POLITECHNIKA LUBELSKA

MONOGRAFIE

Jan J. Hycnar

Gabriel Borowski

Metody podwyższania kaloryczności drobnoziarnistych odpadów węglowych

Lublin 2016

Serdeczne podziękowania za pomoc w realizacji badań, prób i wdrożeń przedstawionych w naszym opracowaniu, składamy niżej wymienionym osobom:
– mgr inż. Marian Borowski,
– mgr inż. Marian Dziwok,
– dr inż. Roman Foltyn,
– mgr inż. Andrzej Fraś,
– dr inż. Bronisław Gaj,
– mgr inż. Grzegorz Gruszka,
– mgr Daria Kadlec,
– mgr Ewa Leśnik,
– dr inż. Piotr Pasiowiec,
– mgr inż. Rafał Przystaś,
– mgr inż. Romuald Rolnik,
– mgr inż. Krystyna Szulowska,
– mgr inż. Andrzej Szymkiewicz,
– prof. dr hab. inż. Barbara Tora,
– mgr inż. Jerzy Wajs.

Jan J. Hycnar
Gabriel Borowski

Monografie – Politechnika Lubelska

Politechnika Lubelska
Wydział Inżynierii Środowiska
ul. Nadbystrzycka 40B
20-618 Lublin

Jan J. Hycnar
Gabriel Borowski

Metody podwyższania kaloryczności drobnoziarnistych odpadów węglowych

Politechnika Lubelska
Lublin 2016

Recenzent:
prof. dr hab. inż. Eugeniusz Mokrzycki, Instytut Gospodarki Surowcami Mineralnymi i Energią Polskiej Akademii Nauk w Krakowie

Redakcja techniczna: Gabriel Borowski

Publikacja wydana za zgodą Rektora Politechniki Lubelskiej

© Copyright by Politechnika Lubelska 2016

ISBN: 978-83-7947-207-9

Wydawca: Politechnika Lubelska
ul. Nadbystrzycka 38D, 20-618 Lublin
Realizacja: Biblioteka Politechniki Lubelskiej
Ośrodek ds. Wydawnictw i Biblioteki Cyfrowej
ul. Nadbystrzycka 36A, 20-618 Lublin
tel. (81) 538-46-59, email: wydawca@pollub.pl
www.biblioteka.pollub.pl
Druk: Textoprint
www.textoprint.pl

Elektroniczna wersja książki dostępna w Bibliotece Cyfrowej PL www.bc.pollub.pl
Nakład: 50 egz.

SPIS TREŚCI

1 WPROWADZENIE 7

2. ZAGADNIENIA ZWIĄZANE Z OBNIŻANIEM ZAWODNIENIA DROBNOZIARNISTYCH ODPADÓW WĘGLOWYCH 16
2.1. Problematyka uwodnienia odpadów węglowych 16
2.2. Urządzenia filtracyjne 16
2.3. Doziarnianie nadawy do filtracji 19
2.4. Stosowanie środków powierzchniowoczynnych 26
2.5. Odwadnianie zawiesin wodno-mułowych w porowatych zbiornikach elastycznych 27
2.6. Stosowanie chemicznych środków odwadniających 30

3. GRANULOWANIE DROBNOZIARNISTYCH ODPADÓW WĘGLOWYCH 34
3.1. Wprowadzenie 34
3.2. Wybór technologii przeróbki mułów węglowych 34
3.3. Ustalenie warunków granulowania mułów węglowych 36
3.4. Założenia techniczne dla instalacji granulowania mułów węglowych .. 43
3.5. Instalacje granulowania mułów węglowych za pomocą mieszalników intensywnego działania 48

4. BRYKIETOWANIE DROBNOZIARNISTYCH WĘGLI Z BIOMASĄ 52
4.1. Wprowadzenie 52
4.2. Charakterystyka mułów węglowych z „Bogdanki” 54
4.3. Badania laboratoryjne brykietów węglowych z biomasą 56
4.4. Przemysłowe próby brykietowania drobnoziarnistego węgla 65

5. TECHNOLOGIE ZWIĘKSZANIA ZAWARTOŚCI SUBSTANCJI WĘGLOWEJ 69
5.1. Wprowadzenie 69
5.2. Selektywne wydzielanie drobnoziarnistych odpadów węglowych z odcieków obiegów wodnych zakładów wzbogacania węgla 69
5.3. Wydzielanie frakcji bogatych w węgiel z drobnoziarnistych odpadów węglowych 72
5.3.1. Stosowanie przesiewaczy typu Stack Sizer 74
5.3.2. Stosowanie sit łukowych i odśrodkowych sit odwadniających 75
5.3.3. Stosowanie sit z tekstylną przegrodą filtracyjną 82
5.4. Metody „głębokiego” wzbogacania drobnoziarnistych odpadów węglowych 83
5.4.1. Flotacja odpadów drobnoziarnistych węgla 83
5.4.2. Aglomeracja olejowa 86

5.4.3. Odzysk węgla w wirówkach o dużych wartościach sił odśrodkowych 88
5.4.4. Technologie chemicznego odsiarczania i demineralizacji węgla 93

6. ZAGADNIENIA EKSPLOATACJI DROBNOZIARNISTYCH ODPADÓW WĘGLOWYCH DEPONOWANYCH W OSADNIKACH 97
6.1. Problematyka zawiesin wodno-mułowych 97
6.2. Technologie składowania drobnoziarnistych odpadów z procesów wydobywania i wzbogacania surowców mineralnych 100
6.3. Technologie wydzielania koncentratów węglowych z depozytów drobnoziarnistych odpadów 104

7. PRZYKŁADY ENERGETYCZNEGO WYKORZYSTANIA DROBNOZIARNISTYCH FRAKCJI WĘGLOWYCH 110
7.1. Możliwości wykorzystania drobnoziarnistych frakcji węglowych 110
7.2. Suspensje węglowo-wodne jako paliwa zawiesinowe 111
7.2.1. Badania i próby produkcji suspensji węglowo-wodnej 113
7.2.2. Właściwości fizykochemiczne suspensji węglowo-wodnej 115
7.2.3. Kierunki stosowania suspensji węglowo-wodnych 117
7.2.4. Aspekty ekonomiczne i ekologiczne stosowania suspensji węglowo-wodnych 119
7.3. Zastosowanie drobnoziarnistych odpadów węglowych do opalania palenisk fluidalnych kotłów i pieców 120
7.3.1. Wymagania dotyczące paliw do palenisk fluidalnych 121
7.3.2. Rozpowszechnienie kotłów fluidalnych zagranicą i w kraju 128
7.3.3. Zagraniczne doświadczenia stosowania palenisk fluidalnych .. 130
7.3.4. Krajowe doświadczenia stosowania palenisk fluidalnych 133

8. PODSUMOWANIE I WNIOSKI 136

Literatura 138
Spis rysunków 150
Spis tabel 163
Streszczenie 155
Summary 156

1. WPROWADZENIE

Stosowanie paliw niskokalorycznych w energetyce uzasadnione jest możliwościami uzyskania dodatkowych efektów ekonomicznych oraz zmniejszeniem ilości odpadów zarówno u producentów paliw, jak i u dystrybutorów. Podejmowane działania zmierzają do racjonalizacji wykorzystania substancji węglowej zawartych w paliwach i odpadach. Wymagania w tym zakresie rosną w miarę zaostrzania kryteriów ochrony środowiska, w tym ograniczenia emisji CO_2.

Głównym źródłem drobnoziarnistych paliw niskokalorycznych i mieszanek paliwowych są muły węglowe i odpady poflotacyjne oraz ich mieszaniny, a ponadto ściery z węgla brunatnego, odpady z produkcji wyrobów grafitowo-węglowych, sadza z petrochemii oraz coraz częściej frakcje pylaste i piaskowe pochodzące z przeróbki biomasy. Do źródeł tych paliw należy również zaliczyć koncentraty węgla nisko- i średniokaloryczne odzyskiwane ze skały płonnej i średnio- i gruboziarnistych odpadów z przeróbki mechanicznej węgla [Blaschke 1994, Borowski 2013, Aghazadeh i in. 2016].

W warunkach produkcyjnych kopalń i zakładów wzbogacania węgla największy masowy udział stanowią drobnoziarniste odpady węglowe różniące się nie tylko pochodzeniem, ale także właściwościami fizykochemicznymi. Wśród nich można wyróżnić [Brzeziński 2013]:

- muły węglowe wydzielane z gospodarki wodno-mułowej,
- odpady poflotacyjne z procesów flotacyjnego wzbogacania węgla,
- muły węglowe, odpady poflotacyjne i ich mieszaniny nagromadzone w osadnikach naziemnych,
- muły wydzielone z oczyszczania dołowych chodników wodnych i powierzchniowych osadników wód dołowych.

Odpady węglowe często składowane są, w całości lub częściowo, w osadnikach – stanowiąc drobnoziarniste odpady węglowe z osadników, lub na składowiskach – stanowiąc odpady drobnoziarniste ze składowisk. Niejednokrotnie, w przypadku starych składowisk odpadów górniczych, można spotkać mieszaniny mułów węglowych i odpadów poflotacyjnych z odpadami średnio- i gruboziarnistymi ze wzbogacania węgla i robót przygotowawczych.

Powyższą listę odpadów węglowych należy uzupełnić drobnoziarnistymi materiałami węglonośnymi powstającymi w szeregu procesach technologicznych, a mianowicie:

- koksik ze zgazowania węgla w gazogeneratorach dla produkcji gazu oświetleniowego i technologicznego (dawne gazownie miejskie, stalownie),
- wysokozawęglone popioły lotne z fluidalnego zgazowania węgla, zawierające około 50% odgazowanego węgla [Gasification 1999],

- sadza z procesów pirolizy węglowodorów i zgazowania odpadów gumowych,
- koks naftowy, produkt z koksowania ciężkich pozostałości przeróbki ropy naftowej, zawierający duże ilości siarki.

Wieloletnie badania i dotychczasowe wdrożenia w Polsce i zagranicą pozwoliły określić potencjalne możliwości wykorzystania odpadów górniczych jako surowców oraz materiałów do, m.in. [Alwaeli i Czech 2009, Couch 1998, Girczys 1996, Hycnar 2002b, Karbownik i Chaber 1999, Olszewski i in. 2012, Palarski i in. 2012, Yilmaz 2011]:

- produkcji klinkieru portlandzkiego,
- produkcji ceramiki budowlanej [Łyszczarz 1996],
- produkcji ceramiki szlachetnej,
- produkcji kruszyw sztucznych i spiekanych [Stankiewicz i Góralczyk 2012],
- melioracji i nawożenia gleb,
- odzysku koncentratów metali,
- odzysku węgla [Hycnar i Mokrzycki 1995],
- odzysku siarki,
- neutralizacji i oczyszczania ścieków,
- robót inżynieryjnych [Skarżyńska 1995],
- robót rekultywacyjnych i rewitalizacyjnych [Wożniakowski i Kuczyńska 1992],
- podsadzki i robót w technologiach górniczych [Lisowski 1997, Mazurkiewicz i in. 1997]
- unieszkodliwiania innych odpadów [Hrapiec i in. 1998],
- procesów energetycznych i energotechnologicznych jako źródło energii cieplnej [Giemza i in. 2009, Hycnar i in. 2005].

Wybór konkretnych kierunków zagospodarowania ubocznych produktów wydobycia i wzbogacenia węgla zależy przede wszystkim od rodzaju, składu i właściwości odpadu oraz stopnia akceptacji w społeczeństwie i w gospodarce antropogenicznych surowców i materiałów [Szczygielski 2015].

Drobnoziarniste odpady węglowe, a w szczególności muły węglowe i odpady poflotacyjne stosowane są nie tylko jako paliwa niskokaloryczne (samodzielne lub dodatek do paliw handlowych), ale także jako paliwo technologiczne (dodatek do mas ceramicznych i klinkieru), źródło koncentratów węglowych, jako materiał uszczelniająco-izolacyjny wyrobiska górnicze, powierzchnie zwałów węgla, składowiska odpadów oraz jako środek do melioracji gleb lekkich.

Znaczącym krokiem w rozwoju masowego wykorzystania niskokalorycznych paliw było wdrożenie do eksploatacji kotłów i pieców z paleniskami fluidalnymi [Gibrat i Chenin 1954: Fluidized 1997, Hycnar 2006b]. W tych przypadkach niskokaloryczne paliwa stosowane są jako paliwa podstawowe lub jako składnik mieszanin paliwowych oraz jako paliwo uzupełniające. W praktyce eksploatacyj-

nej kotłów fluidalnych, można wyróżnić spalanie mułów węglowych, odpadów poflotacyjnych i drobnoziarnistych frakcji ziarnowych wydzielanych ze skały płonnej nawet o wartości opałowej rzędu 5,5 MJ/kg z tym, że większość z nich charakteryzuje wartość opałowa powyżej 8 MJ/kg.

Zaostrzane wymogi w zakresie emisji zanieczyszczeń gazowych do środowiska i potrzeba podwyższenia ekonomii procesów spalania wskazują na celowość ponownego przeanalizowania dotychczasowych rozwiązań w zakresie przygotowania i stosowania niskokalorycznych paliw oraz wypracowania nowych kierunków działań na rzecz ich dalszego uefektywnienia. Stosowanie paliw niskokalorycznych, analogicznie do paliw handlowych, wymaga określenia i oszacowania szeregu ich parametrów między innymi takich jak: wskaźnika emisji CO_2, zawartości związków chloru i rtęci oraz wskaźników żużlowania (*Slagging Index*), skłonności do zanieczyszczania powierzchni grzewczych (*Fouling Index*), energetycznego obciążenia popiołem jednostki ciepła (g/MJ), itd.

Podstawowymi składnikami drobnoziarnistych odpadów węglowych są składniki mineralne (oznaczane jako popiół) i substancje węglowe (macerał) oraz woda, których ilość bardzo się waha w zależności od technologii wydzielania drobnoziarnistych odpadów węglowych, sposobu i czasu ich deponowania. O właściwościach energotwórczych drobnoziarnistych odpadów węglowych decyduje przede wszystkim rodzaj i ilość macerału.

Miarą właściwości energetycznych macerału jest ciepło spalania w stanie bezpopiołowym i suchym Q_s^{daf}, które zależy od stopnia uwęglenia macerału. Z dokonanych analiz właściwości węgli wynika, że ciepło spalania zawiera się pomiędzy 29 a 36 MJ/kg, odpowiednio dla węgli płomiennych i gazowo-koksowych (tab. 1.1).

Właściwości drobnoziarnistych odpadów węglowych są wynikiem ich pochodzenia, sposobów przeróbki i wzbogacania urobku oraz w przypadku ich deponowania, sposobami ich składowania. Natomiast ilość macerału w drobnoziarnistych odpadach węglowych zależy nie tylko od formy ich występowania,

Tabela 1.1. Ciepło spalania węgli w stanie bezpopiołowym i suchym w zależności od ich typu

Typ węgla		Ciepła spalania w stanie bezpopiołowym i suchym analizowanych węgli, Q_s^{daf}, MJ/kg	
wyróżnik	nazwa	minimalne – maksymalne	średnia
31.1.	Węgiel płomienny	24,0–31,1	29.1
31.2.	Węgiel płomienny	31,1–34,2	32,5
32.1.	Węgiel gazowo-płomienny	30,4–34,5	33,0
32.2.	Węgiel gazowo-płomienny	31,3–35,2	33,3
33.	Węgiel gazowy	33,1–37,3	35,2
34.2	Węgiel gazowo-koksowy	36,2–36,3	36,2

ale przede wszystkim od zastosowanej technologii wzbogacania węgla. Wszystkie te czynniki decydują o dużych różnicach w ich składzie chemicznym i fizycznym oraz ich właściwościach fizykochemicznych [Hycnar 2015].

Z punktu widzenia energetyki najistotniejszymi wymaganiami dla paliwa są m.in.: ciepło spalania, wartość opałowa i zawartość siarki oraz zawartość wody (wilgoci) i popiołu [Sobota 1994]. Związki te przedstawia zależność między wartością opałową i ciepłem spalania, a zawartością balastu:

$$Q_{\mathrm{i}}^{\mathrm{r}} = Q_{\mathrm{s}}^{\mathrm{daf}} - \alpha(A^{\mathrm{r}} + W_{\mathrm{t}}^{\mathrm{r}}) \qquad (1)$$

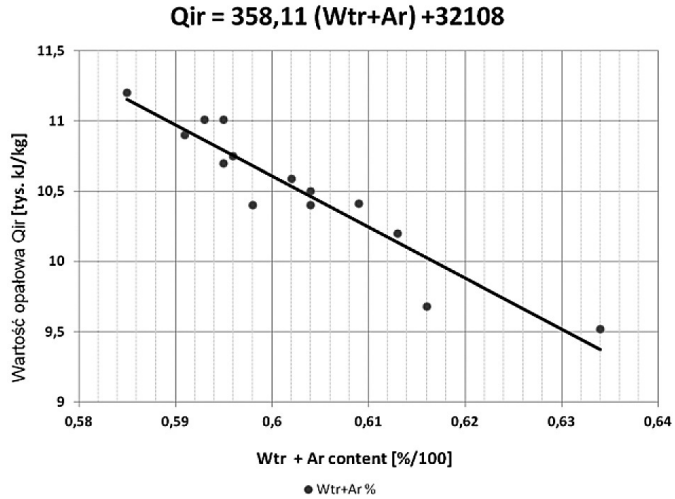
gdzie: Q_i^r – wartość opałowa w stanie roboczym, kJ/kg,
Q_s^{daf} – ciepło spalania w stanie bezpopiołowym i suchym, kJ/kg,
A^r – zawartość popiołu, %,
W_t^r – zawartość wilgoci, %,
α – współczynnik proporcjonalności dla danego rodzaju drobnoziarnistych odpadów węglowych, kJ/kg.

W przypadku mułów węglowych powstających przy produkcji węgli płomiennych typu 31.2 w wybranej kopalni, zależność tą ujmuje następujące równanie:

$$Q_{\mathrm{i}}^{\mathrm{r}} = 32{,}108 - 358{,}11\ (A^{\mathrm{r}} + W_{\mathrm{t}}^{\mathrm{r}}),\ \mathrm{kJ/kg} \qquad (2)$$

Dużą zgodność wyżej podanego równania (2) z faktycznymi pomiarami wartości opałowych mułów węglowych, ilustruje rysunek 1.1.

O wielkości efektów energetycznych decydują zachodzące egzotermiczne reakcje utleniania związków węgla, wodoru, siarki itp., pomniejszone o reakcje endotermiczne związane z destrukcją wysokouwęglonych węglowodorów itp. zawartych w macerale drobnoziarnistych frakcji węglowych. Podstawowymi reakcjami chemicznymi decydującymi o procesach egzotermicznych, są:



Rys. 1.1. Zależność wartości opałowej mułów węglowych od zawartości balastu

$$C + O_2 \rightarrow CO_2$$
$$(C_nH_m) + (n+ 0{,}5m)O_2 \rightarrow nCO_2 + 0{,}5\ mH_2O$$
$$2\ H_2 + O_2 \rightarrow 2H_2O$$
$$S + O_2 \rightarrow SO_2$$

Efekty te wzrastają ze stopniem uwęglenia macerału i jego zawartości w paliwie. Składniki mineralne zawarte w drobnoziarnistych frakcjach węglowych, wpływają na obniżenie wartości energetycznej (kaloryczności) macerału. Wilgotność również wpływa na obniżenie kaloryczności z tytułu wzrostu temperatury i odparowania wody. Ciepło właściwe i parowania wody wynoszą odpowiednio c_w = 4,18 kJ/kg·deg i q_{pw} = 2260 kJ/kg co oznacza, że każdy kilogram wody zawartej w paliwie będzie pochłaniał około 2600 kJ/kg.

Charakterystykę fizykochemiczną przykładowych drobnoziarnistych odpadów węglowych dostarczanych do energetyki i będących przedmiotem niniejszego studium, podano w tabeli 1.2. Szczególnie mocno oddziaływuje zawartość balastu na kaloryczność drobnoziarnistych odpadów powstających podczas wydobycia i wzbogacania urobku węglowego.

Analizowane odpady drobnoziarniste nie odbiegają składem i właściwościami od występujących w innych krajowych i zagranicznych zakładach wzbogacania węgla i w osadnikach oraz spalanych w kotłach fluidalnych, co ilustrują dane w tabeli 1.3 [Hycnar 2006a].

Często, znaczącym problemem, dla użytkowników drobnoziarnistych odpadów węglowych jest ich konsystencja półpłynna, pastowata **(**rys. 1.2), stanowiąca zagrożenie na skutek rozmywania, pylenia i zanieczyszczania środowiska oraz trudności ich składowania w okresach suszy, słoty i mrozów oraz dozowania lub mieszania z innymi paliwami.

Muły węglowe wydzielane w osadnikach ziemnych charakteryzują się dużą zmiennością składu fizycznego i zawartością wody, co wynika z zachodzących procesów hydrograwitacyjnego rozdziału w osadnikach składników mułów. Przez zastosowanie pras filtracyjnych w wielu przypadkach uzyskuje się muły bardziej jednorodne w formie placków filtracyjnych. Niejednokrotnie stanowi to trudność w sporządzaniu mieszanek z paliwami ziarnistymi [Battaglia 1963].

W zależności od stanu fizycznego muły węglowe mogą zanieczyszczać wody, glebę i powietrze. Ponadto, niewłaściwie składowane mogą być źródłem pożarów, gdyż pozostawione na powietrzu ulegają samozagrzewowi.

Z analizy właściwości i składu drobnoziarnistych frakcji węglowych wynika, że racjonalizacja ich zagospodarowania, jako źródła energii cieplnej wymaga ingerowania w ich skład prowadzący do wzrostu udziału masy organicznej węgla i jednoczesnego obniżenia zawartości wody lub zawartości popiołu. Dotychczasowe rozwiązania procesowe w kopalniach i zakładach wzbogacania nie gwarantują znaczącego wzrostu wartości energetycznej wytwarzanych drobnoziarnistych odpadów węglowych, co jest zrozumiałe, gdyż celem głównym

Tabela 1.2. Właściwości fizykochemiczne drobnoziarnistych odpadów węglowych spalanych w energetyce

Drobnoziarniste odpady węglowe	Stan analityczny					Stan roboczy				
	W^a, %	A^a, %	Q_s^d, MJ/kg	S_t^a, %	C^a, %	W_t^r, %	A^r, %	Q_t^r, MJ/kg	S_t^r, %	C_t^r, %
1. Muły węglowe										
1.1. Silesia	3,32	43,6	15,173	–	–	22,8	35,1	11,487	–	–
1.2. Janina	2,53 4,35	57,3 57,1	10,756 9,846	2,36 0,66	27,67 –	42,6 45,0	33,7 28,3	5,327 6,323	1,39 0,50	16,30 –
– z filtra taśmowego – z pras komorowych	4,13 4,13	56,7 56,7	10,047 10,047	0,76 0,76	– –	40,9 29,2	35,1 42,2	5,313 6,686	0,43 0,49	– –
1.3. Sobieski	4,07 –	52,5 –	12,422 –	0,746 –	32,20 –	28,3 25,7	39,3 37,6	8,211 9,277	0,56 1,06	24,10 –
1.4. Chwałowice	–	–	–	–	–	32,0	36,8	9,550	1,01	–
1.5. Mysłowice	–	–	–	–	–	26,1	24,8	14,450	0,63	–
1.6. Dzierżno	–	27,4	–	–	–	32,0	18,6	15,033	0,75	–
2. Odpady poflotacyjne										
2.1. Gliwice - osadnik 29 - osadnik 30	– –	– –	– –	– –	– –	25,8 23,7	38,6 24,4	10,350 16,540	1,40 –	– –
2.2. Pstrowski	3,32	47,8	13,751	0,46	–	21,3	37,9	10,398	0,37	–
2.3. Wałbrzych	–	–	–	–	–	21,3	37,3	8,522	0,6	–
2.4. Jas-Mos Sedyment	0,5	13,6	30,136	0,46	75,7	21,9	10,7	23,132	0,36	59,4
3. Muły węglowe/odpady poflotacyjne spalane w energetyce										
3.1. Koncern energetyczny bilans roczny: – wartość średnia – wartość minimalna – wartość maksymalna	– – –	– – –	– – –	– – –	– – –	– 21,3 31,5	– 37,9 41,1	7,702 6,347 11,393	– 0,42 0,63	– – –
3.2. Kotły fluidalne (KF)	–	–	–	–	–	26,8	41,9	7,633	0,55	–
3.3. KF pulpa, średnioroczna	–	–	–	–	–	40,9	34,4	5,573	–	–
3.4. KF granulat mułowy	– 5,15	– 42,0	– 14,738	– 0,68	– 39,2	27,0 28,8	41,6 31,5	7,702 9,891	– 0,68	– 29,5

Objaśnienia: W – wilgotność, A – zawartość popiołu, Q_s – ciepło spalania, Q_t – wartość opałowa, S – zawartość siarki, C – zawartość węgla.

procesów przeróbczych jest maksymalny odzysk macerału z urobku węglowego w postaci paliw handlowych [Hölter 1990, Honaker i in. 1998].

Uzyskanie znaczącego wzrostu wartości energetycznej dotychczasowych mułów węglowych, odpadów poflotacyjnych itp., wymaga wdrożenia nowych rozwiązań organizacyjnych i technologicznych [Hycnar 2015].

Działania te zasługują na uwagę, gdyż na terenach górnictwa węgla kamiennego są zdeponowane w osadnikach znaczące ilości drobnoziarnistych odpadów węglowych. W zależności od źródeł literaturowych, w Polsce ilość zdeponowanych mułów węglowych i odpadów poflotacyjnych w środowisku szacowana

Tabela 1.3. Skład i właściwości wybranych krajowych i zagranicznych drobnoziarnistych odpadów węglowych

L.p.	Parametry			Krajowe drobnoziarniste odpady węglowe z osadników				Zagraniczne odpady drobnoziarniste						
				muły węglowe		odpady poflotacyjne		Belgia[1]	Francja		Niemcy		Rosja	
				Halemba	Siemia–nowice	Siltech	Dzierżno	Beringen	Carling	Gardanne	BAG–Westfalen	Ensdorf	Kuzbas	Kirowa
1.	Stan roboczy													
1.1.	Wartość opałowa	Q_i^r	MJ/kg	15,7	12,8	8,0–13,7	9,2	2,2–3,3	10,5	11,6	11,4	11,8	3,2	21,7
1.2.	Popiół	A^r	%	23,0	31,6	32,4–47,37	30,4	70–77	45	28–32	–	45,0	–	16,7–41,8
1.3.	Wilgoć całkowita	W_t^r	%	26,9	21,1	12,4–28,4	31,9	5–20	33	11–14	–	13,0	44,7	19,5–28,5
1.4.	Siarka całkowita	S_t^r	%	–	0,4	0,41–1,7	0,8	–	–	3,7	–	–	–	0,6–0.7
2.	Stan analityczny													
2.1.	Wilgoć	W^a	%	1,0	2,0	2,42	2,7	–	–	–	–	–	–	–
2.2.	Części lotne	V^a	%	–	–	–	53,8	–	–	–	–	–	–	41,0–42,4
2.3.	Siarka całkowita	S_t^a	%	0,8	0,5	0,51	–	–	–	–	–	–	0,11	–
2.4.	Popiół	A^a	%	31,2	39,2	58,92	43,5	–	–	–	–	–	73,6	–
2.5.	Ciepło spalania	Q_s^a	MJ/kg	23,0	17,3	11,1	–	–	20,3	14,7	–	–	–	–
2.6.	Wartość opałowa	Q_i^a	MJ/kg	–	–	10,6	–		–	–	13,0	–	–	–

Objaśnienia: [1] frakcja 0–8 mm wydzielona z dokruszania odpadów węglowych z hałdy.

Rys. 1.2. Wygląd i konsystencja mułu węglowego wydobywanego z osadnika ziemnego (fot. J.J. Hycnar)

jest na prawie 11 mln Mg [Grudziński 2005], 16,5 mln Mg [Sobko i in 2011] oraz przeszło 20 mln Mg [Hycnar i Kadlec 2003], natomiast bieżąca produkcja odpadów węglowych wynosi około 5 mln t rocznie. Duże różnice bilansowe wynikają z przyjętych zasad zaliczania wyłączanych składowisk mułów, niejednokrotnie przekazanych do zagospodarowania miejscowym władzom terenowym.

Zdeponowane drobnoziarniste odpady węglowe bardzo różnią się pod względem kaloryczności i udziału poszczególnych grup kalorycznych, a mianowicie [Hycnar i Kadlec 2003]:

- muły o wartości opałowej >15 MJ/kg, stanowią 9,3%,
- muły o wartości opałowej od 12 do 15 MJ/kg, stanowią 6,8%,
- muły o wartości opałowej od 10 do 12 MJ/kg, stanowią 22,3%,
- muły o wartości opałowej < 10 MJ/kg, stanowią 61,5%.

