

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. 2. Mieszanki biomasy z węglem

Wstęp

W pierwszej części pracy [Przywara i in., 2013] przedstawiono zmiany charakterystyki mechanicznej i reologicznej biomasy leśnej i biomasy AGRO pod wpływem wilgotności oraz wykazano, że pełne uchwycenie tych zmian wymaga stosowania różnych technik badawczych. Ponieważ ważnym kierunkiem wykorzystania biomasy jest jej współspalanie, w niniejszej pracy przedstawione zostaną wyniki badań wpływu wilgotności na charakterystyki płynięcia mieszanek biomasy z węglem kamiennym. Należy nadmienić, że w polskich warunkach współspalanie biomasy stosowane jest głównie do wytwarzania energii cieplnej; w dłuższej perspektywie przewiduje się natomiast wykorzystanie biopaliw stałych w instalacjach kogeneracji ciepła i elektryczności. [Rybak, 2006].

Nieliczne, wzmiankowane w literaturze opracowania tematu współspalania biomasy wskazują na charakterystyczne trudności w prowadzeniu tego procesu. Na jakość mieszanki paliwowej ma wpływ zarówno jej wilgotność, jak i udział oraz postać fizyczna (głównie kształt ziaren) biomasy [Zulfiqar i in., 2006]. Wymienieni autorzy wykorzystując aparat Jenikego uzyskali poprawę charakterystyki płynięcia biomasy (w postaci trocin) domieszkowanej węglem. Przeprowadzone przez nich badania wskazują również na znaczne pogorszenie syfkości paliwa (jako mieszaniny z węglem) przy stosowaniu biomasy w postaci zrębków. Określanie zdolności plastycznego płynięcia materiałów sypkich, zarówno jednoskładnikowych, jak i w mieszaninie z innymi składnikami za pomocą testów ścinania aparatem Jenikego jest standardową metodą projektowania silosów w zakresie doboru kąta nachylenia ściany leja wysypowego oraz określenia średnicy otworu leja. W ostatnich latach metodę tę stosuje się również w odniesieniu do biopaliw stałych. Chen i in. [2012] przedstawili pomiary porównawcze zdolności płynięcia wykonane dla węgla kamiennego, brunatnego oraz trocin za pomocą aparatu Jenikego. Autorzy ci wskazują na gorszą zdolność płynięcia trocin w porównaniu z paliwami konwencjonalnymi, a możliwym sposobem jej poprawy może być, ich zdaniem, domieszkowanie biomasy węglem. Podobnie Guo i in. [2012] badając metodą bezpośredniego ścinania właściwości mieszanin słomy ryżowej i węgla w odniesieniu do ich zastosowań energetycznych stwierdzili, iż kluczowym czynnikiem warunkującym efektywność procesów współspalania jest zadowalająca zdolność płynięcia mieszanki.

Inną metodę pomiarową stosuje się do projektowania operacji dynamicznych z materiałami proszkowymi, np. ich przesyłu i przetwarzania oraz do obliczania parametrów stacji przesyłowych. Istotna dla tych operacji jest znajomość właściwości reologicznych. Pomiary reologiczne materiałów proszkowych prowadzone są nową, od niedawna stosowaną techniką wykorzystującą tzw. proszkowy reometr obrotowy. Na celowość jej stosowania potwierdzają dane Teruela i in. [2012] wskazujące, że statyczna metoda Jenikego nie odzwierciedla w wystarczającym stopniu właściwości materiałów proszkowych w procesach przebiegających w warunkach dynamicznych i pod małymi obciążeniami zewnętrznymi. Wnioski takie wyprowadzono przy projektowaniu systemu do automatycznego sterowania udziałami biomasy i węgla w strumieniu zasilającym paliwa podawanego do palnika w doświadczalnej instalacji współspalania biomasy (trocin sosny i słomy kukurydzy) w mieszankach z węglem w zależności od wilgotności i rozdrobnienia składników. Wynika stąd konieczność stosowania różnych technik badawczych umożliwiających prowadzenie badań przy różnych poziomach obciążenia zewnętrznego materiału w aparacie.

