

**Energetyczne i materiałowe wykorzystanie odpadów –
wybrane technologie opracowane we współpracy
Wydziału Energetyki i Paliw oraz Wydziału Górnictwa i
Geoinżynierii Akademii Górniczo-Hutniczej w Krakowie**

**Energy and materials utilization of wastes - selected
technologies developed in cooperation between the
Faculty of Energy and Fuels and Faculty of Mining and
Geoengineering, AGH University of Science and
Technology in Kraków**

Stanisław Budzyń^{1*}, Barbara Tora²

¹Katedra Technologii Paliw, Wydział Energetyki i Paliw; *budzyn@agh.edu.pl

²Katedra Inżynierii Środowiska i Przeróbki Surowców, Wydział Górnictwa i
Geoinżynierii

Słowa kluczowe: energetyczne wykorzystanie odpadów, stałe paliwa wtórne,
paliwa alterantywnne

Key words: energy waste utilization, solid recovery fuels, alternative fuels

Streszczenie

Przedstawiono wybrane technologie energetycznego i materiałowego wykorzystania odpadów, opracowane we współpracy Wydziału Energetyki i Paliw oraz Wydziału Górnictwa i Geoinżynierii Akademii Górniczo-Hutniczej w Krakowie. Wybrane technologie są rezultatem badań wykonywanych w ramach prac statutowych jak również we współpracy z przemysłem. Przedstawiono, między innymi, rezultaty prac związanych z produkcją i energetycznym wykorzystaniem paliw alternatywnych, w których użyto takie odpady jak osady ściekowe, mączkę zwierzęcą, segregowane odpady komunalne, odpady węglonośne i stałe pozostałości z pirolizy odpadów organicznych oraz prac nad materiałowym wykorzystaniem niektórych odpadów.

Abstract

Presented are selected technologies of waste utilization elaborated towards energy and materials applications that were developed in cooperation between the Faculty of Energy and Fuels and Faculty of Mining and Geoengineering of AGH University of Science and Technology in Kraków. The technologies are the offspring of both the statutory research and collaborative efforts with industrial partners. Specifically, presented are results of the studies on the production and utilization of alternative fuels from such waste resources as sewage sludge, animal meals, segregated municipal waste, carbonaceous waste, solid residues from pyrolysis of organic wastes as well as studies on materials utilization of some wastes.

Wstęp.

Stosowanie w praktyce zasad racjonalnej gospodarki odpadami wymaga nie tylko rozwoju technologii minimalizujących ilość powstających odpadów, ale także nowoczesnych rozwiązań technologicznych, które pozwalają na ich skuteczne unieszkodliwianie i wykorzystanie gospodarcze. Jedną z metod utylizacji odpadów palnych jest wytwarzanie z nich paliw alternatywnych. Zastosowanie tej metody uwarunkowane jest właściwościami fizykochemicznymi odpadów oraz obowiązującymi przepisami prawnymi.

Na jakość wyprodukowanego paliwa wpływa odpowiedni dobór:

- możliwych do wykorzystania, w świetle przepisów prawnych dotyczących ochrony środowiska i gospodarki odpadami, składników palnych, od których zależy wartość opałowa paliwa,
- metody aglomeracji składników paliwa np. sposobu odwadniania, suszenia, rozdrabniania i homogenizacji, uzależnionej od wymagań stawianych formie wytwarzanego paliwa oraz właściwości składników,
- spoiwa nie wywierającego negatywnego wpływu na właściwości energetyczne i ekologiczne produktu,
- metody końcowej obróbki paliwa, np. sezonowanie w warunkach naturalnych czy kondycjonowanie w podwyższonej temperaturze.

Znaczną grupę odpadów stanowią odpady komunalne, które w przeciwieństwie do odpadów przemysłowych charakteryzują się niejednorodnością właściwości, wynikającą ze zróżnicowania składu. Na obecnym etapie wymagań ekologicznych

i rozwoju technologicznego, najbardziej racjonalnymi kierunkami energetycznego zagospodarowania odpadów komunalnych są:

- selekcja odpadów komunalnych i wydzielanie frakcji energetycznej (paliwo alternatywne), zaliczanej do źródeł produkcji energii „zielonej”,
- wykorzystanie frakcji energetycznych jako paliwa samodzielnego lub paliwa uzupełniającego (paleniska multipaliwowe), albo jako składnika paliw mieszanych,
- wykorzystanie frakcji energetycznych jako paliwa do procesów technologicznych (produkcja klinkieru, ceramiki, hutniczej itp.) i wytwarzania ciepła (przede wszystkim w procesach zgazowania).

Wydzielona frakcja energetyczna poprzez komponowanie z innymi składnikami i dobór odpowiednich metod spalania jest źródłem produkcji paliw alternatywnych i czystej energii cieplnej. W niniejszym rozdziale przedstawiono wybrane technologie głównie energetycznego wykorzystania odpadów, opracowane w Katedrze Technologii Paliw na Wydziale Energetyki i Paliw we współpracy z Wydziałem Górnictwa i Geoinżynierii AGH oraz partnerami przemysłowymi.

Badania właściwości energetycznych pozostałości po segregacji odpadów komunalnych na składowisku w Gorzowie Wielkopolskim.

Celem badań było określenie właściwości energetycznych pozostałości (tzw. balastu) po segregacji odpadów komunalnych na składowisku w Gorzowie Wielkopolskim [8]. Określono skład morfologiczny balastu oraz zbadano własności energetyczne poszczególnych składników pod kątem ich wykorzystania jako składnika paliw alternatywnych.

Dostarczane na składowisko odpady komunalne poddawane są następującym procesom technologicznym:

- rozdział strumienia odpadów komunalnych na odpady organiczne, surowcowe, niebezpieczne i balast,
- kompostowanie biofrakcji w pryzmach napowietrzanych,
- uszlachetnianie kompostu,
- belowanie odpadów balastowych.