Oznacza to, że największą ilość odpadów stanowią muły węglowe o kaloryczności poniżej 10 MJ/kg. Pozostałe drobnoziarniste odpady węglowe mają duże wartości kaloryczności i są wykorzystywane jako samodzielne paliwo lub jako dodatek do paliw tradycyjnych. Niektóre z nich nie powinny być spalane w tradycyjny sposób ze względu na zawartość składników toksycznych, takich jak: metale ciężkie, siarka i wielopierścieniowe węglowodory aromatyczne (WWA). Przeróbka drobnoziarnistych odpadów węglowych i materiałów węglonośnych oraz ich mieszanin umożliwia ich zagospodarowanie jako paliwa spełniającego wymagania energetyczne, a także kryteria ekologiczne i ekonomiczne [Hycnar i Górski 2003, Borowski 2008].

Celem niniejszej monografii jest przedstawienie i analiza wyników badań oraz wdrożeń nad możliwościami podwyższenia energetycznej wartości drobnoziarnistych odpadów węglowych dla ich zagospodarowania jako paliwa podstawowe lub alternatywne.

Opisane badania i wdrożenia mają szczególnie duże znaczenie w aspekcie zakazu składowania od 2016 roku odpadów węglowych o wartości opałowej powyżej 6 MJ/kg. W latach 90. ubiegłego wieku nastąpił przełom w strategii wydobycia węgla kamiennego, zrezygnowano bowiem z modelu ilościowego wydobywania węgla na rzecz podwyższenia jakości jego sprzedaży. Wyłączono z eksploatacji najbardziej zasiarczone i zapopielone pokłady, z równoczesnym wdrożeniem wzbogacania urobku węglowego w szerokim zakresie. Nastąpiła poprawa jakości paliw węglowych, szczególnie dla energetyki oraz zwiększenie ilości odpadów drobno-, średnio- i gruboziarnistych. Odpady węglowe wykorzystywane są w energetyce, głównie jako paliwa uzupełniające. W oparciu o wyniki badań w wielu przypadkach wykazano irracjonalność ich stosowania w naturalnej postaci. Dużo większe korzyści uzyskano stosując muły węglowe i odpady poflotacyjne po odpowiedniej przeróbce.

Autorzy mają nadzieję, że omówione zagadnienia przyczynią się do efektywniejszego wykorzystania węgla zawartego w drobnoziarnistych odpadach węglowych, w górnictwie oraz w energetyce, zmniejszając ich ujemne oddziaływanie na środowisko i zwiększając efekty ekonomiczne.

2. ZAGADNIENIA ZWIĄZANE Z OBNIŻANIEM ZAWODNIENIA DROBNOZIARNISTYCH ODPADÓW WĘGLOWYCH

2.1. Problematyka uwodnienia odpadów węglowych

Dostarczane do obiektów energetycznych drobnoziarniste odpady węglowe znacząco się różnią zawartością wody, która waha się w granicach od 14 do 48%. Najniższą zawartością wody charakteryzują się często muły i odpady poflotacyjne wydobywane z opróżnianych osadników, poddanych okresowemu sezonowaniu (napowietrzeniu) w warunkach atmosferycznych oraz muły i odpady poflotacyjne specjalnie suszone.

Drobnoziarniste odpady węglowe najczęściej wydzielane są z obiegów gospodarki wodno-mułowej poprzez ich zagęszczenie w osadnikach promieniowych lub lamelowych, z których zagęszczona zawiesina podawana jest do dalszego odwodnienia na urządzeniach filtracyjnych lub jest kierowana do osadników ziemnych.

Dla ograniczenia dostaw niskiej jakości mułów węglowych, energetyka stosuje cennik progresywny uzależniony od wartości opałowej lub zawartości wody. W przypadku dostarczenia mułów niespełniających wymagań energetyki, koszty dostawy obciążają dostawcę. Tym niemniej, dostarczane do energetyki muły węglowe i odpady poflotacyjne tylko w bardzo małych ilościach są suszone.

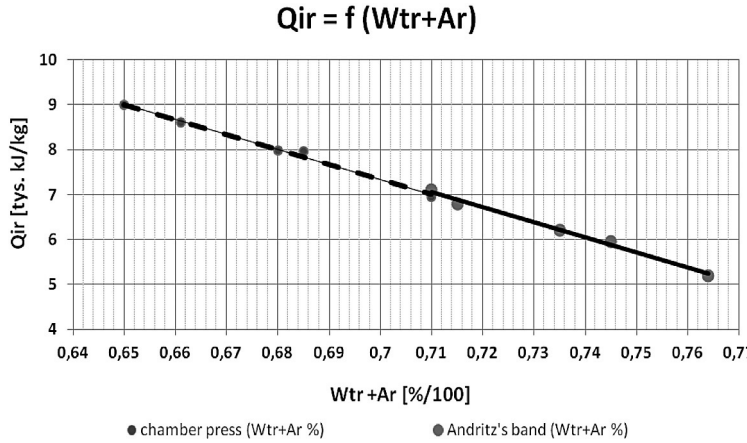
W latach 60. ubiegłego wieku w elektrowni Miechowice opalanej pyłem węglowym zbudowano i uruchomiono licencyjną suszarnię pneumatyczną opalaną podsuszonymi mułami. Muły węglowe pochodzące z sąsiedniej kopalni (KWK Miechowice) suszono do około 10% zawartości wody i następnie mieszano z pyłem węglowym w centralnej instalacji nawęglania lub w paleniskach kotłów. Po około roku instalacja ta została wyłączona z eksploatacji z powodu powtarzających się wybuchów pyłu węglowego w suszarni.

Obecnie, tylko w nielicznych przypadkach muły węglowe i odpady poflotacyjne suszone są w suszarniach bębnowych, głównie jako składniki mieszanek węglowych przeznaczonych dla energetyki.

2.2. Urządzenia filtracyjne

Wykazano, że zawartość wody w plackach mułowych i ich konsystencja w dużym stopniu zależy od rodzaju zastosowanych urządzeń filtracyjnych. Uśrednione roczne wyniki wykazały, że placki wydzielane z filtrów taśmowych

zawierały 40,9% wody, natomiast placki filtracyjne z pras komorowych zawierały 29,2% wody (rys. 2.1).



Rys. 2.1. Wpływ rodzaju urządzeń filtracyjnych na zawartość balastu i wartość opałową mułów węglowych

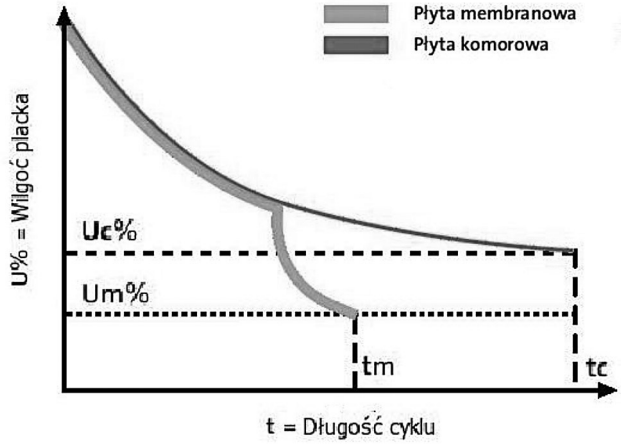
Stosowanie filtrów taśmowych w porównaniu do pras komorowych, zwiększało ilość mułów do zagospodarowania o około 12% oraz zubożyło energetycznie muły średnio o 1375 kJ/kg.

Prowadzone rozeznania doboru urządzeń filtracyjnych wykazały, że przy zastosowaniu w pełni zautomatyzowanych pras komorowo-membranowych z przedmuchem powietrza, dwustopniowym zapełnianiem komór filtracyjnych, z dosuszaniem za pomocą sprężonego powietrza, w zależności od rodzaju węgla/odpadu, placki charakteryzują się wysoką wytrzymałością na penetrację i najniższymi zawartościami wody, nawet o 8 jednostek wilgotności (najniższa zarejestrowana zawartość wody w placku mułowym wynosiła 17%). Wpływ zastosowanego rozwiązania prasy filtracyjnej na stopień odwodnienia nadawy ilustruje rysunek 2.2 [Piechaczek i in. 2012].

Przez zastosowanie mieszanego zespołu płyt, membranowych na zmianę z płytami komorowymi, sprężonego powietrza, dosuszania placków itp., w przypadku odwadniania zawiesin sedymentu (80% stanowią ziarna poniżej 63 μm) [Kot 2012, Piechaczek i in. 2012], uzyskano m.in.:

- odzysk części stałych: minimum 98%,
- produkt handlowy o parametrach: W_t^r – średnio 26,4% i A^a – średnio 14,7%, przy wydajności instalacji 8,8 do 9,2 Mg/h,
- pełne zamknięcie obiegu wodno-mułowego.

W przypadku KWK Jas-Mos, odwadnianie odcieku z części sedymentacyjnej w nowo wybudowanej instalacji wyposażanej w prasę komorowo-membranową GTH 1500 generuje koszty netto w wysokości 50,30 zł/Mg [Kot 2012].



Rys. 2.2. Schemat ideowy porównania efektów odwodnienia nadawy w zależności od zastosowanej prasy filtracyjnej; Uc% – wilgotność przy płytach komorowych, Um% – wilgotność przy płytach membranowych, tm – długość cyklu przy płytach membranowych, tc – długość cyklu przy płytach komorowych

Wyniki porównania efektów i kosztów odwadniana odpadów poflotacyjnych w prasach filtracyjnych PF ROW 570 i w prasie komorowej typu GHT 2000 P9, przedstawiono w tabeli 2.1. Koszty odwadniania 1 Mg odpadów flotacyjnych w prasie GHT 2000.P9 są ponad trzykrotnie niższe od kosztów odwadniania 1 Mg odpadów w prasie PF ROW 570 [Lenartowicz i in. 2014].

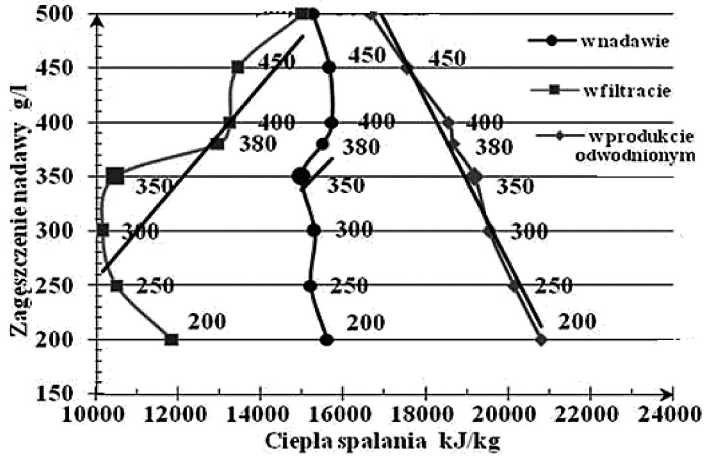
Do odwadniania mułów stosowane są również wirówki sedymentacyjne [A new generation... 2004]. W przypadku kopalni Ziemowit, gdzie zastosowano wirówki sedymentacyjno sitowo-bezsitowe, najlepsze wyniki odwodnienia mu-

Tabela 2.1. Porównanie zużycia mediów i kosztów odwodnienia odpadów poflotacyjnych w zależności od stosowanych pras filtracyjnych w KWK Krupiński [Lenartowicz i in. 2014]

L.p.	Parametr	Jednostki	Prasa komorowa	
			tradycyjna PF ROW 570	nowoczesna GHT 2000 P9
1.	Zużycie mediów:			
1.1.	- zużycie prądu	kWh/cykl	464,25	146,39
1.2.	- zużycie wody	m^3/cykl	0,00	1,56
1.3.	- zużycie powietrza	m^3/cykl	0,00	40,00
2.	Koszty eksploatacyjne:			
2.1.	- energia elektryczna	zł/cykl	157,85	49,77
2.2.	- woda	zł/cykl	0,00	2,12
2.3.	- sprężone powietrze	zł/cykl	0,00	1,52
2.4.	- obsługa prasy	zł/cykl	56,50	19,16
2.5.	**Suma**	**zł/cykl**	**214,35**	**72,57**
3.	Koszty odwadniania 1 Mg odpadów poflotacyjnych	zł/Mg	**16,50**	**4,80**

łów uzyskano przy nadawie z odmulnika Dorra o zagęszczeniu około 350 g/dm^3 [Wypych i Śliwińska 2010]. Wpływ zagęszczenia nadawy na wyniki separacji i kaloryczność mułu ilustruje rysunek 2.3. Uzysk fazy stałej, w porównaniu do jej zawartości w nadawie, wynosi do 75%. Różnica w zawartości fazy stałej wynika z mechanizmu działania wirówki, nie tylko odwadniającej, ale również klasyfikującej, w wyniku czego filtrat zostaje wzbogacony w ziarna o wielkości poniżej 63 μm oraz związki siarki, a wydzielany muł jednocześnie zostaje wzbogacony w macerat węglowy.

W wyniku zagęszczenia, klasyfikacji i wzbogacenia zawiesin wodno-mułowych (o wartości opałowej 9500 kJ/kg) w procesie wirowania uzyskuje się odwodniony muł o wartości opałowej powyżej 14 000 kJ/kg, dozowany do miałów o wartości opałowej 19 000 kJ/kg. Zastosowanie wirówki sedymentacyjnej przyniosło znaczne efekty ekonomiczne z tytułu zwiększenia produkcji miału oraz obniżenia kosztów wywozu i deponowania mułów o 75%.

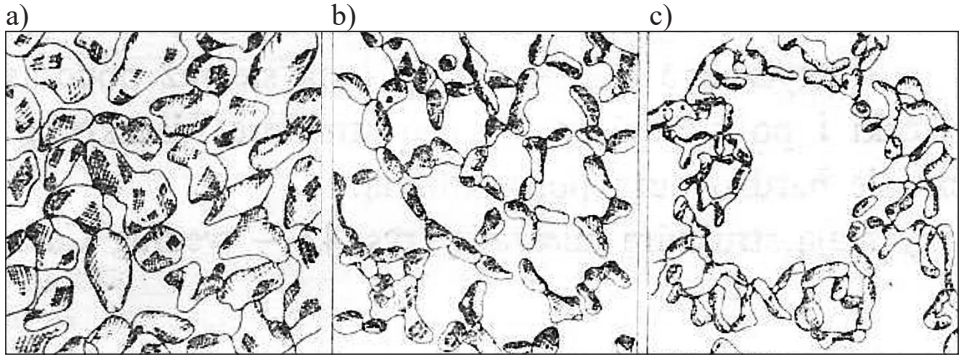


Rys. 2.3. Wpływ zagęszczenia nadawy do wirówki sedymentacyjnej na ciepło spalania filtratu i produktu odwodnionego [Wypych i Śliwińska 2010]

2.3. Doziarnianie nadawy do filtracji

Badania procesu sedymentacji zawiesin wodno-mułowych i procesów ich rozdziału na przeponach filtracyjnych wykazują bardzo duże zróżnicowanie uzyskiwanych wyników w zależności od rodzaju, pochodzenia i składu mułów węglowych. Przeprowadzone testy sedymentacji w leju Imhoffa wykazały między innymi, że czas ustabilizowania się procesu osiadania fazy stałej z zawiesin wodno-mułowych z badanej kopalni był od kilka do kilkadziesiąt razy dłuższy niż zawiesin wodno-mułowych z innych kopalń (Silesia, Gliwice itd.).

Duże różnice w przebiegu sedymentacji wynikają z odmienności struktur fazy stałej zawartej w wodzie i jej w roztworach (rys. 2.4). W strukturach ziarnistych, poszczególne ziarna opadają swobodnie pod wpływem działania sił grawitacji, ponadto taka zawiesina na przeponach filtracyjnych łatwo ulega odwodnieniu, gdyż w większość występuje woda grawitacyjna.



Rys. 2.4. Przykłady struktur fazy stałej w zawiesinach wodno-mineralnych [Wiłun 1987]; a – struktura ziarnista, b – struktura komórkowa, c – struktura kłaczkowa

Struktury komórkowe i kłaczkowe są charakterystyczne dla zawiesin iłów w których występuje woda „związana" w postaci wody adhezyjnej i adsorpcyjnej. Zawiesiny iłowe należą do trudno sedymentujących i trudnych do odwodnienia na przeponach filtracyjnych, co wynika z tworzenia się warstw solwatacyjnych na ziarnach, i w przypadku układów koloidalnych tworzenia żeli ze strukturami, określanych jako warstwy solwatacyjne.

W przypadku zawiesin koloidalnych (zol/żel) poprawę sedymentacji zapewniają odpowiednio dobrane flokulanty, a intensyfikację filtracji najskuteczniej gwarantuje prowadzenie procesu pod ciśnieniem oraz przez powiększanie powierzchni filtracji.

Zawiesina wodno-mułowa stanowiąca mieszaninę iłów z ziarnami węgla i przerostów węglowo-skalnych, należy do bardzo trudnych do odwadniania. Na efekt wydzielania i odwodnienia fazy stałej na przeponach porowatych duży wpływ ma ciśnienie prowadzonego procesu filtracji. Tym należy tłumaczyć mniejsze zawodnienie placka mułu węglowego z pras komorowych niż z filtrów taśmowych.

Dodatek flokulanta do zawiesiny kierowanej na filtr taśmowy powoduje utrwalenie żelu zawiesiny, co zapewnia właściwe obłożenie taśmy filtracyjnej zawiesiną podlegającą odwodnieniu i przeciwdziała wylewaniu się zawiesiny poza część roboczą taśmy filtracji, ale równocześnie żeluje wodę w zawiesinie.

Dla poprawienia efektu odwodnienia i zagęszczenia mułów w procesie odwadniania w filtrach, przebadano wpływ dodawania do nadawy frakcji piaskowej lub piaskowo-żwirowej stałych minerałów, których obecność oddziałuje na przyspieszenie odwodnienia zawiesin. W tym celu, przeprowadzono próby

z dodatkiem popiołów dennych z palenisk fluidalnych (El. Jaworzno II i EC Katowice) i dodatkiem popiołu lotnego z paleniska pyłowego (El. Jaworzno III) do nadawy, z dodatkiem i bez dodatku flokulanta [Hycnar 2002a]. Porównanie podstawowej charakterystyki fizykochemicznej popiołów podano w tabeli 2.2.

Tabela 2.2. Charakterystyka fizyko-chemiczną popiołów zastosowanych w badaniach i próbach doziarniania zawiesin trudno oddających wodę

Wyszczególnienie	Popiół denny		Popiół lotny
	El. Jaworzno II	EC Katowice	El Jaworzno III
Gęstość, g/cm^3	2,63	2,65	2,17
Skład ziarnowy, %:			
> 4 mm	5,3	8,0	0,0
4 – 2 mm	4,8	10,0	0,0
2 – 1 mm	6,7	10,0	0,0
1 – 0,50 mm	10,2	10,0	0,0
0,50 – 0,25 mm	26,9		2,9
0,25 – 0,125 mm	40,9	58,0	20,1
0,125 – 0,063 mm	3,5		30,2
< 0,063 mm	1,7	4,0	46,8
Straty przy prażeniu, %	0,81	1,46	3,60
Zawartość, %:			
- subst. rozpuszczalnych w wodzie	1,04	4,3	1,01
- związków siarki jako SO_3	9,6	14,86	0,78
- związków wapnia jako CaO	23,2	16,39	5,81
- wolnego wapnia jako CaO	11,9	2,86	0,21
- związków krzemu jako SiO_2	46,6	41,92	53,0
- związków glinu jako Al_2O_3	10,1	17,73	21,1

Zastosowane do badań i prób popioły różnią się następującymi parametrami:

- uziarnieniem – popioły denne zawierają ziarna o rozmiarze powyżej 0,125 mm w przeszło 90% objętości, natomiast w popiele lotnym znajduje się przeszło 80% ziaren poniżej 0,125 mm,
- zawartością związków wapnia – popioły denne z palenisk fluidalnych mają kilkakrotnie wyższą zawartość związków wapnia niż popioły lotne z kotłów pyłowych,
- zawartością wolnego wapnia – popioły denne charakteryzuje duża zawartością niezwiązanych związków wapnia, które w popiołach lotnych z palenisk pyłowych występują w ilościach śladowych.

Doziarnienie zawiesiny dodatkiem frakcji piaskowej lub żwirowej, zawierającej ziarna o wyższej gęstości i ciężarze od zawiesiny powoduje, że opadające ziarna tworzą dodatkową powierzchnię filtracyjną (kanał opadającego ziarna) oraz oddziałują destrukcyjnie na warstwy solwatacyjne.

Badania wpływu dodatku popiołu na efekt odwodnienia zawiesiny wodno-mułowej prowadzono na przemysłowym filtrze taśmowym firmy Andritz poprzez wylewanie nadawy na taśmę filtracyjną. Nadawę przygotowywano przez zmieszanie 100 litrów zawiesiny wodno-mułowej z określoną dawką popiołu dennego z El. Jaworzno II lub EC Katowice oraz z popiołem lotnym z El. Jaworzno III, w stanie „naturalnym", suchym bez dodatkowej obróbki.

Ocenę dodatku popiołów prowadzono w porównaniu do zjawisk występujących przy odwodnieniu zawiesiny wodno-mułowej bez dodatku popiołu, a mianowicie przez:

- ocenę rozlewności nadawy na taśmę,
- ocenę zachowania się rozlanej nadawy na taśmę,
- ocenę zrzutu odwodnionego mułu,
- ocenę odwodnionej próbki mułu,
- oznaczenie zawartości wody w odwodnionej próbce.

Badania wpływu dodatku popiołu dennego z El. Jaworzno II (2,25 do 50 kg/100 dm^3) prowadzono z zawiesiną wodno-mułową, z dodatkiem i bez dodatku flokulanta [Hycnar i in. 2014]. Uzyskane wyniki badań zestawiono w tabelach 2.3 oraz 2.4.

Dodatek popiołu dennego do zawiesiny wodno-mułowej z flokulantem pozytywnie wpływa na odwodnienie mułu na taśmie filtracyjnej. Zmniejszenie ilości

Tabela 2.3. Charakterystyka procesu filtracji i właściwości mułów uzyskiwanych z zawiesin wodno-mułowych z dodatkiem popiołu dennego z El Jaworzno II (seria I)

Nr próbki	Zawartość w zawiesinie wodno-mułowej, faza stała 362 mg/l		Ocena wzrokowa				Zawartość, %			Wartość opałowa kJ/kg
	flokulant	popiół denny	łatwość rozlewania	rozlewność na taśmie	zrzut z taśmy próbki	stan fizyczny próbki odwodnionej	W	A	S	
1.	+	0	normalna	normalna	normalny	silnie-wilgotna	48,5	31,3	0,3	4 063
1.1.	+	18	normalna	normalna	normalny	sucho-wilgotna	–	–	–	–
1.2.	+	9	normalna	normalna	normalny	sucho-wilgotna	40,1	40,5	0,8	3 710
1.3.	+	4,5	normalna	normalna	normalny	wilgotna	40,6	46,8	0,9	3 550
1.4.	+	2,25	normalna	normalna	normalny	silnie-wilgotna	34,6	37,1	0,6	4 157
2.	0	0	normalna	wylewa się	normalny	brak	–	–	–	–
2.1.	0	9	normalna	wylewa się	maty	brak	–	–	–	–
2.2.	0	18	normalna	–	więcej	zwiększony	34,8	44,1	1,3	3 978
2.3.	0	36	normalna	–	duży	sucho-wilgotna	31,7	51,8	2,7	2 568

Tabela 2.4. Charakterystyka właściwości mułów uzyskiwanych z zawiesin wodno-mułowych z dodatkiem popiołu dennego z El Jaworzno II (seria II)

Nr próbki	Nr analizy	Zawiesina wodno-mułowa		Qi^r	A_r	W_t^r	S_t^r	W_{exr}	$A_r + W_{rt}$	Uwagi
		flokulant, %	popiół denny, kg	kJ/kg	%	%	%	%	%	
1.	4 625	100	0	5 639	27,0	40,0	0,44	45,47	75,02	wzorzec
1.1.	4 649	100	4,5	6 082	31,79	36,2	1,10	31,79	73,20	
1.2.	4 650	100	9	4 949	40,8	35,4	1,66	31,84	76,16	
1.3.	4 651	100	18	5 134	44,4	31,6	1,86	28,50	75,97	
2.		50	0							
2.1.	4 647	50	18	4 201	46,4	31,8	2,29	29,06	78,16	
2.2	4 648	50	36	2 532	57,0	25,6	2,84	23,42	82.58	
3.		0	0							
3.1.	4 626	0	18	3 877	44,4	35,2	1,41	32,5	79,55	
3.2.	4 627	0	36	3 339	45,6	35,0	2,24	32,26	80,56	
3.3.	4 628	0	50	2 886	50,7	31,2	2,43	28,96	81,93	

flokulanta o 50% zwiększa efekt odwodnienia mułu. Dodatek popiołu dennego do zawiesiny wodno-mułowej nie zawierającej flokulanta, wpływa pozytywnie tylko przy dużych dawkach popiołu. Zawiesiny bez flokulanta wylewają się z taśmy i nie gwarantują odwodnienia mułu, także dodatek masy 9 kg popiołu do zawiesiny nie pozwala na jej odwodnienie (wylewa się).

Analogiczne badania i próby prowadzono z dodatkiem popiołu dennego z EC Katowice i z popiołem lotnym z El. Jaworzno III. Uzyskane wyniki zestawiono w tabelach 2.5 i 2.6.

Z analizy uzyskanych wyników wpływu dodatku popiołów do zawiesin wodno-mułowych na proces filtracji i właściwości mułów węglowych

Tabela 2.5. Charakterystyka właściwości mułów uzyskiwanych z zawiesin wodno-mułowych z dodatkiem popiołu dennego z EC Katowice

Nr próbki	Nr analizy	Zawiesina wodno-mułowa		Qi^r	A_r	W_t^r	S_t^r	W_{exr}	$A_r + W_{rt}$	Uwagi
		flokulant, %	popiół denny, kg	kJ/kg	%	%	%	%	%	
1.	5 355	100	0					43,50	73,24	wzorzec
1.1.	5 283	100	4,5	5 475	31,4	43,3	0,97	40,55	74,72	
1.2.	5 282	100	9	4 751	37,4	38,9	1,67	36,33	76,25	
1.3.	5 281	100	18	5 382	39,0	34,6	1,73	31,56	74,51	
1.4.	5 280	100	36	4 015	47,2	31,4	2,65	28,61	78,53	
2.		0	0							
2.1.	5 359	0	4,5					37,11	77,03	
2.2.	5 358	0	9					29,68	81,03	
2.3.	5 357	0	18					27,05	80,98	
2.4.	5 356	0	36					27,36	80,03	

Tabela 2.6. Charakterystyka właściwości mułów uzyskiwanych z zawiesin wodno-mułowych z dodatkiem popiołu lotnego z El Jaworzno III

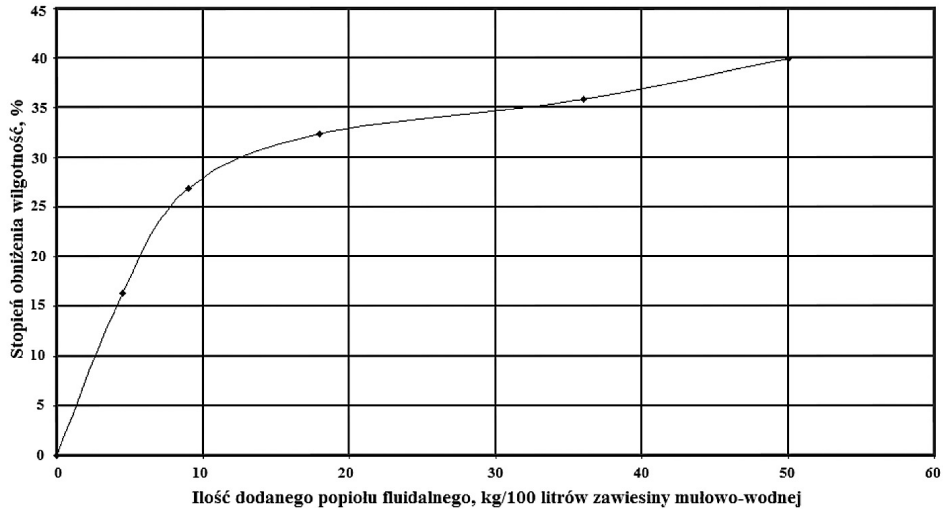
Nr prób-ki	Nr ana-lizy	Zawiesina wodno-mułowa		Qi^r	A_r	W_t^r	S_t^r	W_{exr}	$A_r + W_{rt}$	Uwagi
		flokulant, %	popiół denny, kg	kJ/kg	%	%	%	%	%	
1.	5 432	100	0	5 741	29,5	45,2	0,44	42,97	74,64	wzorzec
2.		0	0							
2.1.	5 434	0	18	3 503	52,8	31,3	0,33	29,92	84,12	
2.2.	5 433	0	36	4 314	46,0	35,1	0,36	33,45	81,10	
10.	4 774	100	0							
10.1.	4 816	100	4,5	5 986	34,2	38,6	0,87	35,26	72,83	
10.2.	4 815	100	9	5 091	38,8	36,2	1,35	32,74	75,09	
10.3.	4 814	100	18	4 673	67,4	33,3	1,74	30,27	97,94	
20.		50	0							
20.1.	4 812	50	18	4 422	44,2	32,7	1,39	29,45	76,16	
20.2.	4 813	50	36	4 716	42,8	33,4	1,67	29,62	76,18	
30.		0	0							
30.1.	4 809	0	18	4 118	46,1	31,8	1,55	28,62	77,96	
30.2.	4 810	0	36	2 839	54,7	26,8	2,48	24,14	81,29	
30.3.	4 811	0	50	2 839	54,8	26,7	2,22	24,32	81,45	

wydzielanych na filtrze taśmowym wynika, że uzyskuje się zmniejszenie zawilgocenia testowanych mułów. Przeprowadzone badania na zawiesinach wodno-mułowych (362 mg/dm^3) odwadnianych na przemysłowym filtrze taśmowym wykazały, że:

- dodatek popiołów w ilościach od 4 do 26% do zawiesiny wodno-mułowej z flokulantem zmniejsza zawodnienie placka mułowego od 18 do 34%,
- dodatek popiołów w ilościach od 15 do 26% do zawiesiny wodno-mułowej z 50% dawki flokulanta zmniejsza zawodnienie placka mułowego od 34 do 40%,
- dodatek popiołów w ilościach od 15 do 33% do zawiesiny wodno-mułowej bez flokulanta zmniejsza zawodnienie placka mułowego od 32 do 40%,
- uzyskiwane odwodnienia placków przy zastosowaniu popiołów wykazały możliwość zrezygnowania z dodawania flokulanta do odwadniania zawiesin wodno-mułowych,
- rodzaj zastosowanego popiołu nie wykazuje zasadniczych różnic w efektach odwodnienia mułów węglowych.

