

Weronika KRUSZELNICKA

e-mail: weronika.kruszelnicka@gmail.com

Zakład Systemów Technicznych, Wydział Inżynierii Mechanicznej, Uniwersytet Technologiczno-Przyrodniczy, Bydgoszcz

Analiza wskaźników stosowanych do oceny rozdrabniania**Wstęp**

Rozwój technologii stwarza zapotrzebowanie na materiały o określonym, pożądanym składzie ziarnowym, który w dużej mierze zależy od rozwiązań konstrukcyjnych rozdrabniacza. Ponieważ proces rozdrabniania charakteryzuje się dużą energochłonnością, ważne jest określenie zależności między energią wykorzystywaną w procesie rozdrabniania, a uzyskanym efektem rozdrabniania materiału (hipotezy/teorie *Charlesa, Kicka, Bonda, Rittingera*).

Inżynieria wielotarczowego rozdrabniania biomasy uziarnionej i rozdrabniania obejmuje szereg zagadnień m.in. efektywność energetyczną, wydajność, nieszkodliwość środowiskową, jakość produktu końcowego. Usystematyzowanie charakterystyk procesu i określenie wydajności na tle istniejących teorii rozdrabniania pozwoli zaproponować postać modelu – do weryfikacji w ramach badań własnych – z uwzględnieniem specyficznych cech konstrukcyjnych rozdrabniacza wielotarczowego.

Celem pracy jest usystematyzowanie i analiza wskaźników oceny rozdrabniania na potrzeby modelowego opisu procesu dla systemu inteligentnego monitorowania charakterystyk użytkowych rozdrabniania.

Rozdrabnianie materiałów ziarnistych

Proces rozdrabniania polega na zmniejszaniu wymiarów geometrycznych cząstek materiału poprzez ich podział w wyniku działania sił wywołanych ruchem elementów roboczych, co powoduje powstawanie naprężeń przekraczających granicę wytrzymałości materiału rozdrabnianego (odpowiednio na ściskanie, ścinanie, naciski powierzchniowe w zależności od działających obciążeń) przez co ulega on zniszczeniu i rozpada się na mniejsze frakcje. W zależności od charakteru oddziaływań zespołów roboczych rozdrabniaczy na materiał rozdrabniany i naprężeń powstających w materiale wyróżnia się następujące sposoby rozdrabniania: zgniatanie, ścinanie, ścieranie, uderzanie, łamanie [*Brożek i Naziemiec, 2012*].

Cele procesowe. Dla procesu rozdrabniania surowców na potrzeby energetyczne można wyznaczyć cele procesowe. *Flizikowski [1998]* wyróżnia cele główne i dodatkowe procesu rozdrabniania (Tab. 1). Cele główne dotyczą przede wszystkim funkcji realizowanej przez system, cele dodatkowe natomiast stanowią wypadkową środowiskowych uwarunkowań procesu, oddziaływania otoczenia na rozdrabniający system techniczny.

Tab. 1. Cele główne i dodatkowe procesu rozdrabniania [*Flizikowski, 1998*]

Rozdrabnianie na cele energetyczne	
Cele główne	Cele dodatkowe
<ul style="list-style-type: none"> - dekohezja materiału - uzyskanie pożądanego stopnia rozdrobnienia - zwiększenie powierzchni właściwej cząstek - jednorodność granulometryczna wsadu - homogenizacja i wymieszanie wsadu - zmniejszenie objętości materiałów - zachowanie właściwości wsadu - przygotowanie do dalszej przeróbki 	<ul style="list-style-type: none"> - efektywność energetyczna, ekologiczna i ekonomiczna - wysoka jakość produktu - sterowalność procesu - bezpieczeństwo

Warunki techniczne. Realizacja postawionych celów wymaga zapewnienia odpowiednich warunków technicznych, a wybór technologii dopasowanej do struktury rozdrabnianego materiału powinien opierać się o kryteria oceny procesu obejmujące [*Flizikowski i Sadkiewicz, 2013*]:

- jakość surowców energetycznych oraz produktów, odpadów, energii i mocy w procesie rozdrabniania,
- efektywność energetyczną (niskie zużycie energii, niezawodność, trwałość elementów, sprawność układu), ekologiczną (redukcja emisji, przetwórstwo odpadów, współspalanie) i ekonomiczną procesu,
- nieszkodliwość środowiskową wynikającą z działania urządzeń.

