

Tomasz DZIK, Marek HRYNIEWICZe-mail: tdzik@agh.edu.pl

Katedra Systemów Wytwarzania, Wydział Inżynierii Mechanicznej i Robotyki, AGH Akademia Górniczo-Hutnicza, Kraków

Badania ciśnieniowej aglomeracji paliw kompozytowych

Wstęp

Analizując problemy związane z zagospodarowaniem odpadowych paliw kopalnych oraz różnych rodzajów biomasy zwrócono uwagę na możliwość i celowość produkcji paliw kompozytowych. W procesie ich wytwarzania korzystne będzie stosowanie komponentów w postaci różnych rodzajów biomasy, odpadów komunalnych, paliw kopalnych niskiej jakości oraz miału węgla kamiennego. Mieszanka odpowiednio przygotowanych składników musi być poddana ciśnieniowej aglomeracji w celu uzyskania postaci kawałkowej.

Paliwa kompozytowe powinny nadawać się do spalania w kominkach, kotłach energetycznych małej mocy służących do ogrzewania siedlisk ludzkich, do współspalania w zakładach energetyczno-ciepłowniczych, a także do zgazowania w małej i dużej skali. W zależności od przeznaczenia stawiane im wymagania są zróżnicowane. Potrzeba zapewnienia takim paliwom określonych parametrów stanowiła inspirację do podjęcia badań eksperymentalnych mających na celu opracowanie podstaw technologii ich wytwarzania.

Przystępując do realizacji prac eksperymentalnych założono, że w produkcji paliw kompozytowych powinny być wykorzystane następujące komponenty: biomasa, węgle niskiej jakości, odpady przemysłu papierowego, a także dodatki poprawiające wytrzymałość mechaniczną kształtek i wpływające na właściwości popiołów.

Wytwarzanie paliw kompozytowych stanowi nowe podejście do energetycznego wykorzystania wymienionych komponentów [Dzik, 2012; Hryniewicz i in., 2012; Hrystaliiev, 2005]. Dzięki zastosowaniu aglomeracji ciśnieniowej z mieszanki węgla i biomasy uzyska się paliwo ekologiczne o stabilnych, w przeciwieństwie do czystej biomasy parametrach użytkowych, co jest istotne dla jego potencjalnych odbiorców. Paliwo takie charakteryzować się będzie mniejszą emisją CO₂ i niższą zawartością siarki oraz chloru. Ponadto wytwarzanie paliw kompozytowych z odpadów umożliwia ich zagospodarowanie, przy zapewnieniu stałych parametrów uzyskiwanego nośnika energii. Należy także zwrócić uwagę na to, iż przy tworzeniu tego typu kompozytów możliwe jest stosowanie dodatków, które pozwolą na poprawę właściwości energetycznych, mechanicznych i użytkowych wytworzonego paliwa. W tym przypadku istotne znaczenie ma dobór odpowiednich komponentów i rodzaju prasy, w której przygotowana wcześniej mieszanka poddawana będzie ciśnieniowej aglomeracji, a także kształtu i wielkości produktu.

Wymagania stawiane węglom oraz biomase przeznaczonych do spalania

Paliwa kompozytowe mogą być spalane w kotłach retortowych małej mocy przeznaczonych do ogrzewania gospodarstw domowych, jak również współspalane w zakładach energetycznych z paliwami kopalnymi. W kotłach małej mocy spalane są różne sortymenty węgla kamiennych oraz granule nazywane także peletami, które wytwarza się z drewna, węgla brunatnego lub słomy. W Polsce najchętniej kupowanym paliwem jest węgiel kamienny typu groszek ze względu na wysoką wartość ciepła spalania i stabilność właściwości mechanicznych oraz chemicznych tego rodzaju paliwa. Poważnym jego konkurentem na rynkach Europy i USA jest pelet drzewny charakteryzujący się dużą stabilnością właściwości użytkowych. Wysoka cena jednostkowa tego paliwa na rynku krajowym w porównaniu z paliwem węglowym w znacznym stopniu ogranicza jego stosowanie. W tej sytuacji zwiększenie kaloryczności granulatu ze słomy i ograniczenie ilości żużla powstającego w komorze spalania powinno spowodować wzrost zainteresowania klientów indy-

widualnych paliwem kompozytowym produkowanym na bazie słomy zbóż i roślin energetycznych, a w szczególności miskantusa.