Wpływ dodatku popiołów do zawiesin wodno-mułowych na stopień odwodnienia placków mułowych na filtrze taśmowym ilustruje rysunek 2.5.

Przeprowadzone próby weryfikacyjne z nadawą 25 m^3 z dodatkiem 16,7% popiołu dennego (odpowiednik 8 kg na 100 dm^3) pozwoliły obniżyć zawartość wilgoci przemijającej do 29% w plackach otrzymywanych mułów, gdy średnioroczna wilgotność w otrzymywanych plackach wynosiła 40,9%.



Rys. 2.5. Przebieg zależności stopnia odwadniania mułu węglowego od ilości dodawanego popiołu do zawiesiny wodno-mułowej (średnia ze wszystkich badań obejmująca popioły denne i lotny oraz zawiesiny z i bez flokulanta)

Próby na modelu prasy komorowej wykazały natomiast, że dodatek popiołu do zawiesin jest bardziej efektywny niż przy zastosowaniu filtrów taśmowych. Obserwacje te wskazują na możliwość większego odwadniania placków mułowych przy mniejszym dodatku materiału doziarniającego.

Przeprowadzone próby miały na celu nie tylko określenie możliwości obniżenia zawartości wody w plackach mułowych za pomocą dodatku popiołów, ale także ich wpływu na konsystencję otrzymywanych placków. Dodatek popiołów nie tylko zwiększa drożność wody w strukturze masy odwadnianego mułu, ale także zmienia strukturę placków z pastowatej na gęstoplastyczną, czasem zestaloną.

Deponowane zawiesiny w osadnikach ziemnych, podlegające sedymentacji grawitacyjnej, po dodaniu popiołów ulegają szybciej sedymentacji i tworzą bardziej zagęszczony osad, przy równoczesnym szybszym odzysku wody nadosadowej.

Doświadczenia te mają szczególne znaczenie dla wdrażania technologii bezpiecznego składowania mułów w środowisku i ewentualnego ich wykorzystania do rekultywacji i rewitalizacji terenów zdegradowanych oraz zamykania składowisk odpadów komunalnych [Halat i Hycnar 2008, Wróbel i in. 2012]. W przypadku zastosowania popiołów fluidalnych do przyspieszenia i uefektywnienia procesów filtracji/odwadniania zawiesin wodno-mułowych jak również jako dodatku do placków z tradycyjnych procesów, otrzymywane muły z popiołami z upływem czasu ulegają naturalnym procesom petryfikacji stając się odpornymi na działanie czynników atmosferycznych i nie zagrażając środowisku [Hycnar 2006b].

Uzyskane wyniki wskazują także na możliwość sterowania właściwościami placków mułowych jako paliwa, poprzez zastąpienie popiołów dodatkiem koncentratów węglowych (klasa ziarnowa powyżej 0,05 mm, wydzielana z mułów). Ponadto, zawiesiny zawierające dodatek popiołów wapniowych (fluidalne i rodzaju wapniowego), w postaci mułów stanowią dobry surowiec do ich granulowania lub bezpośredniego spalania w paleniskach fluidalnych [Szymkiewicz i in. 2012].

Na celowość stosowania popiołów ze spalania węgla do odwadniania zawiesin i osadów zwrócono również uwagę w pracach zagranicznych, w szczególności w USA i Wielkiej Brytanii [Hycnar i in. 2014b].

Firma Union Carbide Corporation prowadziła badania nad oczyszczaniem własnych ścieków organicznych. Prace zakończono instalacją pilotową, zastępując chlorek żelaza i wapno popiołami lotnymi, uzyskując wzrost zagęszczenia osadów z 33% do 67% fazy stałej [Nelson i Brattlof 1993].

Obszerne prace Uniwersytetu w Notre Dame (Indiana) skoncentrowano nad wpływem dodatku popiołów do wód kopalnianych, ścieków biologicznych i wód śródlądowych, analizując ich wpływ na strącanie fosforanów, filtrację, neutralizację i usuwanie zanieczyszczeń organicznych. Interesujące wyniki uzyskano z oczyszczania wód zeutrofizowanych jezior. W przypadku jezior o małym przepływie wody fosforany zatrzymywane są w warstwie dennej, zmniejszając szansę podtrzymywania życia roślinnego. W takich przypadkach dodanie popiołu powoduje przyspieszenie wypadania fosforanów i innych zanieczyszczeń i następnie „uszczelnienie" osadów dennych, zapobiegając dalszemu uwalnianiu fosforanów [Watts i Trainer 2011].

Kolejny przykład to zastosowanie popiołów do oczyszczenia wód w Walt Disney World na Florydzie. W ciągu zaledwie 30 minut nastąpiło oczyszczenie wód od fosforanów i cząstek stałych, bez stosowania kosztownych tradycyjnych urządzeń filtracyjnych i biologicznego złoża [Fecko i Tora 2013]. Znane są również pozytywne wyniki stosowania popiołów do oczyszczania ścieków w przemyśle celulozowo-papierniczym.

2.4. Stosowanie środków powierzchniowoczynnych

Prowadzone próby odwadniania miałów węglowych w wirówkach wykazały, że pomimo intensywnego odwodnienia ziaren węgla obserwuje się również występowanie na ich powierzchniach kropel wody. Krople wody nie oderwały siły odśrodkowe, natomiast poddane bocznemu podmuchowi powietrza łatwo odpadają z powierzchni ziaren. Siły adhezji woda-węgiel w omawianych warunkach są znacznie większe od oddziaływujących sił odśrodkowych. Natomiast, łatwość ich usuwania poprzez podmuch powietrza z powierzchni ziaren węgla wynika z bardzo niskich sił tarcia tocznego kropel wody. Obserwacje te wskazują

na celowość stosowania przedmuchu powietrza na odwodniony węgiel z wirówek oraz na przesypach dla usunięcia resztek wody oraz stosowanie środków powierzchniowoczynnych dla obniżenia różnic napięcia powierzchniowego na granicy faz węgiel-woda.

W przypadku odwadniania zawiesin mułów małoilastych w wodzie na wibracyjnym sicie odwadniającym (w porównywalnych warunkach), dodatek 0,1 do 0,3% środka powierzchniowoczynnego (pochodna oksyetylenowa alkoholi tłuszczowych) powodował zmniejszenie zawartości wody w mułach o dodatkowe 15 do 20%. Nie stwierdzano natomiast tak znaczącego wpływu dodatku środków powierzchniowoczynnych na zawiesiny mułów silnie zailonych.

2.5. Odwadnianie zawiesin wodno-mułowych w porowatych zbiornikach elastycznych

Do odwadniania i składowania różnorodnych zawiesin, szlamów i mułów stosowane są elastyczne zbiorniki i przepony wykonane z geotechnicznych tkanin i folii, charakteryzujących się mikroporowatością przepuszczającą cząstki wody. W zależności od zasady działania, można wyróżnić:

- przepony filtracyjne z rurami drenażowymi, np. Draintube,
- zbiorniki elastyczne z geotechnicznej tkaniny, których cała powierzchnia umożliwia przenikanie wody z zawartych zawiesin na zewnątrz przepony, np. TenCate Geosynthetics.

Przepony z rurami drenażowymi (rys. 2.6), najczęściej stosowane są do tworzenia okresowych zbiorników zawiesin, ciągłego odwadniania osadników zawiesin oraz do uszczelniania den tradycyjnych osadników zawiesin.

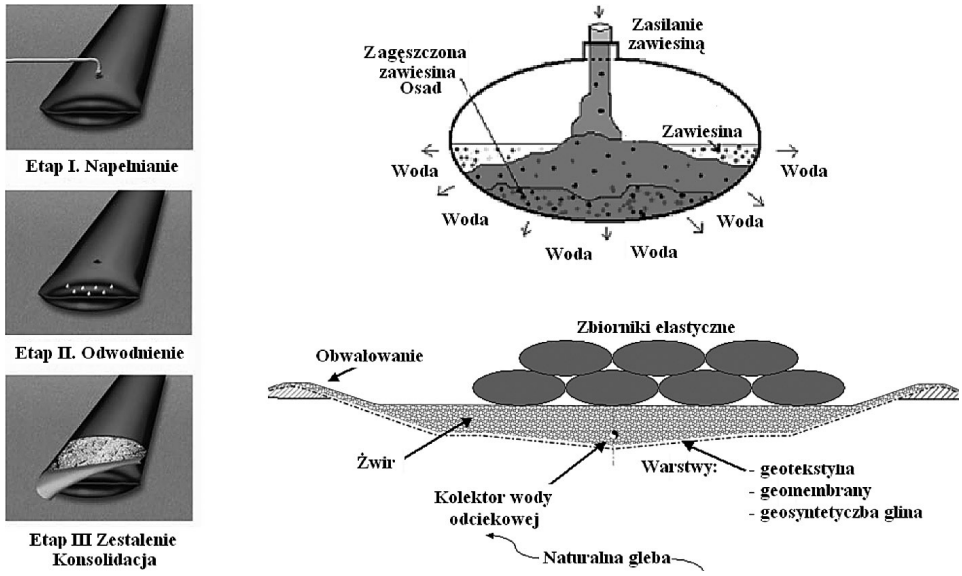
Rys. 2.6. Przepony z rurami drenażowymi [Hycnar, Kadlec 2001]

Zbiorniki wykonane z mikroporowatych przepon (geotkanin) (rys. 2.7), których cała powierzchnia czynna umożliwia przenikanie wody z zawartych zawiesin na zewnątrz przepony, np.TenCate Geosynthetics, GeoTube, Geotextile Tubes.

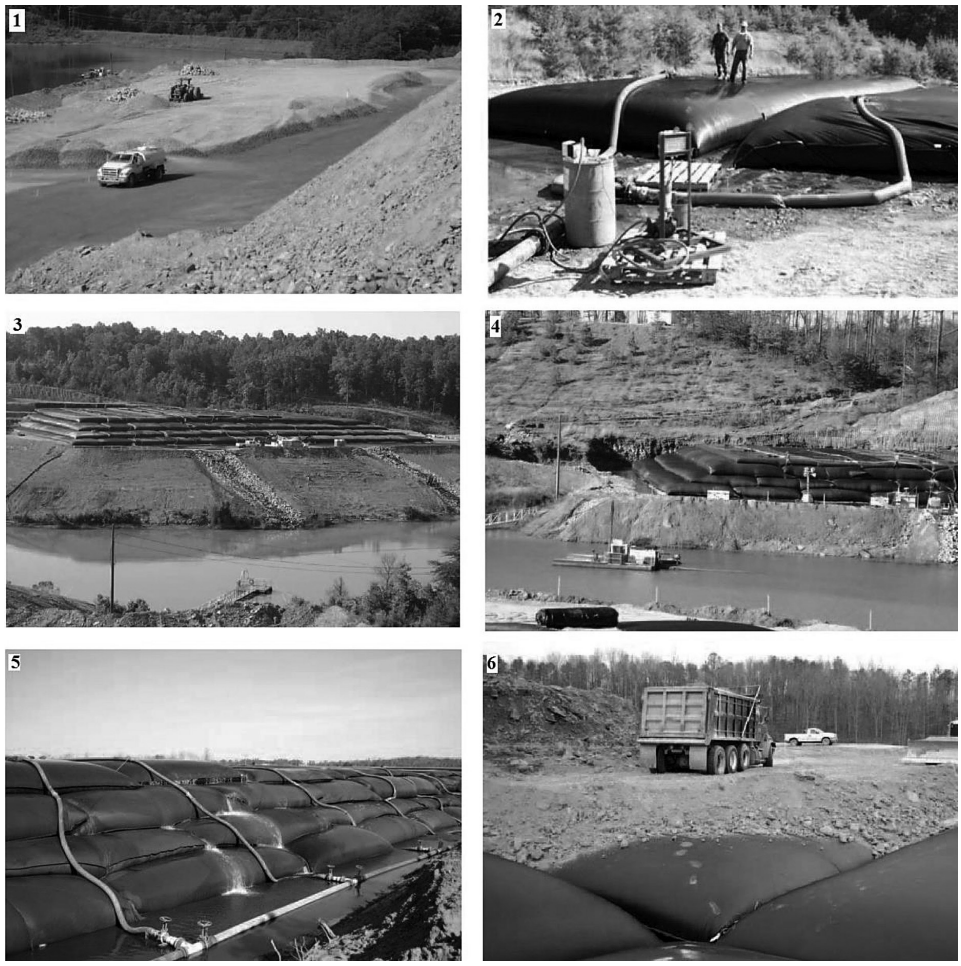
Coraz częściej spotyka się stosowanie elastycznych zbiorników do odwadniania wodnych zawiesin mułów w górnictwie rud i węgla [de Meello i in. 2006, Dijcker i in. 2011, Watts i Trainer 2011, Yilmaz 2011]. Intensywność odwadniania mułów wzrasta po dodaniu do zawiesin flokulantów (często określane jako polimery, na bazie pochodnych poliakryloamidów) oraz po poddaniu zbiorników dodatkowym naciskom.

Elastyczne zbiorniki układane są w kilka warstw – jedna na drugiej. Zapełnione zbiorniki elastyczne są opróżniane i ponownie wykorzystywane, lub są stosowane do kształtowania terenów zdegradowanych i budowli hydrotechnicznych (rys. 2.8) [Watts i Trainer 2011]. Według producenta zbiorników elastycznych typu Geotube®, przy koszcie odwodnienia zawiesin niższym o 50% w porównaniu do odwadniana na prasie filtracyjnej, uzyskano zagęszczenie zawiesin w zbiorniku powyżej 70% zawartości fazy stałej (tab. 2.7).

Z opisywanych doświadczeń wynika, że porównując skuteczność odwodnienia trzech różnych rozwiązań technicznych, największe zagęszczenie węglowych zawiesin wodno-mułowych uzyskano w Geotube (85% ciała stałego), następnie na taśmowej prasie filtracyjnej (65–70%) (*Filter Belt Press*), a najniższe w zagęszczalniku stożkowym (48–50%) (*Deep Cone Paste*) [Murphy i in. 2012]. Dla



Rys. 2.7. Schemat eksploatacji zbiorników elastycznych [Dijcker i in. 2011, Geotube® 2006]



Rys. 2.8. Budowa i eksploatacji parku odwadniania zawiesin wodno-mułowych za pomocą kontenerów GeoTube® w kopalni North River [Watts i Trainer 2011]: 1 – przygotowanie terenu pod kontenery, 2 – badania efektywności odwadniania kontenerów, 3 – czterowarstwowy skład kontenerów Geotube®, 4 – zapełnianie kontenerów zawiesiną wodno-mułową z osadnika, 5 – system przewodów zasilających kontenery, 6 – kontenery z mułem o wilgotności 35%, zagospodarowywane do rekultywacji terenu

podanych rozwiązań koszt odwadniania 180 Mg/h zawiesiny w czasie czterech i pół lat jest najdroższa w Geotube (47 mln USD) roku, a następnie zastosowanie taśmowej prasy filtracyjnej (20,3 mln USD); a najtańszym rozwiązaniem okazało się zastosowanie zagęszczacza stożkowego (16,8–19,5 mln USD). Podany rachunek budzi zastrzeżenia, gdyż nie uwzględnia różnic w ilości powstałych mułów do składowania, a w przypadku ich wykorzystania w energetyce, spadku kaloryczności z tytułu większego zawodnienia.

Tabela 2.7. Wpływ czasu odsączania zawiesin w zbiorniku elastycznym Geotube® na zagęszczenie osadu [Geotube® 2006]

Rodzaj zawiesiny wodno-mułowej	Zawartość fazy stałej, %			
	nadawa	po 1 dniu	po 3 dniach	po 15 dniach
Dopływ do zagęszczalnika z flokulantem	8	27	45	71
Wypływ z zagęszczalnika z flokulantem	31	43	55	70
Mieszanina z flokulantem	26	42	67	86
Mieszanina pobrana z osadnika bez flokulanta	26	–	36	79

Zbiorniki elastyczne częściej stosowane są do odwadniania mułów w kopalniach rud, niż do odwadniana mułów węglowych [Grubb i in 1999, Yilmaz 2011]. Uwzględniając warunki eksploatacji zbiorników elastycznych, omawiane zbiorniki były przedmiotem badań ich odporności i trwałości na czynniki agresywne (AMD – kopalniane kwasy drenażowe o pH 1,82; zasolone wody) i warunki atmosferyczne (m.in. UV) [Dijcker i in. 2011, Grubb i in. 1999].

W przypadku kopalni Stratni Mine w Grecji stosowane są w dużej skali geotekstylne zbiorniki do odwadniania mułów i oczyszczania wód kopalnianych [Yilmaz 2011]. Do odwadniania mułów, w ciągu 10 dni, zastosowano zbiorniki o długości 60 metrów, średnicy 14,7 metra i wysokości 2,5 metra. W wyniku procesu odwadniania wzrósł udział fazy stałej z 27 do 65%. Koszty odwadniania mułu wynosiły 1,20 USD/m^3.

Z dokonanych analiz wynika, że stosowanie Geotube jest bardzo użyteczne przy oczyszczaniu lub opróżnianiu osadników mułowych i zbiorników wód dołowych oraz przy wydzielaniu koncentratów węglowych. Z jednej strony można efektywnie odwadniać zawiesiny i zmniejszać ich ilość, a z drugiej strony można zagospodarować elastyczne pojemniki z zagęszczonym mułem do wypełniania lub uszczelniania wyrobisk górniczych oraz w robotach inżynieryjnych do kształtowania i wzmacniania budowli inżynieryjnych [Wróbel 2013].

2.6. Stosowanie chemicznych środków odwadniających

Stosowanie środków chemicznych do zmniejszania zawartości wody w paliwach węglowych, w tym w mułach węglowych i odpadach poflotacyjnych ma praktyczne znaczenie tylko wtedy, gdy jest połączone z uzyskiwaniem nowych właściwości produktu [Thomas i in. 2014], jak np.

- zmiany struktury pastowanej mułów na zestaloną/kawałkową,
- przystosowanie mułów do bezpiecznego ich transportu i składowania,

- hamowania procesów samozagrzewu,
- neutralizacji obecności związków pirytowych w paliwach.

W wielu przypadkach, dużą przeszkodą w zagospodarowaniu mułów węglowych o charakterystyce akceptowalnej przez odbiorców (*Q*, *A* i *S*) jest ich pastowata konsystencja, duża zawartość wody oraz brak ich odporności na warunki transportu i składowania. Skutecznym sposobem wyeliminowania szeregu wymienionych wad są technologie ich zestalania i kawałkowania przy zastosowaniu aktywnych związków wapnia, z jednej strony wiążących wodę, a z drugiej działających jako spoiwo. Szczególną pozycję w tych technologiach zajmuje granulowanie mułów węglowych. Do grupy tych rozwiązań należy również technologia zestalania mieszanin mułów węglowych ze spoiwami (cement, wapno) przez ich wylanie na wyznaczone powierzchnie, by po stwardnieniu i dokruszeniu uzyskać kruszywo. Uzyskane kruszywa są odporne na warunki transportu i składowania oraz na oddziaływanie warunków atmosferycznych.

Muły węglowe i ich mieszaniny z innymi składnikami i ze spoiwami wapniowymi lub skrobią, często są brykietowane do produkcji paliw komunalnych [Borowski i Hycnar 2013, Giemza i in. 2007] lub zestawów technologicznych [Niesler 2012].

Najczęściej stosowanymi reagentami do wiązania wody w mułach węglowych są: wapno palone (CaO), anhydryt – gips półwodny ($CaSO_4$/$CaSO_4.0{,}5H_2O$), cement, popioły lotne i denne rodzaju wapniowego i fluidalne itd. Wspólną cechą wymienionych reagentów jest obecność aktywnych związków wapnia (CaO lub $CaSO_4$/$CaSO_4.0{,}5H_2O$). Część z nich reaguje ze składnikami zawartymi w mułach węglowych i w środowisku, w istotny sposób wpływając na zachodzenie procesu granulowania i na właściwości otrzymywanego granulatu (produktu zestalenia) oraz na procesy ich spalania [Hycnar 2006a, Hycnar i in. 2011, Szymkiewicz i in. 2012], a mianowicie między innymi dochodzi do:

- Etap odwadniania:

$$CaO + H_2O = Ca(OH)_2$$
$$CaSO_4 + 2H_2O = CaSO_4.2H_2O$$
$$CaSO_4.0{,}5H_2O + 1{,}5\ H_2O = CaSO_4.2H_2O$$

- Etap wiązania z CO_2 i z glinokrzemianami:

$$Ca(OH)_2 + CO_2 = CaCO_3$$
$$(SiO_2)_n.(Al_2O_3)_m + zCa(OH)_2 = (SiO_2)_n.(Al_2O_3)_m.(CaO)_z + z\ H_2O$$

- Etap odsiarczania spalin w procesie spalania granulowanego mułu węglowego:

$$Ca(OH)_2 + SO_2 = CaSO_3$$
$$CaCO_3 = CaO + CO_2$$
$$CaO + SO_2 = CaSO_3$$
$$CaSO_3 + 0{,}5\ O_2 = CaSO_4$$

Każdy mol CaO (56 g) wiąże jeden mol wody (18 g) – oznacza to możliwość związania wody zawartej w mule w ilości adekwatnej do dodanego CaO. Siarczan wapnia także wiążę wodę – w przypadku bezwodnego siarczanu wapnia na jeden jego mol (136 g) przypadają dwa mole wody (36 g).

Zachodzące reakcje odwadniania, działają jednocześnie, jako spoiwo dla tworzonych granul. Natomiast, powstały wodorotlenek wapnia „po spełnieniu roli spoiwa" ulegając reakcji karbonizacji z dwutlenkiem węgla tworzy kalcyt, utrwalając (zeskalając) wewnętrzną strukturę granul. Z tych to względów, ważny jest proces ich sezonowania powodujący wzrost wytrzymałości mechanicznej granul. Dłuższe sezonowanie zgranulowanych mułów może prowadzić także do zachodzenia reakcji pucolanowych z glinokrzemianami zawartymi w popiołach, dodatkowo utwardzającej granulat. Muły granulowane ze spoiwami zawierającymi CaO w procesie ich spalania powodują częściowe odsiarczanie spalin. Spalanie granulowanych mułów, w porównaniu do spalania surowych mułów w stacjonarnych paleniskach fluidalnych, zmniejsza straty paliwa w procesie ich spalania.

Wpływ wielkości dawki popiołu fluidalnego, zawierającego wolny CaO i anhydryt, na obniżenie wilgotności granulatu z mułu węglowego ma przebieg analogiczny do przedstawionego na rysunku 2.5. Natomiast, wytrzymałość na ściskanie granulatu rośnie z wielkością dawki spoiw i czasem ich sezonowania [Hycnar 2006b, Szymkiewicz i in. 2012]. Wpływ dodatku popiołu dennego na wytrzymałość granulatu, utworzonego do przeciwdziałania samozagrzewowi związków pirytowych zawartych w mule węglowym, ilustruje tabela 2.8.

Przeprowadzone badania i ustalone warunki stosowania popiołów zawierających aktywne związki wapnia, w zamian wapna palonego, stały się podstawą do uzyskania patentu [Szymkiewicz i in. 2009]. W ten sposób do granulowania mułów węglowych potwierdzono skuteczność stosowania nie tylko typowych spoiw wapniowych, ale także popiołów fluidalnych i popiołów rodzaju wapniowego.

W przypadku odpadów wysokozasiarczonych, na przykład koncentratu ze wzbogacalników spiralnych i młynowych odpadów węglowych potwierdzono

Tabela 2.8. Wpływ dodatku popiołu dennego na wytrzymałość granulatu, utworzonego do przeciwdziałania samozagrzewowi związków pirytowych zawartych w mule węglowym

Skład granulatu, %		Wytrzymałość uderzeniowa, liczba zniszczonych granul, % po dniach sezonowania				Wytrzymałość na ściskanie, N/granulę po dniach sezonowania				Wytrzymałość na ściskanie po 28 dniach, MPa
muł węglowy	popiół denny fluidalny	0	1	2	28	3	7	14	28	
50	50	90	30	40	10	11,2	25,6	72,0	90,4	0,58
34	66	70	50	40	0	13,7	27,1	87,3	106,3	0,67
0	100	40	10	10	0	18,5	55,2	133,5	167,7	1,06

doświadczalnie, że dodatek wapna palonego nie tylko wiąże wodę ale przede wszystkim obniża emisję SO_2 w procesie ich spalania. Wpływ wielkości dodatku CaO na stopień związania siarki w popiele spalanego węgla ilustrują wyniki zawarte w tabeli 2.9.

Tabela 2.9. Wpływ dodatku CaO na stopień związania siarki w popiele w procesie spalania odpadów wysokosiarkowych [Hycnar 1983, 1985a]

Zawartość siarki, % masy	Dodatek CaO, % rnasy	CaO/CaOs*	Stopień związania siarki w popiele przy 1073 K, % masy	Wartość opałowa mieszanki MOW z CaO, kJ/kg
4,22	0.0	–	15,5	22 283
	13,3	1,8	57,9	19 132
	16,7	2,2	80.3	18 275
	21,7	2,9	77,1	17 276
	25,0	3,4	78,9	17 343
16,72	0,0	–	3,4	12 640
	10,3	0.3	13,7	12 256
	13,3	0.4	17,5	10 977
	15,4	0.5	16,7	11608
	82,1	2.8	91,8	7 587

* Krotność – stosunek ilości dodanego CaO do ilości CaOs równoważnej ilości siarki.

W oparciu o przeprowadzone badania i próby w skali pilotowej, opracowano założenia techniczno-ekonomiczne i wdrożono do eksploatacji przemysłowej dwie instalacje ciągłego granulowania mułów węglowych wypadających w formie placków z pras filtracyjnych [Szymkiewicz i in. 2012, Wróbel i in. 2013].

3. GRANULOWANIE DROBNOZIARNISTYCH ODPADÓW WĘGLOWYCH

3.1. Wprowadzenie

Badania nad granulowaniem drobnoziarnistych frakcji węglowych, w tym mułów węglowych i odpadów poflotacyjnych, mają już długą tradycję. Przynoszą efekty spełnienia wymogów ochrony środowiska oraz przynoszą korzyści ekonomiczne. W kraju znaczący wkład w rozwój technologii granulowania mułów węglowych ma AGH w Krakowie [Feliks 2006, Kuczyńska 2010, Kuczyńska i Sztaba 1981]. W zakresie wdrożenia granulowania mułów węglowych natomiast, największe osiągnięcia notują firmy Haldex S.A., Tauron Wydobycie S.A. i KW KWK Piast [Feliks 2014, Fraś i in. 2013, Galos i Szlugaj 2014, Lech i Koperski 2012, Wróbel i in. 2013].

Procesy granulowania mogą być samodzielnymi procesami formowania paliw oraz materiałów specjalnego przeznaczenia z drobnoziarnistych węgli i ich odpadów lub stanowią element większych technologii (np. produkcja kruszyw spiekanych, wsadu hutniczego itp.) [Feliks 2012]. W dalszej części rozdziału przedstawiono wyniki doświadczeń i wdrożeń technologii granulowania mułów węglowych i odpadów poflotacyjnych do produkcji niskokalorycznego paliwa alternatywnego.

Pod określeniem granulowanie należy rozumieć procesy prowadzące do tworzenia konglomeratów ziaren w postaci granul o uziarnieniu zazwyczaj poniżej 8 mm, występujących pod nazwą aglomerat lub granulat. Określenia aglomerat i granulat należy uznawać jako równoważne określenia.

