarnienia produktu rozdrobnienia biomasy

### Wstęp

Polska jako członek *Wspólnoty Europejskiej* zobowiązana jest do wprowadzenia przedsięwzięć będących konsekwencją zapisów pakietu klimatycznego. Pakiet ten zobowiązuje kraje członkowskie do poprawy efektywności energetycznej o 20%, do przeprowadzenia zmian w zakresie struktury paliwowej kraju tak, aby 20% energii uzyskiwać ze źródeł odnawialnych oraz do ograniczenia szkodliwych emisji o 20% w stosunku do poziomu lat 90. W konsekwencji tych działań powinien m.in. nastąpić wzrost udziału biomasy w krajowej energetyce i ciepłownictwie.

Zastosowanie biomasy jako paliwa wymaga jej wstępnego przygotowania, między innymi przez rozdrabnianie. Rozdrabnianie biomasy jest niezwykle trudne. Na ogół jest to bowiem materiał o strukturze włóknistej, która nie posiada własności izotropowych. Ponadto biomasa jest plastyczna i zawiera dużą ilość substancji żywicznej, która w młynach mechanicznych powoduje ich zalepanie.

Celem pracy jest przedstawienie możliwości zastosowania prawa podziału *Maxwella-Boltzmana* do prognozowania uziarnienia produktu rozdrobnienia biomasy.

### Teorie rozdrabniania

Jednym z kierunków badań procesu rozdrabniania jest określenie relacji między energią rozdrabniania a efektem procesu (objętość, przyrost powierzchni otrzymanego produktu).

Drugi kierunek – to badania dotyczące określenia składu ziarnowego produktu rozdrabniania. Skład ziarnowy produktu jest podstawowym kryterium jakościowym procesu rozdrabniania. Oznaczanie tej wielkości fizycznej metodami laboratoryjnymi jest uciążliwe, a powtarzalność wyników oznaczeń zależy bardzo znacząco od doboru próbki reprezentatywnej. Ponadto porównanie wyników uzyskanych różnymi metodami na ogół prowadzi do znacznych rozbieżności.

Dane literaturowe dotyczące teorii rozdrabniania zawierają dużą liczbę opracowań, ale nie wynikają z nich ogólniejsze prawa. Prezentowane teorie rozdrabniania nie są uniwersalne [Brozek i in., 1995; Zawada, 1998]. Jedne teorie tłumaczą przyczynowo-skutkowy efekt rozdrabniania w procesie kruszenia, inne – w procesie przemiału w młynach mechanicznych, jeszcze inne – w procesie superdrobnego mielenia. Do najbardziej znanych i powszechnie stosowanych teorii rozdrabniania należą teoria *Rittingera* i teoria *Kicka*.

*Rittinger* zaobserwował, że praca zużywana na rozdrabnianie rośnie proporcjonalnie do przyrostu powierzchni substancji. *Kick* twierdził, że energia rozdrabniania jest proporcjonalna do objętości substancji, a więc do jej ilości. Obie te teorie znalazły dostatecznie wierne potwierdzenie eksperymentalne w pewnych warunkach prowadzenia procesu przemiału.

Wśród późniejszych teorii rozdrabniania na uwagę zasługuje termodynamiczna teoria rozdrabniania [Mielczarek, 1981]. W myśl tej teorii energia procesu rozdrabniania jest proporcjonalna do objętości całkowitej substancji oraz do powierzchni końcowego produktu. Teoria ta, będąca połączeniem zmodyfikowanej teorii *Rittingera* z klasyczną teorią *Kicka*, pozwala na postawienie tezy o uniwersalności tego modelu rozdrabniania [Mielczarek, 1981; Urbaniak, 2000].

Istotę termodynamicznej teorii rozdrabniania wyraża równanie:

$$\dot{E}_{ks} = \alpha \dot{A} + \frac{\sigma_m^2}{2E} \dot{V} \quad (1)$$

gdzie:

$\sigma_m$  – niszczące naprężenia ściskające,

$E$  – moduł *Younga*,

$\alpha$  – energia molekuł powierzchniowych,

$\dot{E}_{ks}$  – strumień energii kinetycznej rozprędzonych ziaren materiału rozdrabnianego,

$\dot{A}$  – strumień powierzchni produktu rozdrabniania.

### Numeryczna prognoza składu ziarnowego rozdrobnionych próbek biomasy

We wcześniejszych pracach autorów [Urbaniak i Wyleciał, 2010; Mielczarek i in., 2000] wykazano, że skład ziarnowy produktu rozdrabniania można wyznaczyć numerycznie. Wykorzystując prawo podziału *Maxwella-Boltzmana* oraz termodynamiczną teorię rozdrabniania oznaczono skład ziarnowy produktu rozdrobnienia swobodnego substancji kruchych, takich jak węgiel, piasek kwarcowy czy kulki szklane. Algorytm numerycznej prognozy można zapisać jako [Mielczarek, 1984; Urbaniak, 2000]:

$$R_i = e^{-\frac{6M\alpha}{(MR)\rho T} \left( \frac{1}{X_i} - \frac{1}{X_{i,max}} \right)} \quad (2)$$

gdzie:

$R_i$  – skumulowany skład ziarnowy ziaren większych od rozmiaru  $X_i$ ,

$(MR)$  – uniwersalna stała gazowa,

$M$  – masa molowa substancji,

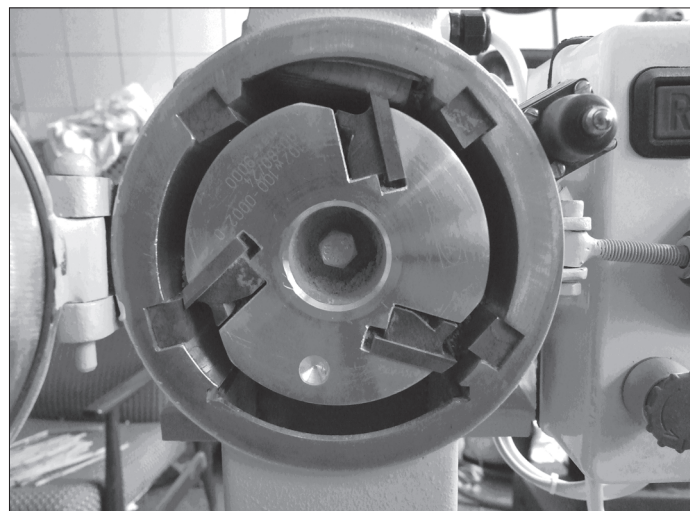
$\rho$  – gęstość materiału rozdrabnianego,

$T$  – temperatura rozdrabnianych ziaren.

### Opis badań eksperymentalnych

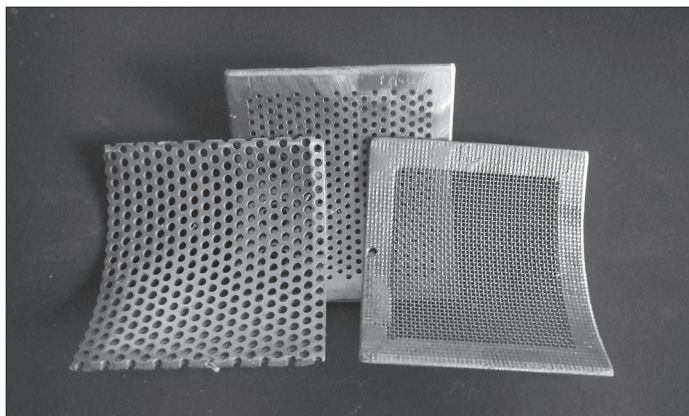
#### Stanowisko badawcze i materiały

W celu weryfikacji wyników numerycznych oznaczeń składu ziarnowego produktów rozdrabniania przeprowadzono badania laboratoryjne. Wykonano je na stanowisku badawczym, w skład którego wchodził laboratoryjny młynek nożowy wraz z oprzyrządowaniem. Wnętrze komory mielenia przedstawiono na rys. 1.



Rys. 1. Wnętrze młyna nożowego z widocznymi trzema nożami

Do badań wykorzystano odpady drewniane. Próbkę odpadów przed rozdrobieniem zważono na wadze RADWAG WPS 720/C/1 z dokładnością do 0,001 g, a następnie poddano je procesowi mielenia w młynku nożowym. Młynek ten nadaje się do rozdrabniania materiałów miękkich, średnio twardych, elastycznych i włóknistych. Proces mielenia odbywa się poprzez cięcie. Próbkę przechodzi przez lej zasypowy do komory rozdrabniania, gdzie napotyka na rotor wyposażony w trzy ostrza tnące – cięcie odbywa się na styku ostrzy rotora i ostrzy stacjonarnych umieszczonych na obwodzie komory. Próbkę pozostaje w komorze bardzo krótko – do momentu, gdy jest rozdrobniona na tyle, by przejść przez sito dolne do zbiornika. Do badań wykorzystano trzy rodzaje sit o średnicach oczek: 3, 2 i 1 mm pokazane na rys. 2.



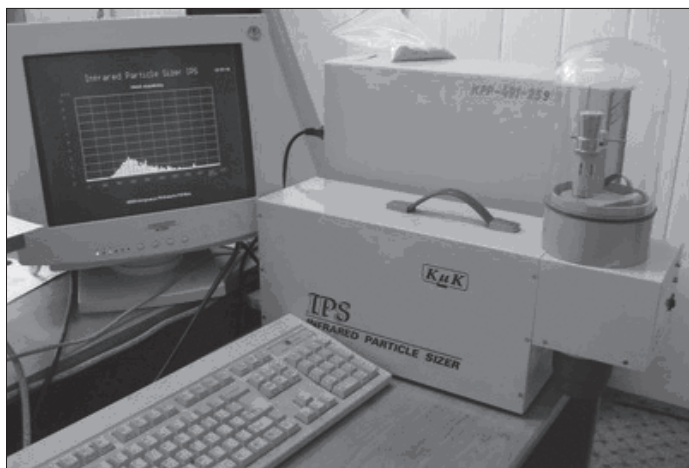
Rys.2. Zestaw sit wykorzystany w badaniach

W czasie badań zmieniano sita, determinujące wielkość produktu mielenia, które znajdowały się na wylocie z komory mielenia. Wykonano także próbę bez sita.

