

## PROCES WYTWARZANIA GRANULATÓW Z DROBNYCH FRAKCJI WĘGLOWYCH POD KĄTEM ICH WYKORZYSTANIA W PROCESIE ZGAZOWANIA

Krzysztof Supernok<sup>1\*</sup>, Jolanta Robak<sup>1</sup>, Karina Ignasiak<sup>1</sup>, Mateusz Szul<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Instytut Chemicznej Przeróbki Węgla, ul. Zamkowa 1, 41-803 Zabrze

\* Autor do korespondencji: [k-supernok@ichpw.pl](mailto:k-supernok@ichpw.pl)

### STRESZCZENIE

W artykule zaprezentowano rezultaty testów wytwarzania granulatu paliwowego z drobnoziarnistych frakcji węglowych. Surowcem stosowanym do badań były wybrane drobnoziarniste frakcje węglowe – muł węglowy oraz flotokonzentrat, pozyskane z procesu wzbogacania węgla w kopalniach węgla kamiennego. Celem przeprowadzonych prac było opracowanie receptury i parametrów procesu wytwarzania granulatu o właściwościach fizykochemicznych, umożliwiających ich transport, dozowanie oraz zgazowanie w złożu stałym i fluidalnym. W pracy określono udział poszczególnych składników (mułu i flotokonzentratu węglowego oraz spoiw) oraz warunki granulowania z wykorzystaniem techniki aglomeracji metodą otaczania na granulatorze talerzowym. Stwierdzono, że mieszanka składająca się z 30 cz. wag. mułu i 70 cz. wag. flotokonzentratu węglowego, wzbogacona cementem portlandzkim w ilości 3% w stosunku do suchej masy składników węglonoiących, pozwala na uzyskanie granulatu paliwowego spełniającego wymagania dla ich zgazowania w instalacjach badawczych IChPW (zgazowanie fluidalne i w złożu stałym) pod względem wartości opałowej, zawartości popiołu, granulacji i wytrzymałości mechanicznej.

**Słowa kluczowe:** granulowanie, paliwo granulowane, muł węglowy, flotokonzentrat, zgazowanie

## PREPARATION OF GRANULES MADE OF FINE-GRAINED COAL FRACTIONS FOR GASIFICATION PROCESS

### ABSTRACT

The paper presents the results of tests for the production of fuel granules from fine-grained coal fractions. The raw material used for the research was selected fine coal fractions – coal sludge and coal flotation concentrate, obtained from the process of coal enrichment in hard coal mines. The aim of the work was to develop a recipe and parameters for the process of granules production with adequate physicochemical properties, enabling their transport, dosing and gasification in a fixed and fluidized bed system. The work determined the share of specified components (coal sludge, coal flotation concentrate and binders) and the conditions of granulation using the agglomeration technique in the disk granulator. It was found that a mixture consisting of 30% wt. coal sludge and 70% wt. coal flotation concentrate with the addition of 3% Portland cement in relation to the dry matter of carbonaceous components, allows obtaining granules meeting the requirements for their gasification in IChPW research installations (fluidized bed and fixed bed gasification) in terms of calorific value, ash content, particle size distribution and mechanical strength.

**Keywords:** granulation, granulated fuel, coal sludge, coal flotation concentrate, gasification

### WPROWADZENIE

Produkcja handlowego węgla kamiennego jest związana nie tylko z jego urobkiem, ale także z koniecznym procesem przeróbki mechanicznej (wzbogacania), dzięki której uzyskuje się węgiel

o określonym sortymencie i odpowiednich dla danego odbiorcy (zastosowania) właściwościach. Wzbogacanie węgla obejmować może, w zależności od potrzeb, etapy od ręcznego sortowania, poprzez wstępną klasyfikację oraz wzbogacanie w płuczkach ziarnowych i miałowych do wzbog-

gacania flotacyjnego, a wybór sekwencji postępowania z urobkiem węglowym każdorazowo jest dostosowywany do technologicznej charakterystyki węgla surowego oraz wymagań w stosunku do produktu handlowego [Roga i Tomków 1971]. Charakterystykę stosowanych schematów technologii wzbogacania węgla przedstawiono w tabeli 1 [Aleksa 2008, Kurus i Białecka 2017, Tumidajski i in. 2008].

Produktami przeróbki mechanicznej węgla są, poza produktami handlowymi będącymi głównym jej celem, drobnoziarniste frakcje węglowe w postaci mułów i flotokonzentratów węglowych. Pomimo pochodzenia z tego samego źródła, produkty te znacznie się różnią. Flotokonzentrat węglowy charakteryzuje się właściwościami fizykochemicznymi zbliżonymi do wysokogatunkowych węgla energetycznych lub koksowych, z kolei muły węglowe charakteryzują się uboższymi parametrami energetycznymi (parametr istotny dla węgla energetycznych) oraz niekorzystnymi właściwościami koksotwórczymi (istotnymi dla węgla koksowych). Wspólną cechą obydwu przedmiotowych produktów jest ich bardzo drobne uziarnienie (cząstki stałe o średnicach poniżej 1 mm) oraz znaczne zawodnienie.

Wspomniane wyżej mankamenty flotokonzentratów i mułów węglowych spowodowały, że ich ceny na rynku są zdecydowanie niższe, niż ceny pełnowartościowych sortymentów węglowych. Według archiwalnego cennika Polskiej Grupy Górniczej S.A. z 2015 roku [Flot z Marcela... 2015], ceny mułów i flotokonzentratów węglowych kształtowały się na poziomie, odpowiednio, ok. 70 – 225 zł/Mg oraz 250-290 zł/Mg. Odpowiadające im w tym samym czasie ceny sortymentów kawałkowych (kostka, orzech, groszek) mieściły się w zakresie ok. 370 – 570 zł/Mg. Taka rozbieżność cenowa zachęcała konsumentów w sektorze ogrzewnictwa indywidual-

nego do zakupu flotokonzentratów i mułów węglowych jako paliwa – przyczyny ekonomiczne stały się głównym kryterium wyboru paliwa, natomiast aspekty ekologiczne schodziły na dalszy plan pomimo świadomości, że spalanie flotokonzentratów i mułów węglowych w paleniskach indywidualnych jest jedną z przyczyn powstawania smogu. Ze względu na między innymi bardzo duże rozdrobnienie cząstek węgla w mułach oraz flotokonzentratów węglowych, ich energetyczne wykorzystanie w sektorze ogrzewnictwa rozproszonego powoduje znaczną emisję pyłu – drobne cząstki węglowe wywiewane są z paleniska bezpośrednio do układu odprowadzania spalin, powodując wzrost emisji najdrobniejszych pyłów (PM<sub>2,5</sub> oraz PM<sub>10</sub>) szkodliwych dla organizmów żywych.

