

Prof. dr hab. inż. Józef Flizikowski¹,
Prof. dr hab. inż. Tomasz Topoliński¹,
Prof. dr hab. inż. Marek Opielak²,
Dr hab. inż. Andrzej Tomporowski¹,
Dr inż. Adam Mroziński¹

¹⁾Wydział Inżynierii Mechanicznej
Uniwersytet Technologiczno-Przyrodniczy
Ul. S. Kaliskiego 7., 85-789 Bydgoszcz, Poland
E-mail: fliz@utp.edu.pl, topol@utp.edu.pl, a.tomporowski@utp.edu.pl, adammmroz@utp.edu.pl

²⁾Department of Mechanical Engineering
Lublin University of Technology
Nadbystrzycka str., 20-816 Lublin, Poland
E-mail: m.opielak@pollub.pl,

Badania i analiza eksploatacyjnych charakterystyk mikronizatora energetycznej biomasy

Słowa kluczowe: *charakterystyki eksploatacyjne, biomasa, rozdrabnianie*

Streszczenie: Poddano analizie wzajemne relacje: ruchu użytkowego, stany i przemiany cząstek rozdrabnianej biomasy, ich przemieszczenia, mieszanie, rozdrabnianie słomy energetycznej i jej cząstek. Wykazano, że zależą one m.in. od warunków tarcia, zderzeń, cięcia, cech konstrukcyjnych mikronizatora, przy czym dynamiczne przemieszczanie elementów (części) konstrukcji maszyny i biomasy (cząstek), następuje w warunkach ruchu jałowego i obciążenia roboczego, dynamicznej realizacji celu zewnętrznego. Celem pracy jest systematyzacja, obliczenia i badania uzupełniające charakterystyk użytkowych (jałowych i roboczych) mikro-rozdrabniania, sporządzanych przy stałej i różnej prędkości obrotowej (kątowej lub liniowej).

1. Wprowadzenie

Zarówno wymogi krajowe jak też unijne nakładają na producentów energii uzyskiwanie (w ściśle określonych terminach) coraz większej ilości energii produkowanej ze źródeł odnawialnych. Do roku 2020 Polska ma osiągnąć 15-procentowy udział źródeł odnawialnych w końcowym zużyciu energii (w Unii Europejskiej 20%), a w roku 2010 wg Ministerstwa Gospodarki udział ten osiągnął w Polsce 9,5% (Polityka Energetyczna Polski – PEP 2030). Polskie rolnictwo może zapewnić odpowiednią ilość roślin energetycznych (biomasy), które odpowiednio przetworzone pozwolą na ograniczenie uzależnienia gospodarki przemysłowej od paliw kopalnianych. Oprócz spełnienia wymogów zwiększenia energii produkowanej ze źródeł odnawialnych pozwoli to także na ograniczenie emisji szkodliwych produktów spalania.

Jednym ze sposobów ograniczenia zużycia paliw kopalnianych jest przemysłowe współspalanie biomasy z węglem. Jednakże problemem jest bardzo częste pozostawianie niespalonych cząstek paliwa zarówno w żużlu jak i popiele lotnym. Jest to ewidentna strata

¹ Autor do korespondencji: Instytut Technik Wytwarzania, Uniwersytet Technologiczno-Przyrodniczy w Bydgoszczy, ul. Prof. S. Kaliskiego 7, bud. 3.2, pok. 202, e-mail: a.tomporowski@utp.edu.pl

energetyczna, gdyż paliwo nie oddaje całej energii, a jej niewykorzystana część jest nieodwracalnie tracona [3, 8, 21, 31].

Badania prowadzone w elektrociepłowniach spalających biomasę wykazują na znaczny wpływ wielkości frakcji wymiarowych biomasy, na końcowy udział węgla w popiele [3, 5, 6]. By zapobiec temu zjawisku konieczne jest zapewnienie powtarzalnego procesu rozdrabniania biomasy na jak najdrobniejsze frakcje stałe.

Dotychczasowe doświadczenia w krajowych elektrociepłowniach wskazują jednoznacznie na wyższe nakłady, koszty procesu, uwarunkowane przez:

- spadek sprawności energetycznej kotłów poddanych procesowi modernizacji do współspalania biomasy, na skutek zmian sposobu wymiany ciepła w kotle, a szczególnie rosnącej ilości niedopału,
- wzrost zapotrzebowania na energię elektryczną przez zainstalowane urządzenia do przygotowania i spalania biomasy (układy transportu, mielenie precyzyjne itp.),
- znaczny wzrost szlakowania komór paleniskowych pogarszających dyspozycyjność kotłów,
- szybką korozję wysokotemperaturową powodowaną przez zawartość chloru w biomasie (głównie słoma),
- niestabilność ceny biomasy na wolnym rynku, powodowaną dużą konkurencją na rynku i dużym rozproszeniem dostawców surowca [14].

Do korzyści, zysków współspalania niewątpliwie należą:

- niższa (bilansowe zero) emisyjność szkodliwych związków: SO_2 , NO_x , CO_2 , która pozytywnie wpływa na stan środowiska naturalnego, jak i na cenę jednostki wytworzonego ciepła (ETS),
- elastyczność procesu – podczas niedoboru biomasy kocioł może pracować na samym węglu,
- proces współspalania jest stabilizowany przez spalanie węgla [13, 15, 19].

Praca ma na celu opis i analizę warunków technicznych przygotowania wysokiej jakości produktu rozdrabniania (mikronizacji) biomasy przy zastosowaniu mikronizatora a także analizę jego charakterystyk eksploatacyjnych, co umożliwi opracowanie nowej techniki rozdrabniania wysoko efektywnej energetycznie biomasy przez odpowiednie jej przygotowanie do spalania z węglem.

Dla osiągnięcia celu przeprowadzono postępowanie analityczne obejmujące: istotę współspalania, dostępność biomasy dla celów energetycznych, pro optymalizacyjne koncyptowanie nowej techniki mikro-rozdrabniania.

2. Istota techniki współspalania

Istota współspalania polega na jednoczesnym spalaniu węgla i biomasy w komorze kotła i oddawaniu ciepła do instalacji. Kotły (np. OP-230) projektowane były dla spalania wyłącznie węgla kamiennego, stąd po procesie dostosowania do współspalania biomasy należy liczyć się z pewnymi ograniczeniami co do wydajności cieplnej kotła spowodowanej dostarczaniem paliwa o mniejszej wartości energetycznej [8, 11, 12, 15, 19, 22, 23].

Oprócz wartości opałowej biomasy niezwykle istotna dla procesu spalania jest także jej wilgotność [1]. Sucha biomasa spala się bardzo dobrze powoduje stabilizację płomienia, natomiast wilgotna przesuwa położenie jądra płomienia ku górze komory paleniskowej co jest bardzo niepożądane ze względu na emisyjność związków NO_x , oraz pogorszenie wymiany cieplnej w kotle [8]. Dla uzyskania maksymalnej efektywności ekonomicznej jest konieczne produkowanie, w procesie spalania, popiołów o zawartości części palnych mniejszych niż 6 %, które z powodzeniem mogą być odsprzedawane cementowniom do produkcji, np. betonu komórkowego [8].

3. Inżynieria precyzyjnego mielenia

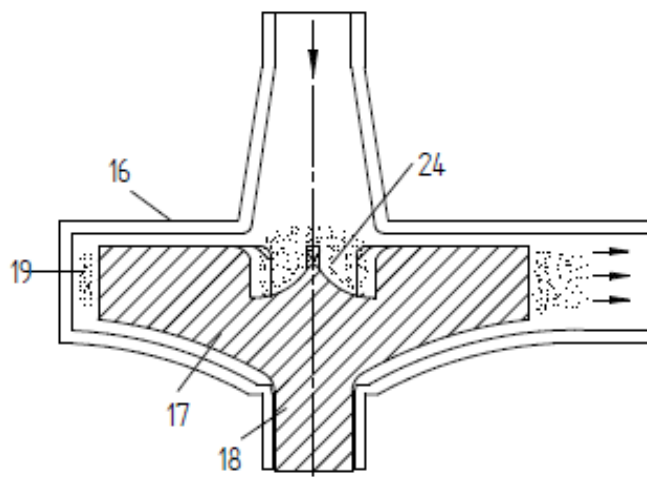
Dla zapobieżenia licznym, niekorzystnym zjawiskom współspalania biomasy z węglem, konieczne jest zapewnienie powtarzalnych charakterystyk użytkowych, precyzyjnego mielenia biomasy na jak najdrobniejsze frakcje stałe.

