

Granulowanie paliwa z odpadów

Jolanta ROBAK, Katarzyna MATUSZEK – Instytut Chemicznej Przeróbki Węgla, Zabrze

Wprowadzenie

Przepisy prawne dotyczące gospodarowania odpadami są jednym z elementów inicjujących rosnące zainteresowanie wytwórców i posiadaczy odpadów technologiami umożliwiającymi ich bezpieczne unieszkodliwienie, a jeszcze lepiej zużytkowanie gospodarcze. Zgodnie z Ustawą o odpadach z dnia 27 kwietnia 2001 r. [1], podstawowymi kierunkami postępowania z odpadami są kolejno: 1) zapobieganie lub ograniczenie ilości odpadów i ich uciążliwości dla środowiska, 2) odzysk materiałów z odpadów przez ich powtórne wykorzystanie, 3) unieszkodliwienie odpadów.

Jedną z metod pozwalających na wykorzystanie użytecznych walorów odpadów jest odzysk energii, zdefiniowany w tej Ustawie jako „termiczne przekształcanie odpadów w celu odzyskania energii”, a polegający na wykorzystaniu energii chemicznej w nich zawartej. W związku z tym pojawia się wiele informacji, między innymi o opracowywanych i wdrażanych technologiach wytwarzania i wykorzystania paliw z odpadów, które zgodnie z Rozporządzeniem Ministra Środowiska z dnia 27 września 2001 r. w sprawie katalogu odpadów [2], należą do kategorii „Odpady palne (paliwo alternatywne)” o kodzie 19 12 10. W świetle powyższego zapisu, jakiegokolwiek paliwo alternatywne (a więc zawierające w swoim składzie odpad) nadal jest odpadem.

W kręgu zainteresowania potencjalnych wytwórców i użytkowników paliw alternatywnych znajdują się odpady o różnych właściwościach fizykochemicznych, co wynika z różnych źródeł ich pochodzenia. Są to zarówno odpady stałe drobnoziarniste i kawałkowe, jak również mokre osady i szlasy pochodzenia komunalnego i przemysłowego. Niekorzystna z punktu widzenia użytkownika forma fizyczna odpadów, utrudniająca transport, składowanie i aplikację, a także niejednorodność właściwości fizykochemicznych powodują, że termiczne ich zużytkowanie w formie nieprzetworzonej nastrocza wiele problemów. Metodą na zwiększenie użytecznych walorów odpadów, i tym samym zwiększenie ich odzysku energetycznego, jest przetwarzanie w paliwa kwalifikowane o zdefiniowanych właściwościach. W tym celu wykorzystywane są między innymi procesy suszenia, rozdrabniania lub aglomeracji różnymi metodami, w tym metodą granulowania.

Problematyka przygotowywania odpowiednich jakościowo paliw dla różnego rodzaju urządzeń grzewczych jest jedną z dziedzin działalności Instytutu Chemicznej Przeróbki Węgla w Zabrzu. Rosnące zainteresowanie paliwami odnawialnymi w postaci biomasy oraz przewijający się stale problem zagospodarowania różnego rodzaju odpadów znalazły również swoje odzwierciedlenie w badaniach Instytutu nad ich energetycznym wykorzystaniem [3 ÷ 5].

Paliwo z odpadów – problem technologiczny

Opracowanie metod wytwarzania granulowanych paliw zawierających odpady wymaga rozwiązania szeregu problemów, do których należą przede wszystkim:

- wybór komponentów palnych paliwa korzystnie wpływających na wartość kaloryczną produktu, a jednocześnie możliwych do wykorzystania w świetle zapisów prawnych dotyczących ochrony środowiska i gospodarki odpadami;
- wybór metody kompaktowania, uzależniony przede wszystkim od wymagań stawianych formie fizycznej wytwarzanego paliwa oraz właściwości składników;
- dobór spoiwa, wspomagającego z jednej strony wytwarzanie spójnej struktury otrzymanych produktów, a z drugiej – niewpływającego negatywnie na walory energetyczne i ekologiczne produktu;
- wybór metody wstępnego przygotowania surowców przez:
 - 1) odwadnianie lub suszenie ciepłem fizycznym, dodatkiem suchych komponentów lub reagentów wiążących nadmiar wody,
 - 2) mielenie,
 - 3) homogenizację wszystkich komponentów;
- wybór metody końcowej obróbki paliwa (sezonowanie w warunkach naturalnych, kondycjonowanie w podwyższonej temperaturze itp.).

Kierunki rozwiązywania przedstawionych problemów uzależnione są przede wszystkim od postawionej na wstępie prac funkcji celu, odpowiadającej nie tylko na pytanie, co chcemy otrzymać w wyniku realizacji opracowanej metody, ale także, jakiej jakości i do jakich zastosowań ma być produkt oraz jakim kosztem otrzymany. W przypadku paliw alternatywnych niebagatelne znaczenie ma również spełnienie przez produkt końcowy wymagań prawnych, dotyczących emisji do środowiska substancji szkodliwych podczas ich spalania. Efektem tak postawionej funkcji celu jest wytyczenie kilku, czasami

Granulowanie paliwa z odpadów

ROBAK J., MATUSZEK K.

Przedmiotem prezentowanej pracy jest stabilne mechanicznie i biologicznie granulowane paliwo alternatywne dla cementowni, wytworzone z komunalnych osadów ściekowych i drobnych sortymentów węgla. Zaprezentowano wyniki badań, dotyczące procesu projektowania paliwa (względny formalnoprawny, dobór receptury paliwa oraz metody jego wytworzenia) oraz ocenę wytworzonego paliwa pod względem mechanicznym i energetycznoemisyjnym.

Słowa kluczowe: granulacja, paliwa granulowane, odpady

Granulated fuels from wastes

ROBAK J., MATUSZEK K.