Odpady zmieszane, po zważeniu i ewidencji, rozładowywane są bezpośrednio do zasobnika, skąd transportowane są na bieżąco poprzez przenośniki – kanałowy i wznoszący – do trójdzielonego sita bębnowego. Odpady mineralne o uziarnieniu poniżej 20 mm (frakcja drobna) kierowane są na składowisko. Frakcja gruba,

powyżej 80 mm, kierowana jest na linię sortowniczą w celu wydzielenia z niej papieru i surowców wtórnych (metali, szkła, tworzyw sztucznych). Pozostałe odpady są prasowane i belowane. Sortowaniu poddawana jest również frakcja średnia, 20-80 mm, przeznaczona do kompostowania. Wydziela się z niej składniki niepożądane w kompoście, tj. szkło, metale i odpady niebezpieczne.

Oczyszczona biofrakcja oraz papier wydzielony z frakcji grubej są rozdrabniane. Uzyskana masa organiczna jest kompostowana metodą pryzm napowietrznych, pod wiatą, przez okres 4-6 tygodni. Uzyskany kompost uszlachetnia się przez sortowanie w sicie bębnowym, oczyszczanie mechaniczne ze szkła, kamieni i ceramiki na stole wibracyjnym oraz oczyszczanie pneumatyczne celem oddzielenia frakcji lekkich. Oczyszczony kompost składowany jest na placu magazynowym w celu dojrzewania i dystrybucji. Jest on całkowicie bezpieczny pod względem sanitarnym.

Końcowymi produktami segregacji odpadów komunalnych są:

- surowce wtórne,
- uszlachetniony kompost,
- odpady nieorganiczne przeznaczone do składowania.

Celem badań było określenie możliwości wykorzystania odpadów składowanych po sprasowaniu i belowaniu określanych jako balast. Skupiono się głównie na ich wykorzystaniu energetycznym. W tym celu pobrano, w określonych odstępach czasu, dziesięć prób balastu o masie około 50 kg każda. Dla każdej próby określono morfologię przez rozdział na następujące frakcje:

- papier i tektura,
- tekstylia,
- tworzywa miękkie,
- tworzywa twarde,
- reszta.

Przeprowadzono badania właściwości energetycznych poszczególnych frakcji oraz prób pobranych z balastu (tabela 1).

Tabela 1. Właściwości energetyczne frakcji balastu.

Fracja	Zawartość wilgoci W^a [%]	Zawartość części lotnych V^a [%]	Zawartość popiołu A^a [%]	Zawartość siarki S_t^a [%]	Ciepło spalania Q_s^a [kJ/kg]	Wartość opałowa Q_i^a [kJ/kg]
Makulatura	5,5	53,1	20,0	0,27	15 164	13 687
Tkaniny	3,7	74,1	15,9	0,17	20 081	18 325
Tworzywa miękkie	0,4	76,9	21,6	0,08	36 352	33 679
Tworzywa twarde	0,3	89,2	3,6	0,23	34 878	33 515
Reszta > 10mm	5,1	35,4	39,5	0,44	11 552	10 449
Reszta < 10mm	5,9	15,0	70,8	0,33	5 056	4 552

Próbki balastu suszono do stanu powietrzno-suchego, a następnie, po określeniu wilgoci przemijającej, określono jego skład morfologiczny. Około 44 % składu stanowiła frakcja „reszta”, która zawierała takie materiały jak stłuczka szklana, ceramika budowlana czy odpady drewniane. Frakcja ta została rozdzielona dodatkowo na sicie 10 mm ze względu na to, że składniki nieorganiczne występowały głównie w postaci drobnych ziaren, które znacznie obniżają wartość energetyczną balastu jako całości. „Reszta” w badanych próbach stanowiła maksymalnie 52,6 %, a minimalnie 39,9 % całości balastu. Papier i tektura stanowiły 28,8 %. Tworzywa sztuczne rozdzielono na tworzywa miękkie i twarde; ich zawartość średnia w balaście wyniosła odpowiednio 11,3 % oraz 7,9 %. Pozostała część balastu to tekstylia, których zawartość wyniosła 7,8 %.

Wartości energetyczne poszczególnych składników balastu w stanie powietrzno-suchym przedstawiają się następująco (tabela 1): tworzywa sztuczne, które stanowią około 20 % balastu, mają największą wartość energetyczną, wynoszącą około 33 000 kJ/kg. Duża zawartość popiołu w tworzywach miękkich (21,6 %) wynikała z faktu, że były one pokryte drobnym pyłem. Najmniej wartościową pod względem energetycznym jest frakcja „reszta”, przy czym wydzielenie z niej frakcji poniżej 10 mm powoduje ponad dwukrotne podniesienie wartości opałowej w pozostałości. Wynika to z tego, że zawiera ona dwukrotnie mniej substancji nieorganicznej oznaczonej jako popiół. Średnia wartość opałowa

makulatury w stanie powietrzno-suchym wyniosła 13 678 kJ/kg, natomiast tkanin, 18 325 kJ/kg.

Wszystkie składniki balastu charakteryzowały się niską zawartością siarki i dużą zawartością chloru. Najwyższą zawartość siarki posiadała frakcja „reszta” i wyniosła ona 0,44 %, natomiast w pozostałych frakcjach była poniżej 0,3 %. W przypadku chloru, największą jego zawartość posiadały tworzywa twarde, 1,97 % i makulatura, 2,99 %. Wszystkie próbki charakteryzowały się dużą zawartością wilgoci całkowitej, wynoszącej powyżej 30 %, co powodowało znaczne obniżenie wartości opałowej, która w stanie dostarczonym wyniosła maksymalnie 10 010 kJ/kg. W tabeli 2 zamieszczono zawartości składników organicznych we frakcjach balastu.

Tabela 2. Zawartość składników organicznych we frakcjach balastu.