Wydajność aktualnie spotykanych młynów młotkowych zależy ściśle od: idei rozdrabniania, konstrukcji młyna, a szczególnie zespołu roboczego (narzędziowego), parametrów procesu jakości biomasy, ilości popiołu i materiału ściernego zawartego w materiale mielonym [10, 16, 20, 32]. W znanych liniach przygotowania wsadu do spalania w kotłach, najczęściej biomasa jest transportowana przenośnikami ślimakowymi i kierowana do stacji młynów młotkowych. Młynami młotkowymi można rozdrobnić dostarczoną do nich biomasę na pył o granulacji nie przekraczającej 1mm [2, 4, 5, 6]. Aby zapewnić odpowiednią ilość/jakość rozdrobnionej biomasy podczas pracy z maksymalną mocą kotła, oraz na wypadek przestoju lub remontu młynów instalacje wyposaża się w liczne młyny (np. cztery komplety młynów).

Mikronizator (rys. 1), wraz z instalacją linii technologicznej (rys. 3) [28], został zgłoszony do Urzędu Patentowego w dniu 24.03.2011 roku pt. *Sposób i urządzenie do mikronizacji biomasy* - nr zgłoszenia P. 394325.

Istotą urządzenia mikronizującego jest szybko wirujący dysk (17) napędzany wałem (18), którego integralną częścią są łopatki proste lub łukowate. Dysk może być otwarty lub zamknięty. Obroty dysku są tak dobierane, aby uzyskać na jego średnicy zewnętrznej bardzo wysoką prędkość obwodową, w granicach $(300 - 800) \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$.

W wyniku dużej użytkowej prędkości obrotowej dysku, w strefie suszenia i wstępnego rozdrabniania (24), generuje się duże podciśnienie, które powoduje przepływ powietrza napływającego na dysk z prędkością pomiędzy $(250 \dots 350) \text{ m/s}$. Przepływające powietrze powoduje zasysanie biomateriału do mikronizacji, który w konsekwencji ulegając gwałtownemu przyspieszeniu zderza się z dyskiem (17) w strefie (24) ulegając wstępnemu rozdrobnieniu.



Rys. 1. Urządzenia do mikronizacji biomasy wg zgłoszenia patentowego P. 394325; 16 - obudowa, 17 - dysk obrotowy, 18 - wał napędzający, 19 - strefa wysokiej turbulencji, 24 - strefa wstępnego rozdrobnienia

Pod wpływem sił odśrodkowych materiał rozdrabniany wraz z powietrzem zmienia kierunek przepływu z osiowego na prostopadły do osi obrotów dysku roboczego (17). Trafiając w kanały pomiędzy łopatkami dalej jest przyspieszany do wartości właściwej dla zastosowanej średnicy dysku i prędkości obrotowej. W konsekwencji oddziaływań

fizycznych materiał jest wyrzucany do strefy wysokich turbulencji (19), w której następuje mikronizacja materiału w procesie współistnienia trzech procesów: deaglomeracji, densyfikacji i dezintegracji, powodowanych kawitacją i propagacją fal uderzeniowych w wyniku promieniowo-obwodowych kolizji naddźwiękowych strumieni masy.

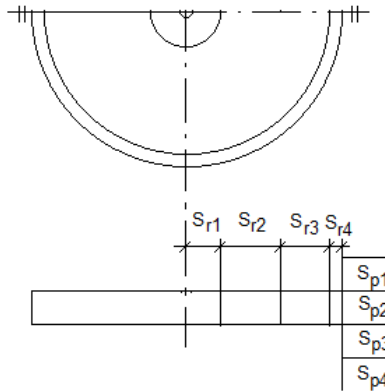
Po wypełnieniu otworu zasilającego (rys.1 i rys.2), zaczyna się zmniejszanie części wspólnej przekrojów kanałów procesu mikronizacji. Wstępnie założono, że każda cząstka w przestrzeni rozdrabniania podlega procesowi podziału (przez tarcie, zderzenia, wyrównywanie napięć). Poczyniono założenie, że położenie cząstek rozdrabnianych względem płaszczyzny, w której odbywa się mikronizacja jest losowe z rozkładem równomiernym. Zatem cząstki o długości początkowej, na skutek mikronizacji rozpadają (rozdrabniają) się z jednakowym prawdopodobieństwem, każda na dwie mniejsze cząstki, o sumie długości będącej długością (wymiarem) przed podziałem.

Użyteczne, eksploatacyjne drobnienie, jest powodowane złożonym stanem obciążeń/odkształceń trwałych i następuje zawsze w materiale, który przed przemieszeniem był w poprzedzającej sekcji zespołu roboczego (rys.2). Rozkład długości cząstki, przy drobnieniu, w materiale, który uzupełnił pustą przestrzeń w segmencie (n+1)-szym zmienia się według zależności [25, 26]:

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

natomiast w materiale, który pozostał w segmencie n-tym:

$$\tilde{\rho}_n^{m+1}(x) = \tilde{B}_{n,m} \rho_n^m = \left(1 - \frac{x}{\tilde{y}_n^m}\right) \rho_n^m(x) + \frac{1}{\tilde{y}_n^m} \int_x^{l_{\max}} \rho_n(l) dl, \quad (2)$$



Rys. 2. Segmenty promieniowe mikronizacji drobin słomy: S_{r1}/S_{p1} - strefa/poziom początkowa, wprowadzająca, S_{r2}/S_{p2} - strefa/poziom wstępnego przyspieszania cząstek, S_{r3}/S_{p3} - strefa/poziom robocza, S_{r4}/S_{p4} - strefa/poziom udarowego podziału cząstek biomasy

Otrzymane funkcje są nieujemne, jako suma dwóch nieujemnych składników. Całkując, według wymiaru produktu, od 0 do l można łatwo sprawdzić, że są to rozkłady prawdopodobieństwa:

$$\int_0^{l_{\max}} \tilde{\rho}_n^{m+1}(x) dx = 1 - \frac{\bar{x}}{\tilde{y}_n^m} + \frac{1}{\tilde{y}_n^m} \int_0^{l_{\max}} \int_x^{l_{\max}} \rho_n(l) dl dx = 1 - \frac{\bar{x}}{\tilde{y}_n^m} + \frac{1}{\tilde{y}_n^m} \int_0^{l_{\max}} \int_0^x \rho_n(l) dx dl = 1 - \frac{\bar{x}}{\tilde{y}_n^m} + \frac{1}{\tilde{y}_n^m} \int_0^{l_{\max}} x \rho_n(l) dx = 1 \quad (3)$$

i tak samo dla rozkładu $\tilde{\rho}_{n+1}^m$. Zatem operatory $A_{n,m}$ i $\tilde{B}_{n,m}$ są poprawnie określonymi operatorami stochastycznymi.

Dla uproszczenia założono, że po drobnieniu rozkład długości ziarna w segmencie $(n+1)$ -szym będzie jednorodny (frakcja rozdrobniona i ta która była w segmencie przed podziałem się wymieszają), będzie ona zatem średnią ważoną z ρ_{n+1}^k i ρ_n^k :

$$\rho_{n+1}^m(x) = \frac{\tilde{y}_{n+1}^m}{y_{n+1}} \rho_{n+1}^{m-1} + \frac{y_n - \tilde{y}_{n+1}^m}{y_{n+1}} A_{n,m} \rho_n^m(x) \quad (4)$$

Proces usuwania. Po podziale, warstwy (strugi) materiału mikronizowanego przesuwają (przemieszczają) się względem siebie zgodnie z kierunkami wytyczanymi przez kanały robocze obracającej się tarczy roboczej wywołującej siłę i przyspieszenie odśrodkowe z gradientem wzajemnych prędkości powodowanych różnicami masy poszczególnych drobin rozdrabnianej biomasy. Drobinę materiału są usuwane z segmentu poprzedzającego (działa na nie siła odśrodkowa wywołana kształtowym modelem kanałów roboczych, siła o kierunku prostopadłym do płaszczyzny roboczej kanału w którym zachodzą trudne do opisanego zjawiska aerodynamiczne wspomagające przedmiotowy proces mikronizacji), natomiast nie są usuwane z segmentu następującego (ponieważ siła odśrodkowa jest w kierunku od tarczy).