Wprowadzona nowelizacja woj. 96 Ustawy Prawo ochrony środowiska umożliwia władzom samorządowym prowadzenie aktywnej polityki antysmogowej na ich terenie. Z możliwości takiej skorzystało już szereg województw, wprowadzających za pomocą tzw. Uchwał antysmogowych całkowity zakaz lub ograniczenie możliwości wykorzystywania mułów i flotokonzentratów węglowych jako paliwa, w tym między innymi woj. małopolskie (Uchwały Sejmiku Województwa Małopolskiego nr XXXII/452/17 z dn. 23.01.2017 r. oraz XXXV/527/17 z dn. 24.04.2017 r.), śląskie (Uchwała nr V/36/1/2017 Sejmiku Województwa Śląskiego z dn. 7.04.2017 r.), opolskie (Uchwała nr XXXII/367/2017 Sejmiku Województwa Opolskiego z dn. 26.09.2017 r.), mazowieckie (Uchwała 162/17 Sejmiku Województwa Mazowieckiego z dn. 24.10.2017 r.), dolnośląskie (Uchwała XLI/1405/17 Sejmiku Województwa Dolnośląskiego z dn. 30.11.2017 r.). Wprowadzenie uchwał antysmogowych ma na celu między innymi ograniczenie spalania paliw niskiej jakości (do których uchwały te zaliczają floto-

**Tabela 1.** Charakterystyka schematów procesów przeróbki mechanicznej węgla

**Table 1.** Characteristics of schemes of mechanical processing of coal

Schemat technologii przeróbki	Wzbogacany węgiel		Stosowane procesy	Uzyskiwane produkty
	typ	frakcja		
PME1	31, 32	powyżej 20 (10) mm	wzbogacanie w cieczy ciężkiej	miał węglowy surowy niewzbogacone muły węglowe
PME2	31, 32, 33	powyżej 1 (0,1) mm	wzbogacanie w cieczy ciężkiej i ośrodka wodnym	wzbogacone miał węglowy niewzbogacone muły węglowe
PME3	33	pełny zakres uziarnienia	wzbogacanie w cieczy ciężkiej, ośrodka wodnym i flotacja	wzbogacone miał węglowy flotokonzentrat węglowy odpady poflotacyjne
PMK1	34, 35	pełny zakres uziarnienia	wzbogacanie w cieczy ciężkiej, ośrodka wodnym i flotacja	flotokonzentrat węglowy odpady poflotacyjne

koncentraty i muły węglowe) w piecach oraz kotłach ogrzewnictwa indywidualnego. Wprowadzone zasady, poza pozytywnym oddziaływaniem na wielkość emisji zanieczyszczeń wywołujących zjawisko smogu, w znacznym stopniu przyczyniły się jednak również do ograniczenia obrotu tymi paliwami przez sprzedawców detalicznych, co zmniejszyło wskaźnik ogólnej konsumpcji mułów i flotokoncentratów węglowych. W związku z tym powstał problem związany z zagospodarowaniem dużej ilości tych frakcji węglowych. Szacuje się, że przy obecnym poziomie stosowanych w krajowym górnictwie węglowym metod wzbogacania węgla rocznie wytwarza się ok. 5-6 mln Mg samego mułu węglowego [Strategia... 2017]. Bez rynku zbytu dla tych frakcji, kopalnie będą musiały deponować je w środowisku (bezpowrotnie tracąc wydobyty, zawarty w nich węgiel) lub znacznie ograniczyć prowadzenie procesów odzyskiwania drobnoziarnistych frakcji węglowych. W obydwu przypadkach działania takie przełożą się zarówno na wtórne obciążenie środowiska naturalnego, jak również na koszt produkcji, a tym samym cenę handlowych sortymentów węgla.

Bezpiecznego dla środowiska rozwiązania problemu upatruje się między innymi w energetycznym wykorzystaniu drobnoziarnistych frakcji węglowych w postaci zwartych, mechanicznie wytrzymałych paliw formowanych. Zgodnie z definicją Wandrasza i in. [Wandrasz i in. 2006], paliwa formowane to substancje palne przeznaczone do realizacji określonego procesu termicznego, utworzone między innymi w wyniku przemian fizycznych lub fizyczno – chemicznych na bazie paliw naturalnych. Paliwa takie z powodzeniem stosowane mogą być zarówno w procesach spalania, jak i zgazowania.

Technologie wytwarzania węglowych paliw formowanych nie są zagadnieniem nowym. Pierwsze wytwórnie brykietów z węgla kamiennego powstały w Europie już w XIX w., w tym w Polsce przy Kopalni Prezydent w roku 1892 [Licznarski 1970]. Jako spoiwo do wytwarzania tego typu paliw stosowane były z reguły paki węglowe i asfalty. Rozwijające się technologie energetycznego wykorzystania paliw oraz rosnąca świadomość społeczna i idące za nią uregulowania prawne dotyczące ochrony środowiska spowodowały, że aktualnie prace nad wytwarzaniem węglowych paliw formowanych ukierunkowane są na wytwarzanie paliw dostosowanych do konkretnych celów i urządzeń grzew-

czych, spełniających nie tylko wymagania technologiczne, ale i wymagania dotyczące emisji substancji szkodliwych. Przedmiotem badań są różne techniki formowania (brykietowanie, granulacja ciśnieniowa i bezciśnieniowa, ekstrudowanie) oraz różne rodzaje spoiw i lepiszczy [Robak i in. 2004, Robak i in. 2005, Kugiel i Piekło 2012, Hycnar i Borowski 2016].

W artykule zaprezentowano rezultaty prac przeprowadzonych w Instytucie Chemicznej Przeróbki Węgla w Zabrze, dotyczących wytwarzania paliw na bazie drobnoziarnistych frakcji węglowych: mułu oraz flotokoncentratu węglowego. Założeniem prac było uzyskanie paliw o właściwościach predestynujących je do zastosowania w reaktorach zgazowania ze złożem stałym i fluidalnym, będących elementem infrastruktury Centrum Czystych Technologii Węglowych IChPW, wykorzystywanej w pracach badawczych.

## CZĘŚĆ EKSPERYMENTALNA

### Paliwo do procesu zgazowania – wymagania

Efektywność procesu zgazowania, mierzona stopniem konwersji węgla i składem otrzymanego produktu gazowego, uzależniona jest od zastosowanej technologii zgazowania oraz właściwości surowca, przy czym czynniki te są wzajemnie ze sobą powiązane: wybór technologii zgazowania uzależniony jest między innymi od właściwości dostępnego paliwa, a przyjęta technologia narzuca wymagania w stosunku do jego przygotowania. W pracy Robak [Robak 2008] omówiono wpływ takich właściwości węgla, jak: reaktywność, rozdrobnienie, właściwości koksotwórcze, zawartość i właściwości popiołu, zawartość siarki i chloru, zawartość wilgoci, części lotnych i węgla związanego  $C_{fix}$ , na proces zgazowania w reaktorach ze złożem stałym (przesuwowym), dyspersyjnym i fluidalnym.

Na podstawie doświadczeń IChPW dotyczących procesu zgazowania paliw węglowych w reaktorach zgazowania ze złożem stałym i fluidalnym ustalono wymagania, jakie powinny spełniać granulaty z drobnoziarnistych frakcji węglowych, możliwe do wykorzystania w instalacjach badawczych, których głównymi elementami są: generator gazu ze złożem stałym (GazEla) [Iluk i in. 2016] oraz bezciśnieniowy reaktor zgazowania paliw stałych z cyrkulującym złożem fluidalnym (IPPS) [Chmielniak i in. 2015].