Następujące warunki techniczne wskazuje się jako niezbędne do spełnienia kryteriów oceny [*Flizikowski i Sadkiewicz, 2013*]:

- opracowane sposoby, idee rozdrabniania materiałów energetycznych,
- cechy konstrukcyjne zespołów rozdrabniających: cechy geometryczne, materiałowe, dynamiczne, wymiary, itp.,
- regulowane parametry procesu rozdrabniania i wzajemne relacje elementów: wydajność, prędkość linowa i kątowa elementów, temperatury procesu i produktu, moment obrotowy, zużycie energii, siły i ciśnienia.

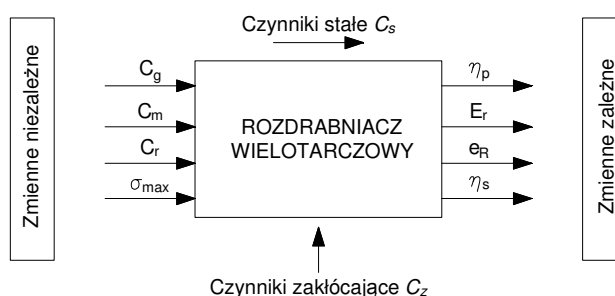
W przypadku materiałów energetycznych, np.: biomasy, węgla, tworzyw sztucznych, odpadów, zmniejszenie wymiarów (rozdrobnienie) w znaczący sposób wpływa na poprawę warunków transportu materiałów do kotłów, pozwala na usprawnienie dozowania składników mieszanki wsadowej w procesach współspalania, ułatwia kontrolowanie procesu spalania, zmniejszenie powierzchni magazynowych dla przechowywania surowców energetycznych [*Cocker-Maciejewska, 2007; Popiel, 2011*].

Bardzo ważna w procesie spalania jest powierzchnia właściwa spalanych materiałów energetycznych i homogeniczność wsadu. Dzięki rozdrobnieniu uzyskuje się zwiększenie powierzchni właściwej oraz ujednoczenie wymiarowe cząstek materiałów, w wyniku czego proces spalania zachodzi szybciej [*Hryb i Biegańska, 2013*].

Wskaźniki oceny procesu rozdrabniania

Na parametry procesu rozdrabniania ma wpływ wiele zmiennych czynników, poczynając od właściwości materiału, a na parametrach roboczych zespołu rozdrabniającego kończąc [*Fraczek i Mudryk, 2007*].

Identyfikacja stałych i zmiennych procesu pozwala na wyznaczenie zależności funkcyjnych (zmiennych zależnych), będących kryteriami, wskaźnikami, funkcjami celu rozdrabniania, wg. których następować będzie sterowanie i samoregulacja systemu rozdrabniania biomasy. Schemat relacji zmiennych niezależnych i zależnych procesu rozdrabniania przedstawiono na rys. 1.



Rys. 1. Schemat relacji zmiennych zależnych i niezależnych w procesie wielotarczowego rozdrabniania, C_g – cechy geometryczne, C_m – cechy materiałowe, C_r – cechy ruchowe, σ_{max} – cechy wytrzymałościowe, η_p – sprawność przekładni, E_r – zapotrzebowanie na energię, e_R – efektywność energetyczna, η_s – sprawność silnika

Charakterystyki użytkowe procesu rozdrabniania (mierzone bezpośrednio) związane są ze zmiennymi, regulowanymi parametrami bezpośrednio zależnymi od konstrukcji rozdrabniacza, a należą do nich:

- moment obrotowy,
- prędkość liniowa krawędzi tnących,
- prędkość obrotowa krawędzi tnących, wału rozdrabniacza,
- czas rozdrabniania,
- moc rozdrabniacza,
- energia zużyta na rozdrabnianie.