Po podziale rozkład długości będzie zatem wynosił [27]:

$$\tilde{\rho}_n^{m+1}(x) = B_{n,m} \rho_{n,m} = \begin{cases} \tilde{\rho}_n^{m+1}(x) \left(\int_{l_{\min}}^{l_{\max}} \tilde{\rho}_n^{m+1}(x) \right)^{-1} & x \in]l_{\min}, l_{\max}] \\ 0 & x \in]l_{\min}, l_{\min}] \end{cases} \quad (5)$$

Poziom materiału po m -tym podziale (przed $m+1$) w n -tym segmencie, \tilde{y}_n^{m+1} wynosi:

$$\tilde{y}_n^{m+1} = (y_n - y_{n+1} + \tilde{y}_{n+1}^k) \left(1 - \frac{\int_0^{l_{\min}} \tilde{B}_{n,m} \rho_n^m(x) dx}{\int_0^{l_{\max}} \tilde{B}_{n,m} \rho_n^m(x) dx} \right) \quad (6)$$

Żeby dostać rozkład w całej przestrzeni kanału przed $(m+1)$ -szym podziałem (po ponownym zasypaniu), należy wziąć średnią ważoną:

$$\rho_n^{m+1}(x) = \frac{y_n - \tilde{y}_n^{m+1}}{y_n} A_{n-1,m} \rho_{n-1}^m + \frac{\tilde{y}_n^{m+1}}{y_n} B_{n,m} \rho_n^m \quad (7)$$

Operator $B_{n,m}$ nie jest już operatorem liniowym jak $A_{n,m}$, ponieważ zależy od poziomu materiału który pozostał w n -tym segmencie po $m+1$ -szym podzieleniu: \tilde{y}_n^{m+1} , i jest funkcją rozkładu prawdopodobieństwa w materiale (który wpływa na to, jaka część materiału będzie usuwana z tarczy i przestrzeni podziału). Żeby móc traktować $B_{n,m}$ jako operatory liniowe, wielkości y_n^m należy traktować, w każdym kroku procedury, jako z góry zadane i iteracyjnie uzgadniane z wynikami badań, doświadczeń [17, 24].

Strumień cząstek opuszczających maszynę. Przy drobnieniu m -tym, strumień cząstek opuszczających maszynę przez szczelinę (na przerwie) pomiędzy segmentem n -tym i $(n+1)$ -szym jest dany rozkładem prawdopodobieństwa:

$$s_n^m(x) = \begin{cases} \int_x^{l_{\max}} \rho_n(l) dl \left(\int_0^{l_{\min}} \int_x^{l_{\max}} \rho_n(l) dl dx \right)^{-1} & l \in]l_{\min}, l_{\max}] \\ 0, & l \in]l_{\min}, l_{\min}] \end{cases} \quad (8)$$

a jego objętość jest równa:

$$V_n^m(x) = (y_n - y_{n+1} + \tilde{y}_{n+1}^k) \frac{\int_0^{l_{\min}} \tilde{B}_{n,m} \rho_n^m(x) x dx}{\int_0^{l_{\max}} \tilde{B}_{n,m} \rho_n^m(x) x dx} \quad (9)$$

Prędkość liniowa drobnienia w sąsiednich segmentach tarczy:

$$\begin{aligned} \Delta v_{L(i+1)-j/i-k} &= v_{(i+1)-j} - v_{i-k} \\ \Delta v_{L(i+1)-j/i-k} &= \pi \cdot D_{(i+1)-j} \cdot n_{i+1} - \pi \cdot D_{i-k} \cdot n_i \\ \Delta v_{L(i+1)-j/i-k} &= \pi \cdot (D_{(i+1)-j} \cdot n_{i+1} - D_{i-k} \cdot n_i) \end{aligned} \quad (10)$$

gdzie:

$\Delta v_{L(i+1)-j/i-k}$ - gradient prędkości liniowej między sąsiednimi segmentami promieniowymi (S_{r1-4})

lub obwodowymi tarczy zespołu rozdrabniającego, $m \cdot s^{-1}$,

$v_{(i+1)-j}$ - prędkość liniowa w $(i+1)$ -ym segmencie, na j -tym poziomie (S_{p1-4}), $m \cdot s^{-1}$,

v_{i-k} - prędkość liniowa w i -ym segmencie, na k -tym poziomie (S_{p1-4}), $m \cdot s^{-1}$,

$D_{(i+1)-j}$, D_{i-k} - odpowiednie średnice wodzące, $(i+1)$ -ego segmentu (S_{r1-4}), i -tego poziomu (S_{p1-4}), j -tym lub k -tym rzędzie rozdrabniania (S_{r1-4}), m,

n_{i+1} - prędkość obrotowa dalszego (od wlotu nadawy) segmentu (np. S_{r3}), s^{-1} ,

n_i - prędkość obrotowa segmentu bliższego wlotu nadawy (np. S_{r2}), s^{-1} ;

Należy zatem tak dobrać prędkość obrotową (kątową) tarczy roboczej, aby w jej poszczególnych segmentach cząstki mikronizowane osiągały prędkości z zakresu (sub)optimalnego:

$$\omega = f(\Delta v_{L(i+1)-j/i-k}) \quad (11)$$

Przemiany rozkładów długości drobin. Rozkład długości drobin w n -tym segmencie po m -tym podziale wyrażamy oznaczeniem ρ_n^m . Operatory przeprowadzające rozkład ρ_n^m w ρ_{n+1}^m i w ρ_n^{m+1} są oznaczone odpowiednio jako $A_{n,m}$ i $B_{n,m}$. Stan ρ_0^0 jest dany (rozkład długości drobin w materiale wejściowym, np. pierwsze rozdrabnianie, drugie rozdrabnianie, ...). Stan ρ_n^m uzyskano z działania sum iloczynów operatorów A i B na stanie ρ_0^0 . Iloczyny reprezentują wszystkie drogi, którymi można dojść do tego stanu ze stanu ρ_0^0 . Dla przykładu:

$$\rho_2^3 = (A_{1,2} A_{0,1} B_{0,0} + A_{1,2} B_{1,1} A_{0,0} + B_{2,2} A_{1,1} A_{0,0}) \rho_0^0 \quad (12)$$

Do stanu ρ_n^m można dojść stosując n razy operator A i m razy operator B ². Drogę określa jednoznacznie podzbiór n -elementowy zbioru kroków w całej drodze $\{1, \dots, m\}$, kroków, w

których działa operator A . Ilość takich podzbiorów, zatem iloczynów w sumie wynosi $\binom{m}{n}$.

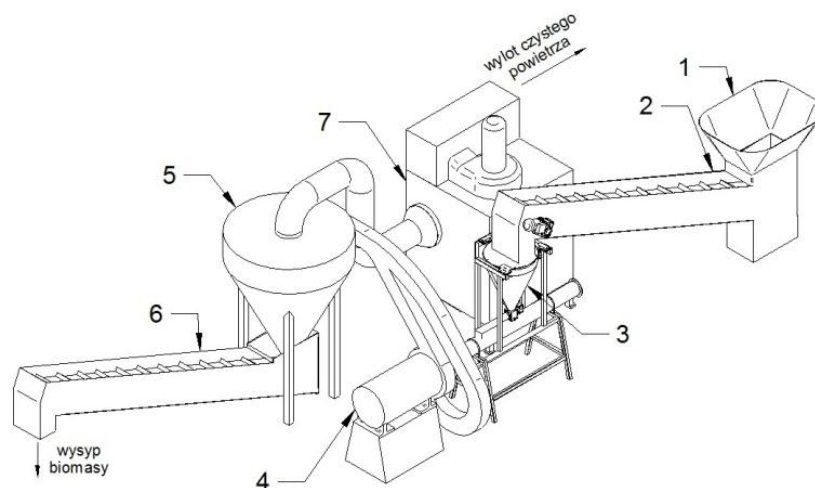
W ogólności operatory A i B nie komutują. Dla dalszych rozważań kluczowe jest obliczanie takich wyrażeń. Stany ρ są dodatnimi elementami przestrzeni Banacha $L^1([0, 1])$, a operatory A i B są endomorfizmami tej przestrzeni [9, 29, 30]. Z przyczyn praktycznych należy przybliżać stany ρ dodatnimi elementami R^d , a operatory A i B macierzami $d \times d$. Fizycznie odpowiada to podziałowi cząstki o długości l (np. wymiar początkowy wsadu) na d niepodzielnych już dalej części (np. wymiar produktu bliski 0) o długości l/d - odpowiadającej liniowej mierze (stopniowi) rozdrobnienia. Może również odpowiadać klasom wymiarowym: ($l > 1,4$) mm, ($0,8 < l < 1,4$) mm, ($0,4 < l < 0,8$) mm, ($l < 0,4$) mm.