**Tabela 2.** Wytyczne dotyczące właściwości granulowanego paliwa węglowego do procesu zgazowania w instalacjach badawczych IChPW**Table 2.** Guidelines on the properties of granulated fuel for the gasification process in IChPW research installations

Parametr	Generator gazu ze złożem stałym	Generator gazu ze złożem fluidalnym
Granulacja, mm	15 ÷ 30	0,5 ÷ 3,0
Zawartość wilgoci w stanie roboczym, %	poniżej 30	poniżej 15
Zawartość popiołu w stanie roboczym, %	poniżej 30	poniżej 25
Wartość opałowa w stanie roboczym, kJ/kg	powyżej 14 000	powyżej 14 000
Spiekalność (RI), -	poniżej 20	poniżej 5

Przedstawione w tabeli 2 wartości parametrów paliw granulowanych, takie jak zawartość popiołu, spiekalność i wartość opałowa, zależą przede wszystkim od właściwości surowców węglowych, z jakich będą wytwarzane, a jedynie w niewielkim stopniu od rodzaju i ilości zastosowanego spoiwa. Z kolei rozkład uziarnienia i zawartość wilgoci w paliwach granulowanych jest bezpośrednią pochodną zastosowanej metody i parametrów procesu ich otrzymywania.

Niemniej istotnymi właściwościami paliw granulowanych, niż przedstawione w tabeli 2, są jego parametry wytrzymałościowe w warunkach pokojowych i w warunkach podwyższonej temperatury. Odpowiednia wytrzymałość mechaniczna paliwa w warunkach pokojowych eliminuje zjawisko jego degradacji podczas operacji magazynowania, transportu i aplikacji do reaktora zgazowania. Wytrzymałość paliwa w wysokich temperaturach (min. 500°C) zabezpiecza przed degradacją paliwa w reaktorze zgazowania i utratą przewodności złoża w wypadku reaktora ze złożem stałym lub stratami w efekcie wywiewania ze strefy zgazowania gazogeneratora fluidalnego nieprzereagowanych cząstek paliwa.

### Surowce węglowe i stosowane spoiwa

Surowcem wykorzystanym do otrzymywania paliw granulowanych dla reaktorów zgazowania były drobnoziarniste frakcje węglowe pochodzące z procesu wzbogacania węgla: muł węglowy z węgla energetycznego typu 31 oraz flotokonzentrat z węgla typu 32, których właściwości przedstawiono w tabeli 3. Wszystkie oznaczenia wykonano w Zespole Laboratoriów w Instytucie Chemicznej Przeróbki Węgla w Zabrze, legitymującego się Certyfikatem Akredytacji Nr AB081, nadanym przez Polskie Centrum Akredytacji.

Istotnym kryterium jakościowym przy wyborze mułu węglowego jako potencjalnego paliwa do procesu zgazowania był brak podatności na spiekanie ( $RI = 0$ ). Wybór przedmiotowego flotokonzentratu węglowego również podyktowany był jego stosunkowo niską spiekalnością ( $RI = 16$ ), a ponadto niską zawartością popiołu ( $A^r = 10,4\%$ ) oraz wartością opałową na poziomie powyżej 20 000 kJ/kg.

O ile możliwe jest otrzymanie na bazie wybranego flotokonzentratu węglowego granulowanych paliw spełniających wymagania zawar-

**Tabela 3.** Właściwości fizykochemiczne stosowanych w badaniach surowców węglowych**Table 3.** Physicochemical properties of raw materials used in research

Parametr	Symbol	Jedn.	Muł węglowy	Flotokonzentrat
Zawartość wilgoci całkowitej	$W_t^r$	%	22,6	23,7
Zawartość wilgoci w stanie analitycznym	$W^a$	%	3,3	2,1
Zawartość popiołu w stanie analitycznym	$A^a$	%	57,2	13,3
Zawartość popiołu w stanie roboczym	$A^r$	%	45,8	10,4
Zawartość części lotnych w stanie analitycznym	$V^a$	%	15,64	27,86
Ciepło spalania w stanie analitycznym	$Q_s^a$	kJ/kg	10 726	28 706
Wartość opałowa w stanie analitycznym	$Q_i^a$	kJ/kg	10 179	27 656
Wartość opałowa w stanie roboczym	$Q_i^r$	kJ/kg	7 660	21 016
Zawartość siarki całkowitej w stanie analitycznym	$S_t^a$	%	0,61	0,57
Zdolność spiekania	RI	-	0	16

te w tabeli 2, o tyle wykorzystanie w tym celu wybranego mułu węglowego nie pozwoliłoby na uzyskanie produktu o pożądanych właściwościach. Zarówno wysoka zawartość popiołu ( $A^r = 45,8\%$ ), jak i idąca w ślad za tym niska wartość opałowa ( $Q_i^r = 7\,660\text{ kJ/kg}$ ) dyskwalifikują wybrany muł węglowy jako samodzielny komponent takiego paliwa. Na podstawie obliczeń teoretycznych, wykorzystujących zasadę addytywności, wyznaczono minimalny udział flotokonzentratu (maksymalny udział mułu) w mieszance do granulowania, który zapewniłby uzyskanie produktu o zawartości popiołu i wartości opałowej paliwa na poziomie zdefiniowanym w tabeli 2. Dla skrajnych, dopuszczalnych zawartości wilgoci (0 do 30 % wag.) udział flotokonzentratu wynosić może od 65 do 85% wag. ze względu na zawartość popiołu (rys. 1) lub 40 do 80% wag. ze względu na wartość opałową (rys. 2). Przy założeniu podsuszenia otrzymanego produktu do poziomu poniżej 22% wag. mieszanka o zawartości minimum 70% wag. flotokonzentratu i maksimum 30 % wag. mułu pozwoli na uzyskanie produktu końcowego o założonych właściwościach.

W skład mieszanki do granulowania, poza podstawowymi składnikami węglowymi, wchodziły również handlowe spoiwa mineralne – cement portlandzki CEM I typu 42,5R (produkcja Grupy Ożarów S.A., Cementownia Ożarów) oraz wapno palone o zawartości ok. 92 % czystego tlenku wapnia (CaO), produkcji ZPW Truskawica S.A.