Mechanically and biologically stable granulated alternative fuel for cement mill, produced from municipal sewage sludge and fine size grade of coal is the object of presented work. In this article the results of research connected with process of fuel project (legal regard, choice of fuel recipe and production methods) as well as mechanical, energetic and emission evaluation the sample of the fuel.

Keywords: granulation, granulated fuels, wastes

wykluczających się kierunków optymalizacji opracowywanej metody technologicznej.

„Projektowanie” paliwa z odpadów

Proces „projektowania” granulowanego paliwa z odpadów przedstawiono na przykładzie paliwa alternatywnego dla cementowni. Założeniem pracy było otrzymanie paliwa mogącego stanowić częściowy zamiennik mialu węglowego, standardowo stosowanego do opalania pieca obrotowego.

Projektowane paliwo alternatywne musi odpowiadać krajowym zapisom legislacyjnym. Zgodnie z nimi, jedynie odpady inne niż niebezpieczne mogą być składnikiem paliwa alternatywnego. Do podstawowych aktów prawnych, dotyczących spalania i współspalania odpadów innych niż niebezpieczne, należą Ustawa z dnia 27 kwietnia 2001 r. Prawo ochrony środowiska [6] i wspomniana już Ustawa o odpadach [1] oraz stosowne do nich rozporządzenia wykonawcze, w tym przede wszystkim:

- Rozporządzenie Ministra Gospodarki z dnia 21 marca 2002 r. z późn. zm. w sprawie wymagań dotyczących prowadzenia procesu termicznego przekształcania odpadów [7],
- Rozporządzenie Ministra Środowiska z dnia 20 grudnia 2005 r. z późn. zm. w sprawie standardów emisyjnych z instalacji [8],
- Rozporządzenie Ministra Środowiska z dnia 23 grudnia 2004 r. z późn. zm. w sprawie wymagań w zakresie prowadzenia pomiarów emisyj [9].

W opracowywanej technologii otrzymywania paliwa alternatywnego surowcami podstawowymi – składnikami palnymi były osady ściekowe ze ścieków komunalnych (odpad nieniebezpieczny o kodzie 19 08 05) oraz drobne sortymenty węgla. Piece obrotowe, stosowane w przemyśle cementowym w produkcji klinkieru, są swoistymi agregatami umożliwiającymi spalanie różnego rodzaju odpadów w warunkach odpowiadających wymaganiom związanym z ochroną środowiska [10].

Wymagane właściwości docelowe paliwa

Docelowe właściwości paliwa uzależnione są bezpośrednio od ich przeznaczenia. Względy technologiczne procesu wytwarzania klinkieru w przemyśle cementowym są podstawą zdefiniowania wymagań stawianych wykorzystywanym w nich paliwom alternatywnym. Zakresy wymaganych parametrów paliw alternatywnych stosowanych w przemyśle cementowym przedstawiono w tablicy I [10, 11].

Tablica I

Zakresy wymaganych parametrów paliw alternatywnych dla przemysłu cementowego [10, 11]

Ranges of required parameters for cement industry alternative fuels [10, 11]

Parametr	Jednostka miary	Zakres
Średnia wartość opałowa	MJ/kg	nie niższa, niż 13 – 14
Zawartość wilgoci	% wag.	nie wyższa, niż 30
Zawartość chloru	% wag.	nie wyższa, niż 0,2 – 0,3
Zawartość siarki	% wag.	nie wyższa, niż 2,5
Zawartość PCB+PCT*	ppm	nie wyższa, niż 50
Zawartość metali ciężkich	ppm	nie wyższa, niż 2500
Zawartość rtęci	ppm	nie wyższa, niż 10
Zawartość Cd+Th+Hg**	ppm	nie wyższa, niż 100

* PCB + PCT – polichlorowe bi- i trifenyle

** Cd+Th+Hg – kadm + tor + rtęć

Konkretne rozwiązania w cementowniach są różne, jednakże ogólnie sposób przygotowania paliwa polega na tych samych operacjach technologicznych: suszeniu i mieleniu. W związku z tym nie ma konkretnych wymagań w stosunku do uziarnienia paliwa, również paliwa alternatywnego. Założono, że wielkość ziaren paliwa alternatywnego powinna być porównywalna z wielkością ziaren standardowo stosowanego mialu węglowego. Cząstki takie można uzyskać metodą granulowania.

Ze względu na alternatywny charakter paliwa mającego powstać w wyniku opracowanej technologii, przyjęto założenie, że jego wartość opałowa nie musi spełniać podawanych w literaturze przedmiotu wymagań. Paliwem u użytkownika będzie mieszanka standardowo wykorzystywanego mialu węglowego i granulatu w proporcjach zapewniających uzyskanie paliwa o wymaganych walorach energetycznych.

Testy technologiczne otrzymywania paliw

Badania nad opracowaniem technologii otrzymywania paliw alternatywnych z ubocznych produktów przemysłu węglowego podzielono na dwa etapy:

Etap I: próby wstępne, zmierzające do określenia składników mieszanki do granulowania oraz sposobu ich przygotowania do procesu,

Etap II: prace optymalizacyjne w celu ustalenia receptury i procedury wytwarzania paliwa.

Surowce palne i ich właściwości

Jako składniki palne paliwa w badaniach wykorzystano osad ze ścieków komunalnych oraz mial węglowy i flotokonzentrat węglowy, których rolą było wzbogacenie walorów energetycznych produktu. Wybrane właściwości wymienionych surowców przedstawiono w tablicach 2 i 3.