Proces granulowania dotyczy scalania ziaren drobnoziarnistych frakcji węglowych, obejmujących muły węglowe, odpady poflotacyjne, osady z procesów produkcji wyrobów węglowo-grafitowych, sadzy itp. Dla skrócenia zapisów „drobnoziarniste frakcje węglowe" najczęściej stosowany jest zapis równoważny „muł węglowy" lub „muł węglowy i odpad poflotacyjny".

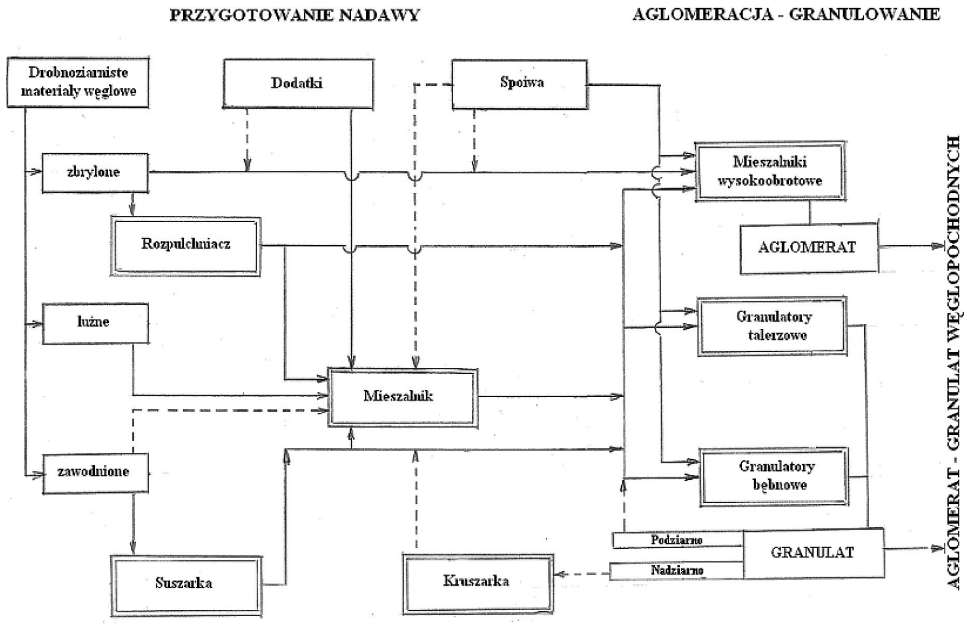
3.2. Wybór technologii przeróbki mułów węglowych

Z przeprowadzonych rozważań nad optymalizacją zagospodarowania mułów węglowych wynika, że w przypadku placków mułów węglowych konieczne jest rozluźnienie ich struktury i następne uformowanie w bryły. Trwałość wytworzonych granul i ich właściwości zależeć będą od składu nadawy oraz zastosowanych spoiw i technologii scalania. W praktyce przeróbczej do scalanie luźnych ziaren stosuje się najczęściej procesy granulowania mułów węglowych i odpadów poflotacyjnych [Kuczyńska 1980, Przystaś i in. 2011].

Najwyższe wytrzymałości mechaniczne konglomeratów ziaren można uzyskać z odpowiednio dobranych składników nadawy w procesie granulowania, który jest najmniej energochłonny i stosunkowo łatwy do wdrożenia oraz pozwala w znacznym stopniu na regulowanie właściwości fizykochemicznych granulatu.

Tworzenie się granul związane jest z zachodzeniem wielu zjawisk fizycznych i chemicznych. Jednym z najważniejszych jest możliwość zwilżania powierzchni ziaren i pokrywania ich wielocząsteczkowymi warstwami cieczy, wywołujących łączenie się pojedynczych ziaren w zespoły-konglomeraty, dzięki oddziaływaniu sił adhezji i zjawisk kapilarnych. Równocześnie, występujące siły odśrodkowe i grawitacji powodują nie tylko wzrost aglomeracji ziaren, ale również ich uporządkowanie i upakowanie w strukturze konglomeratu. Właściwe uziarnienie materiału (stos ziarnowy) i odpowiednio dobrana ilość i rodzaj cieczy oraz warunki prowadzenia procesu umożliwiają uzyskanie trwałego granulatu *in statu nascendi.* Często trwałość granulatu wzrasta w funkcji czasu ich składowania, na skutek zachodzących reakcji chemicznych.

W zależności od rodzaju drobnoziarnistych materiałów węglowych, stopnia zanieczyszczenia i uwodnienia oraz wymagań na konglomerat (aglomerat, granulat), schematy ich scalania mogą się znacznie różnić (rys. 3.1). Podstawowymi elementami schematu aglomerowania jest etap przygotowania nadawy do scalania oraz etap obejmujący proces scalania (aglomerowania, granulowania) i ewentualnego kondycjonowania otrzymanego aglomeratu.



Rys. 3.1. Schemat przygotowania drobnoziarnistych frakcji węglowych do aglomerowania i granulowania [Hycnar i Józefiak 2007]

W przypadku gdy nie jest wymagana duża wytrzymałość mechaniczna tworzonych konglomeratów ziarnowych, do scalania nadawy wystarczające jest intensywne mieszanie powodujące wzajemne oblepianie się ziaren. Trwałość mechaniczną aglomeratu można podwyższać poprzez dodawanie spoiw do nadawy.

Dla zapewnienia łączenia się ziaren w konglomerat oraz w granulat, materiały muszą być poddane procesowi rozluźnienia struktury w rozdrabniaczach (dezintegratorach), rozpulchniaczach lub przecierakach, które mogą także spełniać rolę mieszalników dla nadawy i dozowania takich dodatków jak biomasa, spoiwa i dodatki uszlachetniające (rys. 3.2). W zależności od opracowanej technologii może zachodzić częściowe lub pełne zmieszanie ze spoiwami i powstawanie aglomeratu, jeszcze przed granulowaniem nadawy. W przypadkach dużego zawodnienia materiału przeznaczonego do granulowania konieczne jest jego suszenie lub mieszanie ze składnikami odpowiednio suchymi, dla uzyskania nadawy o odpowiednich parametrach [Morozow i Korienjugina 2009].

W zależności od zastosowanych urządzeń i dobranych warunków prowadzenia procesu, z drobnoziarnistych mułów węglowych można uzyskiwać trwałe aglomeraty lub granulaty. Proces ten można prowadzić w granulatorach talerzowych i bębnowych oraz w mieszalnikach intensywnego mieszania (rys. 3.3 i 3.9).

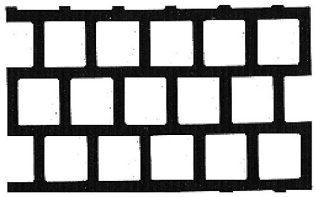
Zastosowanie mieszadeł intensywnego mieszania (mechaniczne i wibracyjne) pozwala na uzyskiwanie aglomeratu, stanowiącego zbiór ziaren, zlepionych zazwyczaj w formie nieregularnej o uziarnieniu od 0,5 do 20 mm. Trwałość (wytrzymałość mechaniczna, odporność na erozję wodną i powietrzną) uzyskiwanego aglomeratu zależy w dużym stopniu od rodzaju i ilości dodawanych spoiw lub dodatków uszlachetniających oraz technologii ich zestalania i sezonowania. Porównanie wyglądu mułów węglowych aglomerowanych i granulowanych przedstawiono na rysunku 3.4.

Przydatność procesu granulowania sprawdzano na przykładzie trzech rodzajów mułów węglowych, pobranych z KWK Bolesław Śmiały, ZG Janina oraz ZG Sobieski.

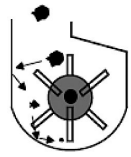
3.3. Ustalenie warunków granulowania mułów węglowych

Dla określenia warunków granulowania mułów węglowych, prowadzone badania i próby miały na celu:

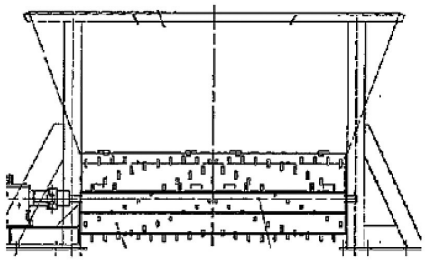
- określenie podatności mułu na granulowanie,
- ustalenie wpływu spoiw na właściwości granulatu,
- weryfikację proponowanych procedur granulowania mułów węglowych.

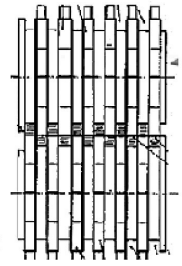


Krata prętowa lub nożowa

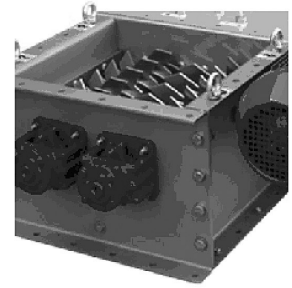


Rozdrabniacz - Rozrzutnik - Mieszalnik

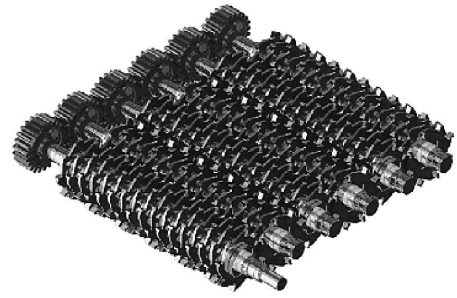




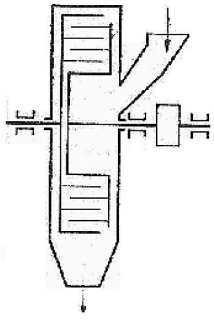
Mieszalnik - rozdrabniacz MR Komag



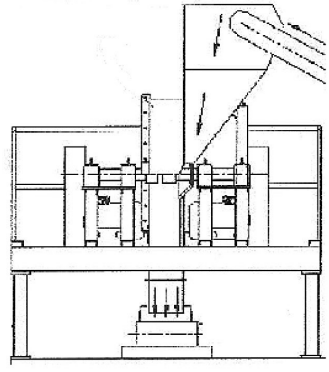
Rozdrabniacz DLP WAM Group



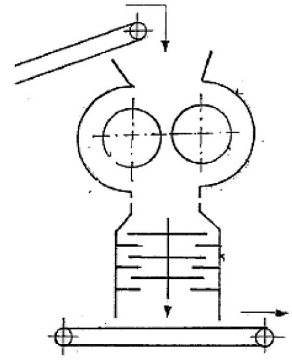
Rozdrabniacz MR 300 ITG Komag



Dezintegrator

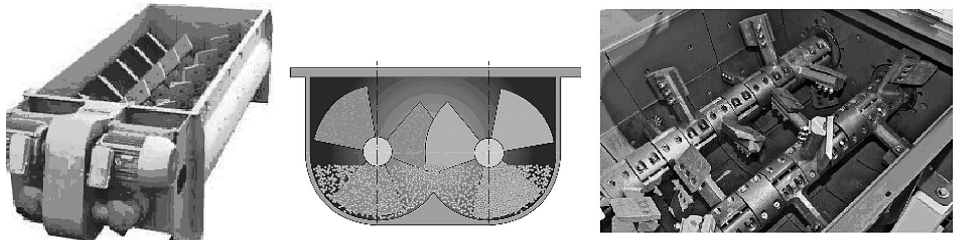


Rozdrabniacz MDW Zamer
Mieszalnik M 125 Rydultowy

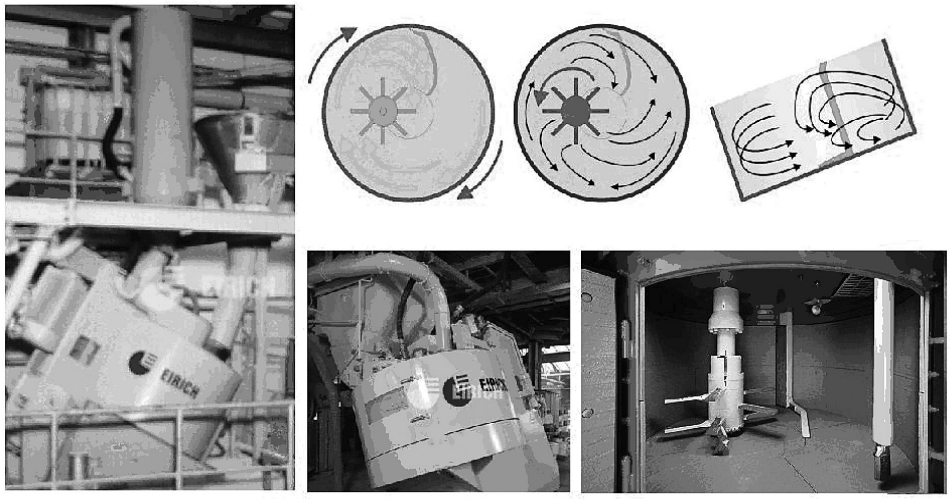


Dezintegrator wg Patentu
PL 200226 GIG

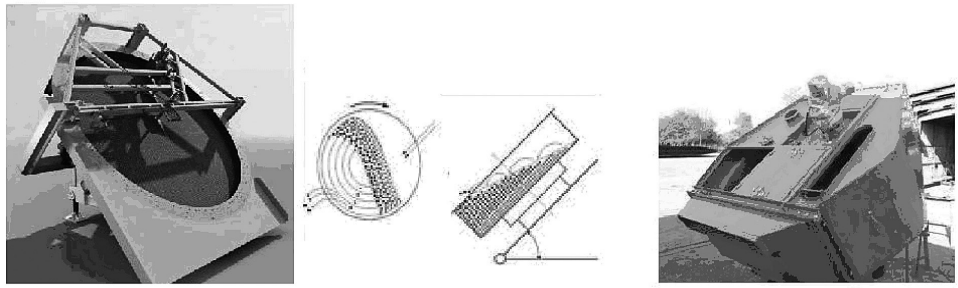
Rys. 3.2. Przegląd urządzeń rozdrabniających dla placków filtracyjnych



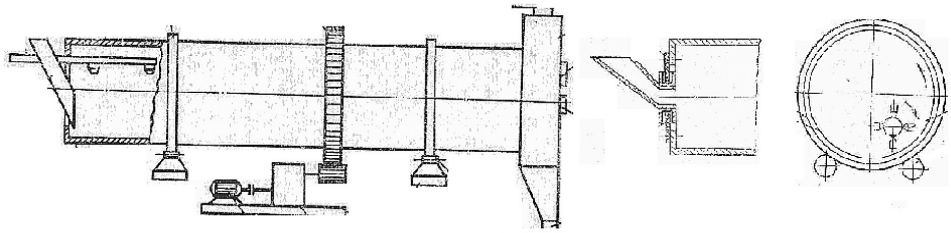
Mieszalnik-granulator dwuwałowy



Mieszalnik-granulator firmy Eirich

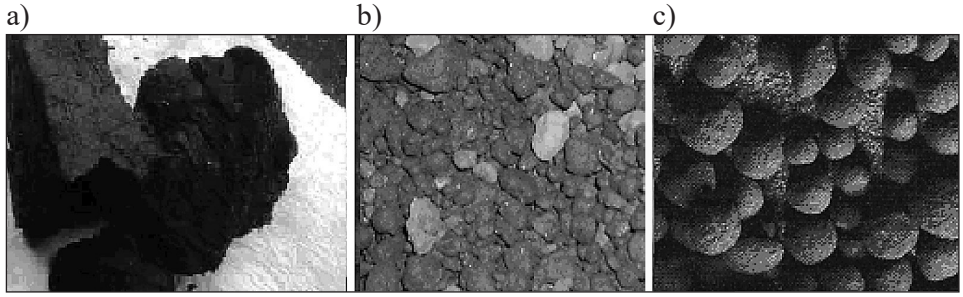


Granulator talerzowy



Granulator bębnowy

Rys. 3.3. Przegląd urządzeń przydatnych do aglomerowania mułów węglowych



Rys. 3.4. Porównanie wyglądu mułu węglowego w zależności od sposobu jego obróbki: a) rumosz placków pofiltracyjnych, b) aglomerat, c) granulat (fot. J.J. Hycnar)

Większość wymienionych parametrów określono wykonując próby granulowania mułów węglowych na:

- modelowym granulatorze talerzowym typu GT o średnicy 120 cm (Zakład Doświadczalny Eko-Invest Bukowno);
- przemysłowym mieszadle planetarnym typu EI-2500 o obrotach 38/500 obr/min (betoniarka) firmy Erich (Haldex SA Katowice);
- modelowym mieszalniku typy BHX 300 (Wam Polska Sp. z o.o. – Bolesławiec).

Badane muły węglowe z ZG Sobieski i ZG Janina różniły się między sobą nie tylko zawartością wody (średnie 29,2 i 40,9%), ale przede wszystkim konsystencją (rys. 3.5). Muły pobrane z ZG Sobieski w porównaniu do mułów z ZG Janina zawierają mniejszą zawartość wody, a ich stopień plastyczności odpowiadał gruntom plastycznym, podczas gdy muły ZG Janina spełniają wymagania na grunty miękkoplastyczne. Muły węglowe z ZG Sobieski wykazują gorsze właściwości adhezyjne niż muły z ZG Janina.

Rys. 3.5. Wygląd mułów węglowych: a) z ZG Sobieski – placek filtracyjny, b) z ZG Sobieski – muł z osadnika, c) ZG Janina – muł węglowy z filtra taśmowego (fot. J.J. Hycnar)

Analizowane muły ze względu na konsystencję nie nadawały się do bezpośredniego sporządzania mieszanek z innymi materiałami ani też do bezpośredniego aglomerowania, granulowania czy brykietowania. Muły te wymagały rozpulchnienia struktury, by doprowadzić do ich możliwie dużego

rozdrobnienia oraz umożliwić skuteczne ich zmieszanie z możliwie małymi ilościami dodatków. Muły węglowe z filtra taśmowego z ZG Janina poddane rozluźnieniu ulegają upłynnieniu i nie dawały się granulować (rys. 3.5).

Do prób rozpulchniania i aglomerowania mułów węglowych zastosowano mieszadło planetarne typu EI–2500 o obrotach 38–500 obr./minutę. Przeprowadzone próby oceny podatności mułów na granulowanie, polegały na określeniu:

- stopnia oblepiania elementów mieszadła,
- stopnia rozdrobnienia nadawy,
- sposobu dozowania spoiwa,
- czasu tworzenia aglomeratu,
- jakości powstającego aglomeratu,
- trwałości wytworzonego aglomeratu.

Uwzględniając, że badane muły węglowe mają być zagospodarowane jako składnik paliw lub jako samodzielne paliwo, wybrano spoiwa zwierające związki wapnia [Giemza i in. 2009], a mianowicie:

- wodorotlenek wapnia, w postaci wapna hydratyzowanego – symbol „H”,
- tlenek wapnia, w postaci wapna palonego – symbol „P”,
- wodorotlenek wapnia (wapno hydratyzowane) z dodatkiem melasy – symbol „H+M”,
- cement portlandzki typu 31,5 – symbol „C”,
- popiół denny z paleniska fluidalnego z elektrowni Jaworzno II – symbol „F”,
- popiół lotny z elektrowni Jaworzno III – symbol „W” [Szymkiewicz i in. 2012].

Z przeprowadzonych prób wynika między innymi, że:

- badane placki mułów z pras komorowych są trudne do rozpulchniania,
- dodatek spoiwa „H” do mułów przyspiesza i ułatwia ich rozpulchnianie,
- dodatek spoiwa „H” w ilości 3% masowo powoduje aglomerowanie mułów i tworzenie trwałych granulatów.

Muł węglowy uzyskany z filtracyjnych prasach komorowych w ZG Janina w porównaniu do mułu z ZG Sobieski jest trudniejszy do aglomerowania i tworzy się granulat o większym uziarnieniu (tab. 3.1).

W przypadku zastosowania *w*apna palonego zachodzi reakcja powstawania wodorotlenku wapnia, który analogicznie jak wapno hydratyzowane łatwo przejmuje wodę i tworzy „ciasto” wapienne działające adhezyjnie.

Na tym etapie procesu aglomeracji występuje zjawisko działania sił adhezyjnych. Pełną wytrzymałość mechaniczną aglomeraty uzyskują w procesie ich sezonowania, podczas którego dochodzi do pełnej karbonizacji wodorotlenku wapnia. Proces utwardzania aglomeratu (karbonizacji) zależy od wielu czynników, wśród których czas odgrywa znaczącą rolę. Zwykle aglomeraty i granulaty ze spoiwem wapniowym, połowę końcowej wytrzymałości mechanicznej uzyskują po 10 dniach sezonowania [Hycnar 2006a].

Tabela 3.1. Porównanie uziarnienia aglomeratów z mułów węglowych

Klasa ziarnowa aglomeratu, mm	ZG Janina		ZG Sobieski	
	wychód, %	suma wychodu, %	wychód, %	suma wychodu, %
> 12	66	66	25	25
12 – 6	29	95	59	84
6 – 3	3	98	12	96
< 3	2	100	4	100

Szybkość zachodzącego procesu karbonizacji zależy między innymi od rozdrobnienia reagentów, ich powierzchni właściwej, temperatury otoczenia i stopnia przewietrzania aglomeratu. W praktyce, dla przyspieszenia procesu karbonizacji stosuje się kontaktowanie aglomeratu ze spalinami (wzrost zawartości CO_2) lub w procesie aglomeracji dodaje się „katalizatory". Z tego powodu, jako trzeci rodzaj spoiwa zastosowano wapno hydratyzowane z dodatkiem melasy, której działanie polega na przyspieszeniu „transportu" tlenu do wodorotlenku wapnia oraz zwiększeniu sił adhezyjnych.

Spośród analizowanych popiołów ze spalania węgla w paleniskach fluidalnych wytypowano popiół denny z El. Jaworzno II, ze względu na wysoką zawartość związków wapnia (CaO = 29,7%) i zawartość wolnego tlenku wapnia ($CaO_{wol.}$ = 5,4%). Prowadzono także próby aglomerowania przy zastosowaniu zwykłego popiołu lotnego.

Na proces tworzenia i właściwości granulatu duży wpływ wywiera sposób dozowania spoiwa do mułu. W zależności od właściwości mułów, niejednokrotnie celowe jest dodawanie spoiwa podczas ich transportu do mieszalnika lub do granulatora. Dla przyspieszenia procesu utwardzania powierzchni granul stosuje się także opylanie (pudrowanie) wytworzonych granul wybranym spoiwem.

Reasumując uzyskane wyniki badań i prób można stwierdzić, że:

- skuteczność aglomerowania mułu węglowego oraz właściwości aglomeratu znacząco zależą od zawartości wody. Muły węglowe odfiltrowane w prasach komorowych zawierają stosunkowo mało wody, co ułatwia dalsze rozdrobnienie i granulację, zaś utworzone granulaty mają dużą wytrzymałość mechaniczną (rys. 3.6);
- muły węglowe odfiltrowane w prasach komorowych nadają się do aglomerowania po rozluźnieniu ich struktury i po zmieszaniu ze spoiwem;
- zalecanym dodatkiem do aglomerowania są spoiwa wapniowe (typu P, H i F) w udziale od 3% do 10% masowo, rozprowadzane w mieszalniku planetarnym, jak również w mieszalniku turbulencyjnym (szybkiego działania). Uzyskane aglomeraty charakteryzują się odpowiednią wytrzymałością spełniającą wymogi transportu i magazynowania. Wytrzymałość granul wzrasta w trakcie ich sezonowania.

Rys. 3.6. Granulat z mułu o zawartości wody 40% (106) i z mułu o zawartości wody 29%

Muły węglowe wydzielone na filtrach taśmowych (Andritz'a) zawierają około 40% wody i są trudnym materiałem do aglomerowania. Najlepsze efekty uzyskano w mieszalniku planetarnym z dodatkiem od 5% do 10% masowo spoiwa typu P i H (tab. 3.2). Uzyskiwane aglomeraty mają większą średnicą w porównaniu do aglomeratu z mułu z pras komorowych oraz mniejszą początkową wytrzymałością mechaniczną, która zwiększa się podczas ich sezonowania.

Muły węglowe z dodatkiem cementu są trudne do aglomerowania, gdyż tworzą zespoły o dużej średnicy (nawet powyżej 50 mm) (tab. 3.2).

Tabela 3.2. Wpływ spoiw na uziarnienie aglomeratów z mułów węglowych

Próbka nr	Charakterystyka granulowania			Suma wychodu frakcja ziarnowej, %			
	muł, zawartość wody, %	spoiwo	urządzenie granulujące	> 12 mm	12–6 mm	6–3 mm	< 3 mm (+straty)
101	29	5% P	EI*	10,4	60,3	87,8	100
102	29	5% H	EI*	17,3	62,4	92,4	100
103	29	5+2% C	EI*	73,9	96,7	99,4	100
104	29	10% C	EI*	73,6/55,3	98,1/93,2	99,2/97,8	100/100
105	29	5+2% C	EI*	91,3	96,1	97,4	100
101g	29	5% P	GT**	10,7	13,0	76,9	100
102g	29	5% H	GT**	14,3	61,1	94,0	100
103g	29	5% P	GT**	12,9	65,8	94,6	100
104g	29	10% C	GT**	67,8/63,4	96,6/93,6	99,6/95,8	100/100
106	40	5% P	EI*	95,8	100	–	–
107	40	5% H	EI*	95,3	99,0	99,5	100

Objaśnienia: * – mieszadło planetarne EI-2500; ** – granulator talerzowy GT.

Czas tworzenia aglomeratu zależy od rodzaju zastosowanego mieszalnika. W mieszalniku planetarnym czas ten wynosi od 3 do 5 minut. W mieszalniku turbulencyjnym (szybkiego działania) czas tworzenia aglomeratu zawiera się między 30 a 60 sekundami. Przekraczanie tego czasu prowadziło do zbytniego wzrostu wielkości granulatu. W przypadku zbyt długiego mieszania mułów z prasy Andritz'a dochodziło do „upłynnienia" wsadu.

Muły węglowe z dużą zawartością wody także mogą być aglomerowane, pod warunkiem stosowania procesu w dwóch etapach. W pierwszym etapie, do mułu dodaje się materiały obniżające zawartość wody (zmiana struktury z półpłynnej na plastyczną), dodatkowo dodając część spoiwa. W drugim etapie do uplastycznionego mułu dodaje się spoiwo i intensywnie miesza.

Otrzymane granulaty mają wystarczającą odporność mechaniczną oraz erozyjną, wietrzną, wodną na zmieniające się warunki atmosferyczne.

3.4. Założenia techniczne dla instalacji granulowania mułów węglowych

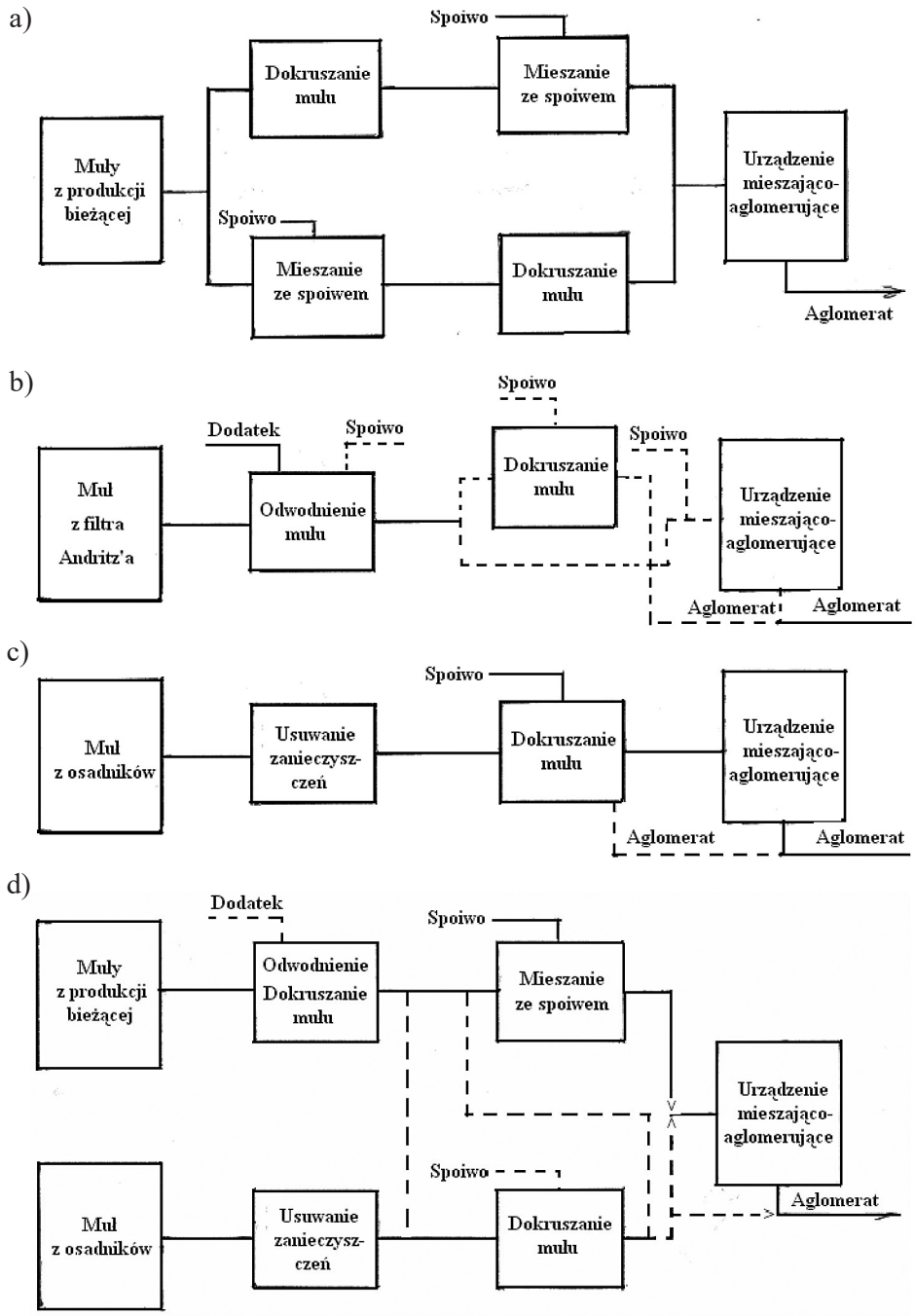
Wybór instalacji technologicznej do granulowania zależy od rodzaju i pochodzenia drobnoziarnistych frakcji ziarnowych węgla oraz wymagań na wytwarzany z nich produkt. Rozróżnia się granulowanie:

- placków mułów węglowych, zazwyczaj z pras komorowych o zawartości wody ok. 30%,
- mułów węglowych o dużym zawodnieniu, o zawartości wody około 40%;
- mułów węglowych odzyskiwanych z osadników mułowych, odpadów poflotacyjnych itp.,
- mieszanin mułów z bieżącej produkcji i osadników.