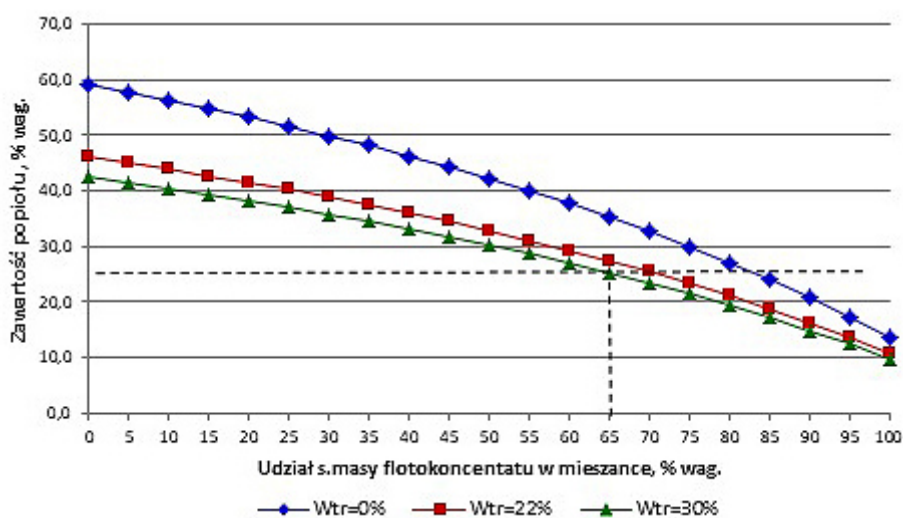
## Wytwarzanie granulatów paliwowych

Prace eksperymentalne nad wytwarzaniem granulatów paliwowych z wyżej opisanych surowców przeprowadzono z wykorzystaniem granuladora talerzowego firmy Eirich (rys. 3). Częścią roboczą urządzenia o działaniu ciągłym jest płaski talerz obrotowy o średnicy 1 m i wysokości burty 0,28 m. Prędkość obrotowa talerza regulowana jest w zakresie 6–40 obr/min, natomiast kąt pochylenia talerza regulowany jest w zakresie od 33,5 do 90° kątowych. Mieszanki do granulowania w ramach testów zasadniczych przygotowywano w dwuwałowym mieszalniku o działaniu periodycznym, z mieszadłami typu Z (rys. 4) – czas mieszania surowców wynosił ok. 10–15 minut.

Badania procesu granulacji obejmowały przeprowadzenie testów wstępnych oraz zasadniczych procesu wytwarzania granulatów paliwowych.

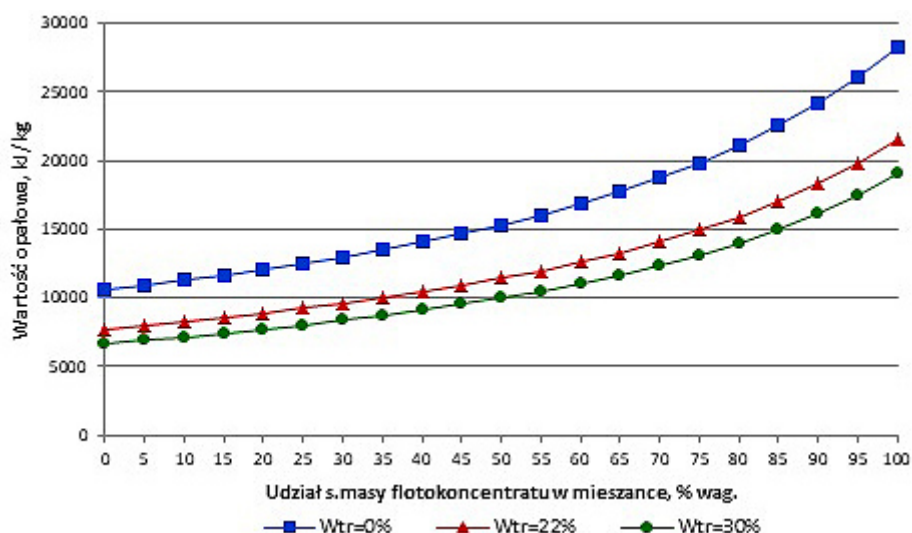
## Testy wstępne

W celu ustalenia optymalnych ustawień granuladora, które umożliwiłyby otrzymanie partii granulek o pożądanych rozmiarach dla ich zastosowania w poszczególnych procesach technologicznych (zgodnie z tabelą 2), przeprowadzono serię testów wstępnych, w których materiałem granulowanym była mieszanka zawierająca wyłącznie muł oraz flotokonzentrat węglowy (w proporcjach, odpowiednio, 30/70 cz. wag. suchej masy). Testy przeprowadzono przy zmiennych kątach nachylenia talerza gra-



**Rys. 1.** Teoretyczna zawartość popiołu w paliwie w zależności od udziału w nim flotokonzentratu i zawartości wilgoci całkowitej

**Fig. 1.** Theoretical ash content in the fuel depending on the share of coal flotation concentrate and total moisture content



Rys. 2. Teoretyczna wartość opałowa paliwa w zależności od udziału w nim flotokonzentratu i zawartości wilgoci całkowitej

Fig. 2. Theoretical calorific value of fuel depending on the share of coal flotation concentrate and total moisture content



Rys. 3. Granulator talerzowy typ TR 10-0,3-1,5 (producent: Eirich GmbH)

Fig. 3. The disk granulator type TR 10-0,3-1,5 (manufacturer: Eirich GmbH)

nulatora i zawartości wilgoci w granulowanej mieszance (tabela 4) oraz przy stałej prędkości obrotowej talerza (19 obr/min). Zawartość wilgoci w granulowanej mieszance ma duży wpływ na rozmiar otrzymywanych granulek. Mieszanki o większej zawartości wilgoci mają tendencję do tworzenia granulatów o



Rys. 4. Mieszalnik dwuwałowy z mieszadłem typu Z: a – widok ogólny, b – wnętrze mieszalnika

Fig. 4. Twin-shaft mixer with a type Z stirrer: a – external view, b – interior

większych rozmiarach ziaren, natomiast te o mniejszej zawartości wilgoci – o mniejszych rozmiarach ziaren. Testy 1 – 3 ukierunkowane

**Tabela 4.** Parametry wstępnych testów wytwarzania granulatów**Table 4.** Parameters of preliminary granules production tests

Kod testu	Kąt nachylenia talerza granulatora, ° kątowe	Wilgotność mieszanki, %
Test 1	30°	25
Test 2	38°	25
Test 3	45°	25
Test 4	30°	30
Test 5	38°	30
Test 6	45°	30

były na otrzymanie granulatów paliwowych do procesu zgazowania w złożu fluidalnym, natomiast testy 4 – 6 zorientowane były na uzyskanie granulatów do procesu zgazowania w złożu stałym.

Procedura testów wstępnych polegała na przygotowaniu mieszanki do granulowania w ilości 10 kg/test i periodycznym, jednorazowym wprowadzeniu jej bezpośrednio na obracający się talerz granulatora. Po osiągnięciu odpowiedniego, ocenionego wizualnie, rozmiaru produktu (czas trwania procesu granulacji wynosił ok. 2-3 minuty), uformowane granulki odbierano z granulatora i suszono w suszarce komorowej w temperaturze 60°C do zawartości wilgoci na poziomie ok. 5-10% wag. Po wysuszeniu, granulaty wychładzano i pozostawiano w warunkach powietrzno – suchych przez 24 godziny, a następnie poddawano analizie sitowej.