Ogólne zależności matematyczne opisujące powyższe charakterystyki przedstawiono w tab. 2.

Tab. 2. Charakterystyki procesu rozdrabniania i ich ogólny opis matematyczny

Charakterystyki użytkowe procesu rozdrabniania	
Parametr	Zależność
Moment obrotowy, M_o [Nm]	$M_o = rF = \frac{P}{\omega} \quad (1)$ <p>r – promień wodzący siły, [m] F – działająca siła, [N] P – moc rozdrabniacza [W] ω – prędkość kątowa elementu tnącego [rad/s]</p>
Prędkość liniowa krawędzi tnących, v [m/s]	$v = \omega R \quad (2)$ <p>R – odległość krawędzi tnącej od środka obrotu [m]</p>
Prędkość obrotowa, n [1/s]	$n = \frac{\omega}{2\pi} \quad (3)$
Czas rozdrabniania, t [s]	-
Moc rozdrabniacza, P [W]	$P = M_o \omega \quad (4)$
Energia zużyta na rozdrabnianie, E [kJ]	$E = Pt \quad (5)$

Opis pracy rozdrabniania. W literaturze znaleźć można wiele sposobów opisu pracy rozdrabniania, m.in. *Rittingera, Bracha, Bonda, Kicka, Rebindera, Mielnikowa, Wang, Walker-Charles'a, Rumpf'a, Papadakisa* [Bieliński, 1998; Kwiatkowski i in., 2012]. Z tych teorii wynikają zależności na zapotrzebowanie energii w procesie rozdrabniania. W tab. 3 zestawiono najważniejsze zależności opisujące zagadnienia energetyczne procesu rozdrabniania.

Tab. 3. Zależności opisujące zapotrzebowanie na energię w procesie rozdrabniania materiałów wg [Bieliński, 1998; Kwiatkowski i in., 2012]

Zapotrzebowanie energii na rozdrabnianie	
Autor	Zależność
Rittinger	$E_{Ri} = K_{Ri} \left(\frac{1}{d} - \frac{1}{D} \right) \quad (6)$ <p>E_{Ri} – energia rozdrabniania Sześciąt o boku d odzwierciedlający kształt ziarna po rozdrobnieniu Sześciąt o boku D odzwierciedlający kształt ziarna przed rozdrobnieniem</p>
Kick	$E_{Ki} = K_{Ki} p \quad (7)$ <p>E_{Ki} – energia rozdrabniania K_{Ki} – współczynnik proporcjonalności, p – liczba rozdrobnienia.</p>
Bond	$E_{Bo} = K_{Bo} \left(\frac{1}{\sqrt{d_{80}}} - \frac{1}{\sqrt{D_{80}}} \right) \quad (8)$ <p>E_{Bo} – energia rozdrabniania K_{Bo} – stała Bonda d_{80} – udział ziarna produktu D_{80} – udział ziarna nadawy</p>

Zależności przedstawione w tab. 3 nie oddają w pełni potrzeb energetycznych rozdrabniania. Najpopularniejszą z przedstawionych jest teoria Bonda, wg której należy wcześniej wykonać analizę granulometryczną nadawy i produktu, aby wyznaczyć wymiary 80% ziaren.

Proces rozdrabniania może być oceniany pod kątem wielu różnych kryteriów, które zależą od zastosowanej technologii, rodzaju

młyna i jego wydajności, a także skali systemu [Macko, 2016].