Frakcja	Zawartość węgla C ^a [%]	Zawartość wodoru H ^a [%]	Zawartość chloru Cl ^a [%]	Zawartość fluoru F ^a [%]	Zawartość azotu N ^a [%]
Makulatura	36,43	6,15	2,89	0,00469	0,33
Tkaniny	52,79	7,63	0,43	0,00619	2,00
Tworzywa miękkie	66,26	12,2	0,81	0,00395	0,71
Tworzywa twarde	68,34	6,2	1,97	< 0,0001	0,18
Reszta > 10mm	30,53	4,48	0,49	0,00840	0,97
Reszta < 10mm	16,53	1,65	0,56	0,00287	0,29

Przeprowadzone badania wykazały, że wydzielenie z balastu frakcji o uziarnieniu poniżej 10 mm powoduje zwiększenie jego wartości opałowej o ponad 20 %, a obniżenie zawartości wilgoci do stanu powietrzno-suchego zwiększa wartość opałową do ponad 19 000 kJ/kg.

Badanie właściwości odpadów w aspekcie wykorzystania ich jako składników mieszanek energetycznych.

Realizując współpracę z Jednostką Ratownictwa Technicznego z Tarnowa, opracowano i opatentowano technologię produkcji paliwa alternatywnego na bazie mączki kostnej i osadów ściekowych [10].

Określono właściwości energetyczne sześciu próbek odpadów, które mogą stanowić składniki paliwa alternatywnego. Materiałami poddanymi badaniom były: mączka kostna, osad komunalny, trociny, wydzielone odpady komunalne, zużyty węgiel aktywny oraz składowana sadza techniczna. Prace badawcze nad charakterystyką energetyczną oraz składem chemicznym i mineralogicznym wytypowanych materiałów odpadowych wykazały ich przydatność do komponowania mieszanek paliwowych, szczególnie dla energetyki wielkoprzemysłowej. Podstawą komponowania paliw z materiałów odpadowych powinna być przede wszystkim biomasa w formie osadów ściekowych, mączki kostnej oraz odpadów drzewnych. Produkcja paliw alternatywnych na bazie osadów ściekowych jest rozwiązaniem konkurencyjnym w stosunku do współspalania osadów przede wszystkim z uwagi na to, że:

- paliwo nie wnosi do procesu spalania tak dużej ilości wody jak osady,
- paliwo jest substancją bezwoną, ma konsystencję stałą,
- paliwo ma wartość opałową podobną do węgla brunatnego, dlatego też w bilansie ekonomicznym utylizacji może generować dodatkowy zysk,
- jest paliwem biomasowym, co w przypadku spalania w elektrowniach pozwala zaliczyć je do odnawialnych źródeł energii.

Należy zwrócić uwagę, że w związku z addytywnością cech poszczególnych parametrów uzyskanie odpowiednich, wymaganych wielkości i stabilności konkretnych składników nie powinno nastroczać trudności, szczególnie przy homogeniczności poszczególnych składników. Najlepszą formą wytwarzanych paliw z badanych materiałów odpadowych jest granulata.

Opracowana i opatentowana technologia obejmuje wykorzystania mączki zwierzęcej i osadów ściekowych jako paliwa w energetyce. Mączka zwierzęca charakteryzuje się małą zawartością wilgoci do 4 % i wartością opałową od 15 do 20 MJ/kg. Natomiast osady ściekowe surowe zawierają około 90 % wilgoci i mają wartość opałową 7-9 MJ/kg. Osady fermentowane i podsuszane zawierają od 10 do 70 % wilgoci oraz mają wartość opałową do 13 MJ/kg. Wymieszanie mączki zwierzęcej i osadów ściekowych w proporcjach zależnych od wilgotności osadów

daje w rezultacie paliwo o parametrach zbliżonych zawartością wilgoci i wartością opałową do takich, jakie posiadają muły węglowe, stosowane w energetyce. Cechą składników mieszanki jest ich stałe uziarnienie, co pozwala na łatwe ich mieszanie np. w mieszalnikach zetowych. Zarówno osady ściekowe jak i mączka zwierzęca są w pewnych przypadkach traktowane jako paliwa biomasowe. Zatem istnieje możliwość rozliczania uzyskanej energii ze spalania tego paliwa jako paliwa z energii odnawialnej, a zwłaszcza zerowego bilansu CO₂, co daje wymierne korzyści ekologiczne i ekonomiczne.

Mączka kostna posiada wyższą wartość opałową od osadów ściekowych, stąd odpowiedni dobór proporcji pozwala na uzyskanie paliwa o wartości opałowej akceptowanej przez użytkowników. Uzyskane paliwo będzie się charakteryzowało stabilnymi parametrami, wymaganymi przez energetykę. Osady ściekowe i mączka kostna posiadają również stabilne uziarnienie. Otrzymana mieszanka może stanowić podstawę do wykorzystania innych odpadów biomasowych jak np. frakcje segregowanych odpadów komunalnych, zrębki czy trociny.

Na podstawie przeprowadzonych badań materiałów odpadowych przygotowano receptury paliw. Paliwo pierwsze otrzymane było według dwóch receptur: zgodnie z recepturą I składało się z 80 % osadu ściekowego i 20 % mączki kostnej, według receptury II składało się z 20 % osadu ściekowego i 80 % mączki kostnej. Paliwo drugie składało się z mączki mięsno-kostnej, osadów ściekowych i odpadów komunalnych.

W tabelach 3 i 4 przedstawiono wyniki analiz właściwości energetycznych próbek paliw uzyskanych według opracowanej technologii.

Tabela 3. Paliwo alternatywne na bazie świeżych osadów ściekowych i mączki kostnej.

Receptura I				
Składniki mieszanki	Udział masowy [% wagowo]	Wilgotność w stanie roboczym W^r [%]	Ciepło spalania składnika Q_s^a [kJ/kg]	Ciepło spalania paliwa Q_s^a [kJ/kg]
Osad	80	20	14 200	14600
Mączka kostna	20	4	16 200	

Receptura II				
Składniki mieszanki	Udział masowy [% wagowo]	Wilgotność w stanie roboczym W^r [%]	Ciepło spalania składnika Q_s^a [kJ/kg]	Ciepło spalania paliwa Q_s^a [kJ/kg]
Osad	20	20	14 200	15 800
Mączka kostna	80	4	16 200	

Tabela 4. Paliwo na bazie osadów ściekowych, mączki kostnej i odpadów komunalnych – receptura II.