Pelety wykonane na bazie słomy znalazły przede wszystkim zastosowanie w procesie współspalania z paliwami kopalnymi w zakładach energetycznych. Jako główne kryteria określające przydatność paliw z odpadów z produkcji rolnej oraz upraw roślin energetycznych współspalanych z paliwami kopalnymi przyjmuje się: emisję SO₂, NO_x, CO, HCl, żużlowanie powierzchni ogrzewalnych kotłów, wartość charakterystycznych temperatur płynięcia popiołów, dystrybucję ciepła w obrębie komory paleniskowej oraz bilans energetyczny procesu spalania.

Pomimo pozornej prostoty procesów aglomeracji ciśnieniowej wpływ na ich przebieg ma wiele czynników. Z tego powodu wdrażanie tych procesów z reguły poprzedzone jest badaniami eksperymentalnymi. Z własnych doświadczeń wiadomo, że przy dodaniu do węgla biomasy w ilości od kilku do kilkunastu procent istnieje możliwość scalania mieszanki w prasie walcowej. Ma to duże znaczenie ze względu na istotne zalety takiej brykietarki. Najważniejsze z nich to: ciągły charakter pracy, możliwość uzyskania dużej wydajności, mniejsze zapotrzebowanie energii oraz dłuższa żywotność elementów formujących w porównaniu z innymi typami maszyn. Dlatego w nowoczesnych liniach technologicznych często stosuje się prasy walcowe. Należy zaznaczyć, że mieszanka węgla oraz biomasy należy do grupy materiałów trudnych do scalania w prasie walcowej i wymaga stosowania w niej specjalnego, niesymetrycznego układu zagęszczania. W przypadku większej ilości dozowanej do węgla biomasy, mieszankę poddaje się scalaniu w granulatorze. Do granulacji ciśnieniowej stosuje się granulatory z matrycą pierścieniową (PMP), matrycą płaską (GMP) oraz konstrukcje łączące zalety granulatorów (PMP) i pras walcowych, w których scala się przede wszystkim materiały pochodzenia mineralnego oraz odpady poprodukcyjne. W analizowanym przypadku wskazane jest stosowanie granulatora GMP.

Badania procesów aglomeracji paliw kompozytowych rozpoczęto od ciśnieniowej granulacji ponieważ umożliwia ona wykorzystanie dużej ilości biomasy. W pracach eksperymentalnych stosowano granulator z płaską matrycą. O jego wyborze zdecydowała funkcjonalność oraz duże możliwości rozwojowe tego urządzenia. Z własnych doświadczeń wynika, że o prawidłowym działaniu granulatora GMP decydują: geometria rolek, geometria gniazd formujących, ich sposób rozmieszczenia w matrycy i stan powierzchni po obróbie, kinetyka układu roboczego oraz własności mechaniczne tworzyw konstrukcyjnych, z których wykonane są jego elementy. Dobrano je na podstawie wyników badań eksperymentalnych oraz przeprowadzonych analiz [Chlopek i in., 2012].

Próby wytworzenia paliw

Mając na uwadze ograniczenia i wymagania jakie powinny spełniać nowe paliwa przyjęto założenie, że kompozyty zostaną wytworzone w oparciu o węgle kamienne niskiej jakości tj. drobne frakcje węgla z *ZG Janina* i *ZG Wieczorek*, węgiel brunatny z *KWB Belchatów*, muły węglowe z *ZG Wieczorek*, które będą nośnikiem węgla oraz słomę zbożową i miskantus. Jako lepsze zastosowano włókna celulozy pozyskane z odpadów z przemysłu papierowego. W celu poprawy właściwości mieszanek oraz podwyższenia temperatury mięknięcia popiołu zastosowano substancję mineralną oznaczoną jako PW 75. Badania ciśnieniowej granulacji paliw kompozytowych poprzedzono wyznaczeniem wybranych właściwości ich składników, do których należą: zawartość popiołu, siarki i chloru oraz ciepło spalania i temperatura płynięcia popiołu. Niektóre właściwości komponentów użytych do badań podano w tab. 1.

