

Mateusz PRZYWARA, Joanna OLIVA, Ireneusz OPALIŃSKI

e-mail: ichio@prz.edu.pl

Katedra Inżynierii Chemicznej i Procesowej, Wydział Chemiczny, Politechnika Rzeszowska, Rzeszów

## Wpływ wilgotności na charakterystyki płynięcia alternatywnych biopaliw stałych. Cz.1. Biomasa leśna i AGRO

### Wstęp

W ostatnich latach obserwuje się stały wzrost ilości energii uzyskiwanej ze źródeł odnawialnych, w szczególności biomasy stałej, której udział w ogólnym zużyciu biomasy wynosił w 2011 r. blisko 86% [Berent-Kowalska i in., 2012]. Zgodnie z wytycznymi polityki energetycznej, Polska ma obowiązek produkcji 20% energii z OZE do 2021 roku oraz zwiększenia udziału tzw. biomasy AGRO w całej spalanej biomase od 50% w 2012 roku do 85% w roku 2021 [Rozporządzenie MG, 2012]. Zapewnienie ciągłości dostaw i wykorzystania biomasy w skali przemysłowej wymaga gruntownej wiedzy o jej właściwościach.

Wady biomasy stałej jako biopaliwa, takie jak zmienność właściwości, w tym wartości opałowej i znaczne naturalne zawilgocenie utrudniają jej szersze wykorzystanie. Nieliczne są prace prezentujące wyniki badań biomasy. Podkreślane są problemy przechowywania biomasy w silosach, tj. jej przesklepienie, nawisy i tunele, mogące doprowadzić do całkowitego przerwania ciągłości procesów spalania [Mattsson i Kofman, 2002]. Kolejne wskazywane trudności to niekorzystny wpływ wilgotności na właściwości biomasy oraz duża jej kohezynność. Zwiększenie zawartości wilgoci przyczynia się do wzmocnienia oddziaływań między ziarnami materiału, co może pogorszyć właściwości mechaniczne [Zou i Brusewitz, 2002; Ganesan i in., 2008]. Wilgotność niekorzystnie wpływa też na takie procesy, jak granulacja czy mieszanie [Landillon i in., 2008]. Dane literaturowe wskazują ponadto, że proszkowe materiały roślinne, do których można zaliczyć biomasę, cechują się dużą chłonnością wilgoci, co sprzyja zbrylaniu podczas magazynowania [Fitzpatrick i in., 2007].

Chevanan i in. [2009] badali wpływ obciążenia zewnętrznego na właściwości mechaniczne rozdrobnionej słomy pszenicy i kukurydzy wykorzystując tzw. aparat bezpośredniego ścinania *Jenikego*. Uzyskane wyniki autorzy proponują zastosować do projektowania urządzeń do przechowywania biomasy oraz do opracowania systemów jej przesyłu. Aparat *Jenikego* umożliwia pomiar wytrzymałości materiału na ścinanie w warunkach statycznych i pod znacznym obciążeniem zewnętrznym (odpowiadającym obciążeniu podczas magazynowania materiału w silosie). Wyniki pomiarów tym aparatem pozwalają określić graniczne naprężenia styczne, po przekroczeniu których materiał przechodzi w stan plastycznego płynięcia. Oznacza to przewyższenie naprężeń (np. zakłóceń w postaci przesklepień, nawisów) pochodzących od wewnętrznych sił spójności materiału i uzyskanie stanu płynięcia. Naprężenia graniczne uzyskane z testów ścinania stanowią podstawę do projektowania silosów w zakresie ich napełniania i opróżniania [Schwedex, 2003].