Składniki mieszanki	Udział masowy [% wagowo]	Wilgotność w stanie roboczym W^r [%]	Ciepło spalania paliwa Q_s^a [kJ/kg]
Osad	56	20	14 800
Mączka kostna	14	4	
Odpady komunalne	30	30	

Receptura II

Składniki mieszanki	Udział masowy [% wagowo]	Wilgotność w stanie roboczym W^r [%]	Ciepło spalania paliwa Q_s^a [kJ/kg]
Osad	56	20	15 600
Mączka kostna	14	4	
Odpady komunalne	30	30	

Technologia produkcji stałego paliwa biomasowego RECO.

Technologia została opracowana we współpracy z firmą Kompostech z Nowego Sącza. Technologia produkcji paliwa alternatywnego RECO opiera się na wykorzystaniu przefermentowanego osadu ściekowego i dodatku biomasy w postaci zrębków lub trocin. Paliwo jest produkowane w dwu odmianach RECO 1 i RECO 2. Paliwo alternatywne RECO 1 bazuje na osadach ściekowych, natomiast RECO 2 składa się z przefermentowanych osadów ściekowych z dodatkiem zrębków. Charakterystykę paliw przedstawiono w tabeli 5.

Tabela 5. Paliwo RECO na bazie ustabilizowanych osadów ściekowych.

Parametr	Jednostka	Paliwo biomasowe RECO 1	Paliwo biomasowe RECO 2
Wymiar	mm	2-8	5-50
Gęstość nasypowa suchej masy.	kg/m ³	200 – 300	200 - 400
Wilgoć w stanie roboczym, W_t^r	%	30,0 – 47,0	25,0 - 40,1
Zawartość popiołu w stanie roboczym, A^r	%	10,6	7,4
Ciepło spalania, Q_s^a	kJ/kg	13 471	15 461
Wartość opałowa w stanie roboczym, Q_i^r	kJ/kg	9 540 - 6 623	11 490 - 8 692
Zawartość siarki całkowitej w stanie analitycznym, S_t^a	%	0,03	0,03
Zawartość węgla w stanie analitycznym, C^a	%	50,0	49,0
Zawartość wodoru w stanie analitycznym, H^a	%	7,30	5,60
Zawartość azotu w stanie analitycznym, N^a	%	2,0	1,8

Produkcja paliwa formowanego SRF (Solid Recovered Fuel) na bazie osadów ściekowych.

Technologia została opracowana we współpracy z firmą CTL Maczki Bór. Technologia produkcji paliwa formowanego obejmuje przygotowanie mieszanki wsadowej, składającej się z osadów ściekowych i lepiszcza oraz uformowanie paliwa w prasie walcowej. Próbkę paliwa wykonano w warunkach laboratoryjnych z osadów ściekowych z dodatkiem następujących substancji: karboksymetylocelulozy – CMC, bentonitu, wapna i skrobi. Na rysunku 1 przedstawiono paliwo wytworzone z dodatkiem skrobi.

Optymalną recepturą dla tego rodzaju paliwa jest dodanie do mieszaniny osadów ściekowych materiału charakteryzującego się wyższą wartością opałową (np. półprodukty lub odpady ze wzbogacania węgla). Mogą to być np. osady

zdeponowane w osadnikach kopalnianych. Dobór lepszycza pozwala na regulację właściwości paliwa. Skrobia i celuloza podnoszą wartość opałową paliwa, wapno ma właściwości higienizujące, bentonit zaś poprawia właściwości reologiczne.



Rys. 1. Paliwo formowane z dodatkiem skrobi.

System klasyfikacji paliw z odpadów został opracowany przez CEN – Europejską Komisję Normalizacyjną. Paliwo SRF AGH należy do grupy stałych paliw alternatywnych w normie CEN 343 jako SRF (Solid Recovered Fuels). SRF jest pojęciem funkcjonującym w Unii Europejskiej; wprowadzone przez normę CEN 343 odpady są to odpady palne o zdefiniowanych właściwościach użytkowych i fizyko-chemicznych, spełniające wymagania sformułowane w Specyfikacji Technicznej CE/TS 15359. System ten obejmuje szereg Specyfikacji Technicznych, określających nazewnictwo, zasady klasyfikacji, wymagania dla systemu zarządzania jakością podczas procesu produkcji paliw z odpadów, a także metod poboru i przygotowania próbek do badań oraz metodykę wykonywania poszczególnych oznaczeń. Większość specyfikacji technicznych została wydana w 2006 roku.

Opracowany system klasyfikacji CEN/TS 15359 paliw stałych wtórnych pozwala na jednoznaczne zakwalifikowanie paliwa do konkretnej klasy oraz bardzo szczegółowe wyspecyfikowanie jego właściwości fizyko-chemicznych. Zgodnie ze Specyfikacją Techniczną CEN/TS 15359 stałe paliwo wtórne może być wytworzone wyłącznie z odpadów innych niż niebezpieczne i spalane w instalacjach, spełniających standardy emisyjne wynikające z Dyrektywy 2000/76/EC, dotyczącej spalania odpadów.

Produkcja syntetycznego węgla koksującego.

Opracowana technologia obejmuje odpowiednie przygotowanie materiałów odpadowych oraz ich zagospodarowanie w procesie klasycznego koksowania węgla kamiennych w komorach koksowniczych [4,5].

Specyfika procesu koksowania węgla kamiennych, polegająca na wysokotemperaturowej pirolizie mieszanki węglowej oraz kompleksowym oczyszczaniu surowego gazu koksowniczego, może być wykorzystana z pozytywnym efektem dla środowiska naturalnego przez możliwość zagospodarowania odpadów pochodzenia organicznego.