Celem niniejszej pracy jest określenie wpływu zawartości wilgotności na właściwości mechaniczne i reologiczne mieszanek biomasy stałej

z rozdrobnionym węglem kamiennym. Obecność pewnej ilości wilgoci, zazwyczaj w postaci wody jest cechą naturalną biomasy, jednak z drugiej strony nadmierne zawilgocenie może być przyczyną nieoczekiwanych zmian jej właściwości. Zmiany takie mogą wystąpić zwłaszcza w przypadku mieszanin biomasy z innymi materiałami, np. z węglem, jako wynik złożonych oddziaływań zachodzących między cząstkami obu materiałów. Oddziaływania te mogą powodować zmianę niektórych elementarnych właściwości ciała stałego, np. współczynnika tarcia materiału o powierzchnię aparatury oraz wprowadzać do układu nowe zjawiska, np. siły adhezji kapilarnej. W rezultacie istotnie zmienić się mogą właściwości mieszaniny powodujące zmianę jej charakterystyki mechanicznej, np. wytrzymałości na ścinanie oraz reologicznej określającej zdolność do płynięcia w warunkach realizowanego procesu. Charakterystykę mechaniczną wyznaczano znaną metodą ścinania bezpośredniego. Do wyznaczenia charakterystyki reologicznej zastosowano nową metodę badawczą wykorzystującą proszkowy reometr obrotowy.

Materiały

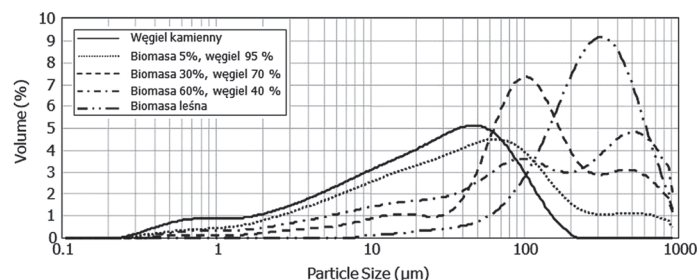
Rodzaje materiałów przewidziane do badań dobierano w uzgodnieniu z przedstawicielami Stowarzyszenia Elektryków Polskich, Oddział w Rzeszowie, pod kątem ich użyteczności praktycznej w procesach współspalania biomasy z węglem w przemyśle energetycznym.

Próbki węgla kamiennego pochodziły z Elektrociepłowni Stalowa Wola S.A. W programie badań uwzględniono podstawowe rodzaje biomasy leśnej (trociny drzew liściastych, iglastych, przemysłowa mieszanka tych trocin) i biomasy AGRO (mączka mięsno-kostna, podestylacyjny susz zbożowy DDGS). Wszystkie rodzaje trocin oraz mieszanka pochodziły z zakładu PPHU DREWNOTECH - Rzeszów.

Wstępne badania wykazały, że charakterystyka mechaniczna i reologiczna (z uwzględnieniem wpływu wilgotności) wymienionych rodzajów trocin badanych osobno nie odbiega istotnie od charakterystyki mieszanki. Z tego powodu dalsze badania wykonano dla mieszanki, mającej istotne znaczenie przemysłowe. Udział trocin sosnowych w mieszance wynosił ok. 60%, bukowych – ok. 20%, dębowych – ok. 10%; resztę stanowiły trociny czereśni oraz jesionu.

Podobnie stwierdzono, że wpływ wilgotności na przebieg charakterystyk dla mieszanin węgla z biomasą AGRO był jakościowo identyczny jak dla mieszanin węgla z mieszanką trocin. Ponieważ różnice ilościowe nie były znaczące, dalej przedstawione zostaną wyniki dla mieszanin węgla z przemysłową mieszanką trocin.