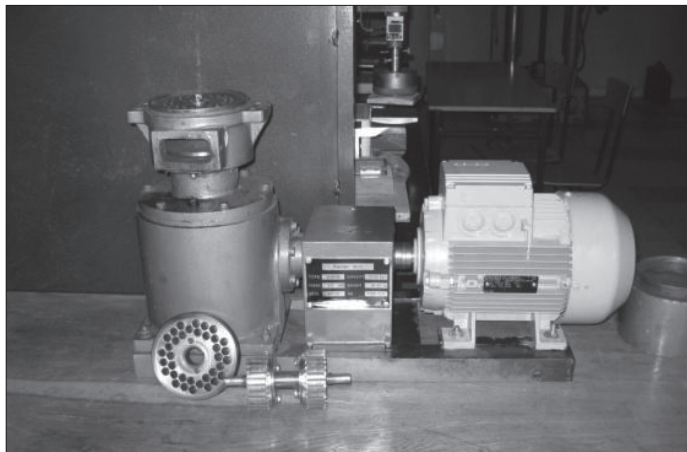
Na podstawie analizy bieżących potrzeb zdecydowano się na wykonanie prób granulacji ciśnieniowej następujących mieszanek:

- biomasy w postaci słomy zbóż z węglem brunatnym z *KWB Belchatów* oraz węglem kamiennym z *ZG Wieczorek* o rozmiarze 0÷2 mm dla potrzeb spalania w kotłach energetycznych małej mocy,
- pozostałości z przemysłu papierowego w postaci włókien celulozy i słomy zbóż dla celów spalania i współspalania,
- mułów węglowych z włóknami celulozy.

Tab. 1. Wybrane właściwości podstawowych składników paliw kompozytowych.

	Popiół A ^a [%]	Ciepło spalania [kJ/kg]	Siarka S ^a [%]	Chlor Cl ^a [%]	Temperatura płynięcia popiołu [°C]
<i>KWK Janina</i>	16,95	22 172	1,38	–	1350
<i>KWK Wieczorek</i>	24,08	25 138	0,66	–	1340
<i>KWB Belchatów</i>	20,74	19 413	0,75	–	1370
Miskantus	4,0	17 200	0,02	0,15	1466
Włókna celulozy	9,4	15 030	0,05	0,57	1376
Słoma zbożowa	5,6	16 870	0,06	0,12	1372

Próby aglomeracji ciśnieniowej paliw kompozytowych prowadzono w laboratoryjnym granulatorze, który przedstawiono na rys. 1. Wypożyczone jest on w płaską matrycę o średnicy 120 mm, której grubość wynosi 25 mm. Matryca posiada 36 otworów cylindrycznych o średnicy 8 mm. W górnej części otworu wykonane są podcięcie stożkowe na głębokość 2,5 mm o kącie rozwarcia 60°. Granulator ma dwie rolki dociskowe o średnicy 60 mm i szerokości 40 mm. Na powierzchni rolki wykonanych jest 30 nacięć równoległych do osi rolek. Mają one kształt rowków o szerokości 3 mm i głębokości 3 mm. Prędkość obrotowa matrycy jest stała i wynosi 300 obr/min. Natomiast można regulować szerokość szczeliny między rolkami i matrycą, którą ustawiono na $h = 0,1$ mm.



Rys. 1. Widok stanowiska laboratoryjnego

Układ roboczy granulatora pokazano na rys. 2. Granulator napędzany jest silnikiem trójfazowym o mocy 2,2 kW. Przed wykonaniem prób matryca i rolki zostały rozgrzane do temperatury około 70°C za pomocą mieszanki otręby – woda – olej – proszek korundowy. Granule otrzymano w próbie jednokrotnego przejścia materiału przez otwory w matrycy.