Wskaźniki oceny rozdrabniania. Macko [2016] dokonał podziału wskaźników oceny rozdrabniania na trzy grupy: wskaźniki technologiczne dotyczące jakości produktu, wskaźniki techniczne związane z możliwościami technologicznymi i zużyciem energii oraz wskaźniki ekonomiczne obejmujące koszt eksploatacji i inwestycji (Tab. 4).

Tab. 4. Wskaźniki oceny rozdrabniania [Macko, 2016]

Wskaźniki oceny rozdrabniania		
Technologiczne	Techniczne	Ekonomiczne
<ul style="list-style-type: none"> - stopień rozdrobnienia - powierzchnia właściwa - stopień wzrostu powierzchni - wydajność całkowita - kształt ziaren 	<ul style="list-style-type: none"> - jednostkowe zapotrzebowanie na energię - możliwości współpracy z innymi urządzeniami - wskaźniki skuteczności 	<ul style="list-style-type: none"> - koszty eksploatacyjne - koszty inwestycyjne - koszty procesów towarzyszących

Inny podział wskaźników-kryteriów oceny rozdrabniania spotkać można w pracy [Flizikowski i Sadekiewicz, 2013]. Wyróżnia się tam następujące kryteria oceny: jakość, efektywność i nieszkodliwość (Tab. 5).

Tab. 5. Kryteria oceny rozdrabniania [Flizikowski, 1998; Flizikowski i Sadekiewicz, 2013]

Kryteria oceny rozdrabniania		
Jakości	Efektywności	Nieszkodliwości
<ul style="list-style-type: none"> - produktu (stopień rozdrobnienia) - procesu (wydajność) - maszyny 	<ul style="list-style-type: none"> - energetycznej - ekonomicznej - ekologicznej 	<ul style="list-style-type: none"> - wskaźniki emisji zanieczyszczeń - wskaźniki emisji hałasu - wskaźniki emisji odpadów

Stopień rozdrobnienia jest najczęściej wykorzystywanym wskaźnikiem oceny rozdrabniania. Można go określać na wiele sposobów, np. za pomocą granicznego stopnia rozdrobnienia i_g :

$$i_g = \frac{D_{max}}{d_{max}} \quad (9)$$

gdzie:

D_{max} – średnia arytmetyczna średnic największych ziaren nadawy,

d_{max} – średnia arytmetyczna średnic największych ziaren produktu rozdrabniania.

Graniczny stopień rozdrobnienia obarczony jest błędem wynikającym z faktu, że ziarna nadawy i produktu nie są idealnie okrągłe.

Stopień rozdrobnienia może też być wyznaczany z zależności na 80% stopień rozdrobnienia [Tomporowski, 2010]:

$$i_{80} = \frac{D_{80}}{d_{80}} \quad (10)$$

gdzie:

D_{80} – wymiar otworu sita, przez które przechodzi 80% ziaren nadawy,

d_{80} – wymiar otworu sita, przez które przechodzi 80% ziaren produktu rozdrabniania.

Stopień rozdrobnienia i_{80} najłatwiej wyznaczyć na podstawie analizy granulometrycznej i krzywych składu ziarnowego nadawy i produktu odczytując 80% udział ziaren.

Wskaźnik skuteczności energetycznej rozdrabniania W_j łączący kilka parametrów rozdrabniania okazuje się przydatny w analizie porównawczej i pozwala na porównanie procesów rozdrabniania [Macko, 2016]:

$$W_j = \frac{\Delta S \cdot m_s}{P_{sr} \cdot t} \quad (11)$$

m_s – masa rozdrabnianego nośnika energii, [kg]

P_{sr} – średnia moc do rozdrabniania nośnika energii [W],

t – czas rozdrabniania nośnika energii o określonej masie m_s [h].
 W_j – wskaźnik skuteczności procesu rozdrabniania, [m²/(Wh)]
 ΔS – przyrost powierzchni właściwej rozdrabnianego nośnika energii, [m²/kg]