Badania reologiczne, w przeciwieństwie do mechanicznych, prowadzone są w warunkach dynamicznych i pod małymi obciążeniami zewnętrznymi. Umożliwiają one określenie zdolności materiału do płynięcia pod wpływem przyłożonej siły, np. tarcia pochodzącego od sąsiednich cząstek lub przesuwającej się pod materiałem powierzchni. Są szczególnie przydatne do badań operacji przepływowych, czy szerzej przetwórczych, jak np. fluidyzacji, transportu pneumatycznego lub mieszania. Jest to nowa technika badawcza materiałów sypkich i w dostępnej literaturze nie napotkano na wyniki dotyczące badań biomasy tą metodą. Z powodzeniem natomiast została ona zastosowana do projektowania instalacji transportu pneumatycznego złoża krzemionki i kaolinu przez zespół badawczy z uniwersytetu na Florydzie [Chen i in., 2002]. Pozwala to wnosić, że również w odniesieniu do biomasy ta metoda badania właściwości reologicznych okaże się przydatnym narzędziem badawczym.

Nieliczne i fragmentaryczne, dostępne w literaturze wyniki badań biomasy wymagają podjęcia prac w kierunku poszerzenia zasobu infor-

macji, które umożliwiłyby poprawne zaprojektowanie urządzeń do jej przechowywania i przetwarzania.

Celem pracy było zbadanie wpływu wilgotności biomasy stałej na charakterystyki płynięcia – mechaniczną i reologiczną, które są istotne odpowiednio dla operacji magazynowania oraz procesów przesyłu biomasy i dalszego przetwarzania. Charakterystykę mechaniczną wyznaczano znaną metodą za pomocą aparatu *Jenikego*. Do wyznaczenia charakterystyki reologicznej zastosowano nową metodę badawczą wykorzystującą proszkowy reometr obrotowy.

### Materiały

Doboru materiałów dokonano pod kątem porównania paliw konwencjonalnych z alternatywnymi biopaliwami sypkimi. Przebadano podstawowe rodzaje biomasy leśnej (trociny drzew liściastych, iglastych, przemysłowa mieszanka tych trocin) i biomasy AGRO (mączka mięsno-kostna, podestylacyjny susz zbożowy, wyłoki jabłkowe, łuski słonecznikowe) oraz dla porównania rozdrobniony węgiel kamienny. Wszystkie rodzaje trocin oraz mieszanka pochodziły z zakładu PPHU DREWNOTECH – Rzeszów. Wstępne badania wykazały, że charakterystyka mechaniczna i reologiczna wymienionych rodzajów trocin badanych osobno nie odbiega istotnie od charakterystyki mieszanki. Z tego powodu dalej przedstawione zostaną wyniki dla mieszanki, mającej istotne znaczenie przemysłowe. Udział trocin sosnowych w mieszance wynosił ok. 60%, bukowych ok. 20%, dębowych ok. 10%; resztę stanowiły trociny czeresni i jesionu.

Z materiałów należących do biomasy AGRO, w pracy pokazane zostaną typowe dla tej grupy materiałów wyniki dla mączki mięsno-kostnej. Mączka jest przetworzonym białkiem zwierzęcym kategorii III, której dostawcą był zakład SARIA S.A. w Przewrotnem k. Rzeszowa. Ponieważ mączki mięsno-kostne są produktami organicznymi pochodzenia naturalnego ich skład podlega wahaniom. Badany materiał charakteryzował się wysoką zawartością substancji organicznych – rzędu 60%, ponadto zawierał ok. 15% wapnia, 12% fosforu, 8% azotu i innych substancji odżywczych w mniejszych ilościach. Wybór materiałów konsultowano z przedstawicielami PKE w Katowicach oraz Elektrociepłowni Stalowa Wola S.A.

Wyniki uzyskane dla biomasy porównano z wynikami dla paliwa konwencjonalnego, tj. rozdrobnionego węgla kamiennego, dostarczonego przez Elektrociepłownię Stalowa Wola S.A.

Skład granulometryczny materiałów wyznaczano za pomocą analizatora laserowego MALVERN Mastersizer 2000E, metodą dynamicznego rozpraszania światła. Wartości średnic D(0,5), które także określane są jako mediana masowa średnic MMD (*Mass Median Diameter*) zestawiono w tab. 1.