Osad ściekowy charakteryzował się uwodnieniem na poziomie ok. 80%. Stosunkowo niska zawartość popiołu (37,42%), jak również nieprzyjemny zapach i występowanie organizmów żywych świadczyły o jego niepełnym przefermentowaniu. Fakt ten miał wpływ na wartość opałową surowca ($Q_i^a = 11\,564$ kJ/kg), ale przede wszystkim musiał być uwzględniony w procedurze wytwarzania paliwa, zapewniającej bezpieczeństwo jego producentom i użytkownikom.

Zawartość chloru na poziomie 0,0899% nie przekraczała dopuszczalnej zawartości tego pierwiastka w paliwach alternatywnych. Całkowita zawartość oznaczonych metali ciężkich w osadzie, wynosząca 4380,3 ppm suchej masy była wyższa od dopuszczalnej ich zawartości w paliwach alternatywnych. Jednakże przy wytwarzaniu paliwa alternatywnego z udziałem również surowców o niższej zawartości metali, możliwe jest spełnienie wymagania dotyczącego ich maksymalnej ilości.

Chemiczny skład popiołu z badanego osadu ściekowego wskazuje, że zawierał on komponenty wchodzące w skład klinkieru portlandzkiego i nie powinien w zasadniczy sposób wpływać na jakość klinkieru produkowanego z udziałem wytworzonego na jego bazie paliwa.

Spoiva i dodatki modyfikujące

Granulowanie materiałów drobnodziarnistych, które nie wykazują właściwości samowiązujących, wymaga dodatku spoiw, zapewniających uzyskanie produktu o odpowiednich właściwościach mechanicznych: w przypadku paliw – wytrzymałości mechanicznej i wodoodporno-

Właściwości fizykochemiczne i zawartość metali ciężkich w składnikach palnych paliwa
Physicochemical properties and heavy metals content in combustible components of the fuel

Oznaczenie	Jednostka miary	Osad ściekowy	Miał węglowy	Flotokonzentrat węglowy
Analiza techniczna zawartości:				
– wody całkowitej W_t^r	% wag.	79,18	3,50	18,7
– wody analitycznej W^a	% wag.	3,62	0,84	0,9
– popiołu A^a	% wag.	37,42	3,54	11,3
– części lotnych V^a	% wag.	48,44	32,15	29,48
Zawartość siarki				
– całkowitej S_t^a	% wag	0,97	0,32	0,56
– palnej S_c^a		0,19	0,21	0,16
Zawartość chloru Cl^a				
	% wag.	0,089	0,119	0,53
Zawartość metali ciężkich:				
– Cynk, Zn		3 164	32,79	57
– Miedź, Cu		234,5	22,30	31,2
– Ołów, Pb	ppm	277,2	12,33	70,3
– Nikiel, Ni	s. masy	39,6	12,95	12,7
– Kadm, Cd		13,9	0,66	1,0
– Chrom, Cr		118,0	5,11	4,9
– Mangan, Mn		533,1	n.o.	n.o.
Wartość opałowa Q_t^a				
	kJ/kg	11 564	34 076	29 316
Ciepło spalania Q_s^a				
	kJ/kg	12 704	34 311	30 374

ści. Na bazie wcześniejszych doświadczeń związanych z doborem spoiw do wytwarzania paliw formowanych i kompaktowania osadów ściekowych [12, 13] do prób technologicznych wytypowano następujące spoiwa i materiały wiążące: wapno hydratyzowane, cement portlandzki, cement glinowy, karboksymetylocelulozę (KMC) i popiół lotny z węgla kamiennego.

Dodatkowym czynnikiem, decydującym o wytypowaniu tego rodzaju surowców, była możliwość usunięcia wody zawartej w osadzie ściekowym w wyniku ich hydratacji w procesie wiązania, w tym również uwodnienia karboksymetylocelulozy, która w procesie suszenia stopniowo oddaje związaną wcześniej wodę.

Wymienione spoiwa i ich komponenty mogą również spełniać rolę dodatku modyfikującego jako:

- akceptora siarki uwalnianej w procesie spalania organicznego składnika paliwa (spoiwa mineralne i popiół lotny),
- czynnika błonotwórczego na powierzchni wytworzonych produktów, poprawiającego wytrzymałość mechaniczną i wodoodporność (karboksymetyloceluloza).

Ze względu na wspomniane niepełne przefermentowanie i stabilizację osadu ściekowego, przewidziano również konieczność zastosowania fungicydu jako dodatku modyfikującego, niszczącego grzyby pasożytujące na roślinach, nasionach lub w glebie.

Testy wstępne i prace optymalizacyjne

Próby wstępne polegały na wytwarzaniu partii granulatów oraz ocenie i porównaniu ich wytrzymałości mechanicznej i wodoodporności. W próbach tych stosowano osad ściekowy o zróżnicowanej wilgotności całkowitej, miał węglowy o uziarnieniu poniżej 5 mm i zawartości wilgoci całkowitej 3,5%, flotokonzentrat węglowy o zmiennej zawartości wilgoci całkowitej, a także wymienione wyżej spoiwa i składniki wiążące. Z wymienionych surowców sporządzano mie-

Skład chemiczny popiołów z palnych składników paliwa, % wag.
Chemical composition of ashes from combustible components of the fuel, weight %

Składnik popiołu	Osad ściekowy	Miał węglowy	Flotokonzentrat węglowy
SiO_2	36,53	28,67	44,41
Al_2O_3	9,62	20,20	23,76
Fe_2O_3	14,86	14,37	7,18
CaO	10,98	12,16	6,52
MgO	2,44	4,46	2,46
P_2O_5	18,55	0,48	0,99
SO_3	1,26	15,06	n.o.
Mn_3O_4	0,12	0,22	0,10
TiO_2	0,22	0,63	1,36
Na_2O	0,89	2,83	4,96
K_2O	3,51	0,88	2,45

szanki, które następnie granulowano na aparacie talerzowym, a uzyskane produkty sezonowano w czasie 7 dni. Testy wstępne pozwoliły na poczynienie następujących obserwacji, istotnych z punktu widzenia opracowywanej technologii:

- granulaty otrzymane z samych surowców podstawowych, bez udziału spoiw, wykazywały różną wytrzymałość mechaniczną zależną od ich składu, charakteryzował je jednak całkowity brak wodoodporności;
- długie mieszanie i homogenizacja osadu ściekowego wywołuje zjawisko tiksotropii, charakterystyczne dla substancji o charakterze żelu. Powoduje to nadmierną płynność mieszanki do granulowania i dozowanie jej jak materiału sypkiego i tworzenie granulatu o wymaganych wymiarach nie jest możliwe;
- najkorzystniejszymi właściwościami technologicznymi charaktery-

Tablica 4

Składniki mieszanek wytypowanych do optymalizacyjnych prób technologicznych
Components of mixtures chosen for optimization technological tests

	Mieszanka 1	Mieszanka 2	Mieszanka 3	Mieszanka 4
Składniki	Miał węglowy	Miał węglowy	Miał węglowy	Miał węglowy
	Flotokonzentrat węglowy	Flotokonzentrat węglowy	Flotokonzentrat węglowy	Flotokonzentrat węglowy
	Osad ściekowy	Osad ściekowy	Osad ściekowy	Osad ściekowy
	Wapno hydr.	Wapno hydr.	Wapno hydr.	Wapno hydr.
		KMC	Popiół lotny	Popiół lotny

zowały się mieszanki do granulowania, których wilgotność oscylowała wokół wartości 26%; mieszanki te nie stwarzały problemów na etapie homogenizacji, dozowania ani granulacji (umożliwiły uzyskanie granulatów o żądanym uziarnieniu w wyniku zmiany parametrów pracy granulatora);

– próbki granulatów zawierające więcej niż 30% suchej masy osadu ściekowego w masie surowców podstawowych (palnych) i mniej niż 10% spoiwa mineralnego (wapna, mieszanki wapienno-popiołowej) w odniesieniu do ilości surowców podstawowych charakteryzowały się przykrym zapachem, po kilku dniach pokrywały się pleśnią, a procesom gnilnym ulegały już podczas oznaczania nasiąkliwości wodnej;

– odwadniając w warunkach naturalnych pod zadaszeniem osad przeznaczony do badań zaobserwowano, że poziom wilgotności osiąga po kilku dniach plateau na poziomie ok. 65%; obserwacje odnoszą się do okresu jesiennego o niewielkiej ilości opadów.

Najkorzystniejsze właściwości technologiczne mieszanek i parametry wytrzymałościowe granulatów uzyskano z kompozycji składników przedstawionych w tablicy 4. Receptury te stanowiły podstawę dalszych prac optymalizacyjnych.

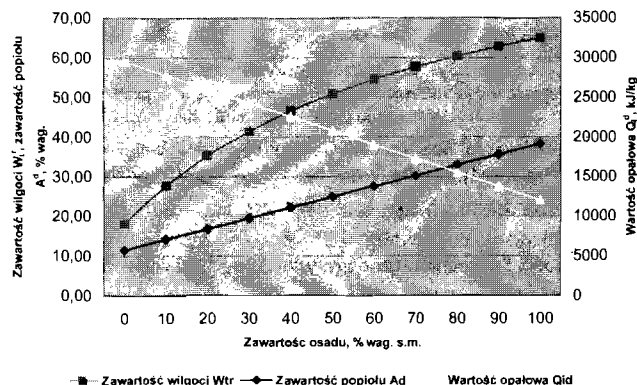
Celem prac optymalizacyjnych było ustalenie finalnej receptury i procedury otrzymywania paliwa alternatywnego. Założeniem optymalizacji było:

- zminimalizowanie kosztu wytwarzania paliwa alternatywnego,
- uzyskanie mieszanki do granulowania o odpowiednich walorach technologicznych umożliwiających przeprowadzenie procesu granulacji bez komplikowania technologii,
- uzyskanie produktu o jak najwyższej wartości opałowej,
- uzyskanie produktu z mieszanki o jak najwyższym udziale osadów ściekowych.

Biorąc pod uwagę minimalizację kosztu, w pierwszym etapie zrezygnowano z receptur mieszanek 1÷3 (tab. 4), w których surowcem był miał węglowy. Cena tego surowca oraz konieczność jego wstępnego przygotowania (mielenie poniżej 5 mm), byłyby przyczyną znacznego wzrostu kosztów wytwarzania paliwa alternatywnego według tych receptur.

Wykonano szereg obliczeń optymalizacyjnych, w których przyjęto następujące założenia:

- zawartość wilgotności w osadzie ściekowym wynosi 85 lub 65%,
- średnia zawartość wilgotności w flotokonzentracie węglowym wynosi 18%,
- pozostałe właściwości osadu ściekowego i flotokonzentratu są takie jak właściwości surowców dostarczonych do badań,
- osiągnięcie założonej wilgotności końcowej mieszanki do granulowania (26%) odbywa się jedynie na drodze dodawania składników o niższej zawartości wilgotności.



Rys. 1. Obliczenia optymalizacyjne. Właściwości mieszanek osad ściekowy – flotokonzentrat.

$$W_{tr} \text{ osadu ściekowego} = 65\%$$

Fig. 1. Calculation for optimization. Properties of blends: sewage sludge – flotoconcentrate.