Próbki węgla brunatnego przygotowano w następujący sposób: do miazgi węgla dodano zmielonej do rozmiaru < 5 mm słomy zbożowej tak aby jej udział masowy wynosił odpowiednio 50% w przypadku próbki oznaczonej symbolem (WB+S 5/5), 75% dla próbki (WB+S 3/4), 90% dla próbki (WB+S 1/9). Składniki wymieszano za pomocą mieszadła wirnikowego. Następnie oznaczono wilgotność otrzymanej mieszanki i do każdej partii dodano odpowiednią ilość wody tak aby jej końcowy udział masowy wynosił 20%. Po czym składniki mieszano przez 3 minuty w mieszarce wałowej. Tak przygotowaną mieszankę podawano do granulatora.



Rys. 2. Układ roboczy granulatora

Natomiast słomę o rozmiarze 5 mm wymieszano z włóknami celulozy w stosunku 9/1 i nawilżono do 18% udziału wody. W ten sposób uzyskano próbkę (S+10%WM).

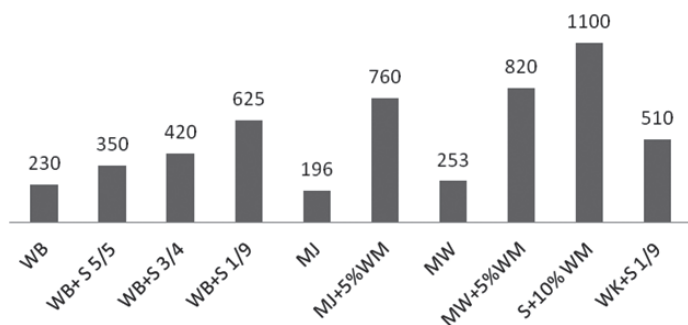
W przypadku węgla kamiennego proces przygotowania mieszanki polegał na dodaniu do zmielonej słomy o rozmiarze < 5 mm węgla w klasie ziarnowej 0÷2 mm w ilości pozwalającej na jego 20% udział masowy. W dalszej kolejności oznaczono wilgotność mieszanki i dodawano wody tak, aby jej udział masowy wynosił 16%. Następnie składniki mieszano 3 minuty z użyciem mieszadła wirnikowego. Tak przygotowaną mieszankę węgla kamiennego oznaczoną jako (WK+S 1/9) poddawano granulacji.

Badania mułów węglowych prowadzono na dwóch materiałach: mule węglowym z *ZG Janina* (MJ) oraz mule węglowym z *ZG Wieczorek* (MW). Muł węglowy z *ZG Janina* w postaci placków z pras filtracyjnych posiadał wilgotności 61%. Zawartość popiołu w tym mule wynosiła A^a = 64,75%, a jego kaloryczność około 11 MJ/kg. Natomiast muł węglowy z *ZG Wieczorek* dostarczono w postaci rozdrobnionej do rozmiaru < 2 mm. Jego wilgotności wynosiła 22%, zawartości popiołu A^a = 20%, a kaloryczności około 17,6 MJ/kg.