Tab. 1. Właściwości badanych materiałów

Badany materiał	Średnie rozdrobnienie D(0,5) [μm]	Gęstość usypowa [kg/m <sup>3</sup> ]	Gęstość upakowana [kg/m <sup>3</sup> ]	Kąt różnicowy [deg]
Węgiel kamienny	43	443	769	21,6
Biomasa leśna	148	264	439	24,7
Mączka mięsno-kostna	242	438	649	18,4

Zmierzone też wartości gęstości usypowej, upakowanej i kąta różnicowego (różnica pomiędzy kątem nasypu oraz kątem opadania tj. kątem powstałym przez poddanie materiału działaniu odpowiednich wstrząsów). Wartości gęstości oraz kątów określano urządzeniem *Powder Tester PT-S* japońskiej firmy HOSOKAWA MIKRON B.V. o zautomatyzowanym i skomputeryzowanym trybie pracy wg standardów mię-

dzynarodowych, znanych pod nazwą metody wyznaczania wskaźników *Carra* [Powder Tester Operating Manual, 2011].

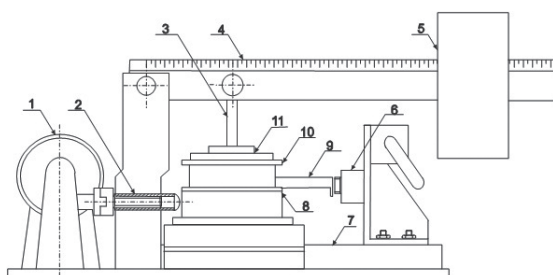
## Aparatura i metodyka badań

### Aparatura do nawilżania złoża materiału sypkiego

Wilgotność materiału określano za pomocą wagosuszarki *WPS 210S* firmy *RADWAG*. W celu równomiernego nasycenia całej masy materiału sypkiego wilgocią, nawilżanie prowadzono w mieszalniku przepływowym typu *V*, wyposażonym w system przepływu strumienia powietrza o określonej wilgotności i temperaturze.

### Aparat bezpośredniego ścinania *Jenikego*

Zmiany charakterystyki mechanicznej pod wpływem wilgoci badano aparatem bezpośredniego ścinania (Rys. 1) skonstruowanym na wzór aparatu *Jenikego* [1964]. Aparat został wykonany zgodnie z wytycznymi normy europejskiej [PN-EN 1991-4, 2003]. Główną jego częścią jest cylindryczna komora ścinania o średnicy  $D = 60$  mm i wysokości  $H = 30$  mm. Komora podzielona jest na dwie części: dolną, która w trakcie pomiaru przesuwa się wraz z podstawą oraz górną nieruchomą, zaopatrzoną w pokrywę i trzpień naporowy. Aparat ma ograniczoną drogę ścinania oraz ustalone położenie strefy ścinania w połowie wysokości komory. Pomiaru prowadzono przy prędkości przesuwu podstawy 2,79 mm/min. Pionowy (normalny), konsolidujący nacisk zewnętrzny na badaną próbkę materiału ustalano za pomocą wykalibrowanych dźwigni oraz obciążników. Siłę styczną powstającą w trakcie ścinania rejestrowano za pomocą czujnika tensometrycznego siły *C9B* firmy *Hottinger Baldwin Messtechnik GmbH*, o zakresie do 200 N i dokładności  $\pm 1$  N. Czujnik sprzężony był ze wzmacniaczem *Spider 8* (*HBM*) połączonym z komputerem PC. Dane pomiarowe rejestrowane były w postaci cyfrowej przez program *Catman Easy 2.1*. Program ten umożliwiał rejestrowanie wartości siły wskazywanej przez czujnik z częstotliwością 50 Hz.