Prędkość obwodowa młynka wynosiła 3000 obr/min; a napędzany był silnikami o mocy 2 kW.

#### Analiza ziarnowa

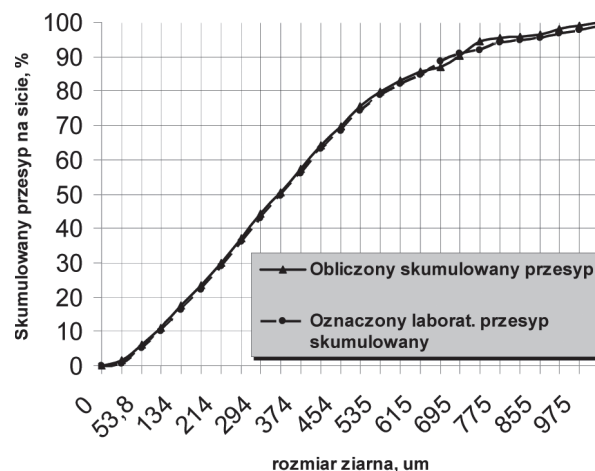
Po badaniach dokonano analizy produktu powstałego w wyniku rozdrabniania, wybrane próbki poddano analizie ziarnowej w aparacie IPS (*Infrared Particle Sizer*) KμK (Rys. 3).



Rys. 3. Analizator ziarnowy IPS U

Analizator IPS jest urządzeniem służącym do określania granulacji cząstek stałych w powietrzu. Strumień promieniowania laserowego w podczerwieni nie tylko identyfikuje wielkość cząstek, ale jeszcze pozwala je precyzyjnie zliczyć w całym zakresie pomiarowym. Każdej

cząstce odpowiada impuls elektryczny proporcjonalny do wielkości cząstki. Zbiór cząstek jest pierwotnie mierzony z podziałem na 4096 klas wymiarowych i przekształcany (kalibrowany) na 256 klas wymiarowych dostępnych dla użytkownika.



Rys. 4. Skumulowany skład ziarnowy produktów rozdrabniania

#### Analiza wyników i wnioski

Na podstawie przedstawionego algorytmu (2) dokonano obliczeń analitycznych składu ziarnowego wybranej próbki rozdrobnionej biomasy. Uzyskane w ten sposób wyniki porównano z uśrednionymi wynikami laboratoryjnych analiz ziarnowych tej samej próbki biomasy wykonanych przy użyciu analizatora ziarnowego IPS. Wyniki uzyskane na drodze analitycznej i laboratoryjnej wykazują istotną zbieżność. Tym samym potwierdzają tezę o możliwości zastosowania prawa podziału *Maxwella-Boltzmanna* do prognozowania składu ziarnowego rozdrabnianej biomasy. Stwarza to możliwość numerycznego oznaczenia składu ziarnowego produktu rozdrabniania bez konieczności pobierania próbek produktu i przeprowadzania laboratoryjnych analiz granulometrycznych.

Należy jednak podkreślić, że biomasa, jak zaznaczono we wstępie, stwarza problemy w procesie rozdrabniania. Podobne trudności występują również w czasie laboratoryjnych prób oznaczania składu ziarnowego. Ziarna biomasy zawieszają się w urządzeniu, powodując niejednokrotnie konieczność przerwania analizy. Tak więc możliwość analitycznego wyznaczenia składu ziarnowego w przypadku rozdrabniania biomasy nabiera szczególnego znaczenia.

#### LITERATURA

- Brożek M., Mączka W., Tumidajski T., 1995. *Modele matematyczne procesów rozdrabniania*. Wyd. AGH, Kraków
- Mielczarek E., 1981. Energia kinetyczna i wewnętrzna oraz sprawność w procesie swobodnego rozdrabniania. *Archiwum Budowy Maszyn*, **28**, nr 2, 145-159
- Mielczarek E., 1984. Rozkład uziarnienia produktu rozdrabniania swobodnego. *Arch. Górn.*, **29**, nr 1
- Mielczarek E., Urbaniak D., Wyleciał T., 2000. Predykcja numeryczna składu ziarnowego produktu swobodnego rozdrabniania. *Zesz. Nauk. Politechniki Łódzkiej. Inż. Chem. i Proc.*, nr 27, 189-197
- Urbaniak D., 2000. *Prognozowanie składu ziarnowego produktu rozdrabniania strumieniowego monodispersyjnego materiału*. Praca doktorska, Wydz. Metalurgii i Inż. Materiałowej Politechniki Częstochowskiej, Częstochowa.
- Wyleciał T., Urbaniak D., 2010. Modelling of the process of coal crushing in a hammer crusher. *Hutnik – Wiadomości Hutnicze*, nr 5, 239-241
- Zawada J., 1998. *Wstęp do mechaniki procesów kruszenia*. Wyd. Inst. Technologii Eksploatacji, Radom