## Testy zasadnicze

Po określeniu optymalnych parametrów procesu granulacji z punktu widzenia uziarnienia produktu, przystąpiono do realizacji testów zasadniczych, których celem był finalny dobór receptury paliw (rodzaj i ilość zastosowanego spoiwa) pod kątem uzyskania produktów o najkorzystniejszej wytrzymałości mechanicznej. Skład mieszanek poddawanych granulowaniu przedstawiono w tabeli 5 – proporcje zawartości mułu do flotokonzentratu węglowego zachowano na poziomie, odpowiednio, 30/70 cz. wag. suchej masy, udział poszczególnych spoiw wynosił 1, 3 i 5 % wag. całkowitej, suchej masy mieszanki do granulowania. Procedura wytwarzania granulatów przebiegała analogicznie, jak w przypadku testów wstępnych.

Z partii granulatów uzyskanych w testach zasadniczych wysiano frakcją 10 – 20 mm oraz frakcją 0,8 – 3,15 mm. Wysianą frakcją 10 – 20 mm poddano badaniom wytrzymałości mechanicznej zgodnie z normą PN-EN ISO 17831-1:2016-02 w Zespole Laboratoriów Akredytowanych w IChPW. Procedura oznaczania wytrzymałości mechanicznej wg przytoczonej normy polega na bębnowaniu próbki granulatu pozbawionego frakcji o wymiarach cząstek poniżej 3,15 mm w komorze bębnowania znormalizowanego urządzenia, przy jego prędkości obrotowej 50 obr/min. i całkowitej liczbie obrotów 500, a następnie wysianiu powstałej w procesie bębnowania frakcji o uziarnieniu poniżej 3,15 mm. Wynikiem pomiaru jest wytrzymałość mechaniczna  $D_U$ , wyrażona jako ilość (w % wag.) granulatu nie ulegającego degradacji w procesie bębnowania do uziarnienia poniżej 3,15 mm, liczona wg wzoru:

**Tabela 5.** Receptury mieszanek poddawanych granulowaniu w testach zasadniczych**Table 5.** Recipes of mixtures subjected to granulation in basic tests

Kod mieszanki	Udział składników w mieszance, % wag. suchej masy			
	Muł węglowy	Flotokonzentrat węglowy	Cement portlandzki CEM I 42,5R	Wapno palone
A	30,0	70,0	0	0
B-1	29,7	69,3	1	0
B-2	29,1	67,9	3	0
B-3	28,5	66,5	5	0
C-1	29,7	69,3	0	1
C-2	29,1	67,9	0	3
C-3	28,5	66,5	0	5
D-1	29,7	69,3	0,5	0,5
D-2	29,1	67,9	1,5	1,5
D-3	28,5	66,5	2,5	2,5

$$D_U = \frac{m_A}{m_E} \cdot 100 \quad (1)$$

gdzie:  $m_A$  – masa granulatu po przesianiu próbki poddanej bębnowaniu, g;  
 $m_E$  – masa próbki granulatu przed bębnowaniem, g.

Oznaczenie wytrzymałości mechanicznej wysianej frakcji drobnej (0,8 – 3,15 mm) wykonano analogicznie, zastępując jednak sito o wymiarze oczek 3,15 mm sitem o wymiarze oczek 0,8 mm – tym samym uzyskany wynik odzwierciedla procentowy udział granulatu nie ulegającego degradacji do uziarnienia poniżej 0,8 mm.

Realizację testów zasadniczych zakończono wytworzeniem wg opracowanej receptury i procedury postępowania partii granulatu w skali wielkolaboratoryjnej.




## OMÓWIENIE WYNIKÓW

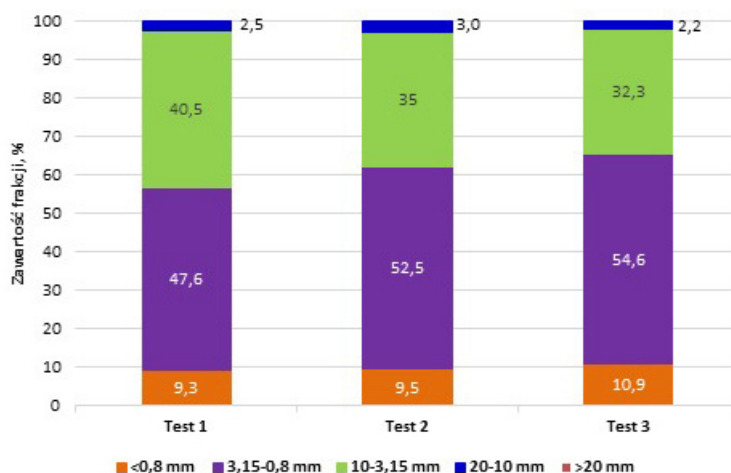
### Testy wstępne

Wyniki analizy sitowej granulatów uzyskanych podczas realizacji testów wstępnych zaprezentowano w tabelach 6 i 7 oraz na rysunkach 5 i 6.

**Tabela 6.** Rozkład ziarnowy granulatów paliwowych do procesu zgazowania w złożu fluidalnym  
**Table 6.** The particle size distribution of granules for the fluidized bed gasification

Klasa ziarnowa	Wychód, %		
	Test 1	Test 2	Test 3
>20 mm	0,0	0,0	0,0
20–10 mm	2,5	3,0	2,2
10–3,15 mm	40,5	35,0	32,3
3,15–0,8 mm	47,6	52,5	54,6
<0,8 mm	9,3	9,5	10,9






**Rys. 5.** Graficzne przedstawienie rozkładu ziarnowego granulatów węglowych do procesu zgazowania w złożu fluidalnym

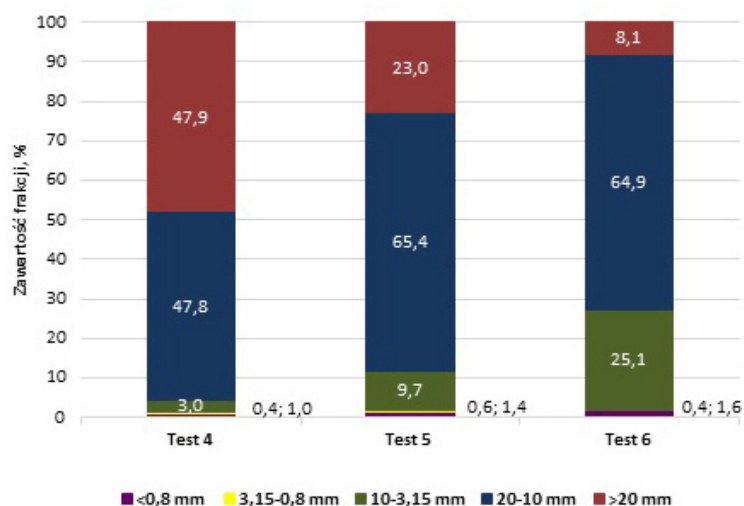
**Fig. 5.** Graphical representation of the particle size distribution of granules for the fluidized bed gasification



**Tabela 7.** Rozkład ziarnowy granulatów paliwowych do procesu zgazowania w złożu stałym  
**Table 7.** The particle size distribution of granules for the fixed bed gasification