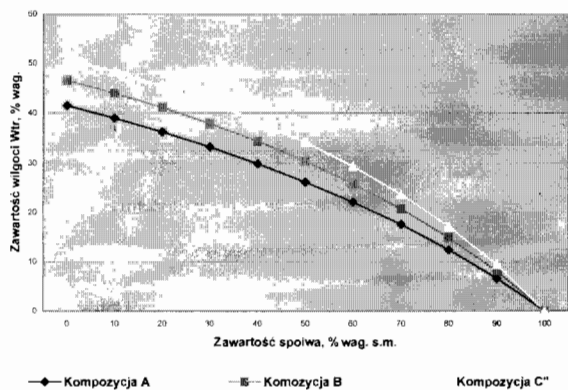
$$W_{tr} \text{ (water content) of sewage sludge} = 65\%$$

Zakładając, że granulowany będzie sam osad ściekowy bez dodatku surowca węglowego stwierdzono, że aby uzyskać mieszankę osadowo-spoiwową o wilgotności 26%, maksymalny udział suchej masy osadu ściekowego nie powinien przekroczyć kilku lub kilkunastu procent, zależnie od wyjściowej wilgotności osadu. Zawartość popiołu w takiej mieszance kształtowałaby się na poziomie powyżej 80%, a co za tym idzie jej wartość opałowa byłaby bardzo niska, poniżej 2000 kJ/kg. Uzyskane wyniki pozwoliły wyeliminować wariant, w którym jedynym składnikiem palnym paliwa byłby osad ściekowy.

Biorąc pod uwagę trudności z homogenizacją suszonych osadów ściekowych (tworzą twarde, trudne do rozdrobnienia w procesie mieszania bryły) zdecydowano, że korzystnym poziomem wilgotności dla osadów ściekowych – składników mieszanek do granulacji – jest poziom 65%, możliwy do osiągnięcia w warunkach naturalnych pod zadaszeniem w ciągu kilku dni.

Kolejnym przybliżeniem do optymalnej receptury paliwa alternatywnego było określenie zawartości osadu ściekowego w mieszance z flotokonzentratem węglowym. Na rysunku 1 przedstawiono zależność zawartości wilgotności i wartości opałowej mieszanki osad – flotokonzentrat w zależności od zawartości osadu ściekowego.

Biorąc pod uwagę obserwacje poczynione w czasie wstępnych prób technologicznych, dotyczące zjawiska tiksotropii w osadach ściekowych, zawężono obszar dalszych poszukiwań optymalnej receptury do przedziału 30%–60% zawartości suchej masy osadu ściekowego w mieszance (poniżej tej zawartości udział osadu w mieszance jest zbyt mały, ekonomicznie nieopłacalny a powyżej gwałtownie daje o sobie znać wspomniane zjawisko tiksotropii). W wyznaczonym obszarze dalszej pracy zawartość popiołu (A^d) mieszanek osad – flotokon-



Rys. 2. Obliczenia optymalizacyjne.

Zawartość wilgoci w mieszankach flotokonzentrat – osad – spoiwo.
 W_t osadu ściekowego = 65%

Fig. 2. Calculation for optimization. Content of water in blends sewage sludge – flocculate. W_t (water content) of sewage sludge = 65%

Tablica 5

Właściwości fizykochemiczne granulowanego paliwa alternatywnego

Physicochemical properties of granulated alternative fuel

Oznaczenie	Jednostka miary	Wartość
Analiza techniczna, zawartości:		
– wody całkowitej W_t^a	% wag.	11,10
– wody analitycznej W^a	% wag.	1,2
– popiołu A^a	% wag.	57,6
– części lotnych V^a	% wag.	24,07
Zawartość siarki		
– całkowitej S_t^a	% wag.	0,91
– palnej S_c^a	% wag.	0,01
Zawartość chloru Cl^a	% wag.	0,27
Wartość opałowa Q_i^a	kJ/kg	9 908
Ciepło spalania Q_s^a	kJ/kg	10 383

Tablica 6

Właściwości mechaniczne granulowanego paliwa alternatywnego

Mechanical properties of granulated alternative fuel

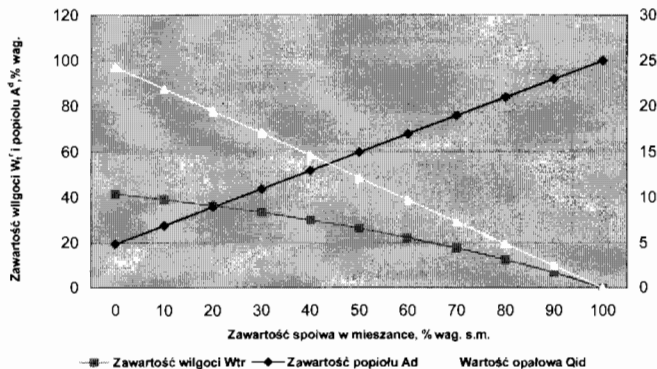
Oznaczenie	Jednostka miary	Wartość
Wytrzymałość mechaniczna na ściskanie*	kG/cm ²	2,66
Wytrzymałość mechaniczna na ścieranie metodą bębnową**	%	98
W_{100}		91,8
W_{500}		
Nasiąkliwość wodna, N^{***}	%	20,1
Wodoodporność, W_o^{***}	%	48

* wg zaadaptowanej normy PN-93/G-11010

** wg zaadaptowanej normy PN-G-04650

*** wg zaadaptowanej normy PN-G-04652

trat wynosi 19,47 ÷ 24,85%, wartość opałowa (Q_i^a) 24306 ÷ 20790 kJ/kg, natomiast zawartość wilgoci (W_t^a) 41,55 ÷ 50,94%. Wilgotność tych mieszanek przekracza wartość 26%, ustaloną jako korzystną, umożliwiającą osiągnięcie odpowiednich walorów technologicznych. Osiągnięcie tej wartości powinno być efektem, zgodnie z założeniami, dodania spoiwa mineralnego.