Przed podjęciem badań właściwych przeprowadzono pomiary ich podstawowych właściwości fizycznych. Skład granulometryczny wyznaczano za pomocą analizatora laserowego MALVERN MASTERSIZER 2000E (Rys. 1). Gęstość usypową, upakowaną oraz kąt różnicowy mierzono przy użyciu urządzenia POWDER TESTER PT-S. Szczegóły



Rys. 1. Rozkład wielkości cząstek badanych materiałów

wy opis urządzeń oraz metodyki pomiarów zamieszczono w pierwszej części pracy [Przywara i in., 2013].

Dobranie składu ilościowego mieszanki węgiel – biomasa jest parametrem istotnym i mającym zasadnicze znaczenie dla podjętych badań określającym charakterystyki płynięcia. W związku z tym pomiary prowadzono dla próbek o stopniowo zwiększającej się zawartości biomasy. Zmierzone parametry węgla i jego mieszanek z biomasą podano w tab. 1.

Tab. 1. Właściwości badanych materiałów

Badany materiał	Gęstość usypowa [kg/m ³]	Gęstość upakowana [kg/m ³]	Kąt różnicowy [deg]
Węgiel kamienny 100%	443	769	21,6
Biomasa 5%, węgiel 95%	382	668	24,5
Biomasa 30%, węgiel 70%	330	661	23,2
Biomasa 60%, węgiel 40%	310	573	24,6
Biomasa leśna 100%	264	439	24,7

Aparatura i metodyka badań

Aparatura do przygotowania mieszanin

W celu odzwierciedlenia warunków przemysłowych, tzn. zmielenia mieszaniny paliw w młynach kulowych przed ich podaniem do kotła w elektrowni, mieszanki biomasy leśnej z węglem kamiennym o odpowiednim udziale masowym składników przygotowywano za pomocą planetarnego młynka kulowego *PULVERISETTE 6 MONO* firmy *FRITSCH*, Niemcy. Młynek wyposażony był w naczynie mielące z tlenku cyrkonu o pojemności 500 ml, oraz kule mielące z tego samego materiału o średnicy 5 mm. Na podstawie wstępnych badań przyjęto następujące parametry mielenia: prędkość obrotową 120 obr/min, czas mielenia 120 s, stopień napełnienia naczynia mielącego 70%.

Aparatura do nawilżania mieszanin

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

Aparat bezpośredniego ścinania Jenikego

Badania charakterystyki mechanicznej materiałów proszkowych (MP) w warunkach statycznych i pod dużymi obciążeniami, jakie występują przede wszystkim podczas magazynowania MP w silosach, przeprowadza się w aparacie ścinania bezpośredniego budowanym na wzór aparatu *Jenikego* [1964]. W aparacie tym mierzy się wytrzymałość materiału na ścinanie, tj. określa zewnętrzne naprężenie styczne, powyżej którego przekroczone zostaje spójność wewnętrzna materiału, wskutek czego przechodzi on w stan plastycznego płynięcia. Zmierzone wartości tego naprężenia odpowiadające zadany wartości obciążenia normalnego określają wartości współrzędnych punktów, których przybliżeniem jest linia (zazwyczaj prosta) nazywana warunkiem płynięcia. Ponieważ stopień upłynnienia MP zależy w znacznym stopniu od wstępnej konsolidacji materiału, stąd w badaniach przywiązywano znaczną wagę do ustalenia początkowych warunków prowadzenia pomiarów.

Szczegółowy opis aparatu *Jenikego* oraz procedura prowadzenia pomiarów zostały zamieszczone w poprzedniej pracy [Przywara i in., 2013].

Proszkowy reometr obrotowy

Badania reologiczne MP, które prowadzone są w warunkach dynamicznych i pod małymi obciążeniami zewnętrznymi wymagają stosowania odmiennej aparatury. W tym celu zastosowano w pracy nową technikę z wykorzystaniem proszkowego reometru obrotowego. Szczegółowy opis reometru został zamieszczony w pierwszej części pracy [Przywara i in., 2013]. Zaletami tego urządzenia w porównaniu z aparatem *Jenikego* jest możliwość prowadzenia pomiarów przy niskich

poziomach obciążeniach oraz przy większych prędkościach ścinania występujących w takich procesach, jak mieszanie, fluidyzacja, transport pneumatyczny czy granulacja. W takich warunkach możliwe jest ujawnienie tych właściwości MP, których nie można uchwycić w metodzie *Jenikego* z powodu ich tłumienia dużymi obciążeniami zewnętrznymi.