Klasa ziarnowa	Wychód, %		
	Test 4	Test 5	Test 6
>20 mm	47,9	23,0	8,1
20-10 mm	47,8	65,4	64,9
10-3,15 mm	3,0	9,7	25,1
3,15-0,8 mm	0,4	0,6	0,4
<0,8 mm	1,0	1,4	1,6



**Rys. 6.** Graficzne przedstawienie rozkładu ziarnowego granulatów węglowych do procesu zgazowania w złożu stałym

**Fig. 6.** Graphical representation of the particle size distribution of granules for the fixed bed gasification

Wstępne testy granulowania mieszanki mułu i flotokonzentratu węglowego umożliwiły dobór optymalnych parametrów procesu. Bazując na uzyskanych wynikach stwierdzono, że w przypadku wytwarzania granulatów na potrzeby procesu zgazowania w złożu fluidalnym zwiększenie kąta nachylenia talerza granulatora z 30 do 45° kątowych pozwoliło na zwiększenie wychodu frakcji najbardziej przydatnej (0,8 do 3,15 mm) o ok. 15% (z 47,6 do 54,6% udziału w produkcie całkowitym). Jednocześnie frakcja 3,15–10 mm (nie-

pożądana) zmniejszyła swój udział. Podobną tendencję zaobserwowano w przypadku wytwarzania granulatów do procesu zgazowania w złożu stałym – większy kąt nachylenia talerza granulatora implikował formowanie granul o mniejszych średnicach. Zwiększanie kąta nachylenia talerza granulatora (w przedziale 30–45°) spowodowało wzrost udziału frakcji 10–20 mm (pożądaney) o ok. 36% i ponad 7-krotny wzrost ilości frakcji od 3,15 do 10 mm, kosztem zmniejszenia wychodu frakcji o średnicy powyżej 20 mm o 83%.

Po analizie wyników wszystkich przeprowadzonych testów wstępnych, do wytwarzania granulatów dedykowanych procesowi zgazowania w złożu fluidalnym i stałym wybrano parametry pracy granulatora, zapewniające największy uzysk właściwej frakcji w danych przedziałach uziarnienia – odpowiednio 0,8–3,15 mm oraz 10–20 mm, przedstawione w tabeli 8.

### Testy zasadnicze

Wytrzymałość mechaniczna granulatów paliwowych jest bardzo istotnym parametrem użytkowym - dobre paliwo powinno być odporne na kruszenie się podczas jego transportu i dozowania do docelowej instalacji procesowej. Wyniki oceny wytrzymałości mechanicznej i zawartości wilgoci dla poszczególnych próbek granulatów paliwowych wytworzonych w ramach testów zasadniczych prezentuje tabela 9 oraz rysunki 7 i 8.

Lepszą wytrzymałością mechaniczną charakteryzują się granulaty drobniejsze, przygotowane pod kątem zasilania układów zgazowania ze złożem fluidalnym, jednakże zależność wytrzymałości mechanicznej granulatów przeznaczonych do zgazowania w złożu fluidalnym i stałym od rodzaju i ilości spoiwa jest taka sama. Najlepszymi wła-

ściwościami mechanicznymi charakteryzują się produkty z dodatkiem cementu portlandzkiego w ilości 3% - wytrzymałość ta wzrasta o ok. 37% w stosunku do wytrzymałości granulatu uzyskanego bez zastosowania spoiwa. Wytrzymałości mechaniczne granulatów uzyskanych z zastosowaniem spoiwa w postaci wapna palonego oraz mieszanki cementu portlandzkiego i wapna palonego w proporcji 1:1 są bardzo zbliżone, niższe średnio o ok. 20% w stosunku do wytrzymałości granulatów uzyskanych z zastosowaniem cementu.

Bez względu na rodzaj spoiwa, zwiększenie jego ilości do 5% nie przyniosło poprawy wytrzymałości produktu w stosunku do produktu z jego 3% dodatkiem.

Biorąc pod uwagę osiągnięte wyniki przeprowadzonych testów, wytworzono w skali półtechnicznej, w układzie pracy ciągłej (szarże produkcyjne po ok. 5 godzin) partie granulatów paliwowych do zgazowania w złożu fluidalnym i stałym – rys. 9a oraz 9b, składające się z mułu i flotokonzentratu węglowego w proporcjach 30/70% wag. suchej masy oraz spoiwa w postaci cementu portlandzkiego CEM I typu 42,5 R w ilości 3% wag. w stosunku do całkowitej suchej masy surowców węglonośnych. Granulaty wytworzono na granulatorze talerzowym, stosując parametry przedsta-

**Tabela 8.** Zestawienie wytypowanych parametrów wytwarzania granulatów w testach zasadniczych

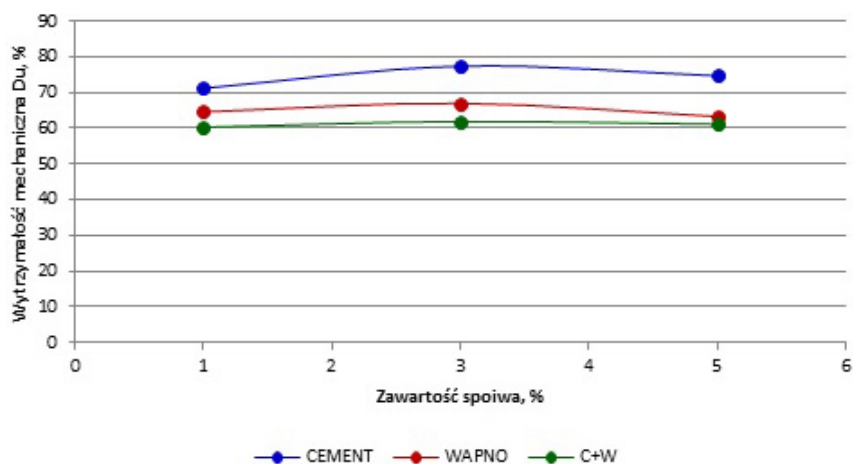
**Table 8.** List of selected granules production parameters in basic tests

Parametr	Granulat do procesu zgazowania w złożu fluidalnym	Granulat do procesu zgazowania w złożu stałym
Kąt nachylenia talerza granulatora, ° kątowe	45	38
Liczba obrotów talerza, obr/min	19	19
Wilgotność mieszanki, %	25	30

**Tabela 9.** Właściwości granulatów paliwowych otrzymanych w testach zasadniczych

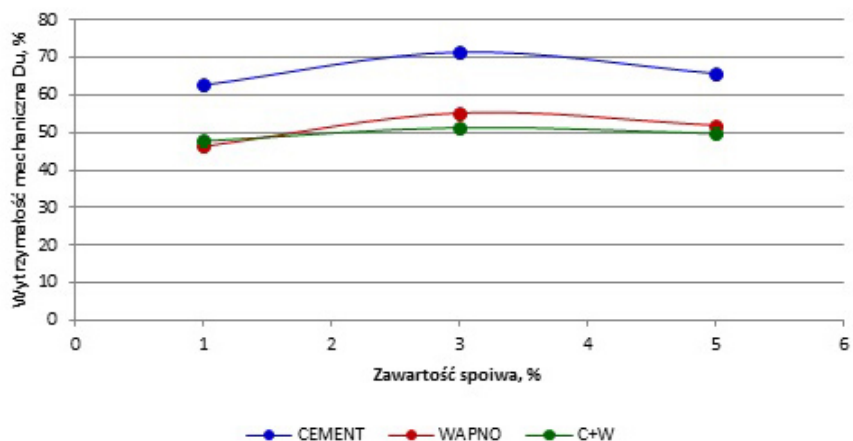
**Table 9.** Properties of granules obtained in basic tests