Rys. 3. Obliczenia optymalizacyjne. Spodziewane właściwości paliwa na bazie mieszanki flotokonzentrat – osad (70:30) w zależności od ilości dodanego spoiwa

Fig. 3. Calculation for optimization. Expected properties of fuel on base of mixture flocculate – sewage sludge (70 : 30) in dependence of binder amount

Dobre walory wytrzymałościowe granulatów w testach wstępnych uzyskano stosując spoiwo składające się z wapna hydratyzowanego i popiołu lotnego. Do dalszych obliczeń przyjęto taki skład spoiwa. Dla trzech kompozycji flotokonzentrat – osad (A, B i C), w których zawartość suchej masy osadu ściekowego wynosiła odpowiednio 30, 40 i 50% wag., wyznaczono zawartość wilgoci po dodaniu w/w spoiwa (rys. 2).

Aby osiągnąć zawartość wilgoci na poziomie ok. 26%, należy sporządzić mieszankę, w której do 1 cz. wag. kompozycji A, B lub C należy dodać, odpowiednio: 1; 1,5 lub 1,9 cz. wag. spoiwa. W opcji z kompozycją A ilość koniecznego dodanego spoiwa jest najniższa, co gwarantuje tym samym najniższą dla trzech analizowanych receptur zawartość popiołu i najwyższą wartość opałową w produkcji. Spodziewane właściwości paliwa wytworzonego na bazie tej kompozycji w zależności od ilości dodanego spoiwa przedstawiono na rysunku 3.

Na podstawie opracowanej receptury wytworzono informacyjną partię paliwa alternatywnego, którą po okresie 7 dni sezonowania poddano ocenie obejmującej podstawowe właściwości fizykochemiczne (tab. 5) i wytrzymałościowe (tab. 6).

Granulat charakteryzuje się wysoką zawartością popiołu ($A^a = 57,6\%$), co w znaczący sposób wpływa na jego wartość opałową ($Q_i^a = 9908$ kJ/kg). Maksymalny możliwy stopień substytucji mialu węglowego o wartości opałowej równej 30 000 kJ/kg wytworzonym granulem wynosi ok. 20%.

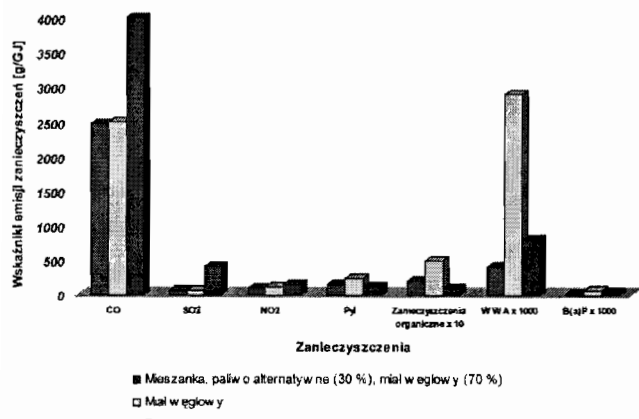
Oszacowana na podstawie zawartości metali ciężkich w surowcach podstawowych sumaryczna zawartość metali ciężkich w paliwie wynosi 830,78 ppm, co przy wymaganiu mówiącym o zawartości poniżej 2500 ppm stwarza jeszcze margines bezpieczeństwa na uwzględnienie ilości metali nieoznaczonych w przeprowadzonych badaniach oraz wzrost ich zawartości wynikający ze zmiany pochodzenia surowców.

Oceniane paliwo charakteryzuje się wysoką wytrzymałością mechaniczną na ściskanie oraz ścieranie metodą bębnową. Parametry te, jak również parametr nasiąkliwości wodnej i wodoodporności, gwarantują możliwość realizacji operacji technologicznych, transportu i składowania bez znaczących strat. Wytworzony granulat jest produktem o lekkim zapachu kompostu, nieulegającym procesom gnilnym lub pleśnieniu. Zastosowana ilość i charakter spoiwa stanowiły

Tablica 7

Wyniki badań energetyczno-emisyjnych spalania paliwa alternatywnego i mialu węglowego
Results of energetic and emission tests of alternative fuel and fine coal

Wyszczególnienie/Wielkości cieplne	Symbol	Jednostka miary	Mieszanka	Miał węglowy
Moc cieplna	Q_k	kW	3,3	4,3
Strumień masy paliwa	B_p	kg/h	1,1	0,8
Współczynnik nadmiaru powietrza	λ	-	6,2	4,1
Strata kominowa	S_k	%	50,3	38,4
Strata niecałkowitego spalania	S_p	%	2,4	0,7
Strata niezpełnego spalania	S_{CO}	%	2,6	2,7
Sprawność cieplna	η_k	%	44,6	58,3



Rys. 4. Wskaźniki emisji zanieczyszczeń uzyskane w testach spalania paliw
Fig. 4 The coefficients of pollutions emission obtained in combustion tests of fuels

jednocześnie czynnik higienizujący, co wyeliminowało konieczność stosowania dodatków modyfikujących – fungicydów.

Właściwości energetyczno-emisyjne paliwa alternatywnego

Ocenę energetyczno-emisyjną wytworzonego paliwa alternatywnego przeprowadzono na podstawie testów spalania w piecu CELUS, które były prowadzone zgodnie z procedurami, na stanowisku badawczym akredytowanego Laboratorium Spalania IChPW. Oznaczonych wielkości nie należy porównywać ze standardami emisyjnymi, zamieszczonymi w Rozporządzeniu MŚ [8], które zgodnie z nim nie dotyczą „instalacji doświadczalnych wykorzystywanych do prac badawczo-rozwojowych, prac naukowych [...], przerabiających mniej niż 50 Mg odpadów rocznie”.

Testom poddano mieszankę składającą się z 30% masowych wytworzonego paliwa granulowanego i 70% mialu węglowego o wartości opałowej Q_a równej 34076 kJ/kg oraz – porównawczo – sam mial węglowy.