Przegląd podstawowych schematów aglomerowania i granulowania mułów węglowych ilustruje rysunek 3.7.

Przemysłowa instalacja mieszająco-aglomerująca musi uwzględniać między innymi:

- przerwy w odprowadzaniu placków filtracyjnych,
- zmiany ilościowe odprowadzanych mułów węglowych,
- zmiany „gabarytów" odprowadzanego rumoszu placków filtracyjnych,
- potrzeby dozowania ustalonych proporcji spoiwa w zależności od zmian ilościowych odprowadzanych mułów,
- eliminowanie zapylenia spoiwem w czasie transportu i przeróbki mułów,
- wymogi urządzenia mieszająco-aglomerującego,
- możliwość zmiany kierunków odprowadzania aglomeratu,
- możliwość wyłączenia instalacji z pracy, jak również awaryjnego wyłączenia,



Rys. 3.7. Przegląd podstawowych schematów granulowania mułów węglowych i odpadów poflotacyjnych: a) z bieżącej produkcji o zawodnieniu 20–30%, b) z bieżącej produkcji o zawodnieniu około 40%, c) deponowanych w osadnikach, d) łącznie z bieżącej produkcji oraz z osadników

- powiązanie obsługi instalacji z zadaniami obsługi pras filtracyjnych wraz z przeszkoleniem w zakresie obsługi i przestrzeganiem przepisów BHP,
- możliwość pełnego sterowania i automatyzacji produkcji aglomeratu.

W instalacji granulowania mułów z bieżącej produkcji należy wyróżnić następujące węzły produkcyjne (rys. 3.7):
- węzeł przystosowania rumoszu placków filtracyjnych do wymogów mieszania i aglomerowania,
- węzeł dozowania spoiwa wapniowego,
- węzeł mieszania i aglomerowania,
- węzeł odbioru, transportu i mieszania aglomeratu z miałami,
- węzeł magazynowania transportu i dozowania spoiwa.

Analizę rozwiązań poszczególnych węzłów instalacji wykonano pod kątem zapewnienia produkcji granulatu w ilości średnio 50 ton na godzinę, przy możliwości zmiany wydajności w zakresie 16 do 80 ton na godzinę.

Węzeł przystosowania rumoszu placków filtracyjnych do wymogów mieszania i granulowania. Rumosz placków filtracyjnych na taśmie odprowadzającej może mieć maksymalny wymiar dochodzący do 1000 mm, w przewadze są kawałki o wymiarach 400 do 600 mm. Trwałość gabarytowa rumoszu jest mała, w miarę wzrostu ilości przesypów na taśmach transportowych następuje zmniejszanie ich wymiarów. Na stożku magazynowym mułu węglowego, wymiary rumoszu kształtują się poniżej 300 mm.

Dla uzyskania dobrych warunków wymieszania mułu ze spoiwem i uzyskania trwałego granulatu oraz bez konfliktowego zapełnienia urządzenia mieszająco-granulującego, rumosz placków mułu węglowego powinien mieć wymiary nie przekraczające 1/2 wielkości komory załadowczej. W przypadku rozpatrywanych mieszalników dwuwałowych ($\phi = 495$ mm) i poziomych mieszalników jednowałowych-turbulencyjnych (380×940 mm), wymiary rumoszu ze spoiwem podawanym do urządzenia mieszająco-granulującego nie powinny przekraczać 80 mm.

Najprostszym rozwiązaniem, uwzględniającym stosunkowo małą wytrzymałość mechaniczną omawianych placków mułu, jest zastosowanie w przesypach co najmniej dwurzędowej kraty „nożowej" o wymiarach; pierwsza 500×500 mm, a druga 200×200 mm; umieszczone w odległości co najmniej 500 mm jedna od drugiej i przekręconych o 45° względem przekątnych. Dla wyeliminowania obrastania i zatykania się krat, powinny być podłączone do wibratorów.

W przypadku nie zadawalającego efektu rozdrobnienia placków filtracyjnych w przesypie należy zamontować jedno z niżej podanych urządzeń:
- podajnik skrzydełkowy lub prętowy, jedno lub dwuwałowy,
- mieszalnik wirnikowy,
- mieszalnik dezintegrator,
- rozdrabniacz z wałami ze stałymi krążkami np. MR 300 ITG Komag [Zuba i in. 2015]; DLP WAMGroup itp.

Dokruszanie (rozdrobnienie) rumoszu placków mułu można także wykonać przed samym zrzutek do urządzenia mieszająco-aglomerującego, wtedy dochodzi do lepszego wymieszania spoiwa z mułem.

Węzeł dozowania spoiwa wapniowego. Przeprowadzone badania i próby granulowania mułu węglowego ze spoiwem wapniowym w mieszalniku planetarnym wykazały, że czas mieszania i granulowania zależy w dużym stopniu od miejsca dodawania spoiwa. W przypadku dodawania spoiwa do mułu znajdującego się w mieszalniku czas mieszania i aglomerowania w porównaniu do czasu mieszania i aglomerowania gotowej mieszanki mułu ze spoiwem jest 3 do 4 razy dłuższy. Dla skrócenia czasu procesu aglomerowania nieodzownym jest dozowanie i ew. wymieszanie spoiwa wapniowego z mułem węglowym jeszcze przed zapełnieniem urządzenia mieszająco-granulującego.

Uwzględniając warunki i rozwiązanie systemu transportu oraz ew. lokalizację urządzenia mieszająco-granulującego, właściwym miejscem dozowania spoiwa do rumoszu placków mułu węglowego powinien być taśmociąg mułu węglowego.

Dozowane spoiwo na muł, powinno zabezpieczyć jego rozprowadzenie na możliwie jak największą powierzchnię kawałków mułu. W tym celu końcówka dozownika (rury) powinna być wyposażona w odpowiednią kierownicę rozprowadzającą spoiwo na około 80% szerokości taśmociągu, z podawaniem ok. 50% spoiwa w środkową część taśmociągu gdzie znajduje się największa masa transportowanego mułu.

System dozowania musi być wykonany z dużą dokładnością gdyż musi zapewnić rozprowadzenie stosunkowo małych ilości wapna, a mianowicie:

- przy granulowaniu mułu w ilości 16 000 kg/h i 2% dodatku, ilość dodawanego spoiwa wynosi odpowiednio: 320 kg/h; 5,33 kg/min i 0,089 kg/s,
- przy granulowaniu mułu w ilości 48 000 kg/h i 2% dodatku, ilość dodawanego spoiwa wynosi odpowiednio: 960 kg/h; 16,0 kg/min i 0,27 kg/s.

Dla wyeliminowania zapylenia w rejonie dozowania spoiwa, transportu mułu ze spoiwem i podawania mieszanki do urządzenia mieszająco-granulującego, nieodzownym jest zabudowanie odpowiednich osłon na omawianym ciągu z systemem odsysania (usuwania) pyłu.

Węzeł mieszania i granulowania mułu węglowego. Dla uzyskania granulatu stosuje się mieszalniki intensywnego mieszania, najczęściej w postaci:

- mieszalników dwuwałowych,
- mieszalników planetarnych,
- mieszalników turbulencyjnych.

Większość mieszalników dwuwałowych gwarantuje dobre wymieszanie nadawy ze spoiwem i jej rozdrobnienie, praktycznie na sypki materiał. W małym

zakresie dochodzi do wytworzenia granul. Mieszalniki dwuwałowe są produkowane i stosowane dla bardzo wielu dziedzin gospodarki, o wydajności nawet do 300 ton/h.

Mieszalniki planetarne należą do skutecznych urządzeń, które gwarantują bardzo dobre wymieszanie składników i tworzenie aglomeratu. Zazwyczaj działają w sposów periodyczny. Rozpowszechnione są do sporządzania mieszanin betonu.

Urządzeniami mieszająco-granulacyjnym są natomiast mieszalniki turbulencyjne (intensywnego działania), gwarantujące homogenizację nadawy. Proces mieszania wsadu odbywa się w obszarach turbulencji charakterystycznej dla złoża fluidalnego co gwarantuje duże efekty mieszania i tworzenia aglomeratu. Mieszalniki turbulencyjne są produkowane o wydajności nawet do 1000 m^3/h.

Niezależnie od stosowania urządzeń mieszająco-granulujących, niejednokrotnie konieczne jest stosowanie granulatorów talerzowych lub bębnowych albo wibracyjnych.

Omawiane rozwiązanie instalacji granulowania mułów węglowych zostało oparte o zastosowanie mieszalników intensywnego działania, eliminując stosowanie granulatorów.

Węzeł odbioru, transportu i mieszania granulatu z miałami. Ze względu, że powstały granulat nie uzyskuje od razu końcowej wytrzymałości mechanicznej ważnym jest by jego zrzut był możliwie złagodzony poprzez zastosowanie zsuwni na przykład wykonanej z gumy taśmociągowej.

W przypadkach gdyby zawartość frakcji piaskowej w granulacie była za wysoka to zsuwnia powinna być zastąpiona odpowiednim sitem, z możliwością zawrotu frakcji piaskowej do mieszalnika aglomerującego. Taka sama zasada obowiązuje w przypadku tworzenia się nadziarna.

Najkorzystniejszym rozwiązaniem transportu aglomeratu jest jego bezpośrednie dozowanie do miałów. Struktura ziarnowa miału zapewnia „bezpieczne" lokowanie aglomeratu między ziarnami miału oraz zapewnia dobre warunki karbonizacji ziaren aglomeratu z tytułu dobrego napowietrzenia i reagowania z dwutlenkiem węgla który występuje wokół ziaren węgla.

Sterowanie i automatyzacja pracy instalacji mieszania i granulowania mułów węglowych. Pracę instalacji mieszająco-aglomerującej można prowadzić przez indywidualne włączanie poszczególnych urządzeń, a mianowicie przez uruchomienie:

- odstawy granulatu,
- urządzenia mieszająco-granulacyjnego,
- dostawy mułu,
- instalacji odpylania,
- podawania wapna w ilości adekwatnej do ilości opróżnianych pras.

Dla automatyzacji procesu aglomeracji nieodzownym jest zamontowanie wag tensometrycznych na taśmociągu podającym muł do mieszania i granulowania oraz mieszania ze spoiwem. Proces automatyzacji byłby podporządkowany wielkości nadawy. Zbiorniki spoiwa wymagają również opomiarowania stanów poziomów spoiwa oraz sterowania dozowania wielkości dawki spoiwa.

3.5. Instalacje granulowania mułów węglowych za pomocą mieszalników intensywnego działania

Na podstawie wyżej wymienionych badań i prób, decyzje o wdrożeniu procesu granulowania oparto o zastosowanie mieszalników szybkiego działania co znacznie ograniczyło nakłady inwestycyjne i koszty eksploatacyjne, w porównaniu do powszechnie stosowanych granulatorów talerzowych i bębnowych. Schemat technologiczny instalacji granulowania mułów węglowych przy zastosowaniu mieszalnika szybkiego działania podano na rysunku 3.8. Wygląd wybranych urządzeń instalacji przedstawiono na rysunku 3.9.

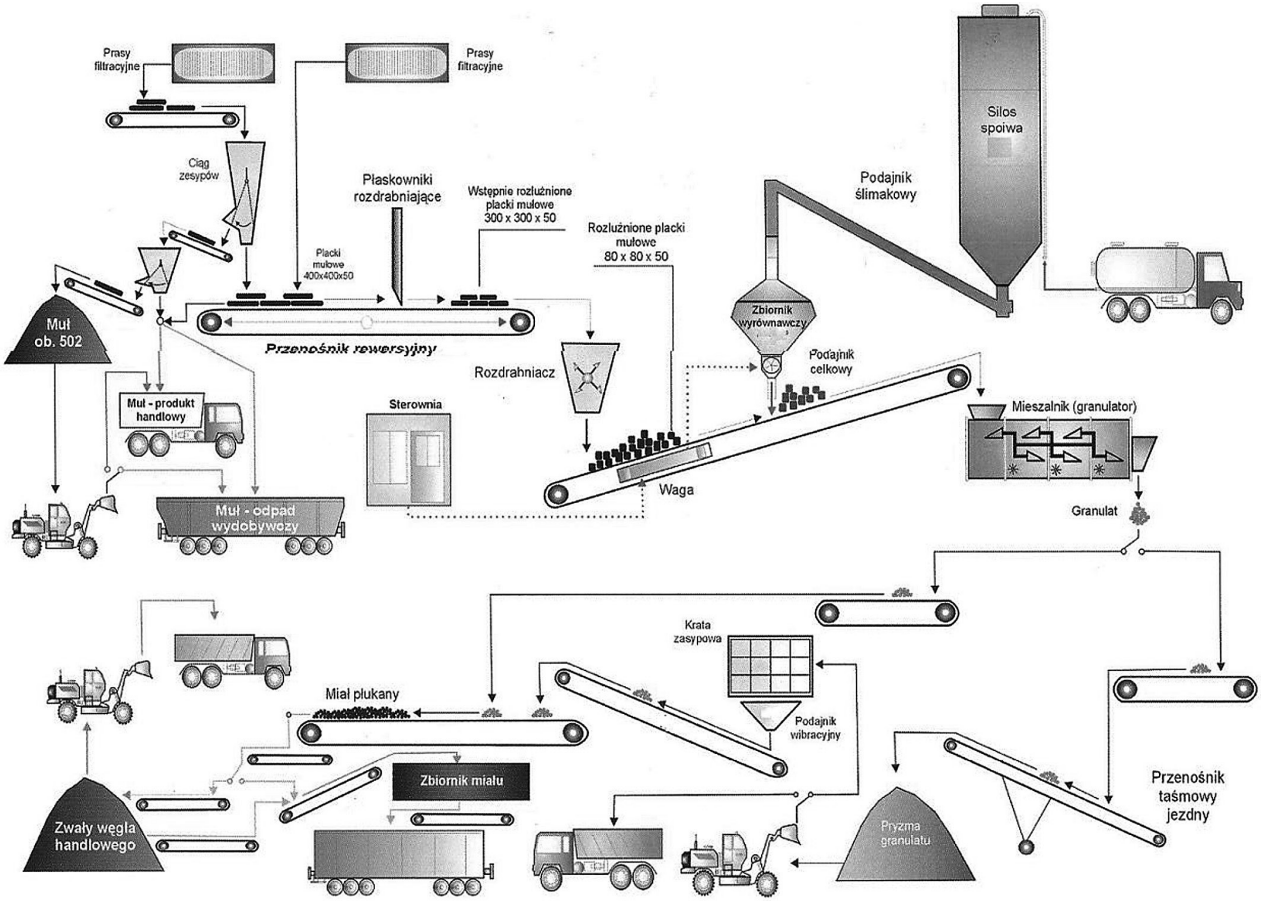
Mieszalnik szybkiego działania wyróżnia się posiadaniem systemu łopat zainstalowanych na obracającym się centralnie wale, które przesuwają i mieszają nadawę oraz posiadaniem w dolnej części mieszalnika mikserów rozdrabniających strukturę nadawy, powodując jednocześnie aglomerowanie ziaren mułów węglowych.

W instalacji wytwarzany jest granulat o uziarnieniu od 2 do 20 mm, dodawany do produkowanych miałów lub dostarczany bezpośrednio do elektrociepłowni/elektrowni jako granulowane paliwo niskokaloryczne. Wytwarzane granulaty charakteryzują się następującymi właściwościami:

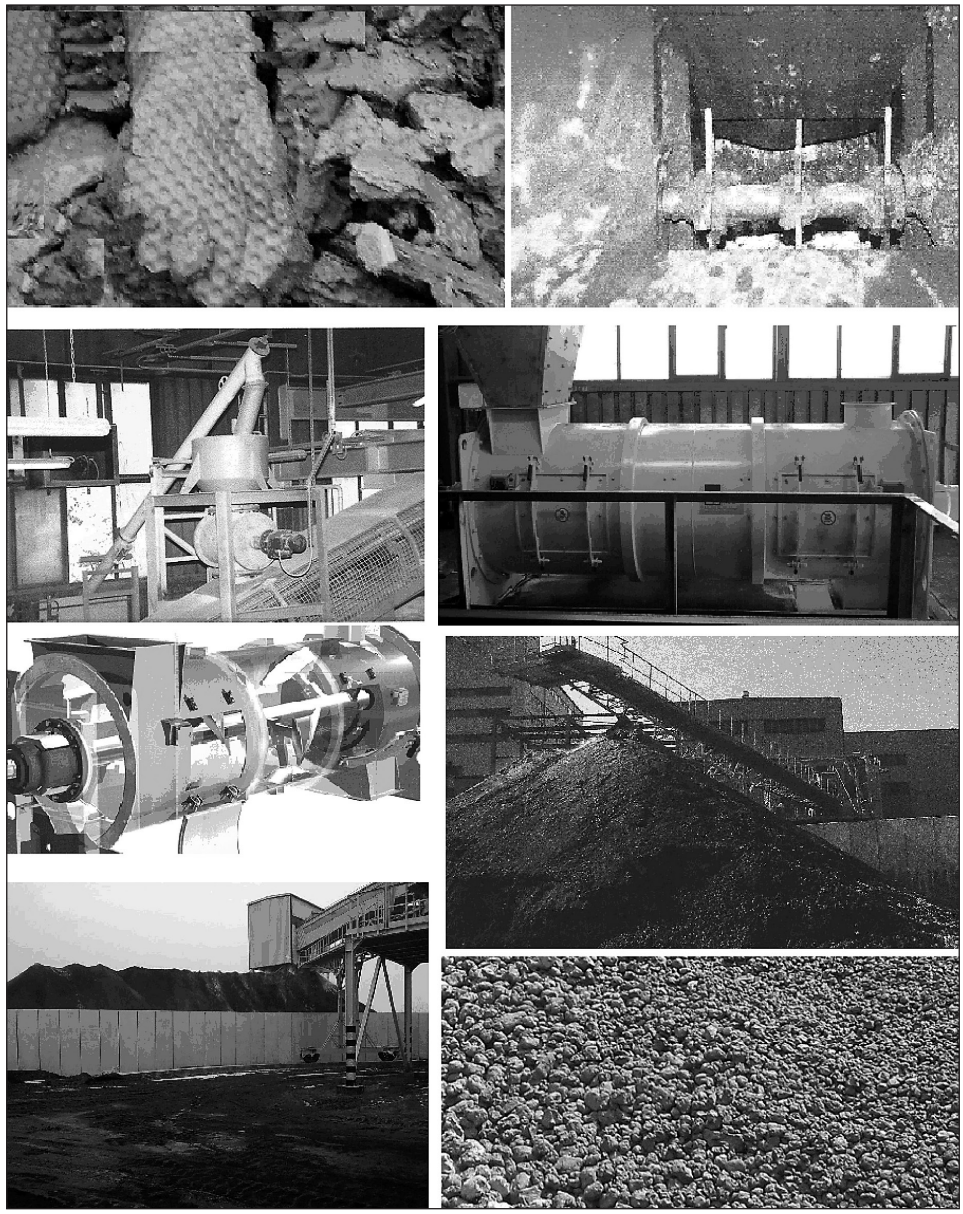
- struktura sypka, rozluźniona, półsucha,
- wilgotność W_{tr} = 17%,
- wielkość granul maksymalna do 20 mm,
- wartość opałowa Q_{ir} = 8–11 kJ/kg,
- zawartość siarki S_{tr} = 0,7–1,0%,
- zawartość popiołu A_r = 35–40%,
- granulat odporny na działanie czynników atmosferycznych,
- granulator łatwy do mieszania z miałami węglowymi,
- granulat łatwy do transportu.

Uzyskane efekty ekonomiczne pozwoliły na zwrot nakładów inwestycyjnych już w pierwszym roku jej eksploatacji [Wróbel i in. 2013].

Szczególne znaczenie ekonomiczne ma stosowanie granulowanych mułów węglowych w kotłach z paleniskami fluidalnymi. Obecnie kotły są wyposażone



Rys. 3.8. Schemat instalacji granulowania mułów węglowych w Zakładzie Górniczym Sobieski w Tauron Wydobycie SA



Rys. 3.9. Wygląd poszczególnych węzłów technologicznych instalacji granulowania mułów węglowych (fot. J.J. Hycnar)

w instalację do sporządzania pulpy wodno-mułowej wtryskiwanej do paleniska fluidalnego. W tej sytuacji, dostarczane z kopalń placki mułów węglowych są uwadniane i sporządzana jest z nich pulpa, o zawartości wody średnio 40%. Przeprowadzone bilanse wykazują, że spalanie granulowanych mułów węglo-

Tabela 3.3. Porównanie właściwości mułów węglowych w zależności od sposobu ich przygotowania do spalania [Hycnar i in. 2013, 2015]

Muł węglowy	Stan analityczny					Stan roboczy				
	W	A	Qs	St	C	Wt	A	Qt	S	C
	%	%	kJ/kg	%	%	%	%	kJ/kg	%	%
Muł 37 J: - placek - pulpa - różnica	3,22	56,7	11129	0,60	29,1	27,5 40,0 +12,5	42,5	7311 5744 -1567	0,45	21,8
Muł 38 S: - placek - pulpa - różnica	4,07	52,5	12422	0,75	32,2	28,3 40,0 +11,7	39,2	8211 6584 -1627	0,56	24,1
Muł S: - granulat - pulpa - różnica	5,15	42,0	14738	0,91	39,2	28,8 40,0 -11,2	31,5	9891 6584 +3307	0,68	29,5
Miał + 5% granulatu	8,23	16,2	23944	1,71	59,82	20,3	14,1	19525	1,48	52,0

wych w porównaniu do pulpy przynosi wzrost kaloryczności spalanych mułów o około 2000 kJ/kg i obniżenie kosztów ich spalania (tab. 3.3) [Hycnar i in. 2013, 2015a].

Oprócz opisanych doświadczeń granulowania, często stosowane jest brykietowania mułów węglowych i odpadów poflotacyjnych z dodatkiem spoiwa wapniowego, skrobiowego lub lignosulfonianowego [Borowski i Hycnar 2013, Hycnar i Józefiak 2007].

4. BRYKIETOWANIE DROBNOZIARNISTYCH WĘGLI Z BIOMASĄ

4.1. Wprowadzenie

W przetwórstwie górniczym powstają znaczne ilości drobnoziarnistego węgla jako produktu ubocznego lub odpadów. Wielu badaczy wskazuje na możliwość stosowania brykietowania tych materiałów w celu uzyskania wyrobów wykorzystywanych jako nośniki energii w obiektach energetycznych [Zawistowski i in. 2003, Majchrzak i in. 2005, Ściążko i in. 2006, Kijo-Kleczkowska 2013].

Brykietowanie jest celowe do scalania mułów węgli wraz z różnymi dodatkami [Hycnar 2006a, Borowski 2007, Taulbee i in. 2009, Hycnr i in. 2012]. Produkowane obecnie brykiety zawierają frakcje węgla kamiennego, węgla brunatnego i koksu, często z dodatkiem trocin, torfu, słomy lub innych surowców [Lazaro i in. 2007]. Drobnoziarnisty węgiel stanowi znaczący udział w bilansie produkcji i zagospodarowania węgla, w tym: muły węglowe, odpady poflotacyjne, ściery, pyły koksownicze, koksik z procesów zgazowania oraz niektóre produkty spalania paliw. Często są zagospodarowywane jako paliwa samodzielne oraz jako jeden ze składników wytwarzanych mieszanek paliwowych [Lorenz 2005, Temmerman i in. 2006, Boruk i Winkler 2009].

Duże ilości mułów i miałów węgla powodują potrzebę zwiększenia ich zagospodarowania jako paliwa podstawowego oraz uzupełniającego do określonych obiektów energetycznych oraz podjęcia produkcji wysokojakościowych koncentratów węglowych i mieszanek paliw alternatywnych. Proponowane przez Hycnara i in. [2005] rozwiązania pozwalają na zagospodarowanie nawet niskoenergetycznych odpadów węglowych. Węgiel drobnoziarnisty należy jednak do materiałów wykazujących małą podatność na scalanie w prasach do brykietowania. Pożądane są więc działania mające na celu zmianę właściwości tego materiału [Mi i Li 2006].

Kaloryczność węgla jest dwukrotnie większa niż biomasy. Biomasa często jest stosowana w kotłach indywidualnych, głównie ze względu na małe pozostałości popiołów w palenisku oraz niewielką emisję związków siarki do atmosfery [Kubica i in. 2003, Stolarski i in. 2003, Niedziółka i Zuchniarz 2006].

W porównaniu ze spalaniem węgla zastosowanie mieszanek węglowo-biomasowych skutkuje zmniejszeniem emisji dwutlenku siarki do atmosfery, dzięki czemu nie jest wymagane odsiarczanie spalin [Wisz i Matwiejew 2005]. Współspalanie biomasy z węglem ma wiele zalet w porównaniu ze spalaniem tych paliw oddzielnie [Liszka i Majchrzak 2005; Majchrzak i in. 2005], między innymi pozwala na stosowanie mieszanek w kotłach o dużych mocach.

W mieszance tej węgiel odgrywa rolę stabilizatora procesu spalania [Purohit i in. 2006]. Nie wszystkie jednak kotły są przystosowane do współspalania węgla z biomasą, co wiąże się z ich modernizacją i wyłączeniem z eksploatacji na pewien czas.

Mieszanki węgla z biomasą stosowano w Elektrowni Opole [Majchrzak i in. 2005]. Na podstawie testów współspalania określono udział masowy biomasy w mieszance z węglem kamiennym na poziomie około 8%. Uzyskane wyniki prób spalania potwierdziły niewielki wpływ udziału biomasy na skład chemiczny uzyskanego popiołu. Spowodowane jest to znacznie mniejszą zawartością popiołu w biomasie w stosunku do węgla. Niewielka różnica w składzie miała jednak istotny wpływ na obniżenie temperatury mięknięcia składników popiołu. Popioły ze spalania biomasy cechowały niższe temperatury mięknięcia (w przedziale od 750 do 1000 °C) w porównaniu do popiołów z węgli (ok. 1000 °C i więcej).

Z powodu niższej temperatury mięknięcia popiołu podczas spalania mieszanki węgla i biomasy ulega zwiększeniu szybkość narastania osadów na powierzchniach ogrzewalnych kotłów. Warstwa popiołu zalegająca na rurach jest bardziej podatna na osadzanie się kolejnych cząstek, co w konsekwencji powoduje szybki przyrost osadu i powiększenie jego rozmiarów w stosunku do osadów powstałych ze spalania samego węgla [Liszka i Majchrzak 2005].

W Instytucie Chemicznej Przeróbki Węgla opracowano technologię produkcji brykietów bezdymnych dla indywidualnych gospodarstw domowych i ogrzewnictwa komunalnego [Ulbricht 2005]. Technologia ta polega na brykietowaniu mieszanki węgla z koksikiem z dodatkiem zhydrolizowanej mąki i melasy. Do mieszanki dodano rozcieńczony kwas fosforowy, który jest utwardzaczem lepiszcza. Przygotowaną mieszankę podawano na prasę dwuwalcową i otrzymano surowe brykiety. Brykiety suszono i kondycjonowano do skutecznego utwardzenia lepiszcza.

Przeprowadzone dotychczas próby na terenie Polskiego Koncernu Energetycznego (obejmującego m.in. EC Katowice, Jaworzno III/II, Elektrownię Siersza i ZEC Bielsko-Biała) wskazały, że współspalanie odpowiednio przygotowanej biomasy (w udziale do 5%) z miałem i mułem węglowym jest praktycznie możliwe w sposób bezinwestycyjny [Ściążko i Zieliński 2003]. Do współspalania biomasy w udziale większym niż 5%, konieczna jest budowa linii technologicznych, zapewniających podawanie tego paliwa do kotła w sposób niezależny od węgla. W ten sposób zwiększa się udział współspalanej biomasy do 10–15% wartości energetycznej strumienia paliwa.