Istnieje realna możliwość utylizacji tą metodą dużej ilości materiałów odpadowych pochodzenia organicznego, zarówno przemysłowych jak również, po odpowiedniej segregacji wstępnej, odpadów komunalnych. Biorąc pod uwagę proces technologiczny koksowania oraz to, że pewna część mieszanki węglowej zastępowana jest półproduktem (granulatem „syntetycznego węgla koksowego”), wytworzonym z materiałów odpadowych, metoda ta nie powoduje dodatkowej emisji substancji szkodliwych do otoczenia. Z uwagi na dużą różnorodność odpadowych materiałów pochodzenia organicznego i znaczne różnice w ich własnościach zarówno fizycznych jak i chemicznych, materiały te należy poddać wstępnej obróbce, aby końcowe własności fizykochemiczne półproduktu (granulatu) podawanego do komory koksowniczej były jak najbardziej zbliżone do własności fizykochemicznych węgla stanowiących wsad do komory koksowniczej. Ponadto wstępnie przygotowana forma odpadów w postaci granulatu powinna wykazywać aktywność w termicznym procesie tworzenia koksu (powinna sama ulegać spiekaniu).

Proponowana metoda zagospodarowania węglonośnych materiałów odpadowych pochodzenia organicznego może być uzupełnieniem lub nawet alternatywą dla powszechnie obecnie stosowanego, a społecznie nie akceptowanego, procesu spalania tychże odpadów. Istota zagospodarowania proponowaną metodą polega na wstępnym rozdrobieniu odpadów oraz wymieszaniu ich z upłynnionym pakiem węglowym (alternatywnie może to być ciężka frakcja po przeróbce ropy naftowej - asfalt). Po wymieszaniu i schłodzeniu mieszaniny w basenie wodnym uzyskuje się stały półprodukt w formie granulatu o założonej wielkości ziaren, zawierającej pak węglowy oraz materiały odpadowe pochodzenia organicznego. Otrzymywany w ten sposób granulaty (syntetyczny węgiel koksowy) jest hydrofobowy i posiada własności fizykochemiczne zbliżone do podstawowych

własności węgla wsadowego stosowanego do procesu koksowania (zbliżoną zawartość popiołu i części lotnych oraz wykazuje spiekalność). Końcowym etapem procesu jest dozowanie otrzymanego stałego granulatu w sposób kontrolowany do wsadu węglowego. Tak przygotowana mieszanka kierowana jest następnie do procesu koksowania w komorach koksowniczych.

Z uwagi na przeważnie niską zawartość substancji mineralnej w organicznych materiałach odpadowych oraz w surowym paku węglowym, jak również ze względu na dużą zawartość w tych materiałach części lotnych, istnieje możliwość wykorzystania jako komponentów do produkcji granulatu wysokopopiołowych odpadów węglonośnych o niskiej zawartości części lotnych lub nawet niektórych odpadów całkowicie mineralnych.

Pierwszy etap prezentowanej metody obejmuje segregację odpadów według ich rodzajów. Należy zaznaczyć, że materiały poddawane procesowi zagospodarowania proponowaną metodą nie wymagają precyzyjnej segregacji. Jej celem jest jedynie utrzymanie podstawowych własności fizykochemicznych segregowanych odpadów w aspekcie dobrania stosownej metody rozdrabniania. Etap drugi obejmuje rozdrobnienie odpadów, jeżeli zachodzi taka konieczność, oraz zgromadzenie ich w zbiornikach dozujących. Kolejna operacja to dozowanie stałych komponentów oraz paku węglowego (alternatywnie asfaltu naftowego). Po procesie dozowania składniki są mieszane przy temperaturze wyższej od temperatury mięknięcia paku. Mieszanie komponentów można prowadzić w różnego typu podgrzewanych mieszarkach ciągłych i okresowych. Materiał opuszczający mieszarkę nie wymaga procesu brykietowania i w celu zestalenia jest chłodzony wodą. Po schłodzeniu otrzymuje się stały, wytrzymały mechanicznie półprodukt w postaci granulatu o odpowiedniej wielkości ziaren, który może być z łatwością transportowany i magazynowany. Granulat można w łatwy sposób dozować do węglowej mieszanki wsadowej, stosowanej do produkcji koksu. Podstawowa zaleta proponowanej technologii to wykorzystanie specyficznych własności paku ze smoły koksowniczej (alternatywnie niektórych asfaltów naftowych), a szczególnie jego stosunkowo wysokiej temperatury mięknięcia.

Końcowym etapem zagospodarowania odpadów według proponowanej metody jest kontrolowane dodawanie otrzymanego granulatu do mieszanki węglowej, stanowiącej wsad do procesu koksowania. W wyniku procesu koksowania następuje piroliza węgla wraz z granulem zawierającym pak węglowy i

materiały odpadowe. Z odpadów oraz z paku węglowego tworzy się stały karbonizat koksowy o dużej wytrzymałości mechanicznej, pozostający w całości w masie koksu powstałej z mieszanki węglowej, natomiast lotne produkty pirolizy granulatu zawierającego materiały odpadowe wraz z surowym gazem koksowniczym powstającym w trakcie koksowania mieszanki węglowej kierowane są do instalacji kondensacji i oczyszczania, gdzie gaz oczyszczany jest zgodnie z procesem technologicznym.

Przedstawiona metoda jest bardzo elastyczna. Przez odpowiedni dobór komponentów wejściowych oraz sposób ich wstępnego przygotowania można w bardzo szerokim zakresie regulować własności fizykochemiczne otrzymywanego granulatu pakowego, o odpowiednich własnościach fizykochemicznych, pozwalających na jego kopiolizę ze wsadem węglowym. Ponadto wymieniony wyżej dobór poszczególnych komponentów umożliwia zachowanie składu pierwiastkowego wytwarzanego granulatu (przykładowo: azot, siarka, chlor itp.) na poziomie, jaki występuje w naturalnych węglach koksowniczych.

Wytwarzanie granulatu według zaproponowanej metody może być uruchomione na terenie zakładów koksowniczych albo przy innych zakładach lub na obszarach administracyjnych, w których występuje odpowiednia struktura i ilość odpadów węglonośnych.