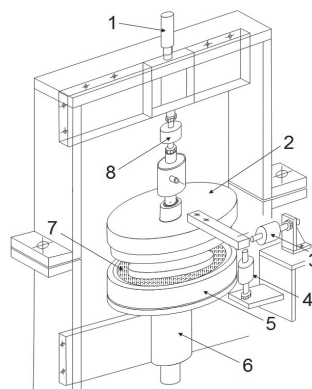


Rys. 1. Schemat aparatu bezpośredniego ścinania *Jenikego*: 1 – układ napędowy; 2 – trzpień napędowy; 3 – trzpień naporowy; 4 – dźwignia; 5 – obciążnik; 6 – czujnik siły stycznej; 7 – prowadnica; 8 – ruchoma część komory pomiarowej; 9 – ramię naporowe górnej części komory; 10 – nieruchoma część komory pomiarowej; 11 – pokrywa

Ścinanie złoża materiału proszkowego następuje w wyniku przesuwu części dolnej komory za pomocą trzpienia napędowego poruszającego się ze stałą prędkością. Rejestrowane jest naprężenie styczne, które stopniowo wzrasta, aż do przewyższenia spójności wewnętrznej (wytrzymałości na ścinanie) materiału i osiągnięcia stanu ustalonego płynięcia. Zmierzone wartości tego naprężenia odpowiadające zadany wartości obciążenia pionowego określają wartości współrzędnych punktów, których przybliżeniem jest linia (zazwyczaj prosta) nazywana warunkiem płynięcia.

### Proszkowy reometr obrotowy

Aparat *Jenikego* umożliwia prowadzenie badań w warunkach quasi-statycznych, tzn. przy prędkościach ścinania bliskich zeru. Odmianą metodą jest badanie w reometrze obrotowym (Rys. 2), gdzie prędkości ścinania mogą przyjmować duże wartości. Ujawniają się przy tym właściwości materiału, których nie można wykazać metodą *Jenikego*. Największą zaletą reometru jest możliwość badań przy znikomych poziomach obciążenia zewnętrznego; charakterystyka procesu nie jest w takich warunkach tłumiona dużym obciążeniem zewnętrznym stosowanym w aparacie *Jenikego*. Przewaga reometru uwidacznia się zwłaszcza w badaniach materiałów roślinnych, w tym biomasy. Mate-



Rys. 2. Proszkowy reometr obrotowy: 1 – zgrubna regulacja położenia talerza górnego; 2 – talerz górny; 3 – czujnik siły stycznej; 4 – czujnik położenia; 5 – dolny talerz obrotowy; 6 – napęd reometru; 7 – komora pomiarowa; 8 – czujnik siły normalnej

dokładnie odpowiadających wymiarom kanału.

Siłę docisku talerza górnego do dolnego ustalano na bardzo niskim poziomie, tj. ok. 1 N. Urządzenie wyposażono w dwa tensometryczne czujniki firmy *HBM*: *U9B* – do pomiaru siły normalnej i *C9B* – do pomiaru siły stycznej (oba o zakresie do 200 N i dokładności  $\pm 1$  N) oraz trzeci *WA10* – do pomiaru grubości złoża o zakresie pomiaru do 10 mm i dokładności 0,01 mm.

Ważną zaletą tego aparatu jest możliwość dokładnego ustalenia grubości ścinanej warstwy materiału. Jest to warunkiem poprawnego obliczenia szybkości ścinania. Z danych literaturowych [Horabik, 2001; Klausner i in., 2000] wynika bowiem, że w celu zapewnienia ruchu wszystkich cząstek próbki podczas procesu ścinania, grubość warstwy proszku powinna być utrzymywana na poziomie ok. 20 średnic cząstek. Stosownie do tego wymagania dobierano każdorazowo odpowiednią ilość materiału do badań.

Umieszczenie materiału sypkiego w zamkniętej komorze między ruchomymi talerzami reometru wywołuje w materiale dwa rodzaje naprężeń – normalne i styczne. Naprężenie normalne pochodzi od nacisku wywieranego przez talerz górny na materiał. Naprężenie styczne pochodzi natomiast od siły tarcia materiału o powierzchnię występu talerza górnego wskutek ruchu obrotowego materiału (ścinania). Ponieważ talerz górny jest nieruchomy, możliwy jest pomiar wartości naprężenia stycznego mierząc napór, jaki wywiera przymocowane do tego talerza ramię opierające się o czujnik siły stycznej.