W czasie prób prowadzony był ciągły monitoring podstawowych zanieczyszczeń gazowych, a także pobór spalin w celu wyznaczenia stężenia pyłu oraz zanieczyszczeń organicznych. Wyznaczono efektywność spalania metodą pośrednią oraz obliczono wskaźniki emisji podstawowych zanieczyszczeń: CO, SO₂, NO_x

(w przeliczeniu na NO₂), pyłu i zanieczyszczeń organicznych, 16 wielopierścieniowych węglowodorów aromatycznych (WWA) wg EPA, w tym benzo(α)pirenu. Wyniki obliczeń z badań energetyczno-emisyjnych, dotyczące wielkości cieplnych przedstawiono w tablicy 7.

Na sprawność cieplną procesu spalania mieszanki z udziałem paliwa alternatywnego wynoszącą 44,6%, wpływ mają przede wszystkim wysoka strata kominowa (50,3%) oraz straty niecałkowitego i niezpełnego spalania, wynoszące odpowiednio 2,4 i 2,6%.

Na rysunku 4 zaprezentowano porównanie uzyskanych w testach spalania wskaźników emisji analizowanych zanieczyszczeń z wewnętrznymi kryteriami emisyjnymi IChPW dla paliw stałych ustalonych w 1999 r. [14]. Wskaźniki emisji zanieczyszczeń ze spalania mieszanki mialowo-granulatowej są niższe od wskaźników wyznaczonych dla mialu węglowego. Zwraca uwagę fakt, że emisja spowodowana spalaniem mieszanki mialu i granulatu jest niższa od emisji jakiej należałoby się spodziewać, zakładając jej addytywność i uwzględniając udziały składników w mieszance. Zjawisko to spowodowane jest efektem synergetycznym, występującym w trakcie współspalania węgla i substancji o charakterze biomasy w złożu stacjonarnym [5, 15].

Miał węglowy, spalany w standardowym urządzeniu i przy zachowaniu warunków prowadzenia testu, nie spełnia cytowanych kryteriów w zakresie emisji pyłu i wielopierścieniowych węglowodorów aromatycznych, w tym benzo(α)pirenu, przekraczając je odpowiednio o 97, 260 i 20%. W przypadku paliwa zawierającego w swoim składzie granulowane paliwo uzupełniające, tylko wskaźnik emisji pyłu przekracza wartość kryterium o ok. 20%.

Podsumowanie

Wytwarzanie paliw alternatywnych z odpadów stanowi szansę poprawy wskaźnika ich gospodarczego wykorzystania, a tym samym obniżenia kosztów produkcji energii oraz racjonalnego i oszczędnego gospodarowania paliwami nieodnawialnymi. Warunkiem koniecznym jest jednak spełnienie wymagań związanych zarówno z formalnymi, jak i technicznymi uwarunkowaniami ich wytwarzania i stosowania, które zdefiniowane są w odpowiednich ustawach i przepisach wykonawczych.

Ze względu na różnorodność odpadów, które – formalnie biorąc – mogą być wykorzystane do produkcji paliw alternatywnych, konieczne jest przygotowanie ich do postaci umożliwiającej ich transport i magazynowanie, a przede wszystkim sprawną aplikację oraz

bezwaryjną i stabilną pracę urządzenia grzewczego. Metody przygotowania paliw z odpadów to: rozdrabnianie, mieszanie i wszelkie sposoby aglomeracji, w tym granulowanie.

Granulowanie, podczas którego następuje nadawanie surowcom odpowiedniej formy fizycznej dzięki możliwości stosowania różnego rodzaju dodatków i modyfikatorów, pozwala na uzyskanie produktów o założonych właściwościach fizykochemicznych i mechanicznych, w tym: określonej wielkości, stabilności mechanicznej i biologicznej, znanego i stabilnego w czasie składu chemicznego.

Projektowanie granulowanego paliwa alternatywnego, to przede wszystkim wyznaczenie sobie jasno sprecyzowanej funkcji celu, do którego dążymy, a ten z kolei determinowany jest docelowym urządzeniem grzewczym dla projektowanego paliwa (warunkującym pożądane właściwości produktu), dostępnością i wielkością podaży potencjalnych surowców, w tym odpadów oraz możliwościami technicznymi.

Przedstawiony tok prac badawczych i technologicznych w skali doświadczalnej wykazał możliwość otrzymywania stabilnego mechanicznie i biologicznie, odpornego na działanie warunków atmosferycznych paliwa alternatywnego z osadów ściekowych i drobnej frakcji węglowej. Rolę czynnika stabilizującego spełnia w nim mieszanina spoiw mineralnych w postaci wapna hydratyzowanego i popiołu lotnego z węgla kamiennego.

Spalanie odpadów w profesjonalnych instalacjach ich termicznej utylizacji prowadzi się w piecach obrotowych o długości ok. 10 m, w temperaturze 980–1150°C [16]. Zakres ten uważa się za optymalny, pozwalający na sprawne niszczenie związków organicznych. Przeciętny czas przebywania gazów w piecu wynosi ok. 2 sek. Wytwarzanie cementu w piecach obrotowych wymaga temperatur surowców na poziomie 1425–1485°C. Proces charakteryzuje się naturalną zasadowością, środowiskiem utleniającym oraz długimi czasami przebywania gazów w piecu [10, 11]. Wymienione czynniki są powodem, dla którego piece cementowe traktowane są jako urządzenia do bezpiecznej eliminacji odpadów. Uzyskane w przeprowadzonych testach energetyczno-emisyjnych wyniki wskazują, że (pomimo niezapewnienia w stosowanym urządzeniu grzewczym warunków uważanych za idealne dla utylizacji odpadów) spalanie wytworzonego w trakcie prac eksperymentalnych paliwa granulowanego w mieszance z miałem węglowym wywołuje emisję zanieczyszczeń niższą od emisji wynikającej ze spalania samego mialu węglowego. Należy domniemywać, że spalanie takiej samej mieszanki w piecu cementowym spowoduje obniżenie emisji związków szkodliwych, szczególnie w zakresie zanieczyszczeń organicznych i wielopierścieniowych węglowodorów aromatycznych.