Paliwo wtórne biomasowe z odpadów przemysłu papierniczego.

Po podpisaniu w 2012 roku umowy o współpracy AGH z International Paper Kwidzyn (IP) oraz WIK Rybnik sp. z o.o., przeprowadzono badania możliwości utylizacji odpadów z produkcji papieru w IP w kierunku ich wykorzystania energetycznego [7].

W związku z rosnącym zainteresowaniem biomasą jako paliwem, poszukiwane są nowe jej źródła. Widocznym efektem tych poszukiwań jest m.in. pojawienie się na polskim rynku znacznej ilości odpadów (z reguły pochodzących z Ukrainy i Białorusi), nazywanych ścierem drzewnym lub lignocelulozą odpadową, a będących odpadową biomasą lignocelulozową pohydrolityczną - produktem ubocznym przy produkcji furfuralu lub biopaliwa płynnego.

Efektywne wykorzystanie lignocelulozy odpadowej uwarunkowane jest jej przetworzeniem do paliwa formowanego, możliwego do stosowania w rusztowych urządzeniach grzewczych, w energetyce zawodowej i ciepłownictwie. Proces

formowania jest bowiem metodą eliminacji takich niekorzystnych właściwości lignocelulozy odpadowej jak mała gęstość energetyczna, duża podatność na ścieranie i pylenie.

Opracowana technologia obejmuje zagospodarowanie odpadów przemysłu papierniczego. Polega na tym, że mieszaninę składającą się ze szlamów z odbarwiania makulatury, które zawierają włókna celulozowe, farby drukarskie, kleje i wypełniacze w ilości od 20 do 70 %, ścieków włóknistych, odpadów z włókna, szlamów z włókien, wypełniaczy i powłok pochodzących z separacji mechanicznej z oczyszczalni ścieków, pochodzących z zakładów papierniczych w ilości od 10-30 % miesza się i poddaje odwadnianiu do zawartości wody poniżej 30 % i wartości opałowej od 9-12 MJ/kg. Powstałą masę formuje się do postaci brykietów lub peletów.

Paliwo produkowane na bazie odpadów z przemysłu papierniczego może być uzupełnione o takie surowce biomasowe jak:

- słoma, trawa, zieleń pochodząca z nieużytków,
- rośliny energetyczne (wierzba energetyczna, miscanthus, róża bezkolcowa i in.),
- odpady gospodarki leśnej i przemysłu drzewnego (gałęzie, korzenie, kora, liście drzew oraz trociny),
- kukurydza, rzepak i inne rośliny,
- odpady produkcyjne z przemysłu rolno-spożywczego (wysłodki, wyciąki, odpady browarniane, makuchy itp.),
- biomasa z odpadów komunalnych,
- biomasa z osadów ściekowych.

Otrzymane paliwo charakteryzuje się następującymi właściwościami:

- wartość opałowa 9 - 12 MJ/kg,
- wysoka efektywność procesu spalania,
- niska emisja pyłów i gazów szkodliwych,
- redukcja emisji mykotoksyn,
- niskie koszty i łatwość produkcji,
- łatwość transportu i przechowywania.

Dzięki specjalnie dobranym dodatkom uszlachetniającym (odpady z odkamieniania wody) spalanie paliwa biomasowego nie powoduje znanych zjawisk występujących przy współspalaniu biomasy, takich jak korozja chlorowa i zanieczyszczanie żużlem powierzchni grzejnych pieców i kotłów.

Zastosowanie technologii daje następujące korzyści:

- zagospodarowanie wszelkiego rodzaju miejscowej biomasy, co jej dostawcom zapewni stałe dochody,
- możliwość zastosowania w energetyce zawodowej (elektrownie, elektrociepłownie), która jest zobligowana do wytwarzania energii ze źródeł odnawialnych,
- utworzenie nowych miejsc pracy,
- pozyskanie taniego paliwa.

Wykorzystanie stałego produktu po pirolizie opon samochodowych jako bazowego składnika paliwa wtórnego - współpraca z DS Recology.

W krajach Unii Europejskiej w znacznie większym stopniu niż w Polsce wykorzystuje się energię zawartą w odpadach do produkcji energii cieplnej i elektrycznej. Realizuje się to zarówno w spalarniach odpadów jak również elektrociepłowniach i elektrowniach, w których odpady są spalane lub współspalane z węglem. Rozwinięty jest system kompleksowego zagospodarowania odpadów, w tym także odzysku energii z odpadów, których nie da się w inny sposób wykorzystać, a można wykorzystać energię w nich zawartą poprzez odzysk termiczny. Zaletą odzysku energii z odpadów jest to, że np. w przypadku elektrowni opalanych odpadami, jest to najtańsze inwestycyjne źródło wytwarzania energii elektrycznej. W przepisach dotyczących gospodarki odpadami, zarówno unijnych jak i krajowych, podstawowym celem gospodarki odpadami jest zredukowanie ilości odpadów kierowanych na składowiska. Polska nie posiada tak jak inne kraje Unii Europejskiej odpowiedniej ilości spalarni odpadów ani odpowiednio rozwiniętego systemu produkcji paliwa alternatywnego z odpadów dla potrzeb energetyki. Znaczną część odpadów, w tym odpadów biodegradowalnych, z których uzyskaną energię można traktować jako energię ze źródeł odnawialnych, które nie będą mogły być składowane na składowiskach odpadów, można wykorzystać dla potrzeb energetyki. Instalacja do pirolizy zużytych opon (również innych odpadów palnych) w połączeniu z produkcją paliwa wtórnego z odpadów biodegradowalnych pozwoli na znaczne zmniejszenie ilości odpadów kierowanych na składowisko z jednoczesnym wykorzystaniem ich energii, którą można zaliczyć do energii ze źródeł odnawialnych. Produktami otrzymywanymi z instalacji do pirolizy opon jest gaz, olej oraz stała pozostałość, karbonizat, którego podstawowe właściwości energetyczne przedstawiono w