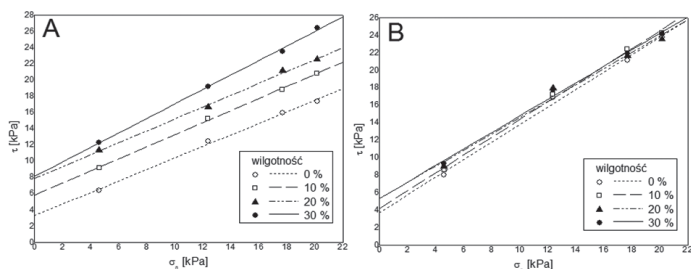
Wyniki zmierzonych reometrem wartości naprężeń stycznych ( $\tau$ ) i normalnych ( $\sigma_n$ ) przedstawiono w postaci typowej charakterystyki reologicznej, tj. zależności naprężenia stycznego lub normalnego od szybkości ścinania ( $\gamma$ ).

## Wyniki i dyskusja

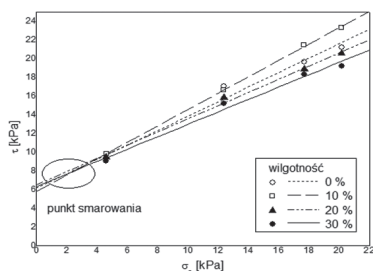
Za podstawę oceny i porównania wpływu wilgotności na właściwości badanych materiałów przyjęto dane uzyskane dla węgla (Rys. 3A). Wykres przedstawia zależność naprężenia stycznego ( $\tau$ ) od naprężenia normalnego ( $\sigma_n$ ) dla próbek tego materiału o różnej zawartości wilgoci. Węgiel wykazuje regularne i wyraźne zmiany charakterystyki mechanicznej. Wzrost wilgotności powoduje systematyczny wzrost naprężeń stycznych odpowiadających określonym wartościom naprężenia normalnego. Oznacza to zwiększanie się wytrzymałości materiału na ścinanie (wzrost kohezji materiału), co wpływa niekorzystnie na jego płynięcie. Potrzebna jest coraz większa siła, aby uzyskać to samo odkształcenie plastyczne. Najlepsze płynięcie wykazuje próbka o najmniejszej zawartości wilgoci.

Próbki biomasy wykazują podobną charakterystykę płynięcia. W przypadku biomasy leśnej (Rys. 3B) przebieg procesu jest zbliżony, lecz zmiany ilościowe nie są tak wyraźne jak dla węgla. Taki przebieg procesu ścinania zauważono również dla łupin orzesznika jadalnego [Littlefield i in., 2011]. Wskazuje to, że wzrost wilgotności może pogarszać zdolność płynięcia tego rodzaju biomasy.





Rys. 3. Wpływ wilgotności na warunek płynięcia dla: (A) – węgla kamiennego i (B) – biomasy leśnej (mieszanki przemysłowej trocin)

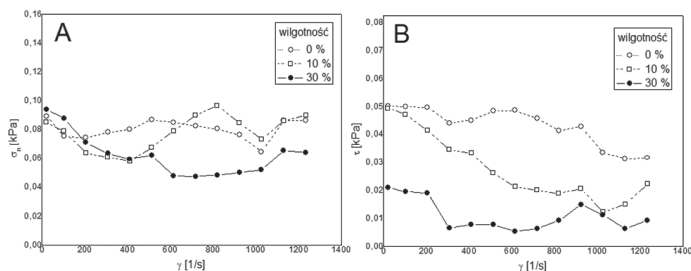


Rys. 4. Wpływ wilgotności na warunek płynięcia dla biomasy AGRO – mączki mięsno-kostnej