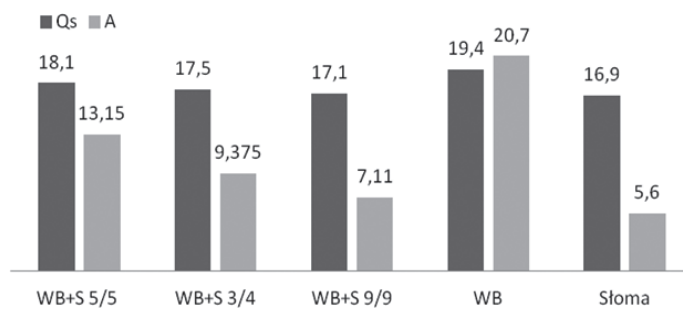
Próbki mułów przygotowano w następujący sposób: wysuszono je i zmielono w młynie wirnikowym bijakowym. Prędkość bijaków wynosiła 15 m/s. Młyn bijakowy posiadał sito o średnicy oczek 3 mm. Następnie do rozdrobnionych mułów dodano taką ilość wody, aby jej udział masowy wynosił 20%. i poddawano je granulacji ciśnieniowej. Przygotowanie mieszanek mułów (MJ, MW) i włókien celulozy (WM) otrzymanych w wyniku rozdrobnienia odpadów z przemysłu papierowego polegało na wysuszeniu węgla, a następnie dodaniu 5% wymionionego komponentu. Następnie składniki mieszano w hermetycznym naczyniu za pomocą mieszadła łopatkowego z prędkością obwodową 40 m/s. Przygotowane w ten sposób mieszanki mułów węgla kamiennych i włókien celulozy (MJ+5% WM oraz MW+5%WM) poddawano granulacji. Uzyskane granule sezonowano przez 24 godziny w powietrzu o temperaturze 24°C. Po tym czasie oznaczono ich wytrzymałość na nacisk oraz wilgotność końcową, która zawierała się w przedziale od 8 do 10%. Wykonano również testy spalania wytworzonego kompozytu słoma – włókna celulozy w kotle o mocy 18 kW, jak również przeprowadzono próbę współspalania tego kompozytu z węglem brunatnym w kotle fluidalnym.

Ocena otrzymanych kompozytów

Do badań wytrzymałości mechanicznej z każdej partii wybrano po 8 granul o masie w zakresie od 0,7 do 1,2 g, którą wyznaczano z dokładnością do 0,001 g. Każdą próbkę poddano działaniu siły niszczącej przyłożonej prostopadle do kierunku działania nacisku normalnego w procesie ich powstawania. Badania wykonano na maszynie wytrzymałościowej *Zwick 1120*. Siłę niszczącą mierzono z dokładnością do 1 N. Wytrzymałość mechaniczną granul określono jako stosunek siły niszczącej do masy próbki poddanej badaniom i nazwano wytrzymałością masową. Na rys. 3 przedstawiono średnią wytrzymałość masową z 8 pomiarów. Przeprowadzono również badania wytrzymałości kine-

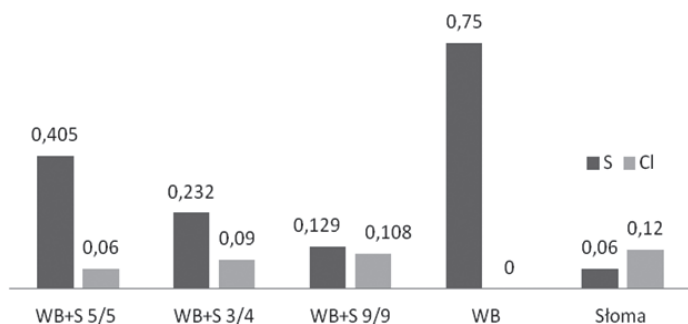


Rys. 3. Wytrzymałość masowa badanych paliw kompozytowych [N/g]

Rys. 5. Ciepło spalania Q_s [MJ/kg] i zawartość popiołu A [%] wybranych paliw kompozytowych

tycznej paliw. W przypadku wszystkich wytworzonych kompozytów stwierdzono jej wzrost w stosunku do granul zawierających tylko jeden podstawowy składnik (węgiel, muł biomasa). Należy zaznaczyć, że nie uzyskano granulatu z węgla kamiennych bez dodatku odpowiedniego lepiszcza.

Analizując wyniki badań przedstawione na rys. 3 stwierdzono, że wszystkie wytworzone stałe paliwa kompozytowe wykazują także wzrost wytrzymałości masowej. W przypadku mieszanki węgla brunatnego ze słomą zwiększyła się ona 2,7 razy, mieszanki miału z ZG Janina i włókien celulozy 3,8 razy, a mieszanki mułu węglowego z ZG Wieczorek i włókien celulozy 3,2 razy. Dodatek 10% włókien celulozy do słomy spowodował ponad 3-krotny wzrost wytrzymałości granulatu. Stosowanie paliw kompozytowych otrzymanych na bazie biomasy i węgla niskiej jakości oraz mułów węglowych wiąże się ze zmniejszeniem emisji szkodliwych substancji, a w szczególności: SO_2 , NO_x , CO, HCl (Rys. 4). Ponadto dodatek paliw kopalnych do biomasy powoduje wzrost kaloryczności kompozytu w odniesieniu do paliw wytworzonych tylko z biomasy jak również zmniejszenie ilości popiołu w porównaniu z niskiej jakości węglami i mułami (Rys. 5).