Źródła literaturowe podają rozbieżne dane o ilości słomy będącej do zagospodarowania na cele energetyczne. Można jednak przyjąć, że jej nadwyżka pomiędzy całkowitą produkcją a

²precyzyjniej, średnie ważone wyniku działania tego operatora

zużyciem w rolnictwie w roku 2010 wyniosła 11,6 mln ton [Flizikowski, 2011, Flizikowski, 2013].

Na rys. 3 przedstawiono schemat instalacji technologicznej do mikronizacji biomasy. Materiał rozdrabniany jest dostarczany, poprzez lej zasypowy, do kosza (1), skąd przenośnikiem (2) podawany jest do dozownika (3). Dozownik napędza rurę ssącą zasilającą osiowo dyskowy mikronizator napędzany silnikiem elektrycznym (4). Zmikronizowana biomasa w mieszaninie z powietrzem i parą wodną przepływa do separatora cyklonowego (5), skąd przenośnikiem taśmowym (6) podawana jest do pojemników zewnętrznych. Oczyszczone z rozdrabnianego materiału wilgotne powietrze przepływa do osuszacza a następnie do filtra dokładnego oczyszczania (7), skąd odprowadzane jest na zewnątrz. Z obu filtrów oddzielone frakcje mogą być zawracana do ponownej mikronizacji (frakcja gruba) lub przekazywane do pojemników zewnętrznych (frakcje drobne).



Rys.3. Instalacja technologiczna mikronizowania biomasy: 1 – kosz z lejem zasypowym, 2 – przenośnik taśmowy, 3 – dozownik, 4 – mikronizator z silnikiem elektrycznym, 5 – cyklon, 6 – przenośnik taśmowy, 7 – urządzenie filtracyjne

Silosi pyłu, filtry workowe oraz silosi biomasy wyposażone są w instalacje przeciwwybuchowe [7, 8, 23].

Proces mikro-rozdrobnienia polega w całości na doprowadzeniu cząstek materiału do stanu, w którym następuje przekroczenie wartości sił międzycząsteczkowych. Podczas przekraczania przez ziarno kolejno po sobie następujących stref granicznych torusów, poddane ono jest ustawicznie przeciwnie skierowanym obciążeniom, siłom wywołującym naprężenia rozciągające i ściskające z jednoczesnym skręcaniem w przeciwne strony. W bardzo krótkim czasie, mniejszym od 0,001 s cząstka taka wpada w rezonans tak silny, że następuje jednoczesne zjawisko implo- i eksplozji, prowadzące do rozerwania ziarna do postaci i wymiarów pyłu, mikrogranulatu. Planuje się, że moduły przyjęcia oraz wstępnego przygotowania surowca pozwolą na docelowe przetwarzanie (1-2) ton surowca na godzinę. Sam proces rozdrobnienia ma charakter fizyczny, mechaniczny i w tym czasie nie zachodzą żadne reakcje chemiczne. Tym samym nie trzeba stosować żadnych katalizatorów, ani też nie powstają żadne produkty uboczne. W związku z tym produkt wyjściowy posiada identyczny skład jakościowo – ilościowy, jak materiał poddany procesowi rozdrabniania.

Dodatkowo planowane rozwiązania obejmują wprowadzenie procesu modyfikacji powierzchniowej odpowiednimi składnikami chemicznymi, pozwalającymi na dokonanie zmiany składu chemicznego spalin, jak również składu chemicznego popiołu po spaleniu.

Powtarzalna jakość produktu procesu mikronizacji, stałe parametry energetyczne wynikające z powtarzalności składu surowca oraz kontrolowanej wilgotności (bardzo suchy, wilgotność poniżej 5%), kaloryczność 18 MJ/kg, przy czym – charakterystyczny jest powtarzalny wymiar cząstki pyłowej – ok. 100 mikrometrów. Pył energetyczny jest najbardziej nowoczesną formą paliwa do zasilania wysoko efektywnych pyłowo-gazowych palników (w każdym elemencie spełnia oczekiwania rynku energetycznego): wysoka mikronizacja – powierzchnia aktywna tysiąc razy większa niż drewnianych mączek, co daje lepszy efekt spalania, łatwy rozładunek mikropyłu (nie jest wybuchowy, jest czysty ekologicznie).

4. Omówienie wyników badań rozdrabniania (Statistica 10)

Badania przeprowadzono na stanowisku badawczym prototypowej, innowacyjnej, przemysłowej instalacji technologicznej do mikronizacji biomasy.

Zestawienie elementów pomiarowych: masa i udział procentowy badanych frakcji słomy żyta dla wybranych prędkości obrotowych pierwszego mikro-mielenia przedstawiono w tabeli 1.

Tabela 1. Masa i udział procentowy badanych frakcji słomy żyta dla wybranych prędkości obrotowych

prędkość obrotowa min^{-1} , t=10s	Wilgotność próbek, %	masa próbki, g	frakcja > 1,4		frakcja 1,4-0,8		frakcja 0,8-0,4		frakcja < 0,4	
			masa g	udział %	masa g	udział %	masa g	udział %	masa g	udział %
0 (wsad)	13,2	40,14	29,8	74,240	3,79	9,442	4,41	10,987	2,49	6,203
9000	13,0	40,1	16,32	40,698	7,71	19,227	7,17	17,880	8,51	21,222
10000	13,1	40,12	15,64	38,983	7,55	18,819	7,84	19,541	8,11	20,214
11000	13,2	40,04	15,93	39,785	7,41	18,506	7,73	19,306	8,5	21,229
12000	12,9	39,99	13,92	34,809	8,07	20,180	8,51	21,280	9,5	23,756
13000	13,0	40,09	11,02	27,488	8,65	21,576	8,7	21,701	11,26	28,087
14000	13,1	39,98	5,75	14,382	9,06	22,661	8,75	21,886	16,07	40,195
15000	12,9	40,02	4,52	11,294	9,28	23,188	9,16	22,889	16,78	41,929
16000	13,0	40,03	5,4	13,490	9,65	24,107	9,14	22,833	14,71	36,747
17000	13,2	40,15	6,17	15,367	9,84	24,508	9,73	24,234	14,18	35,318
18000	13,1	39,99	5,67	14,179	9,59	23,981	9,99	24,981	14,64	36,609
18000 t=30s	13,0	40,07	5,25	13,102	9,87	24,632	9,08	22,660	15,54	38,782

Zbiorowością statystyczną była próba słomy żyta. Badano cechę ilościową, tj. udział masowy poszczególnych frakcji wielkości ziaren w masie całkowitej próbki, mierzony w %, w stosunku do wartości prędkości obrotowej w dwóch przedziałach czasu (10 i 30) s. Jednostką statystyczną była laboratoryjna naważka słomy żyta o masie 40 g, przebadano 12 takich naważek. Wydzielono cztery rodzaje frakcji: (> 1,4, 1,4-0,8, 0,8-0,4 i < 0,4)mm i jednaście wartości prędkości obrotowych – (od 0 do 18.000) min^{-1} . Mierniki statystyczne umożliwiają opis struktury badanej próby (tab.1).