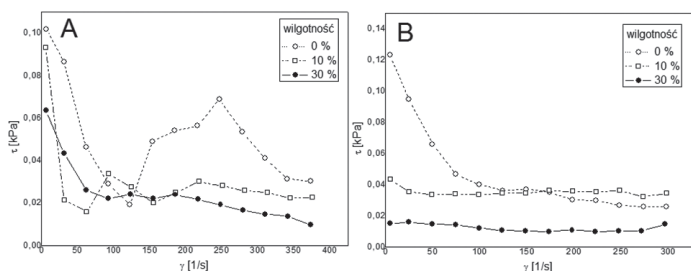
Dla biomasy AGRO (Rys. 4) zaobserwowano interesujące zjawisko „smarowania” polegające na tym, że w obszarze wyższych naprężeń normalnych, próbki biomasy o zwiększonej wilgotności przejawiały większą tendencję do płynięcia (wymagały mniejszych granicznych naprężeń stycznych), niż próbki mniej wilgotne. Przekroczenie pewnej zawartości wody (powyżej punktu smarowania) powoduje zatem wzrost płynności złoża. Wytlumaczyć to można przesyleniem zewnętrznej części ziaren wodą i utworzeniem wilgotnej warstwy ułatwiającej poślizg. Powstaje stąd możliwość przemieszczania cząstek materiału prowadzących do wzrostu lokalnych wartości gęstości usypowej, co może być niebezpieczne dla konstrukcji silosu. Z drugiej strony, dla małych obciążeń, wilgotność ma niewielki wpływ na charakterystykę mechaniczną. Świadczy to o trudnych do przewidzenia zmianach właściwości materiału pod wpływem wilgoci.

W warunkach dynamicznych, zarówno węgiel, jak i badane biopaliwa wykazują na ogół odmienną w porównaniu z warunkami statycznymi charakterystykę płynięcia. Tak dla biomasy leśnej, jak i dla biomasy AGRO zaobserwowano zmniejszanie się naprężeń niezbędnych do upłynienia materiału w miarę wzrostu stopnia jego nawilżenia. Istotny wpływ wilgotności szczególnie widoczny jest w odniesieniu do naprężeń stycznych, w mniejszym stopniu dotyczy to naprężeń normalnych, które pokazano na rys. 5A dla węgla.

Korzystna tendencja obniżania się naprężeń będąca przejawem zmniejszania kohezji wilgotnego materiału sypkiego jest szczególnie wyraźna dla obszaru niskich szybkości ścinania, gdzie wzrost



Rys. 5. Naprężenie normalne (A) oraz styczne (B) w funkcji szybkości ścinania dla węgla kamiennego



Rys. 6. Naprężenie styczne w funkcji szybkości ścinania dla: (A) – biomasy leśnej (mieszanki przemysłowej trocin) oraz (B) – biomasy AGRO (mączki mięsno-kostnej)

szybkości ścinania powoduje silny spadek naprężeń oraz zmniejsza wpływ wilgotności (Rys. 5B oraz 6A, B).

Z tego punktu widzenia obszar ten może mieć ważne znaczenie w projektowaniu operacji z materiałami sypkimi, w tym z biomasą, dla której określona zawartość wilgoci jest cechą naturalną wynikającą z jej pochodzenia i warunków przechowywania.

## Wnioski

Uzyskane rezultaty wskazują, że wpływ wilgotności należy rozpatrywać w kontekście stanu dynamicznego złoża.

W operacjach statycznych, w których złożo materiału rozdrobnionego znajduje się z reguły pod znacznym obciążeniem (np. w silosach), wilgotność pogarsza właściwości mechaniczne złoża: podwyższa jego kohezję lub przy większych wilgotnościach materiału (20÷30%) stwarza zagrożenie dla konstrukcji silosów wskutek możliwości wystąpienia lokalnych zagęszczeń materiału.

W operacjach dynamicznych wilgotność może korzystnie wpływać na przebieg procesu zmniejszając kohezję złoża, zwłaszcza przy wartościach powyżej 20%. Może to stanowić istotny element projektowania instalacji przemysłowej, umożliwiając poprawę ekonomicznej strony procesu przez dobór odpowiedniego zakresu prędkości ruchu złoża, np. szybkości przepływu powietrza fluidyzującego czy obrotów mieszalnika.

Przeprowadzone badania pokazują również, że w celu dokładnego i pełnego zbadania właściwości układów rozdrobnionych, konieczne jest stosowanie różnych technik badawczych.