Literatura

1. Ustawa z dnia 27 kwietnia 2001 r. O odpadach, Dz.U. nr 62, poz. 628.
2. Rozporządzeniem Ministra Środowiska z dnia 27 września 2001 w sprawie katalogu odpadów, Dz.U. nr 112, poz. 1206.
3. Wasielewski R., Sobolewski A.: *Gospodarka Paliwami i Energią*, 1999, 9, s. 22-25.
4. Wasielewski R., Sobolewski A.: *Środowisko i Rozwój*, 2003, 8, s. 119-128.
5. Kubica K., Robak J.: *Formowane paliwa stałe z udziałem osadów ze ścieków komunalnych – otrzymywanie i własności*. Paliwa z odpadów t. III, pr. zbiorowa, Wydawnictwo HELION, Gliwice, 2001, s. 125-135.
6. Ustawa z dnia 27 kwietnia 2001 roku Prawo ochrony środowiska, Dz.U. nr 62, poz. 627.
7. Rozporządzenie Ministra Gospodarki z dnia 21 marca 2002 w sprawie wymagań dotyczących prowadzenia procesu termicznego przekształcania odpadów, Dz.U. nr 37, poz. 339.
8. Rozporządzenie Ministra Środowiska z dnia 20 grudnia 2005 roku w sprawie standardów emisyjnych z instalacji, Dz.U. nr 260, poz. 2181.
9. Rozporządzenie Ministra Środowiska z dnia 23 grudnia 2004 roku z późn. zm. W sprawie wymagań w zakresie prowadzenia pomiarów emisji, Dz.U. nr 110, poz. 1057.
10. Duda J.: *Piec cementowy jako agregat do współspalania paliw alternatywnych*. Materiały z Konferencji nt „Spalanie paliw alternatywnych w energetyce i przemyśle cementowym”, Opole, luty 2003, s. 137-147.
11. Mokrzycki E., Uliasz-Bocheńczyk A.: *Paliwa alternatywne z odpadów dla cementowni – ograniczenia w stosowaniu*. Materiały z Konferencji nt „Zagadnienia surowców energetycznych w gospodarce krajowej”, Zakopane, październik 2001.
12. Kubica K., Robak J.: *Formowane paliwa stałe z udziałem osadów ze ścieków komunalnych – otrzymywanie i właściwości*. Materiały z Konferencji „Paliwa z odpadów 2001”, Wista, październik 2001.
13. Kubica K., Robak J.: *Opracowanie koncepcji przygotowania paliwa do kotła OR32 z mialu węglowego i osadów ściekowych Rafinerii Czechowice SA oraz wykonanie próbnej partii 2 ton tegoż paliwa*. Dokumentacja IChPW, 2002.
14. Kubica K.: *Kryteria efektywności energetyczno-ekologicznej kotłów małej mocy i paliw stałych dla gospodarki komunalnej*. Certyfikacja na „znak bezpieczeństwa ekologicznego”. Opracowanie IChPW, 1999.
15. Hławiczka S., Kubica K., Zielonka U., Wilkosz K.: *Właściwości emisji pyłu i metali ciężkich w procesie spalania węgla w paleniskach domowych*. *Archiwum Ochrony Środowiska*, 2001, 27, s. 29-45.
16. Benoît M. R.: *Wykorzystanie odpadów jako paliwa w piecach cementowych*. Materiały z Sympozjum „Termiczna utylizacja odpadów”, Międzyzdroje, maj 1996.

Dr inż. *Jolanta ROBAK* jest absolwentką Wydziału Inżynierjno-Ekonomicznego Akademii Ekonomicznej we Wrocławiu, specjalność: inżynieria i ekonomia przemysłu chemicznego.

Od 1986 r. jest pracownikiem Instytutu Chemicznej Przeróbki Węgla w Zabrze. Aktualnie jest adiunktem w Centrum Innowacji Technologicznych IChPW, z-cą Kierownika akredytowanego Laboratorium Spalania. Prace doktorską pisała z dziedziny ekstrakcji nadkrytycznej zrealizowana w Wojskowej Akademii Technicznej w Warszawie.

Główne obszary kompetencji: technologia chemiczna, procesy kompaktowania, ekonomia przemysłu, ekstrakcja nadkrytyczna.

W dorobku naukowym ma szereg prac badawczych, ponad 20 publikacji krajowych i zagranicznych, 25 prac prezentowanych na konferencjach naukowych oraz patenty i zgłoszenia patentowe.

Dr inż. *Katarzyna MATUSZEK* jest absolwentką Wydziału Inżynierii Środowiska i Energetyki Politechniki Śląskiej w Gliwicach, kierunek: mechanika i budowa maszyn, specjalność energetyka cieplna i eksploatacja samochodów.

Od 2001 r. jest pracownikiem Instytutu Chemicznej Przeróbki Węgla w Zabrze. Aktualnie jest adiunktem w Centrum Innowacji Technologicznych IChPW, kierownik akredytowanego Laboratorium Spalania. Praca doktorska „Badania eksperymentalno - teoretyczne procesu zgazowania w warstwie nieruchomej” zrealizowana na Politechnice Śląskiej w Gliwicach.

Główne obszary kompetencji: procesy spalania i zgazowania, badania energetyczno-emisyjne urządzeń grzewczych.

W dorobku naukowym szereg prac badawczych, około 20 publikacji krajowych, kilka prac prezentowanych na konferencjach naukowych.