Średnia zawartość procentowa frakcji (>1,4) mm produktu rozdrabniania słomy żyta przy wszystkich badanych prędkościach obrotowych w czasie 10 s wynosiła 29,52%, frakcji (1,4-0,8) mm – 20,563%, frakcji (0,8-0,4) mm – 20,683%, a frakcji (< 0,4) mm – 28,319%. Świadczy to o największym średnim procentowym udziale najbardziej skrajnych przedziałów. Połowa próbek frakcji (>1,4) mm zawierała 27,488%, frakcji (1,4-0,8) mm i (0,8-0,4) mm – ok. 21,5 %, a frakcji (< 0,4) mm – 28,087% (mediana). W badanej zbiorowości między miarami tendencji centralnej we frakcjach (>1,4) mm i (<0,4) mm zachodzi relacja $X_{sr} > Me$,

co świadczy o asymetrii prawostronnej (niegroźnej), a we frakcjach (1,4-0,8) mm i (0,8-0,4) mm – relacja $X_{sr} < Me$, co mówi o lewostronnej asymetrii (również niegroźnej). Najmniejsza zawartość procentowa frakcji pyłu słomy żyta w stosunku do wszystkich prędkości obrotowych w czasie badania 10 s została odnotowana we frakcji (<0,4) mm – 6,203% (wsad), a największa we frakcji (>1,4) mm – 74,240% (wsad). Największa absolutna różnica pomiędzy największą i najmniejszą wartością procentową wyniosła we frakcji (>1,4) mm – 62,946, a we frakcji (<0,4) mm – 35,726. Najniższa wartość rozstępu została odnotowana we frakcji (0,8-0,4) mm – 13,995. Naważki pyłu słomy żyta cechował zróżnicowany udział mas poszczególnych frakcji. Wynosiło on przeciętnie $\pm 18,989$ % w stosunku do średniej frakcji (>1,4) mm i $\pm 7,626$ % w stosunku do frakcji (<0,4) mm. Najniższą wartość odchylenia standardowego odnotowano w odniesieniu do frakcji (0,8-0,4) mm – 3,853%. Dyspersję tę ocenia się jako znaczącą, gdyż względna miara zmienności (v) maksymalnie wynosi 64,327 % dla frakcji (>1,4) mm, a minimalnie 18,63% w stosunku do frakcji (0,8-0,4) mm (tab. 2).

Tabela 2. Statystyki opisowe zawartości masowej badanych frakcji słomy żyta dla przedziału prędkości obrotowych od 0 do 18.000 w czasie badania równym 10s

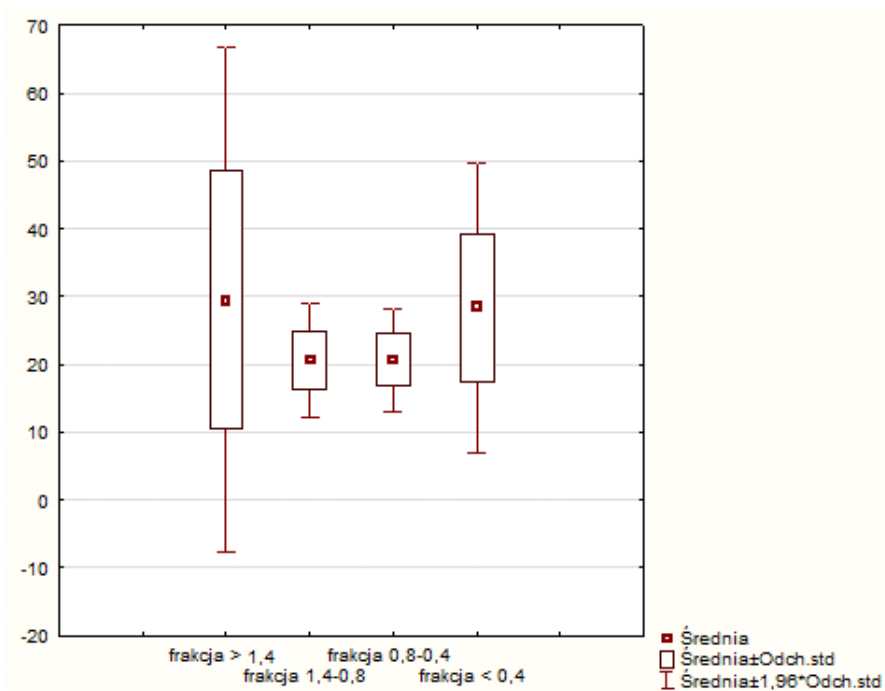
Zmienna	Średnia	Mediana	Minimum	Maksimum	Dolny kwartył	Górny kwartył	Rozstęp
frakcja > 1,4	29,520	27,488	11,294	74,240	14,179	39,785	62,946
frakcja 1,4-0,8	20,563	21,576	9,442	24,508	18,819	23,981	15,066
frakcja 0,8-0,4	20,683	21,701	10,987	24,981	19,306	22,889	13,995
frakcja < 0,4	28,319	28,087	6,203	41,929	21,222	36,747	35,726
Zmienna	Wariancja	Odch. std	P. ufności odch. std. - 95.00%	P. ufności odch. std. +95.00%	Wsp. zmn.	Skośność	Kurtoza
frakcja > 1,4	360,58	18,989	13,268	33,324	64,327	1,300	1,9806
frakcja 1,4-0,8	18,50	4,301	3,005	7,548	20,917	-1,870	4,3669
frakcja 0,8-0,4	14,85	3,853	2,692	6,763	18,630	-1,688	3,6968
frakcja < 0,4	119,13	10,915	7,626	19,155	38,542	-0,606	-0,0923

Największym zróżnicowaniem udziału mas frakcji przy różnych wartościach prędkości obrotowej (od 0 do 18.000) min^{-1} w czasie badania 10 s, charakteryzowała się frakcja (>1,4) mm (zakres od 10,513 do 48,509) oraz frakcja (<0,4) mm (od 17,404 do 39,234). Najmniejsze zróżnicowanie posiada z kolei frakcje (1,4-0,8) mm i (0,8-0,4) mm (od ok. 16,5 do ok. 24,5) (rys. 4).

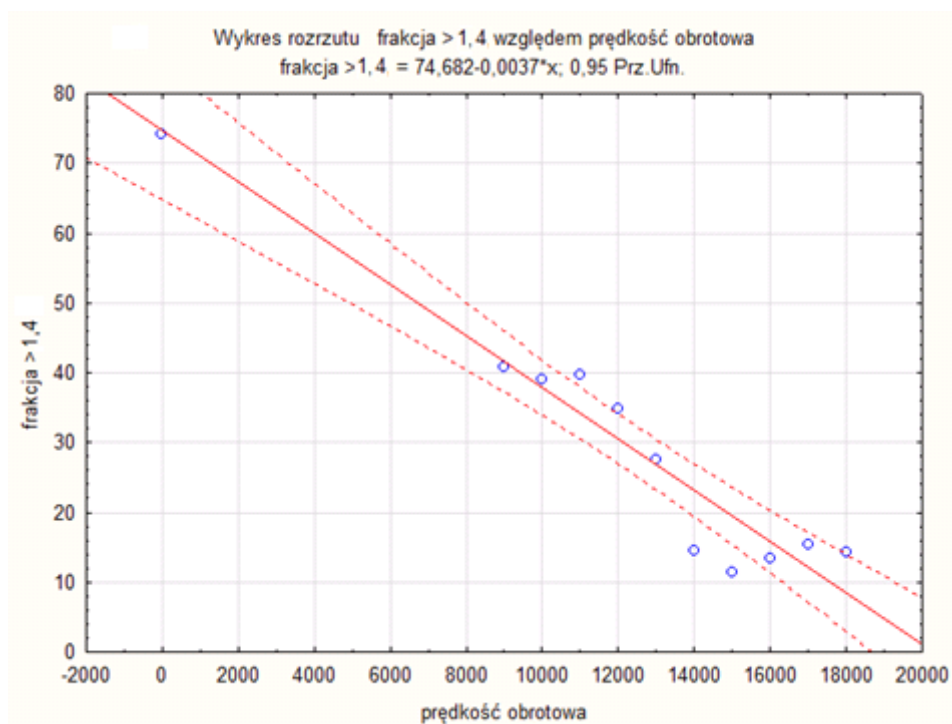
Wyniki testu Shapiro-Wilka dla frakcji (>1,4) mm pyłu słomy żyta, przy prędkościach obrotowych w zakresie (0 ... 18.000) min^{-1} i czasie badania 10 s wskazują na normalność jej rozkładu ($W=0,083708$, $p=0,02892$). Dolny kwartył dla analizowanej frakcji jest równy 14,179%, co oznacza, że 25% wszystkich otrzymanych wyników mieści się poniżej tej wartości. Górny kwartył wynosi 39,785%, zatem 25% wszystkich wyników badanej frakcji znajduje się w przedziale powyżej owej wartości.