Kod mieszanki	Granulat do procesu zgazowania w złożu fluidalnym (0,8 – 3,15 mm)		Granulat do procesu zgazowania w złożu stałym (10 – 20 mm)	
	Wytrzymałość mechaniczna, %	Zawartość wilgoci, %	Wytrzymałość mechaniczna, %	Zawartość wilgoci, %
A	62,1	5,7	52,0	6,3
B-1	71,2	4,9	62,6	5,4
B-2	77,4	5,1	71,4	5,6
B-3	74,7	5,5	65,7	6,4
C-1	64,6	6,7	46,3	9,8
C-2	67,0	7,1	55,2	8,1
C-3	63,3	6,6	51,9	11,7
D-1	60,3	5,9	47,7	6,4
D-2	61,9	5,7	51,3	6,0
D-3	61,1	5,4	49,7	8,6



Rys. 7. Zależność wytrzymałości mechanicznej granulatów od rodzaju i ilości zastosowanych spoiw – granulaty do zgazowania w złożu fluidalnym

Fig. 7. Dependence of mechanical strength of granules on the type and amount of applied binders – granules for the fluidized bed gasification

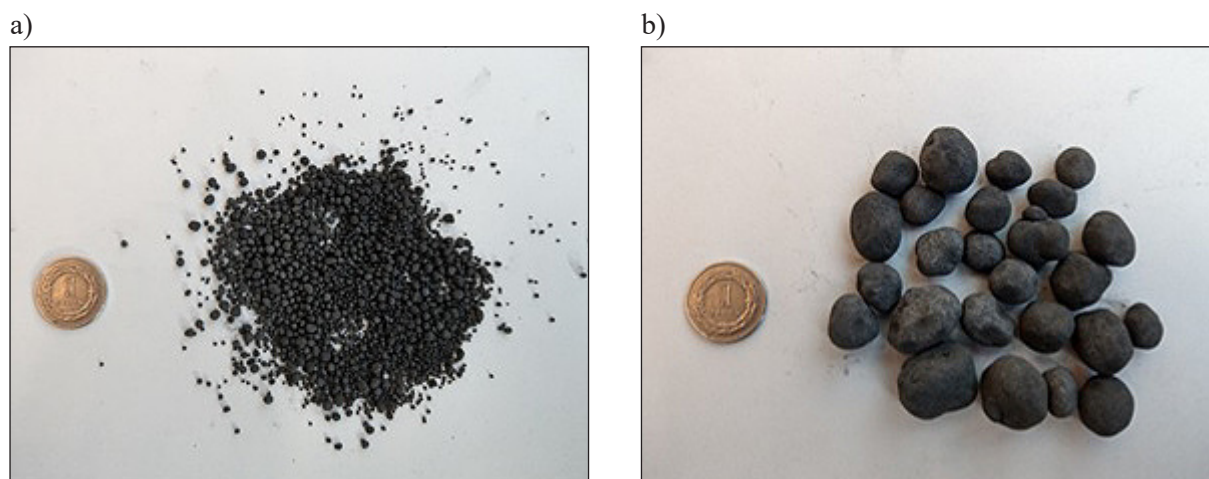


Rys. 8. Zależność wytrzymałości mechanicznej granulatów od rodzaju i ilości zastosowanych spoiw – granulaty do zgazowania w złożu stałym

Fig. 8. Dependence of mechanical strength of granules on the type and amount of applied binders - granules for the fixed bed gasification

Tabela 10. Wybrane właściwości fizykochemiczne granulatu paliwowego do zgazowania w złożu stałym  
Table 10. Selected physicochemical properties of granulated fuel for gasification in a fixed bed

Parametr	Symbol	Jedn.	Wartość
Zawartość wilgoci całkowitej	$W_t^r$	%	11,5
Zawartość wilgoci w stanie analitycznym	$W^a$	%	2,6
Zawartość popiołu w stanie analitycznym	$A^a$	%	27,1
Zawartość popiołu w stanie roboczym	$A^r$	%	24,6
Zawartość części lotnych w stanie analitycznym	$V^a$	%	24,41
Zawartość części lotnych w stanie suchym, bezpopiołowym	$V^{daf}$	%	34,72
Ciepło spalania w stanie analitycznym	$Q_s^a$	kJ/kg	22 339
Wartość opałowa w stanie analitycznym	$Q_i^a$	kJ/kg	21 597
Wartość opałowa w stanie roboczym	$Q_i^r$	kJ/kg	19 400
Zawartość siarki całkowitej w stanie analitycznym	$S_t^a$	%	0,59
Wytrzymałość mechaniczna wg PN-EN ISO 17831-1:2016-02	$D_U$	%	72,7



**Rys. 9.** Granulaty do zgazowania uzyskane w skali półtechnicznej: a – w złożu fluidalnym (0,8 – 3,15 mm), b – w złożu stałym (10 – 20 mm)

**Fig. 9.** Granules for gasification obtained on a semi-technical scale: a – for the fluidized bed gasification (0.8 – 3.15 mm), b – for the fixed bed gasification (10 – 20 mm)

wione w tabeli 8. Uzysk frakcji 0,8 – 3,15 mm (przeznaczonej do zgazowania w złożu fluidalnym) wynosił 71,2%, natomiast uzysk frakcji 10 – 20 mm (przeznaczonej do zgazowania w złożu stałym) wynosił 60,1%. Właściwości fizykochemiczne produktu końcowego, przeznaczonego do zgazowania w złożu stałym (frakcja 10 – 20 mm) zaprezentowano w tabeli 10.

## PODSUMOWANIE

W ramach niniejszego artykułu przedstawiono proces projektowania granulatów paliwowych przeznaczonych do zgazowania w złożu fluidalnym i stałym. Projektowanie to obejmowało opracowanie receptury oraz dobór parametrów procesu realizowanego z wykorzystaniem granulatora talerzowego, umożliwiających wytworzenie granulatów na bazie mułu i flotokonzentratu węglowego z dodatkiem spoiwa mineralnego. Zgodnie z wstępnymi założeniami, projektowane paliwo winno charakteryzować się możliwie wysoką wartością opałową i niską zawartością popiołu, odpowiednim uziarnieniem oraz wysoką wytrzymałością mechaniczną.