Wskaźnik jednostkowego zapotrzebowania na energię E_j określająco ilość energii elektrycznej potrzebnej do rozdrobnienia w odniesieniu do jednostki masy materiału rozdrobnionego jest jednym z najprostszych wskaźników w analizie i ocenie procesu rozdrabniania:

$$E_j = \frac{E_z}{m_s} \quad (12)$$

E_j – jednostkowe zapotrzebowanie na energię w procesie rozdrabniania, [kWh/kg]

E_z – zapotrzebowanie na energię potrzebną do rozdrobnienia określonej masy rozdrabnianego nośnika energii, [kWh]

m_s – masa rozdrabnianego nośnika energii [kg].

Zmniejszanie się wskaźnika jednostkowego zapotrzebowania na energię prowadzi do wzrostu sprawności, efektywności energetycznej procesu rozdrabniania.

Wskaźnik energochłonności celowej E_{Rq} , wyrażający ilość energii na rozdrabnianie odniesioną do wydajności uzyskania produktu o określonych wymiarach może być miarą użyteczności procesu i produktu, ponieważ celem rozdrabniania jest uzyskanie produktu o określonych, wymaganych wymiarach [Macko, 2016]:

$$E_{Rq} = \frac{P_r}{W_{fq}} = \frac{P_j + P_s + P_d}{W_{fq}} = \frac{k_j v_r + \delta_{q-s} + A_R + \varepsilon F_r v_r^2}{W_{fq}} \quad (13)$$

gdzie:

P_r – moc potrzebna do rozdrobnienia nośnika energii, [kW]

W_{fq} – wydajność rozdrabniania dla ilości materiału o pożądanym wymiarach, [kg/h].

Dla rozdrabniania w celu wyznaczenia efektywności procesu można posłużyć się modelem ogólnym wiążącym korzyści i nakłady energetyczne rozdrabniania nośników energii w postaci [Macko, 2016]:

$$E_e = \frac{K_e}{N_e} \quad (14)$$

gdzie:

K_e – korzyści energetyczne wykorzystania nośnika energii [J/g],

N_e – nakłady energetyczne na rozdrabnianie [J/g].

Efektywność procesu dla quasi-ścianania opisuje **funkcja przystosowania** e_{RP} , która w sposób szczegółowy reprezentuje model efektywnościowy [Flizikowski, 2016]:

$$e_{RP} = \frac{(\eta_{q-s} - \eta_o) E_{brutto} \eta_s \eta_p}{(k_j v_r + \tau_{q-s} F_{q-s} + \varepsilon F_r v_r^2) M_k v_r t} \quad (15)$$

gdzie:

E_{brutto} – energia przetwarzanych ziaren [kJ/kg],

F_{q-s} – chwilowy przekrój quasi-ścianania [m²],

F'_R – przekrój wtórnych oddziaływań podczas quasi-ścianania [m²],

k_j – współczynnik oporów ruchu jałowego [kJ/s],

M_k – wskaźnik krotności próby,

ε – współczynnik proporcjonalności [N/s²m⁴],

η_{q-s} – sprawność spalania rozdrobnionych nośników energii,

η_o – sprawność spalania całych ziaren wybranych nośników energii,

η_s – sprawność silnika, η_p – sprawność przekładni,

v_r – prędkość quasi-ścianania [m/s],

τ_{q-s} – naprężenia podczas quasi-ścianania [N/m²].

Całkowity wskaźnik efektywności procesu rozdrabniania ma postać [Flizikowski i Kamyk, 2008]:

$$k = k_w k_n k_R k_E \quad (16)$$

$$k_w = W_t; \quad k_n = i; \quad k_R = 1/R_{max sr}; \quad k_E = 1/L_r;$$

gdzie:

i – efektywny stopień rozdrobnienia,

L_r – energia lub praca użyteczna na rozdrabnianie,

$R_{max sr}$ – średnie maksymalne siły na rozdrabnianie,

W_t – wydajność efektywna.