tabeli 6. Ze względu na wysoką wartość opałową wynoszącą od 26000 do 30000 kJ/kg karbonizat może być wykorzystany jako bazowy składnik mieszanek do produkcji paliwa wtórnego. Zrębki, osady ściekowe, segregowane odpady komunalne, mączka zwierzęca, drewno odpadowe są odpadami, które są biodegradowalne, a więc w bilansie energetycznym energia z nich uzyskana może być traktowana jako energia ze źródeł odnawialnych. Charakteryzują się również niewielkim zakresem zmian podstawowych parametrów energetycznych oraz dużą ilością, stąd zapewnia to stałą ilość paliwa wtórnego o stabilnych właściwościach energetycznych. W tabeli 6 podano też parametry paliwa wtórnego, wyprodukowanego na bazie wyżej wymienionych odpadów. Wysoka wartość opałowa podstawowego składnika jakim jest karbonizat pozwala na komponowanie paliwa wtórnego w znacznym zakresie jego wartości opałowej, którą można dostosować do wymagań odbiorcy. Ze względu na znikomą wartość wilgoci oraz małą zawartość części lotnych karbonizatu, składnikami komponowanymi do paliwa alternatywnego mogą być wykorzystane odpady, które mają ich dużą zawartość i ich bezpośrednie spalanie ma małą sprawność i jest nieekonomiczne. W przypadku takich odpadów jak segregowane odpady komunalne, mączka zwierzęca, drewno odpadowe, papa bitumiczna, korzystnym rozwiązaniem jest ich obróbka termiczna w instalacji do pirolizy zużytych opon. Otrzymany w wyniku pirolizy tych odpadów karbonizat ma znacznie lepsze i bardziej stabilne właściwości energetyczne oraz właściwości fizyczne, niesprawiające trudności w technologii przygotowania paliwa wtórnego. Biorąc pod uwagę docelową moc przerobową z instalacji do pirolizy opon będzie można otrzymać około 100 ton karbonizatu na dobę. Zakładając, że w produkcji paliwa wtórnego będzie on dodawany w ilości 30-50 %, można będzie w skali miesiąca zagospodarować do 6 000 ton odpadów, z których zostanie uzyskana określona ilość energii odnawialnej. Jednym z kierunków wykorzystania karbonizatu z pirolizy opon może być również użycie go do produkcji brykietów z węgla brunatnego i torfu. Jak wiadomo, węgiel brunatny oraz torf charakteryzują się dużą zawartością wilgoci i części lotnych. Zastosowanie karbonizatu do produkcji brykietów z węgla brunatnego znacznie poprawi jego parametry energetyczne [1,2].

Tabela 6. Podstawowe właściwości energetyczne komponentów paliwa wtórnego.

Opad	Zawartość wilgoci W [%]	Zawartość części lotnych V ^a [%]	Zawartość popiołu A ^a [%]	Zawartość siarki S ^a [%]	Zawartość chloru Cl ^a [%]	Zawartość węgla C ^a [%]	Zawartość wodoru H ^a [%]	Wartość opałowa Q [kJ/kg]
karbonizat	0,9	12,1	14,4	1,53	0,25	81,1	5,1	30 334
osady ściekowe	11,8	51,9	26,2	1,33	0,09	33,1	4,9	13 325
zrębki	48,8	81,2	1,8	0,04	0,01	26,1	2,56	8 259
segregowane odpady komunalne	17,0	64,2	10,8	0,46	0,33	34,6	5,74	13 457
mączka zwierzęca	4,5	63,0	28,7	0,44	0,20	40,0	6,31	16 035
frakcje odpadów komunalnych:								
tkaniny	5,1	63,6	18,6	0,76	0,48	45,6	5,91	18 750
tworzywa sztuczne	0,3	33,1	34,6	0,14	2,1	68,4	9,8	30 470
makulatura	5,8	60,5	20,1	0,38	2,3	37,1	5,7	12 828
węgiel brunatny	21,8	48,8	15,6	0,65	0,01	47,5	2,11	16 564
paliwo wtórne	6,4	36,7	0,67	0,76	0,12			20 856

Podsumowanie

Katedra Technologii Paliw Wydziału Energetyki i Paliw we współpracy z Katedrą Inżynierii Środowiska i Przeróbki Surowców Wydziału Górnictwa i Geoinżynierii od szeregu lat prowadzi prace na energetycznym i materiałowym zagospodarowaniu odpadów. Efektem są liczne publikacje oraz opracowania technologiczne (chronione patentami). Opracowano technologie zagospodarowania m.in. osadów ściekowych, segregowanych odpadów komunalnych, mączki mięsno-kostnej, odpady gumowców, odpady z przemysłu papierniczego oraz biomasy. Prowadzone były również badania związane z pirolizą odpadów, oraz gospodarczym wykorzystaniem produktów pirolizy, szczególnie stałej i ciekłej pozostałości

Afiliacja

Artykuł został opracowany w ramach prac statutowych AGH: Wydziału Energetyki i Paliw nr 11.11.210.213 oraz Wydziału Górnictwa i Geoinżynierii nr 11.11.100.276.