Bardzo dobre współspalanie biomasy z węglem zapewniają kotły fluidalne. Należy zwrócić uwagę, że w procesie spalania w tych kotłach nie jest konieczne ani brykietowanie, ani granulowanie mieszanki [Hycnar 2006a].

Sołtys [2005] opisał technologię produkcji brykietów węglowo-biomasowych zawierających ok. 20% wagowych biomasy. Jako wsad węglowy stosowa-

no mieszankę miałów i mułów węglowych. Lepiszczem dodawanym do mieszanki była skrobia wpływająca na wzrost wytrzymałości brykietów. Uzyskane brykiety cechowała ponadto duża wodoodporność. Proces ich spalania przebiegał podobnie jak spalanie węgla typu orzech i groszek. Wartość opałowa brykietów wynosiła od 19 do 26 MJ/kg. Odpowiednie wymieszanie w brykiecie biomasy z węglem powodowało, że zgazowująca się biomasa pozostawiała porowate przestrzenie ułatwiające penetrację powietrza. Dzięki temu poprawiły się warunki spalania samego węgla oraz uzyskano niską emisję gazów toksycznych.

Brykiety węglowo-biomasowe okazały się alternatywnym, wartościowym nośnikiem energii, przeznaczonym do spalania w przydomowych kotłach energetycznych o małej mocy [Kubica 2003, Plíštil i in. 2005, Borowski 2009a, 2009b, 2009c].

4.2. Charakterystyka mułów węglowych z „Bogdanki"

Wykonano badania próbek miałów i mułów węglowych z procesów przeróbki węgla kamiennego w kopalni Lubelski Węgiel „Bogdanka". Zawilgocony miał węglowy jest szczególnie kłopotliwym materiałem w transporcie, wyładunku i procesie spalania. Największą frakcję produktów ubocznych powstających w zakładzie przeróbczym w Bogdance stanowią muły i miały węglowe o kaloryczności 20–23 MJ/kg w udziale około 86% masy ogółem. W pierwszej kolejności z materiałów tych są usuwane części złomu, drewna i kamieni. Następnie węgiel jest kierowany do klasyfikacji wstępnej, gdzie wydziela się klasy ziarnowe: 200–20 mm, 20–1,5 mm oraz poniżej 1,5 mm [Bieńko 2004]. Poszczególne frakcje po odwodnieniu są kierowane do zbiorników węglowych. Miały węglowe odwadniane są za pomocą filtrów próżniowych. Wody popłuczkowe kierowane są do zespołów hydrocyklonów, gdzie są wydzielane muły węglowe, które następnie są zagęszczane w wirówkach i na taśmowych prasach filtracyjnych, oraz są gromadzone w zbiornikach odpadów. Zawartość wody w materiale magazynowanym w zbiornikach odpadów wynosiła około 12%.

Przeznaczone do badań próbki drobnoziarnistych frakcji węgla kamiennego dosuszano do zawartości wody poniżej 10% w suszarce elektrycznej, odseparowano zanieczyszczenia skalne oraz rozdrobniono w udarowym młynku elektrycznym do uziarnienia poniżej 0,5 mm.

Pobrano także próbki biomasy – trociny drzew liściastych z zakładu stolarskiego. Trociny drzewne dosuszano termicznie do zawartości wody poniżej 10%, przesiewano wstępnie w celu oddzielenia większych zrębków, następnie rozdrabniano w młynku nożowym (tnącym) do uzyskania uziarnienia poniżej 2,0 mm.

W tabeli 4.1 przedstawiono parametry produktów ubocznych z przeróbki węgla kamiennego w Zakładzie Przeróbki Mechanicznej Węgla w kopalni Lubelski

Tabela 4.1. Charakterystyka badanych materiałów

L.p.	Rodzaj materiału	Postać	Uziarnienie [mm]	Miejsce poboru
1.	Węgiel kamienny	miał, muł	0,05–2,00	zakład przeróbki mechanicznej węgla w Kopalni Węgla Kamiennego „Bogdanka”
2.	Biomasa drzewna	trociny, zrębki	0,50–5,00	Usługowy Zakład Stolarski Tadeusz Izdebski w Parczewie

Węgiel „Bogdanka”. Określono skład granulometryczny rozdrobnionego węgla oraz biomasy za pomocą analizy sitowej.

Przedstawione dane wskazują, że po rozdrobnieniu wymiary ziarna węgla najczęściej mieszczą się w zakresie 0,2–0,3 mm, ziarna biomasy natomiast są znacznie większe i mają wymiar średnio ok. 1,5 mm. Podczas łączenia tych materiałów istotne jest zatem dokładne mieszanie, którego czas dobrano eksperymentalnie. Największy stopień wymieszania uzyskano po czasie mieszania wynoszącym 3 minuty. Po przekroczeniu czasu mieszania wynoszącego 3,5 minuty stwierdzono zmniejszenie stopnia wymieszania.

Skład chemiczny próbek węgla kamiennego oraz biomasy przedstawiono w tabeli 4.2. Stwierdzono w biomasie około czterokrotnie więcej niż w węglu tlenu, prawie połowę mniej węgla organicznego, a także mniej siarki i azotu.

Tabela 4.2. Podstawowe składniki chemiczne węgla kamiennego i biomasy

Parametr	Jednostki	Węgiel kamienny	Biomasa z drewna liściastego
Węgiel	%	81,0	42,0
Tlen	%	7,0	30,2
Wodór	%	3,5	4,0
Azot	%	1,1	0,5
Siarka	%	0,9	0,1
Chlor	%	0,08	0,1

Tabela 4.3. Właściwości pobranych próbek węgla i biomasy

Parametr	Jednostki	Muły i miały węgla kamiennego	Biomasa z drewna liściastego
Zawartość wilgoci w próbce badanej	%	8,1	12,0
Gęstość nasypowa	kg/m^3	800	150
Gęstość właściwa	kg/m^3	1300	660
Wartość opałowa	kJ/kg	27 000	18 000
Zawartość części lotnych	%	26,6	66,5
Zawartość popiołów	%	22,2	2,0

Właściwości fizyczne analizowanych frakcji węgla i biomasy przedstawiono w tabeli 4.3. Wartość opałowa biomasy w stanie suchym wynosi maksymalnie 18 000 kJ·kg^{-1} i jest około 33% mniejsza niż wartość opałowa węgla kamiennego. Biomasa ma małą gęstość usypową, a więc zajmuje większą objętość przy składowaniu w porównaniu z węglem. Duża objętość może mieć wpływ na wysokie koszty transportu biomasy.

Z analizy piśmiennictwa wynika, że zmierzona wartość opałowa biomasy jest niewystarczająca do stosowania jej jako głównego źródła energii cieplnej w energetyce zawodowej. Chętnie natomiast jest stosowana w kotłach indywidualnych centralnego ogrzewania, głównie ze względu na małe pozostałości popiołów w palenisku oraz niską emisję związków siarki do atmosfery.

4.3. Badania laboratoryjne brykietów węglowych z biomasą

Wytrzymałość mechaniczna brykietów

Brykiety węglowe z biomasą wytworzono w warunkach laboratoryjnych z mieszanki węgla z biomasą w udziałach masowych wynoszących od 0 do 25%. Określono wytrzymałość mechaniczną brykietów w zależności od nacisku prasy i dodatku biomasy (tab. 4.4). Stosując prasę stemplową wraz z matrycą własnej konstrukcji uzyskano brykiety w kształcie walcowym o wymiarach ϕ3,0×2,0 cm,

Tabela 4.4. Wytrzymałość brykietów w zależności od nacisku prasy i udziału biomasy

Nr serii	Udział biomasy [%]	Siła docisku stempla [kN]	Nacisk jednostkowy [MPa]	Właściwości mechaniczne	
				wartość nacisku niszcząca brykiet [MPa]	odporność na zrzut grawitacyjny [%]
1.	0,0	20,0	2,83	1,19	82,6
		30,0	4,25	1,81	89,0
		40,0	5,66	1,42	87,5
2.	15,0	20,0	2,83	1,08	80,0
		30,0	4,25	2,81	89,0
		40,0	5,66	2,42	91,5
3.	20,0	20,0	2,83	1,18	86,7
		30,0	4,25	3,81	90,2
		40,0	5,66	3,42	94,1
4.	25,0	20,0	2,83	1,84	92,7
		30,0	4,25	4,30	95,6
		40,0	5,66	4,03	94,8

objętości około 14,1 cm^3 oraz średniej masie 24,5 gram. Brykiety testowano w postaci świeżej – pobrane nie później, niż po 30 minutach od wytworzeniu.

Stwierdzono, że brykiety wytworzone z samego węgla nie spełniały minimalnych wymagań wytrzymałościowych, dodatek biomasy natomiast umożliwił uzyskanie brykietów o większej odporności. Najlepsze brykiety uzyskiwano stosując nacisk jednostkowy stempla od 4,25 do 5,66 MPa przy udziale biomasy 20% oraz 25%. Jednakże przy 25% udziale biomasy i nacisku jednostkowym 5,66 MPa uzyskano wyroby o mniejszej odporności mechanicznej w porównaniu z wyrobami uzyskanymi przy nacisku 4,25 MPa.

W kolejnych testach zmodyfikowano mieszankę materiałów, dodając do niej skrobię ziemniaczaną jako lepiszcze. Stosując nacisk jednostkowy 4,25 MPa wytworzono próbki brykietów zarówno z samego węgla, jak i z dodatkiem biomasy oraz sprawdzono ich odporność mechaniczną w zależności od procentowego udziału skrobi (tab. 4.5). Testowano brykiety świeże (po 30 minutach od wytworzenia) i sezonowane w okresie 120 godzin.

Tabela 4.5. Wytrzymałość brykietów w zależności od procentowego udziału lepiszcza

Nr serii	Udział biomasy [%]	Udział lepiszcza [%]	Wartość nacisku jednostkowego niszczącego brykiet [MPa]		Odporność na zrzut grawitacyjny [%]	
			brykiet świeży (0,5 h)	brykiet sezonowany (120 h)	brykiet świeży (0,5 h)	brykiet sezonowany (120 h)
1.	0,0	4,2	1,99	2,12	90,3	95,2
		5,4	2,19	2,59	93,5	96,1
		6,1	2,55	2,81	94,6	96,7
		7,8	2,79	2,98	96,4	97,3
		9,5	1,94	2,44	92,1	96,2
2.	15,0	4,0	2,12	2,58	92,4	95,6
		5,2	3,34	3,81	94,1	96,2
		6,0	3,88	4,24	95,3	96,7
		8,3	4,26	4,81	96,1	97,2
		9,4	4,15	4,38	95,7	96,1
3.	20,0	4,1	3,18	3,88	94,1	96,5
		5,0	3,87	4,22	95,9	97,1
		5,9	4,81	5,42	96,2	97,7
		8,1	5,62	6,41	97,8	98,4
		9,7	5,55	6,28	96,2	97,1
4.	25,0	4,2	3,14	3,75	94,3	96,7
		5,1	3,74	4,08	96,1	97,2
		5,8	4,64	5,22	96,6	97,5
		7,9	5,12	5,87	97,1	97,9
		9,6	4,87	5,58	96,3	97,0

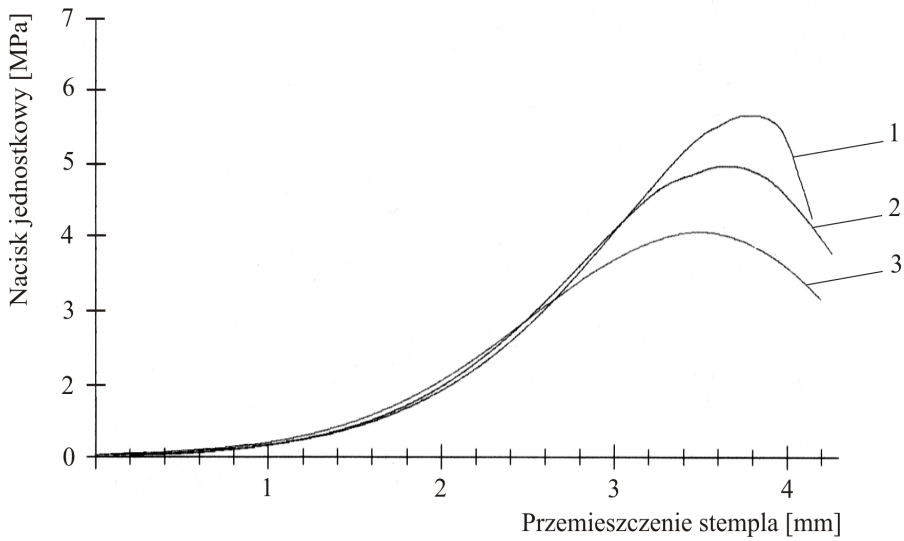
Potwierdzono, że jest możliwe uzyskanie dobrych brykietów węglowo-biomasowych z dodatkiem lepiszcza. Najlepszy efekt uzyskano stosując około 8% udział skrobi w brykietowanej masie odpadów węgla z 20% dodatkiem biomasy. Stwierdzono korzystny wpływ sezonowania na dalsze zwiększenie odporności mechanicznej brykietów. Minimalny czas sezonowania gwarantujący uzyskanie wysokiej wytrzymałości mechanicznej wynosi 4–5 dni. Stwierdzono ponadto, że brykiety osiągają największą wytrzymałość po około 28 dniach od wytworzenia. Po 90 dniach sezonowania zaobserwowano zmniejszenie się wytrzymałości brykietów.

W teście na zrzut grawitacyjny stwierdzono niewystarczającą odporność (przyjętą na poziomioe 90%) brykietów paliwowych o zbyt dużek lub małej zawartości wody. Korzystny zakres wilgotności analizowanej mieszanki węgla z biomasą do brykietowania powinien wynosić od 7 do 9% (tab. 4.6).

Tabela 4.6. Właściwości mechaniczne brykietów świeżych i sezonowanych w zależności od zawartości wody w mieszczance oraz stopnia zagęszczenia

Nr próby	Zawartość wody [%]	Stopień zagęszczenia [–]	Wartość nacisku jednostkowego niszczącego brykiet [MPa]		Odporność na zrzut grawitacyjny [%]	
			brykiet świeży (0,5 h)	brykiet sezonowany (120 h)	brykiet świeży (0,5 h)	brykiet sezonowany (120 h)
1.	11,3	1,88	2,19	2,89	83,5	88,1
2.	9,8	1,92	3,69	4,28	89,9	92,3
3.	8,5	2,14	3,84	4,44	97,1	98,2
4.	7,8	2,18	3,81	4,42	95,2	96,1
5.	7,4	1,98	3,62	4,21	95,8	97,4
6.	6,8	1,03	3,55	4,08	96,2	98,1
7.	5,5	1,94	2,98	3,75	91,9	93,3
8.	4,6	1,91	2,44	3,29	88,9	90,2

W teście ściskania osiowego uzyskane wartości nacisków jednostkowych we wszystkich próbach były wyższe niż wymagane minimum. Należy jednak wziąć pod uwagę, że formownie brykietów w próbach laboratoryjnych przebiega w bardziej sprzyjających warunkach niż w warunkach przemysłowych, więc wyniki z próby 1 oraz 8 uznano za niewystarczające. W tym teście korzystne rezultaty uzyskano przy scalaniu materiału o zawartości wody od 5 do 10%. Przykładowe wykresy ściskania brykietów w maszynie wytrzymałościowej w teście osiowym przedstawiono na rysunku 4.1.



Rys. 4.1. Wykresy ściskania brykietów w teście osiowym: 1 – maksymalny nacisk jednostkowy wynosi 5,66 MPa, 2 – maksymalny nacisk jednostkowy wynosi 4,95 MPa, 3 – maksymalny nacisk jednostkowy wynosi 4,15 MPa

Obserwowano wyższą odporność brykietów na ściskanie, jeżeli były formowane pod większym naciskiem prasy (krzywa nr 1, rys. 4.1) oraz jeśli były sezonowane lub dosuszane w celu zmniejszenia zawartość wilgoci po wytworzeniu. Mniejsza była natomiast odporność na ściskanie brykietów świeżych, testowanych po 30 minutach od wytworzenia (krzywa nr 3).

W początkowej fazie testu ściskania małym przyrostom siły nacisku odpowiadają duże przemieszczenia ruchomych szczęk głowicy (rys. 4.1), pomiędzy którymi znajduje się badana próbka. Wynika to z dużej porowatości brykietów paliwowych, wobec czego występuje dociskanie drobnoziarnistych składników brykietu.

Obserwacje mikroskopowe

Analizowano strukturę wewnętrzną próbek brykietów węglowych wytwarzanych w prasach stemplowych oraz walcowych, a także oceniono wpływ dodawanych środków wiążących na właściwości tej struktury. Jako środki wiążące stosowano skrobię, melasę oraz wapno hydratyzowane.

Wykonano następujące prace:

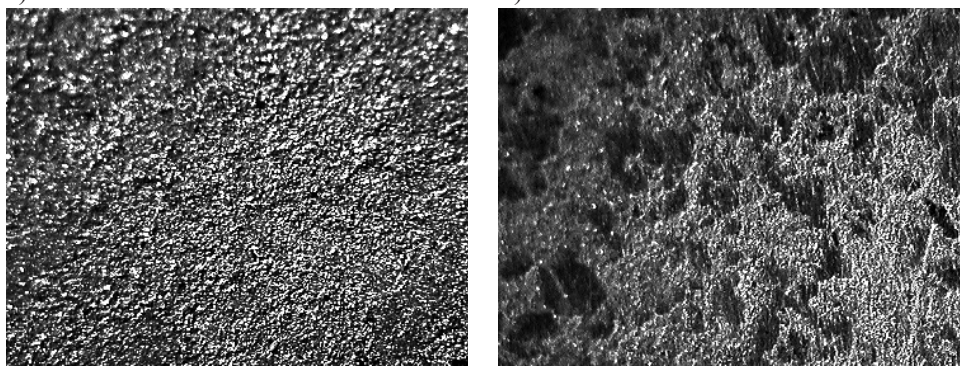
- określono ułożenie ziaren w brykietach po uformowaniu w prasie stemplowej i walcowej,
- określono rozmieszczenie lepiszcza w przekroju brykietu w zależności od jego udziału masowego,
- obserwowano powstawanie pęcherzy oraz pęknięć wewnątrzstrukturalnych.

Struktura brykietu węglowego wykonanego w prasie stemplowej bez dodatków wiążących jest jednorodna, bez widocznych pęcherzy i pęknięć (rys. 4.2a). Ułożenie ziaren jest nieregularne. Struktura brykietu z dodatkiem melasy jako lepiszcza wyraźnie różni się od struktury brykietu bezlepiszczowego (rys. 4.2b). Widoczne są ciemniejsze wtrącenia materiału wiążącego.

Analizując fotografie brykietów z dodatkiem różnych lepiszczy stwierdzono duże znaczenie dokładnego mieszania składników przeznaczonych do brykietowania. W pierwszym etapie materiał ten mieszano ręcznie (rys. 4.3a), jednak bardziej jednorodną strukturę brykietów uzyskano mieszając materiał w mieszarce elektrycznej (rys. 4.3b).

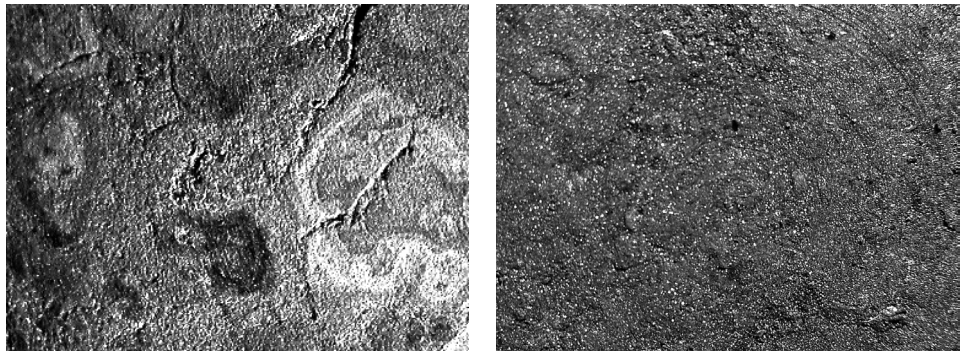
Na podstawie przedstawionych wyników badań strukturalnych stwierdzono, że czynnikami niezbędnymi do uzyskania jednorodnych brykietów są sposób scalania oraz dodatek lepiszcza. Znaczny wpływ ma także dokładność mieszania komponentów. Brykiety scalane w prasie stemplowej

a) b)



Rys. 4.2. Struktura brykietu z węgla wykonanego w prasie stemplowej:
a) bez lepiszcza; b) z dodatkiem 6% melasy (fot. G. Borowski)

a) b)



Rys. 4.3. Struktura brykietu z materiału mieszanego:
a) ręcznie, b) w mieszarce elektrycznej (fot. G. Borowski)

z dodatkiem melasy mają najbardziej jednorodną strukturę. W prasie walcowej natomiast uzyskanie prawidłowych brykietów wymagało zastosowanie lepiszcza skrobiowego.

Na poprawę jednorodności struktury dobrze wpływał również, jako drugi składnik lepiszcza, dodatek wapna hydratyzowanego. Dodatek ten umożliwił podwyższenie jakości brykietów z frakcji węglowych.

Wodoodporność brykietów

Duża odporność brykietów na środowisko wodne jest ważnym czynnikiem w przypadku planowanego składowania i transportu w odkrytych pojemnikach. Wyniki testów wodoodporności brykietów paliwowych uzyskanych w próbach laboratoryjnych przedstawiono w tabeli 4.7.

Tabela 4.7. Wyniki testów wodoodporności brykietów

Lp.	Czas zanurzenia [min.]	Masa brykietu [g]	Ubytek masy [%]
1.	0	24,50	0,00
2.	2	24,44	0,24
3.	4	24,10	1,63
4.	6	23,87	2,57
5.	7	23,18	5,39
6.	8	22,45	8,36
7.	9	22,01	10,16
8.	10	21,55	12,04

Z powyższych danych wynika, że po 10 minutach całkowitego zanurzenia nastąpił około 12-procentowy ubytek masy, a następnie brykiety ulegały dezintegracji. Wynik ten świadczy o niewystarczającej wodoodporności brykietów w dłuższym czasie oddziaływania środowiska wodnego.

Dane literaturowe wskazują, że dobra wodoodporność charakteryzuje brykiety, które nie rozpuszczają się po całkowitym zanurzeniu w wodzie w czasie od 0,5 do 1 godziny.

Wartość opałowa brykietów

Określono wartość opałową brykietów wytworzonych zarówno z samego węgla, jak i z dodatkiem biomasy w udziale od 15 do 25%. Testowano brykiety 30 minut po wytworzeniu oraz sezonowane w okresie 120 godzin. Wyniki pomiarów przedstawiono w tabeli 4.8.

Tabela 4.8. Wartość opałowa brykietów

Lp.	Materiał brykietu	Wartość opałowa [kJ·kg^{-1}]	
		brykiet świeży (0,5 h)	brykiet sezonowany (120 h)
1.	Miał węglowy	25 765	26 780
2.	Miał węglowy + 15% biomasy drzewnej	23 540	24 450
3.	Miał węglowy + 20% biomasy drzewnej	22 870	23 675
4.	Miał węglowy + 25% biomasy drzewnej	21 925	22 740

Wartość opałowa brykietów węgla z biomasą zmniejsza się ze wzrostem zawartości biomasy. Dla brykietów z 20-procentowym udziałem biomasy jest ona ok. 12% mniejsza niż brykietów z samego węgla. Zalecana przez wielu producentów kotłów centralnego ogrzewania wartość opałowa paliwa powinna wynosić co najmniej 24 000 kJ/kg [Borowski 2011], dlatego uzasadnione jest, aby maksymalny udział biomasy w mieszance z mułem i miałem węglowym nie przekraczał 20%.

We wszystkich testach wartość opałowa ze spalania brykietów sezonowanych była większa w porównaniu do spalania brykietów świeżych, co potwierdza korzyści sezonowania brykietów przeznaczonych do wytworzenia energii cieplnej.

Emisja do atmosfery podczas spalania brykietów

Określono emisję gazów i pyłów do atmosfery podczas spalania brykietów węglowych z dodatkiem biomasy w piecu komorowym w temperaturze 900–930 °C. Strumień gazów spalinowych wydostający się z pieca badano w sposób ciągły.

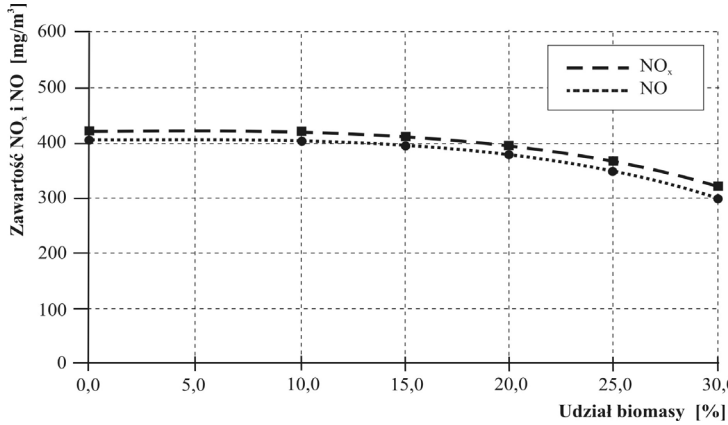
Oznaczono:

- sumę tlenków azotu – NO_x,
- zawartość dwutlenku siarki – SO_2,
- zawartość tlenku węgla – CO,
- zawartość dwutlenku węgla – CO_2,
- zawartość siarkowodoru – H_2S.

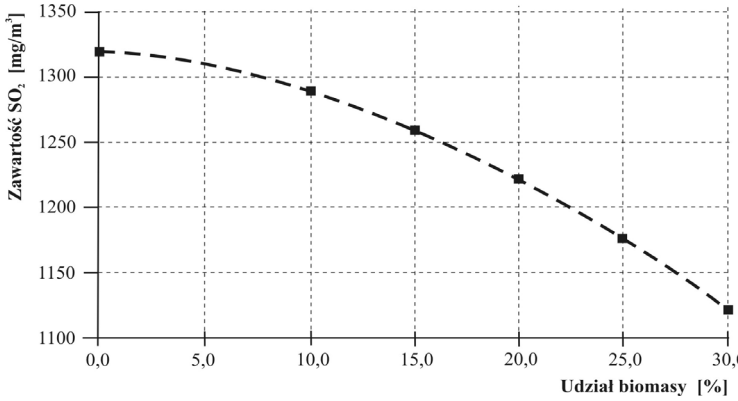
Zakres zmian zawartości wymienionych gazów spalinowych w zależności od procentowego udziału biomasy (w przedziale od 0 do 30%) w mieszance z węglem przedstawiono na rysunkach 4.4–4.8.

Analiza składu spalin wykazała, że zawartości tlenku węgla i siarkowodoru wykazują wyraźny wzrost przy spalaniu brykietów z udziałem biomasy (rys. 4.6 i 4.7). Dodatek biomasy w ilości nieprzekraczającej 20% masy mieszanki nie zmienia w znacznym stopniu wskaźników zanieczyszczeń gazów spalinowych.