Podsumowanie i wnioski

Przeprowadzona analiza źródeł literaturowych pozwala na stwierdzenie, że sposoby oceny procesu rozdrabniania powinny uwzględniać relacje między energią na wejściu procesu, stratami oraz energią na wyjściu procesu, mając na uwadze mechaniczne aspekty rozdrabniania i relacje pomiędzy maszyną a otoczeniem.

Dalsze prace nad rozwojem systemów specjalnych w kierunku inteligentnego systemu rozdrabniania biomasy uziarnionej, opracowanie modeli matematycznych wskaźników efektywności energetycznej i środowiskowej wielokrawędziowego rozdrabniania, w kierunku przydatności energetycznej wybranych bionośników energii mogą w efekcie przynieść korzyści w postaci poprawy jakości produktów rozdrabniania, racjonalnej gospodarki energią (oszczędność energii), poprawy bilansu ekologicznego systemu, procesu rozdrabniania i spalania biomasy.

LITERATURA

- Bieliński, M. (1998). *Materiałowa i przetwórcza charakterystyka wybranych termoplastycznych tworzyw sztucznych*. Wyd. ATR, Bydgoszcz: Brożek, M., Naziemiec, Z. (2012). Analiza mechaniki procesu rozdrabniania surowców mineralnych w kruszarkach i wysokociśnieniowych prasach walcowych. *Gospodarka Surowcami Mineralnymi*, 28(3), 139-153
- Cocker-Maciejewska, A. (2007). Obróbka wstępna biomasy na potrzeby systemów energetycznych. *Ochr. Środ. i Zas. Nat.*, 30, 133-141
- Flizikowski, J. (1998). *Rozdrabnianie tworzyw sztucznych*. Wyd. ATR, Bydgoszcz
- Flizikowski, J. (2016). Metodyka inteligentnego rozwoju procesów rozdrabniania. *Inż. Ap. Chem.*, 55(3), 90-92
- Flizikowski, J., Kamyk, W. (2008). Efektywność energetyczna specjalnego systemu rozdrabniania. *Teka Kom. Bud. Ekspl. Masz. Elektrotech. Bud. - OL PAN*, 17-22
- Flizikowski, J., Sadkiewicz, J. (2013). Inżynieria innowacji rozdrabniaczy ziarnistej biomasy. *Inż. Ap. Chem.*, 52(2), 36-37
- Frączek, J., Mudryk, K. (2007). Metoda pomiaru energochłonności procesów zrybkowania pędów wierzby. *Inż. Roln.*, 95(7), 47-53
- Hryb, W., Biegańska, J. (2013). Wytwarzanie paliw z odpadów dla cementowni. *Przeł., Komunalny - dodatek specjalny*, 2, 32-34
- Kwiatkowski, S. P., Zawiślak, K., Sobczak, P. (2012). Ocena procesu rozdrabniania ziarna jęczmienia rozdrabniaczami bijakowymi. *Acta Sci. Pol., Technica Agraria*, 1(3-4), 65-72
- Macko, M. *Konstrukcja rozdrabniaczy do biomasy*. (11-2017) http://naszaenergia.kujawsko-pomorskie.pl/fileadmin/doc/artykuly/nowe/KONSTRUKCJA_ROZDRABNIACZY_DO_BIOMASY.pdf
- Popiel, P. (2011). Wpływ współspalania biomasy z pyłem węglowym na stratę niedopału. *Pr. Inst. Elektr.*, 249, 69-80
- Tomprowski, A. (2010). Badanie użyteczności rozdrabniania ziaren ryżu. Część I. Model badawczy. *Inż. Ap. Chem.*, 49(5), 119-120

Praca finansowana ze środków budżetowych na naukę w latach 2017-2021 jako naukowy projekt badawczy w ramach programu „Diamenty Grant”.