Przeprowadzona sekwencja badań pozwala stwierdzić:

1. Wielkość uzyskiwanych granul zależna jest od zawartości wilgoci w mieszance poddawanej granulowaniu oraz ustawień granulatora. Zwiększenie zawartości wilgoci w mieszance (z 25% do 30%) wpływa na otrzymanie granul o większej średnicy przy zachowaniu

stałych parametrów pracy granulatora. Równie istotne są ustawienia granulatora, zwłaszcza kąt nachylenia talerza, który determinuje wielkość uzyskanych granul. Zwiększanie kąta nachylenia talerza granulatora wpływało na zwiększenie uzysku frakcji drobniejszych.

2. Najwyższą wytrzymałość mechaniczną granulatów uzyskano przy udziale 3% (w stosunku do suchej masy surowców węglonośnych) stosowanych spoiw mineralnych, przy czym najefektywniejszym spoiwem był cement portlandzki, umożliwiając wytworzenie na bazie mułu i flotokonzentratu węglowego granul o wytrzymałości mechanicznej  $D_u$  powyżej 70%.
3. Receptura paliwa, zawierającego w swoim składzie muł i flotokonzentrat węglowy o przedstawionych w pracy właściwościach (w proporcji 30/70 cz. wagowych suchej masy) oraz cement portlandzki w ilości 3% wag. w stosunku do całkowitej suchej masy surowców węglonośnych, pozwala na uzyskanie paliwa o pożądanym parametrach fizykochemicznych, zwłaszcza pod kątem jego wykorzystania w procesie zgazowania: zawartości popiołu i wartości opałowej, a także wytrzymałości mechanicznej.
4. Ustalone warunki wytwarzania paliwa: kąt nachylenia i prędkość obrotowa talerza, a także zawartość wilgoci w mieszance poddawanej procesowi granulowania, umożliwia otrzymanie paliwa o pożądanym uziarnieniu, i tak parametry te wynoszą, odpowiednio:

- dla pozyskania paliwa do zgazowania w złożu fluidalnym: 45° – 19 obr/min – 25%,
  - dla pozyskania paliwa do zgazowania w złożu stałym: 38° – 19 obr/min – 30%.
5. Uzysk pożądanej frakcji w procesie realizowanym wg opracowanych założeń wynosi ok. 70% w stosunku do granulatu paliwowego dla złoża fluidalnego i ok. 60% dla granulatu paliwowego dla złoża stałego.

Biorąc pod uwagę aktualne problemy, wynikające z niemożliwości bezpośredniego, energetycznego zużytkowania mułów i flotokonzentratów węglowych (powstawanie smogu) oraz jednocześnie utracone korzyści w postaci znacznej ilości deponowanego w środowisku urobku węglowego, formowanie wspomnianych produktów przemysłu węglowego wydaje się jedną z możliwości ich bezpiecznego środowiskowo i efektywnego ekonomicznie zagospodarowania. Warunkiem koniecznym wprowadzenia takiej technologii do praktyki przemysłowej jest jednakże z jednej strony wieloczynnikowa optymalizacja metody otrzymywania granulatu paliwowego (biorąca pod uwagę zarówno właściwości produktu, jak i koszt jego wytwarzania) jak i rzetelne potwierdzenie „ekologicznego bezpieczeństwa” uzyskiwanych tą metodą produktów.

### Podziękowania

Praca wykonana w ramach projektu POIR.04.01.02-00-0038/17 „Opracowanie technologii wytwarzania ekologicznych pelletów na bazie drobnoziarnistych sortymentów węglowych dla ogrzewnictwa indywidualnego”, współfinansowanego ze środków Europejskiego Funduszu Rozwoju Regionalnego.

### BIBLIOGRAFIA

1. Aleksa H. 2008. Rozwój technologiczny przeróbki mechanicznej węgla w świetle oceny ekspertów. *Gospodarka Surowcami Mineralnymi*, 24 (1/2), 259-272.
2. Chmielniak T., Sobolewski A., Tomaszewicz G. 2015. Zgazowanie węgla przy wykorzystaniu CO<sub>2</sub> jako czynnika zgazowującego. *Doświadczenia IChPW. Przemysł Chemiczny*, 94 (4), 442-448.
3. Flot z Marcela to przebój. Dlaczego zakazać nim palić? 2015. <https://www.nowiny.pl/>

biznes/113622-flot-z-marcela-to-przeboj-dlaczego-zakazac-nim-palic.html (dostęp 3.04.2018).

4. Hycnar J.J., Borowski G. 2016. Metody podwyższania kaloryczności drobnoziarnistych odpadów węglowych. Wydawnictwo Politechniki Lubelskiej, Lublin.
5. Iluk T., Sobolewski A., Szul M. 2016. Zgazowanie w skali pilotowej stałych palnych odpadów komunalnych, biomasy oraz osadów ściekowych w generatorze gazu ze złożem stałym. *Przemysł Chemiczny*, 95 (8), 1634-1640.
6. Kugiel M., Piekło R. 2012. Kierunki zagospodarowania odpadów wydobywczych w HALDEX S.A.. *Górnictwo i Geologia*, 7 (1), 133-145.
7. Kurus K., Białecka B. 2017. Model procesu produkcji węgla handlowego uwzględniający redukcję wybranych zanieczyszczeń. Wydawnictwo P.A.Nova, Gliwice. <http://wydawnictwo.panova.pl/attachments/article/1/Kurus.pdf> (dostęp 3.04.2018).
8. Licznerski E. 1970. Brykietowanie węgla. Wydawnictwo „Śląsk”, Katowice.
9. Robak J. 2008, Przygotowanie paliw do zgazowania. W: *Czysta energia. Produkty chemiczne i paliwa z węgla – ocena potencjału rozwojowego*, praca zbiorowa pod red.: T. Borowieckiego, J.Kijęńskiego, J.Machnikowskiego, M.Ściążko, Wydawnictwo IChPW, Zabrze.
10. Robak J., Kubica K., Zawistowski J., Raińczak J. 2004. Niekonwencjonalne paliwa stałe w badaniach IChPW. W: *Paliwa i energia XXI wieku* pod red. K. Bytnara i G.S. Jodłowskiego, Wydawnictwa AGH, Kraków.
11. Robak J., Ociepka W., Kopczyński M. 2005. Problemy techniczne wytwarzania i właściwości brykietów z węgla i biomasy, w: *Papioly z Energetyki* pod red. Myszkowska A., Szczygielski T., Wydawnictwo EKOTECH Sp. z o.o., Szczecin.
12. Roga B., Tomków K. 1971. *Chemiczna technologia węgla*. Wydawnictwa Naukowo – Techniczne, Warszawa.
13. Strategia zagospodarowania odpadów wydobywczych na lata 2017–2026, 2017. <http://www.haldex.com.pl/wp-content/uploads/2017/05/Materia%C5%82y-konferencyjne.pdf> (dostęp 3.04.2017).
14. Tumidajski T., Gawenda T., Niedoba T. i Saramak D. 2008. Kierunki zmian technologii przeróbki węgla kamiennego w Polsce. *Gospodarka Surowcami Mineralnymi*, 24 (1/2), 245-258.
15. Wandrasz J., Wandrasz A. 2006. *Paliwa formowane*. Wydawnictwo Seidel – Przywecki Sp. z o.o., Warszawa.