## LITERATURA

- Berent-Kowalska G., Kacprowska J., Gogacz I., Jurgaś A., 2012. *Energia ze źródeł odnawialnych w 2011 r.*, GUS, Warszawa. (10.2013): [http://www.stat.gov.pl/cps/rde/xbc/gus/se\\_energia\\_zrodla\\_odnawialne\\_2011.pdf](http://www.stat.gov.pl/cps/rde/xbc/gus/se_energia_zrodla_odnawialne_2011.pdf)
- Chen D., Klausner J.F., Mei R., 2002. A fluid mechanics approach to describing the behavior of pneumatically conveyed powder plugs. *Powder Tech.*, **124**, 127-137. DOI: 10.1016/S0032-5910(01)00487-9
- Chevanan N., Womac A. R., Bitra S.P., Yoder D. C., Sokhansanj S., 2009. Flowability parameters for chopped switchgrass, wheat straw and corn stover. *Powder Tech.*, **193**, 79-86 DOI: 10.1016/j.powtec.2009.02.009
- Fitzpatrick J.J., Barry K., Cerqueira P.S.M., Igal T., O'Neil J., Ross Y.H., 2007. Effect of composition and storage condition on the flowability of dairy powders. *Int. Dairy J.* **17**, 383-393. DOI: 10.1016/j.idairyj.2006.04.010
- Ganesan V., Muthukumarappan K., Rosentrater K.A., 2008. Flow properties of DDGS with varying soluble and moisture contents using Jenike shear testing. *Powder Technology* **187**, 130-137. DOI: 10.1016/j.powtec.2008.02.003
- Berent-Kowalska G., Kacprowska J., Gogacz I., Jurgaś A., 2012. *Energia ze źródeł odnawialnych w 2011 r.*, GUS, Warszawa. (10.2013): [http://www.stat.gov.pl/cps/rde/xbc/gus/se\\_energia\\_zrodla\\_odnawialne\\_2011.pdf](http://www.stat.gov.pl/cps/rde/xbc/gus/se_energia_zrodla_odnawialne_2011.pdf)
- Horabik J., 2001. *Charakterystyka właściwości fizycznych roślinnych materiałów sypkich istotnych w procesach składowania*. Inst. Agrofiz. PAN, Lublin
- Jenike A.W., 1964. *Storage and flow of solids*. Bulletin No. 123, University of Utah, Salt Lake City
- Klausner J.F., Chen D., Mei R., 2000. Experimental investigation of cohesive powder rheology. *Powder Tech.*, **112**, 94-101. DOI: 10.1016/S0032-5910(99)00310-1
- Landillon V., Cassan D., Morel M.-H., Cug B., 2008. Flowability, cohesive, and granulation properties of wheat powders. *J. Food Eng.*, **86**, 178-193. DOI: 10.1016/j.jfoodeng.2007.09.022
- Littlefield B., Fasina O.O., Shaw J., Adhikari S., Via B., 2011. Physical and flow properties of pecan shells - Particle size and moisture effects. *Powder Tech.*, **212**, 173-180 DOI: 10.1016/j.powtec.2011.05.011
- Mattsson J. E., Kofman P., 2002. Method and apparatus for measuring the tendency of solid biofuels to bridge over openings. *Biomass and Bioenergy* **22**, 179-185 DOI: 10.1016/S0961-9534(01)00067-8
- PN-EN 1991-4, 2003. Eurokod 1: Part 4. *Actions on silos and tanks*. ECS, Brussels, Belgium
- Powder Tester Operating Manual*, 2011. Micron PT-S, Hosokawa
- Rozporządzenie Min. Gosp. z dnia 18 października 2012 r., Dz.U. 2012 poz. 1229 (08.2013): <http://isip.sejm.gov.pl/DetailsServlet?id=WDU20081560969>
- Schwedes J., 2003. Review on testers for measuring flow properties of bulk solids. *Granular Matter* **5**, 1-43. DOI: 10.1007/s10035-002-0124-4
- Zou Y., Brusewitz G.H., 2002. Flowability of uncompacted marigold powder as affected by moisture content. *J. Food Eng.*, **55**, 165-171. DOI: 10.1016/S0260-8774(02)00060-2