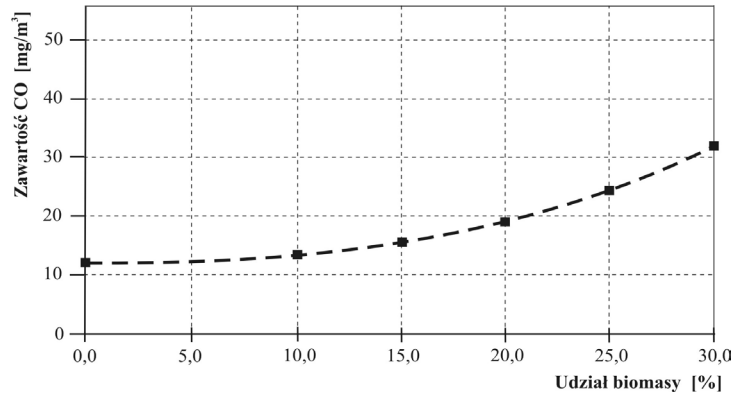
Zawartość tlenków azotu i dwutlenku siarki zmniejszała się wraz ze wzrostem udziału biomasy (rys. 4.4 i 4.5), co jest zgodne z przewidywaniami wyni-



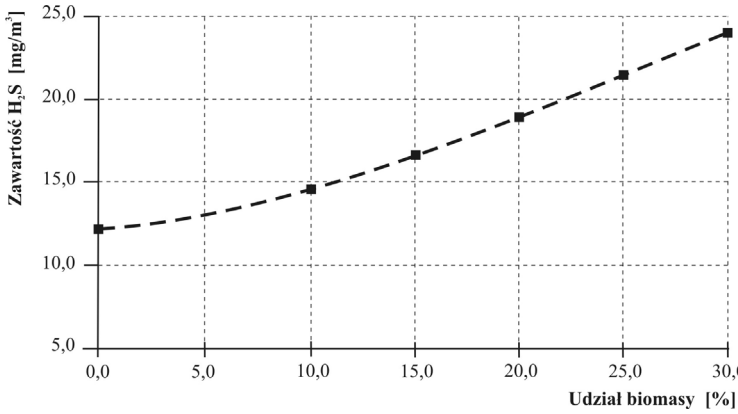
Rys. 4.4. Zmiany zawartości tlenków azotu w zależności od procentowego udziału biomasy w brykietach



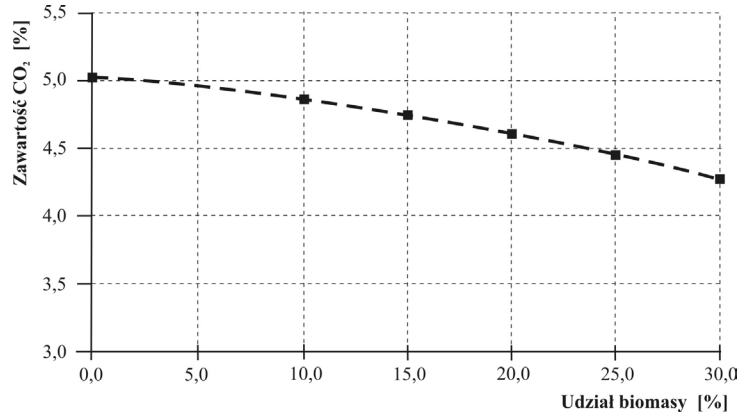
Rys. 4.5. Zmiany zawartości dwutlenku siarki w zależności od procentowego udziału biomasy w brykietach



Rys. 4.6. Zmiany zawartości tlenku węgla w zależności od procentowego udziału biomasy w brykietach



Rys. 4.7. Zmiany zawartości siarkowodoru w zależności od procentowego udziału biomasy w brykietach



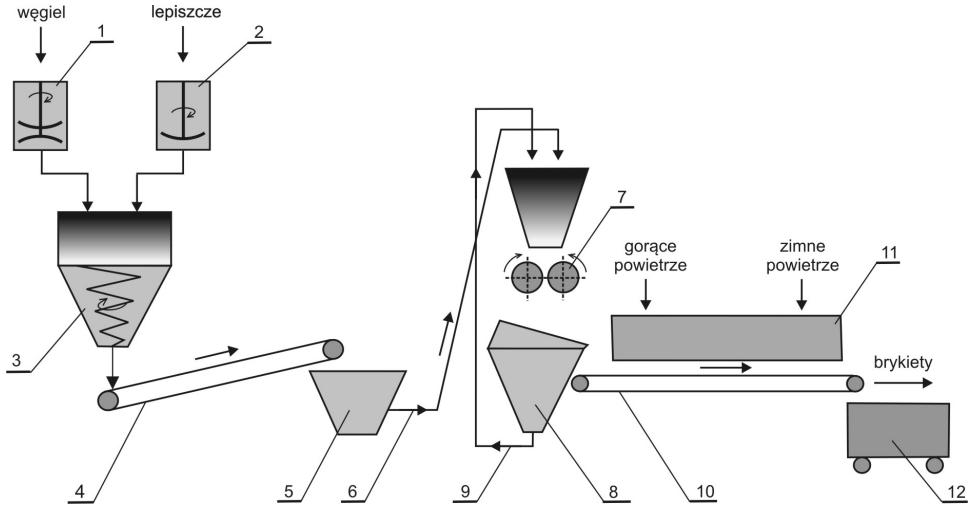
Rys. 4.8. Zmiany zawartości dwutlenku węgla w zależności od procentowego udziału biomasy w brykietach

kającymi ze składu chemicznego. Zmiany zawartości tlenku węgla, dwutlenku węgla i siarkowodoru (rys. 4.6, 4.7 i 4.8), wskazują na niewystarczającą ilość powietrza wprowadzaną do pełnego spalenia brykietu paliwowego. Do spalania mieszanki węgla i biomasy wymagana jest większa ilość powietrza, niż do spalania samego węgla [Gnutek i in. 2002].

Testy spalania potwierdziły, że wytworzone brykiety mogą być przeznaczone do spalania jako alternatywne paliwo w kotłach małej mocy do centralnego ogrzewania gospodarstw domowych.

4.4. Przemysłowe próby brykietowania drobnoziarnistego węgla

Brykietowanie drobnoziarnistego węgla kamiennego prowadzono w skali przemysłowej wykorzystując linię technologiczną o wydajności 800 $kg \cdot h^{-1}$ (rys. 4.9).



Rys. 4.9. Schemat linii produkcyjnej brykietów: 1 – zbiornik węgla, 2 – zbiornik lepiszcza, 3 – mieszarka ślimakowa, 4 – przenośnik taśmowy, 5 – zbiornik pośredni, 6 – przenośnik ślimakowy, 7 – brykieciarka walcowa, 8 – separator, 9 – przenośnik do zawrotu odsiewu, 10 – przenośnik taśmowy dosuszania brykietów, 11 – suszarka tunelowa, 12 – kontener na brykiety

Do kosza zasypowego mieszarki ślimakowej – 3 podawany jest rozdrobniony węgiel – 1 oraz lepiszcze ze zbiornika z mieszadłem – 2. Uśredniona mieszanka jest transportowana do zbiornika pośredniego – 5, skąd przenośnikiem ślimakowym – 6 jest dostarczana do prasy walcowej – 7. Brykiety po odsianiu na ruszcie separatora – 8 są transportowane przenośnikiem taśmowym – 10 do suszarki tunelowej – 11. Oddzielone od brykietów podziarno jest zawracane przenośnikiem kubełkowym – 9 do kosza zasypowego brykieciarki walcowej. Dosuszone i schłodzone brykiety są transportowane do kontenera składowego lub worków typu big-bag – 12. W linii uzyskuje się brykiety o objętości około 50 cm^3 i kształcie pokazanym na rysunku 4.10.

Brykietowanie prowadzono w prasie walcowej o nacisku jednostkowym 110 MPa dla mieszanek drobnoziarnistych węgli (muły i miały) z dodatkiem lepiszcza oraz z dodatkiem 20% biomasy (trociny). Skład mieszanek materiałów przedstawiono w tabeli 4.9.

Rys. 4.10. Kształt brykietów węglowych produkowanych w warunkach przemysłowych (fot. G. Borowski)

Tabela 4.9. Materiały testowane w próbach przemysłowych brykietowania

Nr testu	Rodzaj materiału	Rodzaj lepiszcza	Udział lepiszcza [%]	Wilgotność mieszanki [%]
1.	Miał węgla kamennego	melasa	8,0	12,0
			13,0	18,5
			18,0	26,0
2.	Miał węgla kamennego	melasa + skrobia (1:1)	10,0	24,8
3.	Miał węgla kamennego	skrobia	8,0	24,0
4.	Miał węgla kamiennego + 20% biomasy drzewnej	melasa	8,0	24,5
5.	Miał węgla kamiennego + 20% biomasy drzewnej	brak	–	25,0

Wytwarzano partie brykietów o masie 200 kg każda. Z każdej partii pobierano próbki brykietów do badań w stanie świeżym oraz próbki przeznaczone do sezonowania. Wyniki badań przedstawiono w tabeli 4.10.

Próby uzyskania wytrzymałych brykietów węglowych z dodatkiem melasy nie dały zadowalających efektów. Niezależnie od udziału melasy, brykiety miały mniejszą niż wymagane minimum wytrzymałość na ściskanie (poniżej 1,0 MPa). Przy dużym udziale lepiszcza stwierdzono znaczne zwiększenie sił tarcia w elementach roboczych oraz transportowych maszyn.

Tabela 4.10. Właściwości wytrzymałościowe brykietów z prasy walcowej w zależności od udziału lepiszcza

Lp.	Skład brykietu		Udział lepiszcza [%]	Wartość nacisku jednostkowego stempla niszczącego brykiet [MPa]	Odporność na zrzut grawitacyjny [%]
	rodzaj materiału	lepiszcze			
1.	Miał węgla kamennego	melasa	8,0	0,48	66,1
			13,0	0,51	69,7
			18,0	0,68	76,1
2.	Miał węgla kamennego	melasa + skrobia (1:1)	10,0	0,81	79,7
3.	Miał węgla kamennego	skrobia	8,0	1,99	96,5
4.	Miał węgla kamiennego + 20% biomasy drzewnej	melasa	8,0	1,63	95,0
5.	Miał węgla kamiennego + 20% biomasy drzewnej	brak	–	1,42	94,2

Dobre rezultaty uzyskano w teście, gdzie do frakcji węgla dodano skrobię ziemniaczaną. Uzyskane brykiety miały dużą odporność na ściskanie oraz na zrzut grawitacyjny. Najkorzystniejsze parametry wytrzymałościowe uzyskano dla brykietów z 8% udziałem skrobi oraz 24% początkową wilgotnością mieszanki.

Wyniki testów sezonowania brykietów węglowych z dodatkiem lepiszcza skrobiowego potwierdzają podwyższenie ich wytrzymałości mechanicznej już po 4–5 dniach od wyprodukowania (tab. 4.11). Korzystne właściwości brykietów utrzymują się przez długi czas od daty produkcji. Jednak ich wytrzymałość stopniowo zmniejsza się po trzech miesiącach sezonowania.

Tabela 4.11. Właściwości wytrzymałościowe brykietów z prasy walcowej w zależności od czasu sezonowania

Lp.	Czas sezonowania [dni]	Wartość jednostkowego nacisku stempla niszczącego brykiet [MPa]	Odporność na zrzut grawitacyjny [%]
1.	1	1,99	96,5
2.	4	2,24	97,1
3.	11	2,33	98,3
4.	28	2,38	98,5
5.	40	2,34	97,9
6.	60	2,26	97,3
7.	90	1,95	96,7

Pozytywne rezultaty uzyskano także w próbach przemysłowej produkcji brykietów z rozdrobnionego węgla kamiennego oraz 20-procentowym dodatkiem biomasy drzewnej. W testach porównano parametry wytrzymałościowe próbek brykietów węglowych wytworzonych z dodatkiem skrobi oraz z dodatkiem biomasy. W wielu wypadkach wyniki pomiarów podstawowych właściwości tych dwóch rodzajów brykietów okazały się porównywalne (tab. 4.12).

Tabela 4.12. Porównanie właściwości dwóch rodzajów przemysłowych brykietów paliwowych

Parametr	Jednostki	Brykiet węglowy z biomasą	Brykiet węglowy ze skrobią
Gęstość właściwa	$kg \cdot m^{-3}$	1 120	1 200
Wartość opałowa	$kJ \cdot kg^{-1}$	18 520	23 675
Ciepło spalania	$kJ \cdot kg^{-1}$	20 372	25 095
Zawartość wody	%	4,3	3,8
Zawartość części lotnych	%	42,5	26,6
Zawartość popiołu	%	2,1	12,2
Zawartość siarki	%	0,05	0,9
Odporność na zrzut grawitacyjny	%	98,1	94,7
Maksymalny nacisk jednostkowy w teście ściskania	MPa	2,30	2,14
Wodoodporność	minuty	13,0	12,0

Brykiety węglowe z biomasą mają wystarczające właściwości mechaniczne, bez potrzeby dodawania lepiszcza. Mają one mniejszą wartość opałową oraz ciepło spalania w porównaniu do brykietów ze skrobią, ale pozostawiają mniejsze ilości popiołów w palenisku.

Oba rodzaje brykietów nadają się jako alternatywne paliwo stałe do spalania w kotłach energetycznych centralnego ogrzewania małej mocy w gospodarstwach domowych. Dodatek skrobi jako lepiszcza okazał się korzystny do produkcji brykietów z drobnoziarnistych frakcji węgla. W przypadku brykietowania węgla w dodatkiem biomasy również uzyskano ekologiczne brykiety paliwowe. Brykiety te, ze względu na małą zawartość siarki, zalecane są do grilowania mięs w gastronomii.

5. TECHNOLOGIE ZWIĘKSZANIA ZAWARTOŚCI SUBSTANCJI WĘGLOWEJ

5.1. Wprowadzenie

W rozdziale przedstawiono możliwości uzyskiwania mułów węglowych o zwiększonej zawartości macerału w ramach istniejących rozwiązań obiegów wodno-mułowych w zakładach przeróbczych. Zagospodarowanie drobnoziarnistych odpadów węglowych w górnictwie i w energetyce oparte jest na akceptacji ich niskiej jakości. Realizowane dotychczas działania tylko w małym zakresie wpływały na podwyższenie efektywności energetycznej mułów węglowych.

Na podstawie prowadzonych studiów i badań nad technologiami rozdziału drobnoziarnistych surowców i odpadów, dla wzbogacania drobnoziarnistych odpadów węglowych przydatne są między innymi [Hycnar i in. 2005, 2013, Hycnar 2015, Lutyński 2005, Lutyński i Szpyrka 2012]:

- metody selektywnego wydzielania cieków bogatych w węgiel z obiegów wodno-mułowych,
- metody klasyfikacji ziarnowej, densymetrycznej i opartych o różnice właściwości powierzchniowych ich składników,
- metody „głębokiego" wzbogacania drobnoziarnistych odpadów górniczych,
- zmiany dotychczasowych metod składowania zawiesin wodno-mułowych w osadnikach.

Analizy uzyskanych wyników badań i prób wykazały duże możliwości wdrożenia prostych i efektywnych metod odzysku substancji węglowych oraz podwyższenia efektów ekonomicznych u producentów i użytkowników drobnoziarnistych odpadów węglowych.

5.2. Selektywne wydzielanie drobnoziarnistych odpadów węglowych z odcieków obiegów wodnych zakładów wzbogacania węgla

Gospodarka wodno-mułowa w kopalniach jest przykładem uśredniania różnej jakości i składu cieków z poszczególnych węzłów technologicznych zakładów wzbogacania węgla i następnie odwadniania zawiesin wodno-mułowych, rezultatem czego jest muł o średnich właściwościach i składzie. Analizy fazy stałej zawartej w odciekach wodno-mułowych wykazują bardzo duże zróżnicowanie ich składu i właściwości energetycznych w zależności od miejsca ich powstawania.

Można zauważyć, że odcieki bogate w węgiel są tracone na rzecz bardzo często bezużytecznych uśrednionych mułów. Dotychczasowe typowe rozwiązania gospodarki wodno-mułowej wymagają weryfikacji organizacyjnej, ekonomicznej i ekologicznej oraz odważnego zerwania z tradycją.

Dla oceny różnic w składzie i właściwościach odcieków, badano fazę stałą z zawiesin wydzielanych z następujących węzłów technologicznych: osadników wód dołowych; rekuperatorów obciążnika magnetytowego; sortowni; osadzarek (*jigs*); zagęszczaczy promieniowych; pras filtracyjnych; wirówek; separatorów spiralnych i osadników mułowych. Charakterystykę wydzielanych mułów z wyżej wymienionych cieków ilustrują dane w tabeli 5.1.

Tabela 5.1. Charakterystyka mułów wydzielanych z cieków obiegu wodno-mułowego zakładu wzbogacania węgla

L,p,	Faza stała wydzielona z cieku z węzła technologicznego	Wartość opałowa, MJ/kg		Ciepło spalania, MJ/kg		Zawartość popiołu, %		Udział frakcji, %
		faza stała (muł)	frakcja >45 µm	faza stała (muł)	frakcja >45 µm	faza stała (muł)	frakcja >45 µm	
1,	Dołowy chodnik wodny	6,925	–	11,890	–	30,4	–	–
2,	Sortownia +/- 20 mm	13,787	21,033	16,516	22,000	50,0	31,5	48,5[a]
3,	Rekuperatory magnetytu	10,4546	17,448	11,005	18,275	55,8	35,3	35,6[c]
4,	Osadzarka	14,238	18,407	15,053	19,355	58,0	33,5	63,1[a]
5,	Wirówka odwadniająca	18,480	–	19,174	–	31,0	–	53,7[b]
6,	Separator spiralny	2,525	22,118	–	23,191	74,5	15,0	15[b]
7,	Zagęszczacz promieniowy	11,903	17,492	12,498	18,341	52,8	34,1	39,6[c]
8,	Prasa filtracyjna placek mułu	9,863	–	10,471	21,243	57,5	24,3	23,3[c]
8,	Osadnik mułów	7,000–21,000 12,465	– 21,315	9,000–25,000 13,136	– 22,315	9,5–70,0 48,0	– 17,9	– 31,8[b]

Objaśnienia: udział frakcji powyżej – a >32 µm, b >63 µm, c >45 µm.

Analiza rezultatów badań fazy stałej wydzielonej z cieków, dla omawianej kopalni, wykazała następujące różnice wyników (maksymalny – minimalny):

- wartość opałowa – różnica około 11 MJ/kg (wirówka odwadniająca = 18 480 kJ/kg; dołowy chodnik wodny = 6925 kJ/kg),
- ciepło spalania – różnica około 8 MJ/kg (wirówka odwadniająca = 19 174 kJ/kg; prasa filtracyjna, placek mułu = 11 471 kJ/kg),
- zawartość popiołu – różnica około 28% (osadzarka = 58,0%; dołowy chodnik wodny = 30,4%),

- zawartość frakcji ziarnowej (koncentratu węglowego) różnica około 40% (osadzarka = 63,1%; prasa filtracyjna, placek mułu = 23,3%).

Przytoczone wyniki badań były weryfikowane na przykładzie obiegów wodno-mułowych w innych kopalniach. Wszystkie te próby potwierdziły duże zróżnicowanie składu i właściwości wydzielanej fazy stałej z poszczególnych odcieków. Różnice dotyczyły jedynie miejsc występowania najbogatszych i najuboższych odcieków, co wynika z odmienności właściwości węgla i rozwiązań technologii ich wzbogacania.

Pokazane różnice w składzie i właściwościach fazy stałej wydzielonej z cieków różnych węzłów technologicznych węgli energetycznych, jeszcze wyraźniej występują w przypadku odpadów poflotacyjnych. Zastąpienie suszarni termicznych wirówkami sedymentacyjno-filtracyjnymi do odwadniania węgli po flotacji przyniosło duże efekty ekonomiczne, ale jednocześnie stworzyło nowy problem w postaci odcieków z wirówek. Wydzielany odciek tworzy pianę bogatą w bardzo drobne ziarna węgla, trudną do sedymentacji, stwarzając szereg problemów w eksploatacji obiegów wodno-mułowych kopalń. Wydzielaną mieszaninę sedymentu i odpadów poflotacyjnych częściowo zagospodarowano, jako jeden ze składników do wytwarzania brykietów węglowych [Giemza 2009]. W ostatnich latach, w jednej z kopalń, uruchomiono instalację zagęszczania odcieków z wirówek i wydzielania tzw. sedymentu, w formie placków filtracyjnych [Kot 2012]. Różnice w składzie i właściwościach odpadów pofiltracyjnych i sedymentu ilustrują dane w tabeli 5.2.

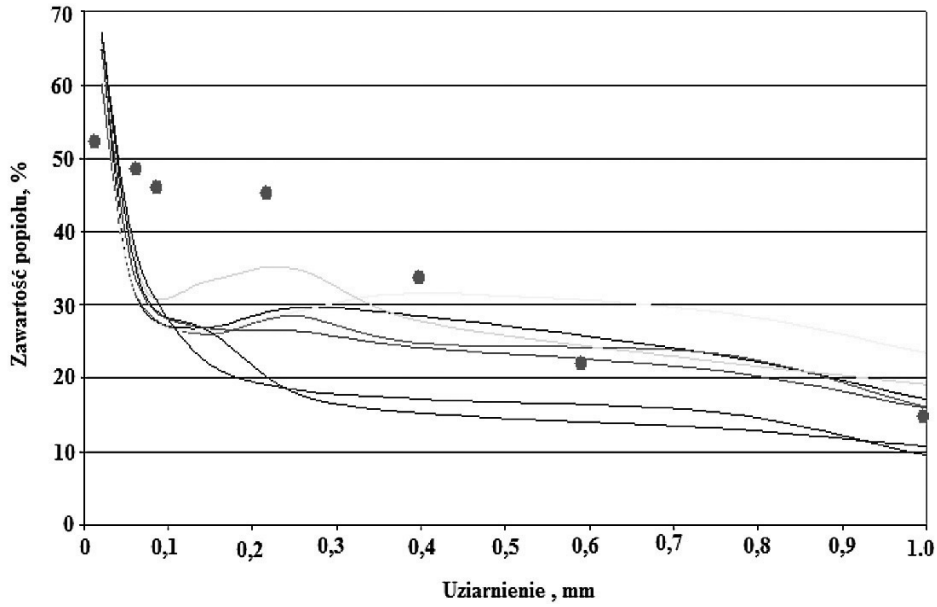
Tabela 5.2. Porównanie właściwości fizykochemicznych sedymentu, odpadów poflotacyjnych i mułów węglowych [Giemza i in. 2007, Hycnar i Kadlec 2008]

L.p.	Określenie	Jednostki	Sedyment			Muły węglowe	Odpady poflotacyjne
			zakres	2012	2014		
1.	Zawartość:						
1.1.	– wody	%	16–32	21,9	31,7	18–42	7–37
1.2.	– popiołu	%	16–22	10,7	19,5	19–50	7–87
1.3.	– siarki	%	0,6	0,36	0,38	0,6–1,2	0,3–2,8
2.	Ciepło spalania	MJ/kg	–	31,2	24,4	–	–
3.	Wartość opałowa	MJ/kg	18 – 24	23,1	15,5	6	6–13
4.	Zawartość frakcji ziarnowych:						
4.1.	– > 1000 µm	%	–	0,0	0,0	6	6–13
4.2.	– > 600 µm	%	–	0,0	0,0	8	–
4.3.	– > 250 µm	%	–	0,0	0,0	10	–
4.4.	– > 125 µm	%	–	0,0	0,0	15	13–84
4.5.	– > 60 µm	%	3–8	0,0	0,0	20–40	–
4.6.	– > 40 µm	%	< 20	1,4	7,05	–	–

Prowadzone badania nad sedymentem węglowym wykazały, że powstający odciek z wirówek odwadniających węgiel po flotacji stanowi niestabilny układ dyspersyjny, ulegający łatwo sedymentacji pod wpływem hydrofobowych dodatków [Hycnar 2008]. Wydzielane sedymenty charakteryzowały się ciepłem spalania powyżej 30 MJ/kg i zawartością popiołu poniżej 8% popiołu i mogą być dodawane do produktów flotacji lub do obiegu nadawy do flotacji. Ponadto, specyfika uziarnienia i właściwości suspensji pozwoliły na wykorzystanie sedymentu do tworzenia suspensji węglowo-wodnych [Hycnar i in. 2014, Michalik i in. 2013].

5.3. Wydzielanie frakcji bogatych w węgiel z drobnoziarnistych odpadów węglowych

Badania składu ziarnowego drobnoziarnistych odpadów węglowych wykazuje pewną prawidłowość, taką mianowicie, że w mułach węglowych można wyraźnie odróżnić frakcje ziarnowe ubogie i frakcje bogate w składniki mineralne (oznaczane jako popiół). Najczęściej punktem przegięcia jest uziarnienie mułów na granicy 30 do 60 mikrometrów. Frakcje ziarnowe powyżej punktów przegięcia zawierają najniższe zawartości popiołu, czyli charakteryzują się wyższą kalorycznością (rys. 5.1). W przypadku odpadów poflotacyjnych nie obserwujemy tak wyraźnej zależności pomiędzy zawartością popiołu, a ich uziarnieniem.

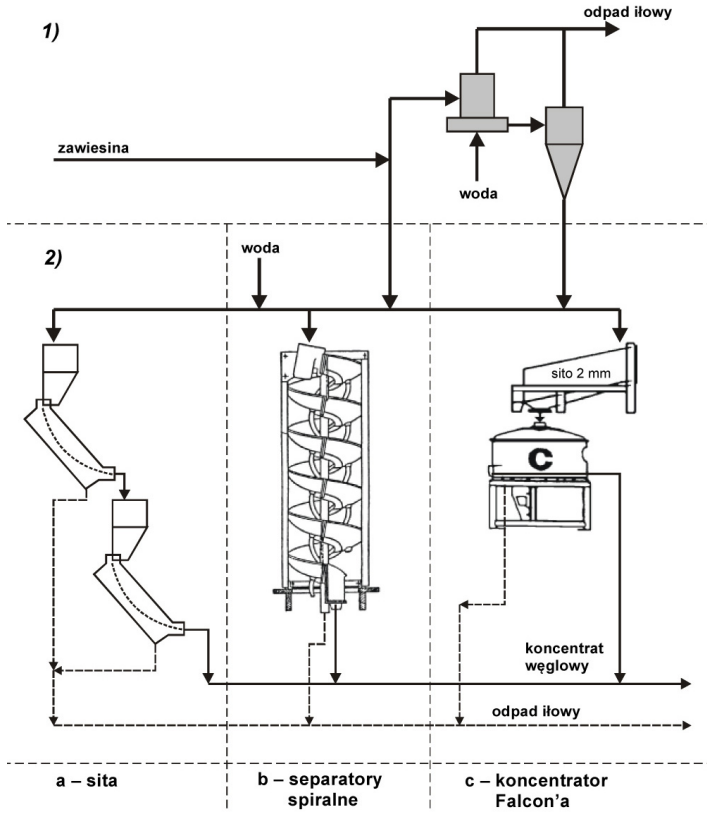


Rys. 5.1. Przykładowe przebiegi zależności zawartości popiołu od wielkości uziarnienia mułów węglowych (linie) i odpadu poflotacyjnego (●)

Ze względu na to, że często muły węglowe i odpady poflotacyjne są wspólnie składowane, mamy wtedy do czynienia ze złożem mało zdefiniowanym. W przypadku składowania mieszanin zawiesin wodnych drobnoziarnistych odpadów węglowych w osadnikach, podlegają one segregacji grawitacyjnej, adekwatnie do ich składu ciężarowego i ziarnowego.

Możliwość i celowość klasyfikacji ziarnowej mułów węglowych jest potwierdzana od wielu lat i przez wiele ośrodków, natomiast w małym zakresie dochodzi do przemysłowego ich wdrożenia. Najczęściej prezentowane są propozycje klasyfikacji zawiesin wodnych mułu w hydrocyklonach i następnie na sitach łukowych lub separatorach spiralnych (rys. 5.2) [Hycnar i Bugajczyk 2004, Hycnar i in. 2005, Hycnar 2015b, Lutyński A. i Lutyński M. 2014].

Wybór urządzeń do badań nad klasyfikacją ziarnowa oparto o wymagania jakościowe i ilościowe wydzielania koncentratów węglowych powyżej 0,05 mm. Spośród wielu sposobów klasyfikacji ziarnowej mułów węglowych, próby odzysku koncentratów węglowych prowadzono na:



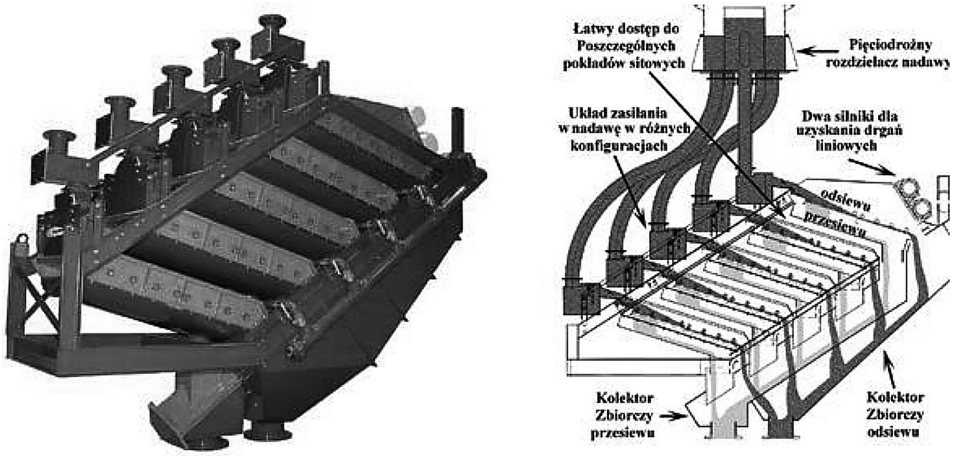
Rys. 5.2. Schemat technologiczny wydzielania koncentratów węglowych z mułów węglowych i odpadów poflotacyjnych [Hycnar i in. 2005]

- przesiewaczu typu Stack Sizer firmy Derrick Corporation,
- sitach łukowych (*VariSieve*) konstrukcji firmy Progress Eco SA,
- sitach szybkodrgających z tekstylną przeponą filtracyjną.

Pomimo zadawalających efektów wzbogacania, nie prowadzono badań nad zastosowaniem stołów koncentracyjnych (wymagają dużych powierzchni ich stosowania), ani też hydrocyklonów (zalety i wady powszechnie znane) i w osadzarce grawitacyjnej (TBS *Teeter Bed Separator*; *hydrosizer*) ze względu na wymagania ścisłego przestrzegania parametrów procesu. Natomiast, odpady poflotacyjne poddano separacji w wirówkach o dużych wartościach sił odśrodkowych dla oceny nie tylko możliwości wydzielania koncentratów węgla koksowego, ale także oceny ekonomicznej takiego wdrożenia.