Wyniki zmierzonych reometrem wartości naprężeń stycznych, pochodzących od siły tarcia materiału o ruchomą powierzchnię roboczą reometru, przedstawiano w postaci typowej charakterystyki reologicznej, tj. zależności naprężenia stycznego (τ) od szybkości ścinania ($\dot{\gamma}$). Procedura przetwarzania uzyskanych wyników, która obejmuje obliczenie naprężeń normalnych, stycznych oraz szybkości ścinania przedstawiona jest w pracy *Klausnera i in.* [2000].

Wyniki i dyskusja

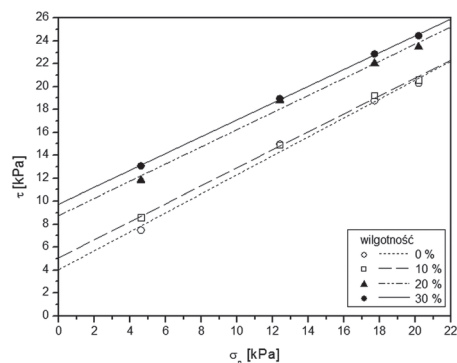
Charakterystykę mechaniczną badanych mieszanin, wyznaczaną za pomocą aparatu *Jenikego* w warunkach statycznych, przedstawiono wykreslnie w postaci warunku płynięcia, tzn. zależności naprężenia stycznego τ (miara wytrzymałości albo kohezji złoza) od obciążenia normalnego σ_n (stopień konsolidacji złoza).

Charakterystykę reologiczną, wyznaczaną reometrem w warunkach dynamicznych, pokazano w postaci zależności naprężenia stycznego τ od szybkości ścinania $\dot{\gamma}$ (miara dynamiki złoza wyrażona prędkością obrotową reometru).

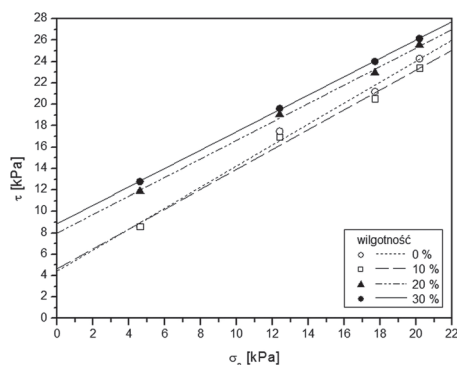
Charakterystyka mechaniczna mieszanin

Na rys. 2–4 pokazano wpływ wilgotności na przebieg warunku płynięcia badanych materiałów. Im wyżej położona jest linia warunku płynięcia i większe jest jej nachylenie, tym większa wymagana jest wartość przyłożonego z zewnątrz naprężenia stycznego, aby spowodować plastyczne płynięcie próbki, tzn. większa jest kohezynność ścinanego materiału, albo mniejsza jego zdolność płynięcia.

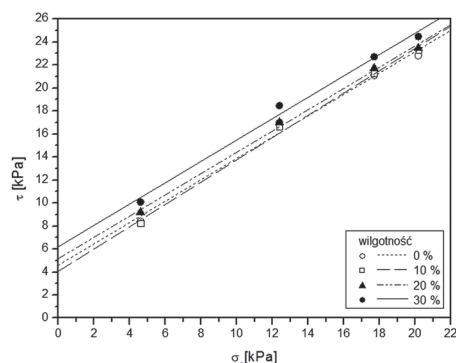
Rys. 2 obrazuje zmiany wytrzymałości (kohezynności) mieszaniny (biomasa 5%, węgiel 95%) ze wzrostem wilgotności. Powiększanie wilgotności istotnie i systematycznie przesuwają warunek płynięcia w kierunku wyższych wartości naprężeń stycznych. Oznacza to pogarszanie się zdolności płynięcia nawilżonego materiału.