Wyniki testu Shapiro-Wilka dla frakcji (1,4-0,8) mm pyłu słomy żyta, przy prędkościach obrotowych w zakresie (0 ... 18.000) min^{-1} i czasie badania 10 s wykazują, że jej rozkładu jest normalny ($W=0,80469$, $p=0,01084$). Dolny kwartył dla tej frakcji jest równy 18,819%, a górny wynosi 23,918%.

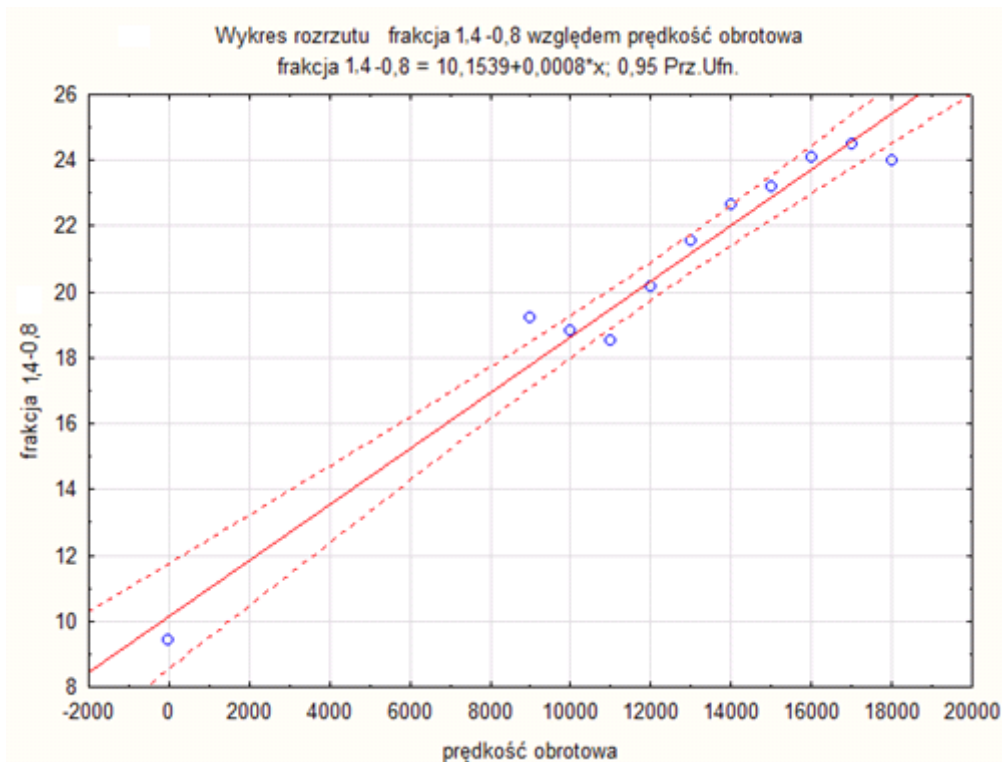
Wyniki testu Shapiro-Wilka dla frakcji (0,8-0,4) mm pyłu słomy żyta, przy prędkościach obrotowych w zakresie (0 ... 18.000) min^{-1} i czasie badania 10 s wskazują na normalność jej rozkładu ($W=,85496$, $p=,04953$). Dolny kwartył dla owej frakcji jest równy 19,306%, a górny wynosi 22,889%.



Rys. 4. Wartości średniej i odchylenia procentowego zawartości masowej badanych frakcji dla przedziału prędkości obrotowych (0 ... 18.000) min⁻¹ w czasie badania równym 10s



Rys. 5. Wykres rozrzutu dla frakcji (>1,4) mm pyłu słomy żyta przy prędkościach obrotowych w zakresie (0 ... 18.000)min⁻¹ i czasie badania 10 s



Rys. 6. Wykres rozrzutu dla frakcji (1,4-0,8) mm pyłu słomy żyta przy prędkościach obrotowych w zakresie (0 ... 18.000)min⁻¹ i czasie badania 10 s

Wyniki testu Shapiro-Wilka dla frakcji (<0,4) mm pyłu słomy żyta, przy prędkościach obrotowych w zakresie (0 ... 18.000)min⁻¹ i czasie badania 10 s wskazują na brak normalności jej rozkładu (W=0,92245, p=0,33961). Dolny kwartył dla tej frakcji jest równy 21,222%, a górny wynosi 36,747%.

Udział wartości frakcji (>1,4) mm pyłu słomy żyta jest silnie ujemnie skorelowany ze wzrostem prędkości obrotowej w przedziale (0 ... 18.000)min⁻¹ (r=-0,96). Świadczy to o tym, że wraz ze wzrostem prędkości obrotowej, zmniejsza się udział frakcji (>1,4) mm w całkowitej masie próbki (rys. 5). Zależność tę opisuje równanie regresji:

$$\text{frakcja } >1,4 = 74,682 - 0,0037 \cdot \omega$$

Udział wartości frakcji (1,4-0,8) mm pyłu słomy żyta jest silnie dodatnio skorelowany ze wzrostem prędkości obrotowej w przedziale (0 ... 18.000)min⁻¹ (r=0,98). Świadczy to o tym, że wraz ze wzrostem prędkości obrotowej, zwiększa się udział frakcji (1,4-0,8) mm w całkowitej masie próbki (rys. 6). Zależność tę opisuje równanie regresji:

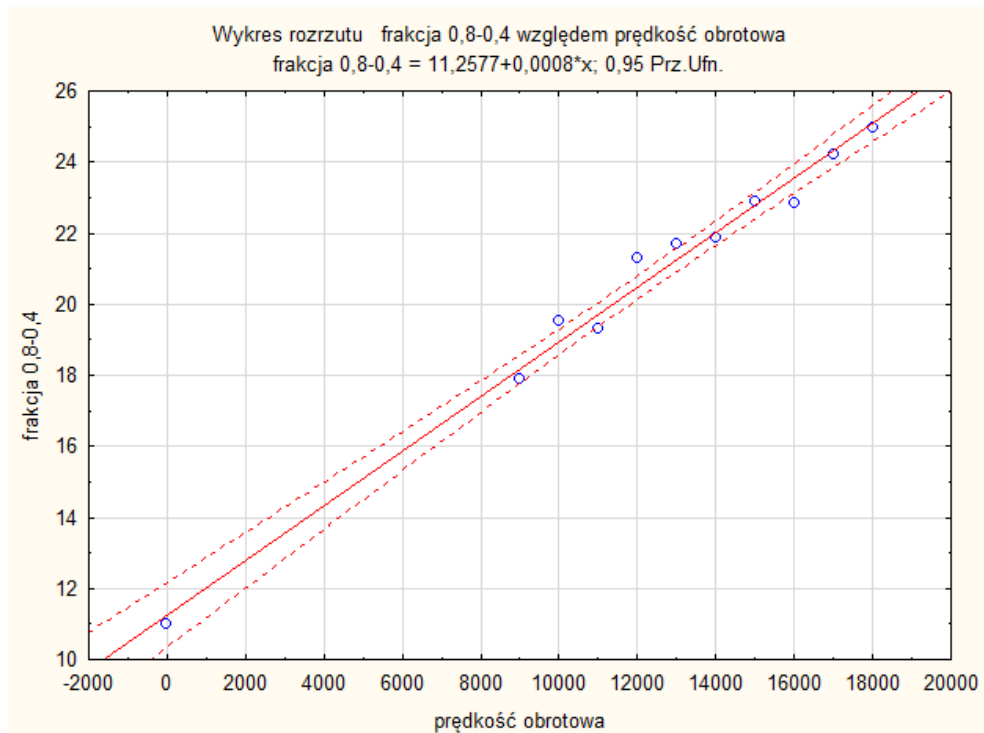
$$\text{frakcja } 1,4-0,8 = 10,1539 + 0,0008 \cdot \omega$$

Udział wartości frakcji (0,8-0,4) mm pyłu słomy żyta jest silnie dodatnio skorelowany ze wzrostem prędkości obrotowej w przedziale (0 ... 18.000)min⁻¹ (r=0,99). Świadczy to o tym, że wraz ze wzrostem prędkości obrotowej, zwiększa się udział frakcji (0,8-0,4) mm w całkowitej masie próbki (rys. 7). Zależność tę opisuje równanie regresji:

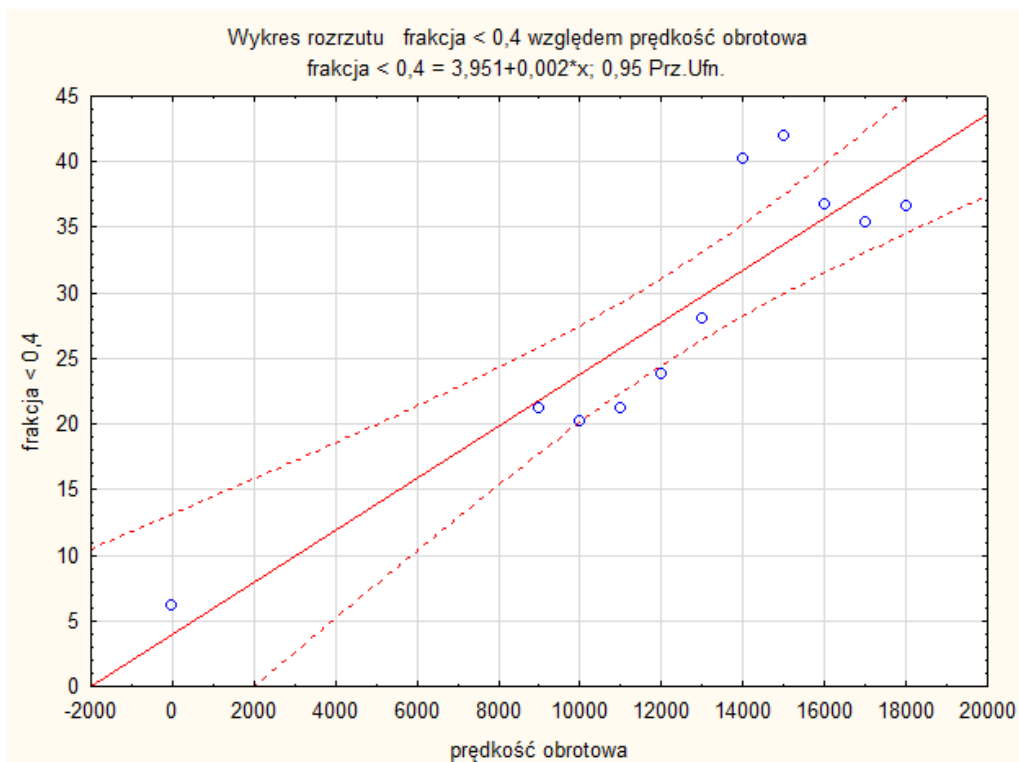
$$\text{frakcja } 0,8-0,4 = 11,2577 + 0,0008 \cdot \omega$$

Udział wartości frakcji (<0,4) mm pyłu słomy żyta jest silnie dodatnio skorelowany ze wzrostem prędkości obrotowej w przedziale (0 ... 18.000)min⁻¹ (r=0,90). Świadczy to o tym, że wraz ze wzrostem prędkości obrotowej, zwiększa się udział frakcji (<0,4) mm w całkowitej masie próbki (rys. 8). Zależność tę opisuje równanie regresji:

$$\text{frakcja } < 0,4 = 3,951 + 0,002 \cdot \omega$$



Rys. 7. Wykres rozrzutu dla frakcji (0,8-0,4) mm pyłu słomy żyta przy prędkościach obrotowych w zakresie (0 ... 18.000)min⁻¹ i czasie badania 10 s



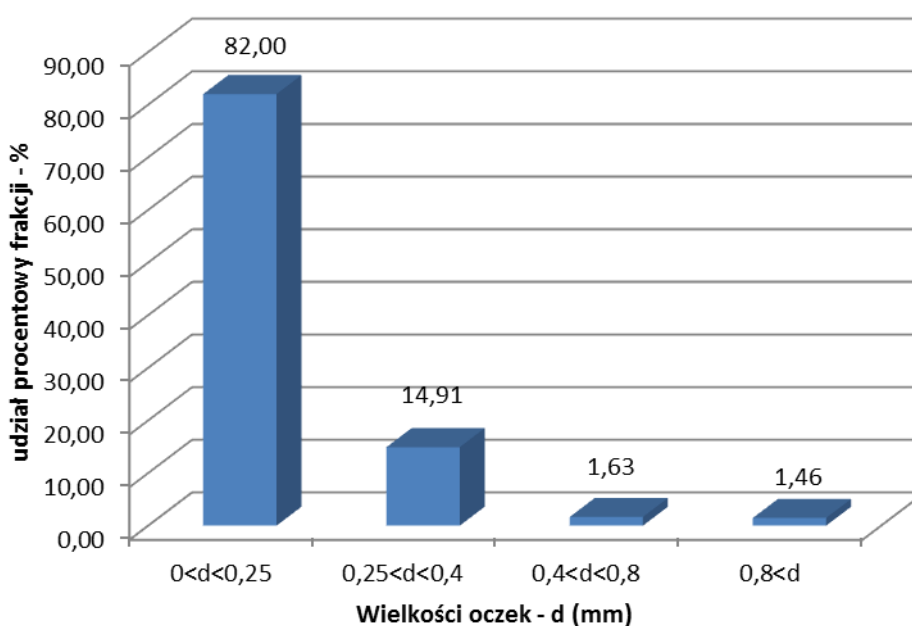
Rys. 8. Wykres rozrzutu dla frakcji (< 0,4) mm pyłu słomy żyta przy prędkościach obrotowych w zakresie (0 ... 18.000)min⁻¹ i czasie badania 10 s

Wykonano również analizę porównawczą zmian udziałów mas poszczególnych frakcji, przy wielokrotnym rozdrabnianiu, stałej prędkości obrotowej 18.000min⁻¹, o różnym czasie prowadzonego badania (10 i 30) s (tab. 5). Z otrzymanych danych wynika, że wraz z przyrostem czasu trwania procesu, zmniejsza się udział procentowy frakcji (>0,8-0,4) mm

oraz zwiększa się udział frakcji (0,25-0,4) mm, a szczególnie pyłów (<0,25) mm (tab.5, rys.8).

Tabela5. Masowe i procentowe udziały frakcji wymiarowych z analizy Próbki nr 2, (drugiego mikro-mielenia)

Wielkość oczka sita d (mm)	Masa frakcji m_1 (g)	Masa frakcji m_2 (g)	Masa frakcji m_3 (g)	Średnia masa m_{sr} (g)	Procent %
0<d<0,25	32,95	32,48	32,97	32,80	82,00
0,25<d<0,4	5,98	5,95	5,96	5,96	14,91
0,4<d<0,8	0,62	0,82	0,52	0,65	1,63
0,8<d	0,45	0,75	0,55	0,58	1,46



Rys. 9. Rozkład ziarnowy dla Próbki nr 2

5. Podsumowanie i wnioski

Przeprowadzone badania i analiza uzasadniają korzyści z zastosowania mikronizatora w procesie przygotowania biomasy do współspalania z węglem, a także określają wpływ charakterystyk eksploatacyjnych mikronizatora na poprawę jakości procesu.

W pierwszym mikro-mieleniu drobin słomy, udział frakcji największej (>1,4) mm pyłu słomy żyta jest silnie ujemnie skorelowany ze wzrostem prędkości obrotowej w przedziale (9.000 ... 18.000)min⁻¹(r=-0,96). Świadczy to, że wraz ze wzrostem prędkości kątowej, zmniejsza się udział frakcji (>1,4) mm w całkowitej masie produktu (w zakresie badawczy o ponad 28%). Natomiast udział frakcji (1,4-0,8) mm pyłu słomy żyta jest silnie dodatnio skorelowany ze wzrostem prędkości kątowej w przedziale (9.000 ... 18.000)min⁻¹(r=0,98). Świadczy to o tym, że wraz ze wzrostem prędkości, zwiększa się udział frakcji (1,4-0,8) mm w całkowitej masie próbki (w zakresie badawczy o ponad 6%). Podobnie udział frakcji (0,8-0,4) mm pyłu słomy żyta jest silnie dodatnio skorelowany ze wzrostem prędkości w przedziale (9.000 ... 18.000)min⁻¹(r=0,99). Ze wzrostem prędkości, zwiększa się udział frakcji (0,8-0,4) mm w całkowitej masie próbki (w zakresie badawczy o ponad 7%).