Literatura

1. Sposób wytwarzania ukształtowanego paliwa stałego z materiałów odpadowych — [The method of solid fuel preparation from carbonaceous wastes] / DS REECOLOGY Spółka z Ograniczoną Odpowiedzialnością, Zielona Góra ; wynalazca: Depta Grzegorz, Kielec Roman, TORA Barbara, ŻMUDA Wiesław Andrzej, BUDZYŃ Stanisław. — Int.Cl.: C10L 5/48^{(2006.01)}. — Polska. — Opis zgłoszeniowy wynalazku ; PL 394987 A1. Zgłosz. 2011-05-23 ; Opubl. 2012-12-03 // Biuletyn Urzędu Patentowego ; ISSN: 0137-8015 ; 2012 nr 25, s. 25. — tekst: <http://patenty.bg.agh.edu.pl/pelneteksty/PL394987A1.pdf>
2. *Rubber granulate conversion process for producing a semi—active carbonized substance and plasticizer* — Procède de transformation de granulats de caoutchouc pour produire du carbonisat semi—actif et du plastifiant / ALFYMA INDUSTRIE ; wynalazca: BUDZYŃ Stanisław, Iwanicki Victor, Sumara Andrzej, ŻMUDA Wiesław, D'emal Christian. — Int.Cl.: C10B 53/07^{(2006.01)}. — Polska. — Opis zgłoszeniowy wynalazku ; WO 2010/139888 A1. — Zgłosz. nr PCT/FR 2010/051055 z dn. 2010-06-01 ; Opubl. 2010-12-09. — tekst: WO2010139888A1.pdf.
3. *Sposób otrzymywania paliwa bezdymnego* — [Method of obtainig smokeless fuel] / Akademia Górniczo-Hutnicza im. Stanisława Staszica w Krakowie ; wynalazca: Wiesław ŻMUDA, Wojciech Woyciechowski, Stanisław BUDZYŃ. — Int.Cl.^{7} : C10L 5/48. — Polska. — Opis patentowy ; PL 183515 B1. — Zgłosz. nr 315266 z dn. 1996-07-11 ; Opubl. 2002-06-28. — tekst: PL183515B1.pdf
4. *Sposób utylizacji materiałów pochodzenia organicznego* — [Method of utilising materials of organic origin] / Akademia Górniczo-Hutnicza im. Stanisława Staszica w Krakowie; wynalazca: Wiesław ŻMUDA, Aleksander DŁUGOSZ, Stanisław BUDZYŃ, Andrzej Włodkowski, Józef Lis. — Int.Cl.^{6}: B09B 3/00. — Polska. — Opis patentowy ; PL 174223 B1. — Zgłosz. nr 304640 z dn. 1994-08-12 ; Opubl. 1998-06-30. — tekst: PL174223B1.pdf.
5. *Sposób utylizacji odpadów płynnych i mazistych* — [Method of utilising liquid and dammy wastes] / Akademia Górniczo-Hutnicza im. St. Staszica w Krakowie ; wynalazca: Wiesław A. ŻMUDA, Aleksander DŁUGOSZ, Stanisław BUDZYŃ, Barbara TORA. — Int.Cl.^{7} : B09B 3/00. — Polska. — Opis patentowy ; PL 185812 B1. — Zgłosz. nr 323395 z dn. 1997-11-26 ; Opubl. 2003-08-29. — tekst: PL185812B1.pdf.
6. *Sposób utylizacji odpadów zawierających materiały pochodzenia organicznego, zwłaszcza tworzywa sztuczne* — [Method of utilizing wastes containing materials of organic origin, in particular plastics] / Akademia Górniczo-Hutnicza im. Stanisława Staszica w Krakowie ; wynalazca: Wiesław ŻMUDA, Aleksander DŁUGOSZ, Stanisław BUDZYŃ. — Int.Cl.^{6}: B09B 3/00. — Polska. — Opis patentowy ; PL 170472 B1. — Zgłosz. nr 298008 z dn. 1993-03-08 ; Opubl. 1996-12-31. — tekst: PL170472B1.pdf.
7. *Sposób otrzymywania biomasowego stałego paliwa wtórnego z odpadów przemysłu papierniczego* — [Process for the preparation of secondary biomass

solid fuel from waste paper industry] / Akademia Górniczo-Hutnicza im. Stanisława Staszica w Krakowie ; wynalazca: TORA Barbara, BUDZYŃ Stanisław, Krzykowski Marek, Gradoń Włodzimierz, ŻMUDA Wiesław. — Int.Cl.: C10L 5/46^{(2006.01)}. — Polska. — Opis zgłoszeniowy wynalazku ; PL 402910 A1. — Zgłosz. 2013-02-26 ; — Opubl. 2013-08-05 // Biuletyn Urzędu Patentowego ; ISSN: 0137-8015 ; 2013 nr 16, s. 19. — tekst:<http://patenty.bg.agh.edu.pl/pelneteksty/PL402910A1.pdf>

8. *Charakterystyka energetyczna „balastu” z segregacji odpadów* – Energetic characteristics of comunal waste segregation/ Wiesław A. Żmuda. Paweł Pytlowski, Stanisław Budzyń, w: Paliwa i energia XXI wieku/ monografia, red. Krzysztof Bytnar, Grzegorz S. Jodłowski; AGH Kraków, Uczelniane Wydawnictwa Naukowo-Dydaktyczne AGH, 2004. – s. 53-58.
9. *Sposób wykorzystania olejów po pirolizie odpadów organicznych* — [The methode of organic waste pyrolysis oils utilisation] / Akademia Górniczo-Hutnicza im. Stanisława Staszica w Krakowie ; wynalazca: Barbara TORA, Stanisław BUDZYŃ, Wiesław ŻMUDA, Peter Fecko, Vlastimil Kriz. — Int.Cl.: B03D 1/004^{(2006.01)}. — Polska. — Opis patentowy ; PL 214925 B1. — Zgłosz. nr 393095 z dn. 2010-11-30 ; Opubl. 2013-09-30. — tekst:<http://patenty.bg.agh.edu.pl/pelneteksty/PL214925B1.pdf>
10. *Sposób wykorzystania osadów ściekowych i mączki zwierzęcej* — [The methode of sewage sludge and boue ash utilisation] / Akademia Górniczo-Hutnicza im. Stanisława Staszica w Krakowie, Control Process Spółka Akcyjna, Tarnów ; wynalazca: Wiesław Andrzej ŻMUDA, Stanisław BUDZYŃ, Barbara TORA, Krzysztof Wasa, Janusz Iwaniec. — Int.Cl.: C10L 5/42^{(2006.01)}. — Polska. — Opis patentowy ; PL 214770 B1. — Zgłosz. nr 388706 z dn.2009-08-03 ; Opubl. 2013-09-30. — tekst: <http://patenty.bg.agh.edu.pl/pelneteksty/PL214770B1.pdf>