Rys. 2. Wpływ wilgotności na warunek płynięcia dla mieszaniny biomasy leśnej (5%) z węglem kamiennym (95%)



Rys. 3. Wpływ wilgotności na warunek płynięcia dla mieszaniny biomasy leśnej (30%) z węglem kamiennym (70%)



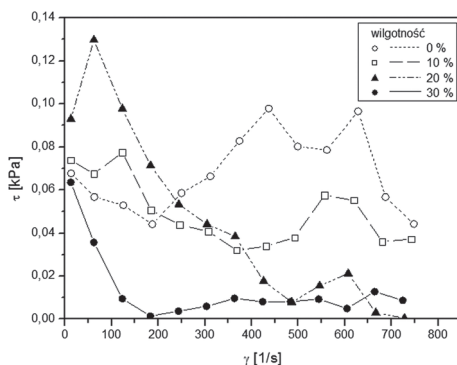
Rys. 4. Wpływ wilgotności na warunek płynięcia dla mieszanki biomasy leśnej (60%) z węglem kamiennym (40%)

Obecność wilgoci w złożu mieszanki zmienia jej charakterystykę mechaniczną tym bardziej, im większa jest zawartość biomasy. Analiza wyników pokazanych na wykresach (Rys. 2–4) prowadzi do interesującego wniosku o stabilizującym wpływie biomasy na właściwości mechaniczne jej mieszanek z węglem. Zwiększanie udziału biomasy w mieszance powoduje zmniejszenie niekorzystnego wpływu wilgotności na wytrzymałość mieszanki na ścinanie (większe skupienie linii warunku płynięcia). Przy większej zawartości biomasy (w obszarze mniejszych naprężeń normalnych) niższa jest ponadto wytrzymałość mieszanki na ścinanie – polepsza się zatem jej zdolność płynięcia. Te korzystne zjawiska można wyjaśnić większym wchłanianiem wilgoci przez biomasę, co zapobiega pogarszaniu właściwości węgla ze wzrostem wilgotności.

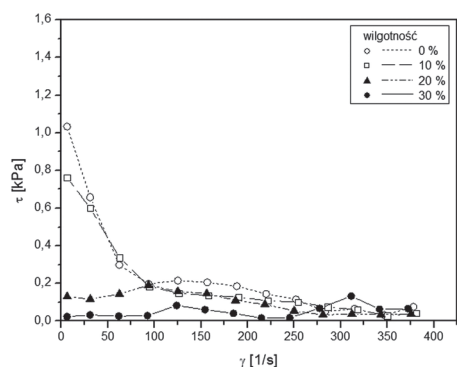
Z drugiej strony, polepszenie zdolności płynięcia może skutkować lokalną konsolidacją materiału i wzrostem jego gęstości usypowej, co może być przyczyną powstania lokalnych naprężeń, niebezpiecznych dla konstrukcji silosu.

Charakterystyka reologiczna mieszanin

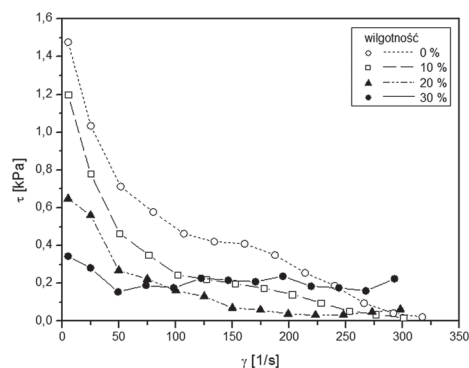
Badania reometrem wykazują odmienne, w porównaniu z badaniami aparatem *Jenikego*, zachowanie mieszanin biomasy z węglem. W stanie



Rys. 5. Wpływ wilgotności na naprężenia styczne w funkcji szybkości ścinania dla mieszanki biomasy leśnej (5%) z węglem kamiennym (95%)