Udział wartości frakcji najmniejszej (<0,4) mm pyłu słomy żyta jest silnie dodatnio skorelowany ze wzrostem prędkości w przedziale (9.000 ... 18.000)min⁻¹(r=0,90). Ze wzrostem prędkości obrotowej, zwiększa się udział frakcji (<0,4) mm w całkowitej masie próbki (w zakresie badawczy o nawet 21%). Drugie mikro-mielenie produktu daje już zadowalające wyniki jakościowe: łącznie ok. 96% frakcji najdrobniejszej (<0,40)mm.

Z przytoczonych zalet biomasy w przemyśle energetycznym nasuwa się główna myśl, iż polski przemysł energetyczny w najbliższej przyszłości jest "skazany" na rozwijanie mikro-rozdrabniania biomasy w pozyskiwaniu energii. Uwarunkowania polityczne (zarówno krajowe jak i unijne) wymagają od producentów energii stosowania w ściśle określonych ramach czasowych odpowiednich poziomów uzyskiwanej energii ze źródeł odnawialnych. Rolniczy charakter Polski sprzyja zakładaniu i pielęgnacji roślin energetycznych, które mogą zapewnić odczuwalną niezależność energetyki przemysłowej od paliw kopalnianych i w konsekwencji ograniczyć ich stosowanie.

Na podstawie wyników badań mikro-rozdrabniania można stwierdzić, że wraz z przyrostem czasu trwania procesu, zmniejsza się udział procentowy frakcji (>0,8-0,4) mm oraz zwiększa się udział pożądanych energetycznie frakcji: (0,25-0,4) mm, a szczególnie pyłów (<0,25) mm.

"Badania wykonano w Firmie HYDRAPRESS Sp. z o.o., w ramach projektu POIG 01.04.00-04-003/11-00: "Wzrost konkurencyjności firmy przez opracowanie technologii rozdrabniania biomasy"

Literatura

1. Armstrong P R, Lingenfelter J E, McKinney L. The Effect of Moisture Content on Determining Corn Hardness from Grinding Time, Grinding Energy, and Near - Infrared Spectroscopy. Applied Engineering in Agriculture. 2007; 23(6): 793-799.
2. Bieliński K S, Flizikowski J B. Sterowanie rozgrywające i rozliczanie energomediów w obiektach. EKOMILTARIS, WAT, Zakopane 2008.
3. Błasiak W, Moberg G, Grimbrandt J. Redukcja tlenków azotu oraz optymalizacja spalania w komorach kotłów za pomocą asymetrycznego systemu podawania powietrza wtórnego. 10 Międzynarodowa Konferencja Technik Grzewczych, Göteborg, 2006.
4. Flizikowski J. Inteligentny system rozdrabniania. Inżynieria i Aparatura Chemiczna 2011; 3(50): 22-24.
5. Flizikowski J. Poziomy inteligentnego systemu rozdrabniania. Inżynieria i Aparatura Chemiczna 2011; 3(50): 24-26.
6. Flizikowski J. Micro - and Nano - energy grinding. Panstanford Publishing, Singapore, 2011.
7. Głód K, Rysiawa K. Współspalanie biomasy. Instytut Chemicznej Przeróbki Węgla. XV Wiosenne Spotkanie Ciepłowników. Zakopane 2008.
8. Golec T. Współspalanie biomasy w kotłach energetycznych. Energetyka 2004; 7(8): 437-445.
9. Hoffman P C, Ngonyamo-Majee D, Shaver R D. Technical note: Determination of can hardness in diverse corn gin diverse corn germplasm using near - infrared reflectance baseline shift as a measure of grinding resistance. Journal of Dairy Science. 2010; Vol. 93, Issue 4: 1685-1689.

10. Kowalik K, Sykut B, Marczak H, Opielak M. A method of evaluating energy consumption of the cutting process based on the example of hard cheese. *Eksploatacja i Niezawodność – Maintenance and Reliability*, 2013;15(3): 241-245.
11. Kruczek M, Skrzypczak G, Muraszkowski R. Spalanie i współspalanie biomasy z paliwami kopalnymi. *Czysta Energia*, 2007; 68(6): 32-35.
12. Kryszak J. Wykorzystywanie biomasy dla pozyskiwania energii odnawialnej. Akademia Rolnicza, Poznań, 2005.
13. Kubica K. Spalanie biomasy i jej współspalanie z węglem. Instytut Chemicznej Przeróbki Węgla, Zabrze, 2004.
14. Laurow Z. Ekologiczne uwarunkowania pozyskiwania biomasy cele energetyczne w leśnictwie. Możliwości wykorzystania biomasy na cele energetyczne. Malinówka, 2003.
15. Lorenz U. Gospodarka węglem kamiennym energetycznym. IGSMiE, PAN, Kraków, 2010.
16. Macko M. Economic-energetic analysis of multi-edge comminution of polymer recyclates. Analiza ekonomiczno-energetyczna wielokrawędziowego rozdrabniania recyklatów polimerowych. *Przem. Chem.* 2013; 213(8): 1499-1502.
17. Mazurkiewicz D. A knowledge base of the functional properties of the conveyor belt Adhesive Joint For Fem Simulation Of Its Stress And Strain State *Journal Of Adhesion Science And Technology*. 2012; 26(10-11): 1429-1442.
18. Niederliński S. System i sterowanie. PWN, Warszawa, 1987.
19. Popiel P. Wpływ współspalania biomasy z pyłem węglowym na stratę niedopału. *Prace Instytutu Elektrotechniki, Zeszyt 249, Politechnika Lubelska*, 2011.
20. Powierża L. Zarys inżynierii systemów bioagro-technicznych. Wydawnictwo ITE, Radom, 1997.
21. Semczuk M. Ustawa o efektywności energetycznej - narzędzie w procesie budowy niskoemisyjnej i konkurencyjnej gospodarki. *Rynek Energii I(V). Zeszyt tematyczny. Wydawnictwo KAPRINT, Lublin*, 2010.
22. Soliński I, Jesionek J. Efekty ekologiczne współspalania biomasy z węglem kamiennym. *Warsztaty; Współspalanie biomasy i termiczna utylizacja odpadów w energetyce. Kraków*, 2007.
23. Ściążko M, Zuwała J, Pronobis M. Zalety i wady współspalania biomasy w kotłach energetycznych na tle doświadczeń eksploatacyjnych pierwszego roku współspalania biomasy na skalę przemysłową, *Energetyka i Ekologia* 2006; 3: 207-220.
24. Sharma B, Jones C L, Khanchi A. Tensile Strength and Shear Strength of Switchgrass Before and After Frost. *Biological Engineering Transactions*. 2011; Vol.4(1): 43-54.
25. Tomporowski A, Flizikowski J. Charakterystyki ruchowe wielotarczowego rozdrabniacza ziaren biomasy. *Przem. Chem.* 2013; 92(4): 498-503.
26. Tomporowski A. Stream of efficiency of rice grains multi-disc grinding. *Eksploatacja i Niezawodność – Maintenance and Reliability* 2012; 14(2): 150-153.

27. Tomporowski A, Opielak M. Structural features versus multi-hole grinding efficiency. *Eksploatacja i Niezawodność – Maintenance and Reliability* 2012; 14(3): 223-228.
28. Topoliński T. Flizikowski J. Jasiński J. Welnowski D. Inżynieria energomechaniczna biomasy. Cz. II. Mikronizator. *Inż. i Ap. Chem.* 2013; 52(1): 9-10.
29. Vishwakarma R K, Shivhare U S, Nanda S K. Physical properties of guar seeds. *Food Bioprocess Technology*, 2012; 5: 1364-1371.
30. Walton O. Effects of interparticle friction and particle shape on dynamic angles of repose via particle - dynamics simulation. *Proc. Conf. Mechanics and Statistical Physics of Particulate Materials*, June 8-10, La Jolla CA, USA, 1994.
31. Węglarz A. Prawne aspekty efektywności energetycznej w Polsce w świetle Dyrektyw Unii Europejskiej. KAPE, Warszawa, 2010.
32. Zawada J, (red). Wprowadzenie do mechaniki maszynowych procesów kruszenia. ITE. Radom-Warszawa, 2005.