Rys. 4. Zawartość siarki [%] i chloru [%] w wybranych paliwach kompozytowych

Na podstawie analizy wyników testów spalania w kotle małej mocy paliwa kompozytowego oznaczonego symbolem (S+10% WM) stwierdzono niską emisję CO oraz brak zużłowania charakterystycznego przy spalaniu granulatu wykonanego tylko ze słomy.

Testy współspalania granul z tej samej mieszanki z węglem brunatnym wykazały spadek emisji SO_2 o ok. 25% i CO o ok. 30%. Natomiast zgodnie z przypuszczeniami wzrosła emisja NO_x o ok. 15%. Spowodowane to jest przejściem azotu w nie objęty limitami emisji N_2O . Zwiększyła się również wielkość emisji HCl o niecałe 10%.

Do istotnych korzyści zalicza się także spadek zapotrzebowanie na sorbent o ok. 20% oraz poprawę bilansu energetycznego procesu spalania w wyniku ograniczenia strat ciepła na odparowanie wilgoci, której udział w granulacie jest zdecydowanie niższy i wynosi od 8 do 10%, a w surowcach od 20 do 50%.

Podsumowanie i wnioski

Badania eksperymentalne wykazały, że z wytypowanych składników można poprzez granulację ciśnieniową otrzymać wytrzymałe mechanicznie kształtki, które stanowią paliwo kompozytowe.

Odpowiedni jego skład umożliwia zmniejszenie emisji szkodliwych substancji, a w szczególności: SO_2 , NO_x , CO, HCl.

Ponadto dodatek paliw kopalnych do biomasy powoduje wzrost kaloryczności kompozytu w odniesieniu do paliw wytworzonych tylko z biomasy oraz zmniejszenie ilości popiołu w porównaniu z niskiej jakości węglami i mułami.

Podjęte badania są kontynuowane. Celem ich jest opracowanie metody doboru parametrów mieszanki zapewniających odpowiednią jakość paliwa kompozytowego oraz określenie możliwości stosowania prasy walcowej do jego wytwarzania.

LITERATURA

- Chłopek M., Dzik T., Hryniewicz M., 2012. The method for selection of the working system components for a pellet press with flat die. *Chemik nauka-technika-rynek*, **66**, nr 5, 493–500
- Chłopek M., Dzik T., Hryniewicz M., 2013. *Dobór elementów formujących prasę do ciśnieniowej aglomeracji paliw kompozytowych*. XXVI Konferencja Naukowa – Problemy rozwoju maszyn roboczych, Zakopane
- Dzik T., 2012. Composite solid fuels for gasification and combustion purposes. *Polish Journal of Environmental Studies*, **21**, 5A, 63–68
- Dzik T., Kowalska Marciniak J., Madejska I., 2012. Pressure agglomeration of hard and brown coals. *Chemik nauka-technika-rynek*, **66**, nr 5, 445–452
- Dzik T., 2012. *Badania mułów węglowych i próbek paliw węglowych zawierających muły w celu otrzymania peletów*. Projekt 23.23.100.8498/R34. (Praca niepublikowana)
- Hryniewicz M., Dzik T., Czernski G., 2012. *Biomass compaction with low coals a way of its preparation for the gasification process* [w:] Development of Coal, Biomass and Wastes Gasification Technologies with Particular in Chemical Sequestration of CO_2 (ISBN:978-83-931791-1-4)
- Khrustal'ov E., 2005. *Composite fuel – a new word in energy conservation (in Russian)*. Power and Industry of Russia 18.11.2005. (04.2013): <http://www.eprussia.ru/tech/articles/72.htm>

Pracę wykonano w ramach projektu KIC Cola Gas umowa Nr 7.7.130.7006