Rys. 6. Wpływ wilgotności na naprężenia styczne w funkcji szybkości ścinania dla mieszanki biomasy leśnej (30%) z węglem kamiennym (70%)



Rys. 7. Wpływ wilgotności na naprężenia styczne w funkcji szybkości ścinania dla biomasy leśnej (60%) z węglem kamiennym (40%)

wilgotnym cechują się one lepszą zdolnością płynięcia – przeciwnie niż w warunkach statycznych – zwiększanie stopnia nasycenia materiału wodą zmniejsza naprężenia styczne (Rys. 5–7) szczególnie w obszarze małych wartości prędkości ścinania – rys. 6, 7. Tendencja ta jest korzystna dla realizacji procesów przesyłu i przetwarzania materiału, gdyż zmniejsza nakłady energetyczne na realizację tych procesów.

Odmienne kształtuje się też wpływ zawartości biomasy w mieszaninie na jej charakterystykę płynięcia. Na rys. 5–7 widać, że wzrost udziału biomasy zwiększa jej wytrzymałość na ścinanie i pogarsza podatność na płynięcie.

Wnioski

Z przeprowadzonych badań wynika, że wpływ wilgotności na charakterystykę płynięcia mieszanin biomasy z węglem zależy istotnie zarówno od warunków dynamicznych, jak i składu mieszanin.

W warunkach statycznych wzrost wilgotności pogarsza na ogół podatność mieszanin na plastyczne płynięcie. Przeciwnie wpływa natomiast zwiększanie udziału biomasy, która w obszarze małych obciążeń zewnętrznych zmniejsza wytrzymałość mechaniczną mieszaniny i polepsza jej płynięcie.

Ważnym i nieodnotowanym dotąd w literaturze wnioskiem jest to, że w warunkach statycznych biomasa okazuje się być czynnikiem stabilizującym właściwości mechaniczne jej mieszanin z węglem. Może to mieć istotne znaczenie w zakresie logistyki biomasy i w przygotowaniu mieszanek.

W warunkach dynamicznych wzrost wilgotności polepsza płynięcie mieszanin, szczególnie w obszarze małych wartości prędkości ścinania. Ta korzystna tendencja – widoczna od wilgotności 20–30% – może przyczynić się do zmniejszenia nakładów energetycznych na realizację procesów współspalania biomasy z węglem.

LITERATURA

- Chen P., Yuan Z., Shen X., Zhang Y., 2012. Flow properties of three fuel powders. *Particology*, **10**, 438–443 DOI: 10.1016/j.partic.2011.11.013
- Guo Q., Liu H., Chen X., Li S., Guo X., Gong X., 2012. Research on the flow properties of the blended particles of rice straw and coal. *Fuel*, **102**, 453–459. DOI: 10.1016/j.fuel.2012.05.025
- Jenike A.W., 1964. *Storage and flow of solids*. Bulletin No. 123, University of Utah, Salt Lake City, USA
- Klausner J.F., Chen D., Mei R., 2000. Experimental investigation of cohesive powder rheology. *Pow. Tech.*, **112**, 94–101. DOI: 10.1016/S0032-5910(99)00310-1
- Przywara M., Oliwa J., Opaliński I., 2013. Wpływ wilgotności na charakterystykę płynięcia alternatywnych biopaliw stałych. Cz. 1. Biomasa leśna i AGRO. *Inż. Ap. Chem.*, **52**, nr 6, 554–556
- Rybak W., 2006. *Spalanie i współspalanie biopaliw stałych*. Wyd. Pol. Wrocławskiej, Wrocław
- Teruel E., Ramos I., Gil M., 2012. Pulverised fuel feeding for co-firing based on loss-in-weight flow metering. *Biomass and Bioenergy*, **39**, 403–412. DOI: 10.1016/j.biombioe.2012.01.038
- Zulfiqar M., Moghtaderi B., Wall T. F., 2006. Flow properties of biomass and coal blends. *Fuel Proc. Tech.*, **87**, 281–288. DOI: 10.1016/j.fuproc.2004.10.007