5.3.1. Stosowanie przesiewaczy typu Stack Sizer

Badania wzbogacania mułów węglowych zrealizowano dzięki uprzejmości firmy Derrick Corp., która udostępniła przesiewacz wibracyjny Stack Sizer z sitami poliuretanowymi o granicznej szczelinie 0,075 mm [Rolnik 2009] (rys. 5.3).



Rys. 5.3. Wygląd i schemat działania przesiewacza Stack Sizer [Fine... 2005]

Przeprowadzone próby wykazały skuteczny proces klasyfikacji i odilania strugi wydzielanego koncentratu węglowego o uziarnieniu powyżej 0,075 mm (tab. 5.3). Duże znaczenie dla efektów klasyfikacji ma utrzymywanie stałej wielkości nadawy i jej stężenia. Niedotrzymywanie tych parametrów wpłynęło na pogorszenie jakości koncentratów (tab. 5.3 – próba 4 i 5).

Tabela 5.3. Wyniki klasyfikacji ziarnowej mułów węglowych na sicie Derrik Stack Sizer

Nr próby	Nazwa próbki	W^a, %	A^a,%	Q_i^a, kJ/kg	S^a, %
1	nadawa	1,5	51,2	12 807	0,82
	przesiew	1,7	54,0	12 092	1,16
	odsiew	2,5	28,3	20 228	1,05
2	nadawa	8,0	39,6	14 188	0,83
	odsiew	7,2	6,7	25 934	0,75
3	nadawa	5,1	45,3	13 743	0,95
	przesiew	2,3	52,4	12 271	0,90
	odsiew	4,9	35,7	16 973	0,86
4	nadawa	8,8	40,6	13 473	0,79
	przesiew	7,3	47,9	14 758	0,82
	odsiew	6,5	38,1	14 864	0,79
5	nadawa	2,6	44,4	14 622	0,90
	przesiew	3,2	28,4	19 931	0,76
	odsiew	6,7	27,0	20 143	0,78

5.3.2. Stosowanie sit łukowych i odśrodkowych sit odwadniających

Wybór sit łukowych do klasyfikacji mułów węglowych wynikał z ich specyficznych właściwości. Styczne podawanie cienkiej warstwy (filmu) zawiesiny wodno-mułowej na krzywiznę powierzchni sita szczelinowego powoduje zmniejszenie czynnej wielkości szczelin sita oraz zwiększenie oddziaływania sił odśrodkowych na odwodnienie i rozdział ziaren cięższych od lżejszych. W szeregu przypadkach, na sitach łukowych obserwuje się zachodzenie także zjawiska flotacji ziaren węgla.

Sita łukowe są stosowane w zakładach wzbogacania urobku, głównie do odwadniania zawiesin węglowych i do oczyszczania ścieków; w znacznie większym zakresie stosowane odśrodkowe sita odwadniające, tak zwane sita OSO.

Zależność pomiędzy średnicą graniczną wydzielanych ziaren d_{gr}, a wielkością szczelin sita s_s ujęta jest następująco:

$$d_{gr} = (0{,}5 \div 0{,}6) \cdot s_s, \text{ mm}$$

Uwzględniając fakt, że granice pomiędzy frakcją węglową a frakcją iłową przebiegają przy granicznej średnicy ziaren wynoszącej średnio 0,05 mm stwierdzono, że najodpowiedniejsze jest sito łukowe ze szczelinami o wielkości 0,1 mm. Badania klasyfikacji zawiesin wodno-mułowych prowadzono na stanowisku z jednym sitem łukowym, na sitach o różnych szczelinach (rys. 5.4).

Początkowo badania rozdziału zawiesin drobnoziarnistych odpadów węglowych prowadzono na sitach ze szczeliną 1 mm, co odpowiadało granicznemu ziarnu 0,5 mm nie gwarantując pełnego wydzielania koncentratów węglowych. Poprawę odzysku koncentratów węglowych uzyskano na sitach ze szczeliną 0,35 i 0,1 mm. Częściowy zbór wyników rozdziału na sitach łukowych ilustruje tabela 5.4.

Rys. 5.4. Schemat instalacji z sitem łukowym do klasyfikacji zawiesin wodno-mułowych

Tabela 5.4. Wyniki klasyfikacji ziarnowej mułów węglowych na sitach łukowych

L.p.	Określenie	Zagęszczenie, g/dm^3	A^a, %	S^a_t, %	Frakcja ziarnowa			
					+ 0,063		– 0,063	
					udział, %	A^a, %	udział, %	A^a, %
1.	Sito łukowe ze szczelinami 1,0 mm							
	Nadawa: – średnia – min.-maks.	– –	33,3 29–33	– –	– –	– –	– –	– –
	Produkt górny – średnia – min.-maks.	– –	26 22–30	– –	– –	– –	– –	– –
	Produkt dolny: – średnia – min.-maks.	– –	44 37–63	– –	– –	– –	– –	– –
2.	Sito łukowe ze szczelinami 0,35 mm							
	Nadawa: – średnia – min.-maks.	 26–92	38,0 32,5–42	1,08 0,95–1,2	35,9 25,9–58,6	19,0 16,2–23,8	64,1 41,3–74,4	54,3 52,4–56,4
	Produkt górny – średnia – min.-maks.	 46–220	27,6 19–35,1	0,95 0,94–0,98	57,9 26,2–83,0	19,9 15,3–25,5	42,1 16,9–73,8	50,8 47,5–52,8
	Produkt dolny: – średnia – min.-maks.	 19–87	43,5 41,4–45,1	1,07 1,02–1,17	28,3 21,7–41,5	20,9 18,6–25,7	71,7 58,5–78,3	54,3 52,5–55,8
3.	Sito łukowe ze szczelinami 0,1 mm							
	Nadawa – średnia – min.-maks.	 80–120	43,9 39–48	0,74	27,6	12,1	75,4	–
	Produkt górny – średnia – min.-maks.		20,1 16,8–26,1	0,73	78,6	15,4	21,4	–
	Produkt dolny – średnia	–	55,7	0,74	8,8	16,8	91,2	–

Badanie rozdziału mułu węglowego na sicie o szczelinie 1 mm, nie zapewniło ilościowego wydzielania koncentratu węglowego, ale pozwoliło na wydzielenie frakcji koncentratu o średniej zawartości popiołu w wysokości 26% z odpadu zawierającego średnio 44% popiołu. Przy sporządzaniu zawiesin wodno-mułowych wystąpiły poważne trudności rozluźnienia struktury placków mułu węglowego. Przeprowadzono próby tworzenia jednorodnej zawiesiny mułów z wodą poprzez jej przewóz w samochodzie z obrotowym bębnem, stosowanym do transportu betonu towarowego. Niestety, przejazd 30 kilometrowy nie spowodował wytworzenia jednorodnej zawiesiny. Część mułu z wodą wytworzyła zawiesinę wodno-mułową, jednocześnie powstały dużej średnicy bryły mułów kształtem zbliżone do kul, wymagające mechanicznego rozbijania.

W przypadkach placków filtracyjnych drobnoziarnistych odpadów węglowych poważnym i trudnym problemem było ich upłynnianie i tworzenie wodnych zawiesin o dużym zdyspergowaniu zawartych ziaren. Znaczącą przeszkodą w tych przypadkach są flokulanty zawarte w strukturze placków filtracyjnych, dodawane do zawiesin dla przyspieszenia koagulacji części stałych przed poddaniem ich odwodnieniu na prasach filtracyjnych.

Zawiesinę mułów i odpadów poflotacyjnych pobierano przed osadnikiem promieniowym (Dorr) i wzbogacano na sicie łukowym ze szczelinami 0,35 mm, uzyskując koncentraty węglowe o średniej zawartości popiołu 26,7% i frakcję iłową o zawartości popiołu średnio 43,5%, z mieszaniny odpadów o zawartości popiołu wynoszącej średnio 38,0% (tab. 5.4).

O niepełności wydzielenia koncentratu węglowego z mieszaniny odpadów (muł + odpady poflotacyjne) na sicie łukowym ze szczeliną 0,35 mm świadczą wyniki analizy zawartości klasy ziarnowej +/- 0,063 mm. Okazuje się, że produkty dolne (iłowe) zawierały średnio 28,3% klasy ziarnowej powyżej 0,063 mm, co wynika z różnicy zawartości omawianych klasy w nadawie i szczeliny sita 0,35 mm, co odpowiada granicznej średnicy ziarna wydzielanego 0,175 mm.

We wszystkich próbach, produkt górny (koncentrat) charakteryzował się obniżoną zawartością popiołu i siarki w porównaniu do nadawy. Stosunkowo duże rozrzuty wyników badań wynikają przede wszystkim z prowadzenia prób na instalacji przemysłowej, w okresie uruchamiania instalacji flotacji węgla oraz trudności zapewnienia równomiernego rozprowadzenia nadawy na sito łukowe.

Najbardziej pełne wydzielenie koncentratów węglowych z zawiesin wodno-mułowych uzyskano na sicie łukowym ze szczelinami 0,1 mm (tab. 5.4). Przebadano trzy zawiesiny wodno-mułowe wykonane z placków mułowych różniące się zawartością klasy ziarnowej +0,063 mm, uzyskując koncentraty węglowe o wysokich wartościach ciepła spalania (18,6; 20,3 i 27,1 MJ/kg) i o znacznie obniżonej zawartości popiołu, w adekwatnej kolejności 25; 17,7 i 13,7% (nadawa 44%).

Wszystkie doświadczenia z sitami łukowymi zostały wykorzystane przy opracowaniu założeń dla instalacji pilotowej, dla umożliwienia weryfikacji założeń i zbilansowania koncentratów węglowych, w ustalonych miejscach selektywnego odbioru cieków (zawiesin wodno-mułowych z konkretnego urządzenia). Wielkość instalacji pilotowej uzależniona jest od wielkości odcieku i parametrów zastosowanego sita łukowego (powierzchnia czynna). Natomiast, na jakość i ilość odzyskiwanych koncentratów węglowych z zawiesin wodno-mułowych ma istotny wpływ:

- zagęszczenie nadawy,
- wysokość spiętrzenia nadawy,
- ułożenie sita łukowego w łożu,
- sposób i ilość podawanej wody na sito łukowe.

Wydajność filtracyjną sita łukowego oblicza się następującą zależnością [Battaglia 1963]:

$$V = c \cdot F \cdot v \qquad (1)$$

gdzie: V – wydajność, m^3/h,
c – współczynnik, wg Fontein'a dla mułów węglowych równy 160,
F – powierzchnia czynna sita (same szczeliny) lub sit, m^2,
v – prędkość nadawy w szczelinie nadawy (obliczana z wysokości spiętrzenia nadawy), m/s.

lub za pomocą wzoru (2):

$$V = q \cdot F \qquad (2)$$

gdzie: q – wydajność jednostkowa dla zawiesiny, $m^3/h \cdot m^2$,
dla sit łukowych z napływem bezciśnieniowym $q = 150\ m^3/h \cdot m^2$,
dla sit łukowych z napływem ciśnieniowym $q = 200\ m^3/h \cdot m^2$.

Dobór szczeliny sita łukowego s_s dokonuje się w zależności od średnicy ziarna granicznego d_{gr}, według wcześniej podanej zależności:

$$d_{gr} = 0{,}5 \cdot s_s, \text{ mm} \qquad (3)$$

W przypadku wielu mułów węglowych, granica pomiędzy frakcją węglową a frakcją iłową przebiega przy granicznej średnicy ziaren wynoszącej 0,05 mm. Oznacza to, że najodpowiedniejsze jest sito łukowe ze szczelinami o wielkości 0,1 mm.

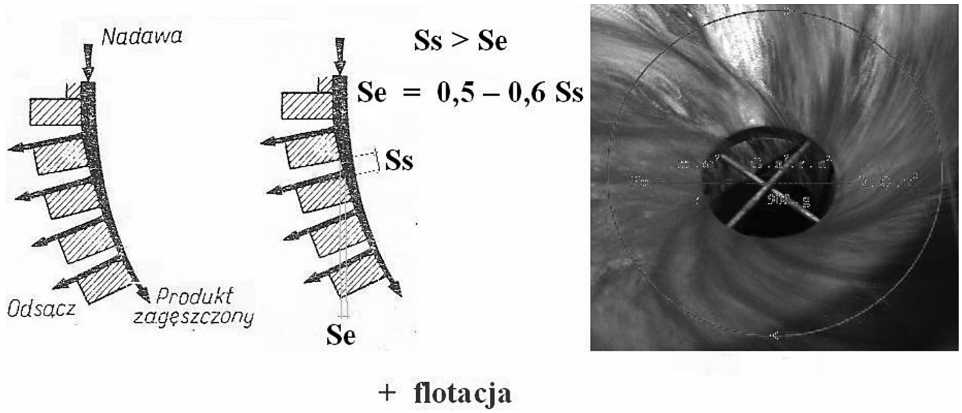
Zazwyczaj pojedyncze instalacje z jednym sitem łukowym są równolegle układane w baterie oczyszczające. W przypadkach kiedy nadawa zawiera dużą ilość podziarna, dla pełnego jego wypłukania budowane są baterie z szeregowym ułożeniem sit łukowych; niejednokrotnie stosowane jest także przemywanie złoża wodą (prysznic).

Dla uzyskania wymaganej wydajności klasyfikacji i odwodnienia zawiesin istotnym jest zapewnienie odpowiedniej spiętrzenia nadawy (odpowiednia wysokość słupa lub ciśnienie tłoczonej nadawy).

Dla zintensyfikowania procesu ilościowego wydzielania koncentratów węglowych i zwiększenia przepustowości sit (liczone jako m^3/m^2), zastąpiono tradycyjne sita łukowe odśrodkowymi sitami odwadniającymi (tzw. sita OSO). Zastosowanie sit OSO do klasyfikacji i odwodnienia indywidualnych odcieków w obiegu wodno-mułowym, umożliwi:

- wydzielanie ziaren z zawiesiny o uziarnieniu „Se" 0,5–0,6 wielkości szczeliny sita „Ss", dzięki stożkowemu ułożeniu rusztowin sita,
- wydzielanie ziaren lżejszych od wody (cząstki węgla), działanie grawitacyjne i flotacyjne,
- odwodnienie zawiesiny w szczelinach sita.

Powyższe procesy są zintensyfikowane wskutek przebiegu ich w cienkiej warstwie i oddziaływania sił odśrodkowych na nadawę. Mechanizm działania sit OSO na proces wzbogacania cieków wodno-mułowych ilustruje rysunek 5.5.

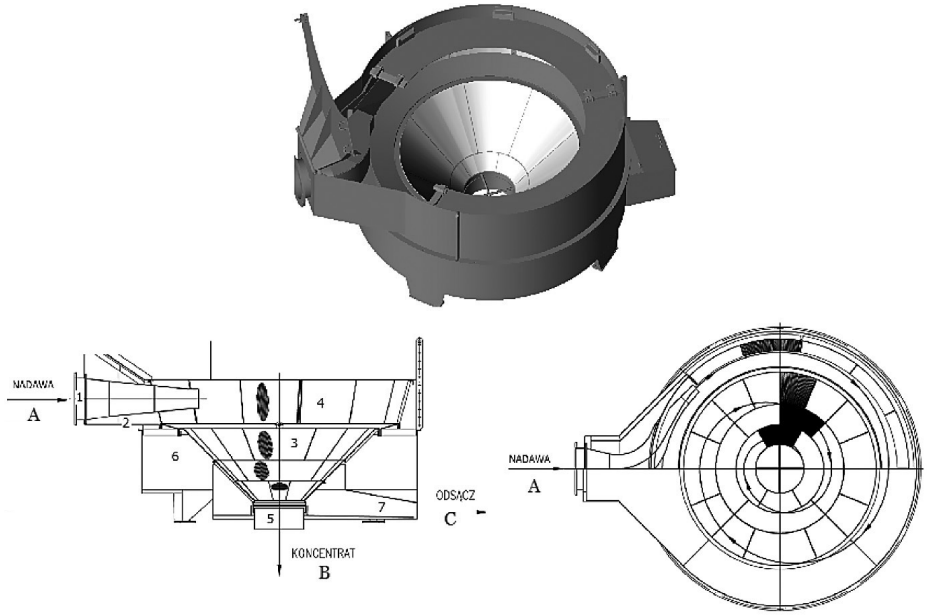


Rys. 5.5. Schemat funkcjonowania klasyfikacji ziarnowej i odwodnienia zawiesin na sitach OSO

Uruchomienie przez firmę Progress Eco SA produkcji trudnościeralnych sit OSO ze szczelinami 0,1 mm umożliwia wdrożenia technologii selektywnego odzysku koncentratów węglowych (rys. 5.6. i tab. 5.5). Wkłady sitowe OSO wykonane z drutów profilowych charakteryzują się:

- dużym współczynnikiem prześwitu,
- dużą wydajnością,
- ostrą krawędzią profilu roboczego zapewniającą struganie warstw nadawy, uzyskując efekt właściwej pracy sita,
- efektywnością odwadniania, odmulania i klasyfikacji.

Za wdrożeniem sit OSO do selektywnego wydzielania koncentratów węglowych z indywidualnych odcieków wodno-mułowych przemawiają także



Rys. 5.6. Odśrodkowe sito odwadniające OSO: A – nadawa, B – koncentrat, C – odsącz, 1 – dysza nadawcza, 2 – obudowa kierownicy, 3 – sito szczelinowe stożkowe, 4 – kierownica, 5 – wylot produktu odwodnionego, 6 – wanna zbiorcza odsączu, 7 – wylot odsączu

Tabela 5.5. Charakterystyka sit OSO z wkładką sitową w obudowie kierownicy

Wielkość sita OSO	Jednostka	1200	1600	2000	2400	2800	3200
Powierzchnia robocza kosza	m²	1,4	2,6	4,1	6,0	8,3	10,5
Powierzchnia robocza kierownicy	m²	0,9	1,6	2,7	4,0	5,1	5,6
Szczelina sit	mm	Podlega uzgodnieniu przy zamówieniu					
Masa	kg	1 180	1 810	2 400	2 770	3 900	4 000
Orientacyjna wydajność dla szczeliny s = 0,75 mm	m³/h	230	420	680	1 000	1 340	1 650
Wydajność dla szczeliny 0,1 mm, przy wysokości naporu zawiesiny 1,87 m	m³/h	38,6 – 41,9	–	–	–	–	–

doświadczenia przemysłowe i modelowe z sitami OSO zastosowanymi do oddzielania żużla od popiołu lotnego z ich wodnych zawiesin (pulpy) [Hycnar i in. 2010, 2011] oraz do oczyszczania wód odciekowych z instalacji odżużlania [Hycnar i in. 2015b, 2016].

Na szczególną uwagę zasługują badania i próby oczyszczania wód odciekowych zawierających ziarna popiołu lotnego, żużla, mikrosfer i niespalonego węgla o uziarnieniu poniżej 800 μm (uziarnienie zbliżone do mułów węglowych). Dla opracowania technologii oczyszczania wód odciekowych, w oparciu o założenia opracowane przez Ecocoal Consulting Center została zbudowana przez Tauron

Rys. 5.7. Instalacja doświadczalna klasyfikacji i odwadniania zawiesin wodnych zawierających fazę stałą o uziarnieniu poniżej 800 μm (fot. J.J. Hycnar)

Tabela 5.6. Zestawienie wyników prób i badań oraz dokonanych modernizacji na instalacji OSO

L.p.	Wyszczególnienie	Jednostka	Średnie	Rozrzut
1.	Woda odciekowa z IOŻ:			
1.1.	- zawartość zawiesin, g/l	g/dm^3	3,13	0,25–4,94
1.2.	- zawartość ziaren >50 mm	%	80,8	37,49–94,02
2.	Odśrodkowe sito odwadniające OSO 1200:			
2.1.	- wielkość szczelin	mm	0,10	–
2.2.	- powierzchnia robocza sita dostarczonego [zmodernizowanego]	m^2	2,3 [2,8]	–
3.	Przepustowość (wydajność) sita OSO 1200:			
3.1.	- wydajność filtracyjna (+D1; h=1,87 m)	m^3/h	40,0 [48,7]	32,11–55,0
3.2.	- jednostkowa filtracyjność	m^{3}h/m^2	17,4 [17,4]	–
4.	Efekty oczyszczania wód odciekowych –			
4.1.	– zawartość zawiesin w próbkach :			
	- nadawa	g/dm^3	12,30	5,52–22,7
	- filtrat	g/dm^3	2,03	1,26–2,82
	- koncentrat	g/dm^3	–	–

Wytwarzanie SA przy współpracy z Progress Eco instalacja doświadczalna w Elektrowni Łaziska (rys. 5.7. i tab. 5.6).

Zastosowanie odśrodkowego sita odwadniającego do klasyfikacji ziarnowej i odwodnienia zawiesin wody odciekowej, zapewniło wydzielanie ziaren fazy stałej adekwatne do ich ilości w nadawie i zastosowanej szczeliny sita. Sita

odwadniające ze szczelinami 0,1 mm, umożliwiły ilościowe wydzielanie ziaren większych od 0,05 mm z oczyszczanych zawiesin.

Na efekt klasyfikacji ziarnowej i odwodnienia zawiesin wód odciekowych na sicie OSO istotny wpływ wywierają:

- sposób podawania nadawy na sito OSO (grawitacyjny i wymuszony, dodatkowo regulowany przepustnicami), decydujący o wielkości naporu nadawy na sito kierownicy i sito stożkowe;
- sposób rozprowadzania nadawy na powierzchnię sita OSO;
- ilość i jakość podawanej nadawy na sito. Stwierdzono wzrost stopnia usunięcia i zawodnienia fazy stałej z nadawy ze wzrostem wielkości nadawy.

5.3.3. Stosowanie sit z tekstylną przegrodą filtracyjną

Do wydzielania koncentratów węglowych z zawiesin drobnoziarnistych odpadów węglowych zastosowano opracowane w Politechnice Śląskiej w Gliwicach rozwiązanie odilania drobnoziarnistych odpadów węglowych poprzez ich przesiewanie na przesiewaczu szybkodrgającym z tekstylną przegrodą filtracyjną (tzw sito BS) [Białas i in. 2001]. Według Autorów rozwiązania, w zależności od zastosowanej przepony, uzysk koncentratu węglowego z dostarczonego mułu węglowego w procesie jednostopniowego przesiewania wahał się od 6,9 do 11,6%, a przy dwukrotnym przesiewaniu mieścił się w granicach 7,01 do 19,24%.

Uzyskane wyniki badań weryfikowano na instalacji przemysłowej w kopalni węgla kamiennego. W tym celu, około 28 ton mułu węglowego uwodniono i jako zawiesinę o zagęszczeniu 427 g/dm^3 podano na hydrocyklon. Z hydrocyklonu odbierano w formie przelewu zawiesinę iłu i wylew, stanowiący nadawę na sito BS w ilości 70 ton o zagęszczeniu 627,9 g/dm^3.

W wyniku odilania na sicie BS odbierano odsącz (zawiesina iłu w wodzie) w ilości 40 ton o zagęszczeniu 212,2 g/dm^3 i produkt w ilości 30 ton zawierający 20 ton koncentratu i 10 ton wody. Nie udało się uzyskać równomiernego rozpływu nadawy na sito i odilania materiału na całej powierzchni sita. Mała ilość materiału do próby uniemożliwiła optymalizację procesu (rozpływ na sito, kąt ustawienia sita i drgań itd.).

Z uzyskanych rezultatów wynika [Białas i in. 2001], że zawartość popiołu w badanym mule spadła z 32,7% do średnio 20,1% (16,8–26,1%) na skutek odmulania mułu, równocześnie nastąpił wzrost wartości opałowej koncentratu do średnio 16 575 kJ/kg (15 033–18 009 kJ/kg).

Przeprowadzone próby wykazały:

- przydatność instalacji z hydrocyklonem i sitem BS do odmulania zawiesin niskokalorycznych mułów węglowych,
- możliwość zmniejszenia straty węgla w przelewie i dalszego obniżenia zapopielenia koncentratu poprzez optymalizację procesu odiłowania,

- efektywne podwyższenie własności energetycznych mułów poprzez zmniejszenie zawartości popiołu nawet o 39% i wzrost wartości opałowej nawet o około 6000 kJ/kg.

W oparciu o przeprowadzone badania i zebrane doświadczenia opracowano założenia i zbudowano instalację do odzysku koncentratów węglowych z mułu wydobywanego z jeziora, w którym od lat gromadziły się odpady poflotacyjne i muły z pobliskich kopalń.

Zbudowana instalacja o wydajności 250 m^3/h ulegała rozbudowie z powodu dużego zanieczyszczenia mułu i potrzeby uzyskania stałości zagęszczenia nadawy. Dodatkowo zabudowano kraty i mieszalnik dwuwałowy dla ujednolicenia nadawy. Rezultaty pracy instalacji, pozwoliły na obniżenie zawartości popiołu z około 33 do około 22% i wzrost wartości opałowej z 15,0 do 18,0 MJ/kg.

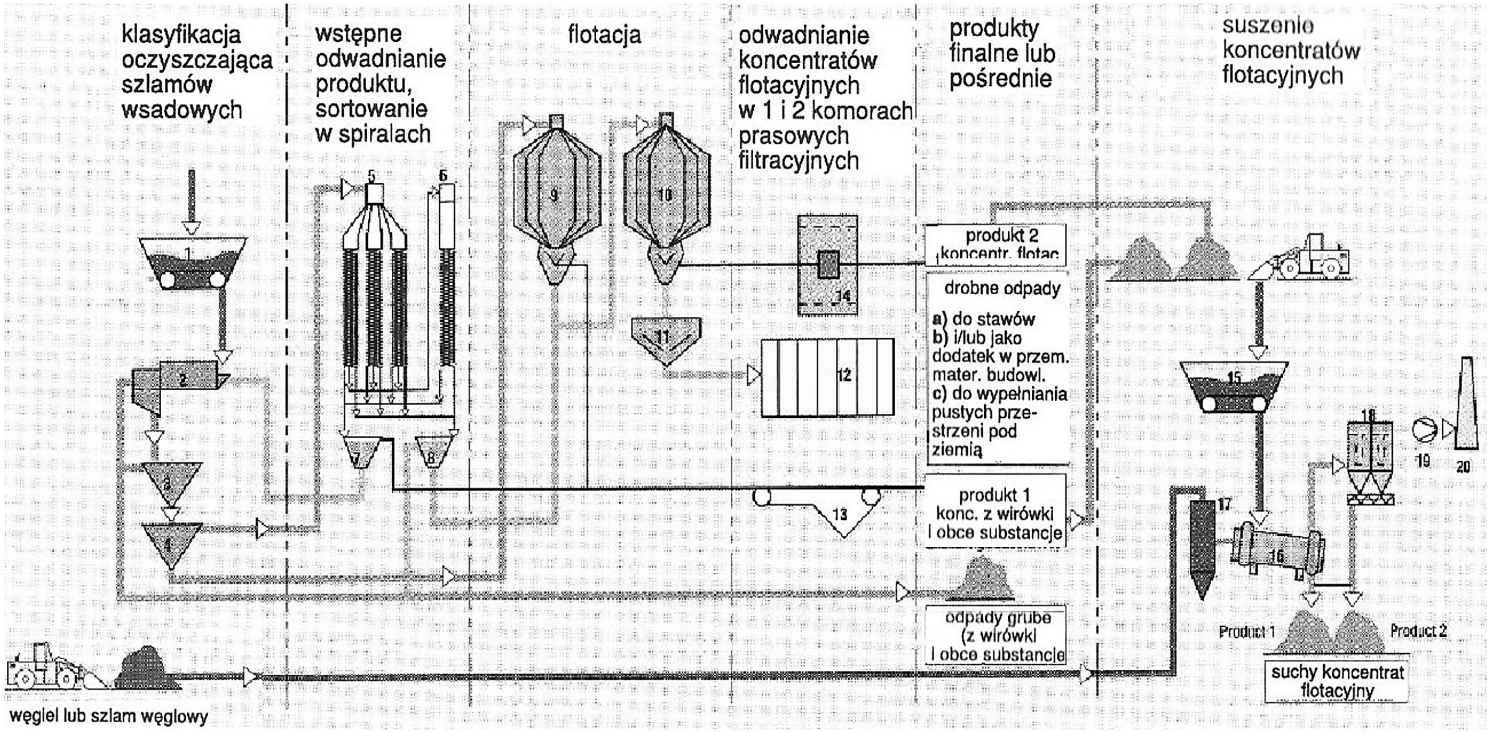
5.4. Metody „głębokiego" wzbogacania drobnoziarnistych odpadów węglowych

Spośród wielu metod „głębokiego" wzbogacania drobnoziarnistych odpadów węglowych przeanalizowano celowość zastosowania procesu flotacyjnego, aglomeracji olejowej i wirówek o dużym gradiencie przyspieszenia oraz technologii chemicznego odsiarczania i demineralizacji węgla.

5.4.1. Flotacja odpadów drobnoziarnistych węgla

Flotację drobnoziarnistych odpadów węglowych wdrożono w Polsce w oparciu o importowaną technologię i urządzenia w 1993 roku. Decyzję o budowie zakładu wzbogacania poprzedziły gruntowne badania złóż odpadów w osadnikach i na zwałowiskach (częściowo omówione w 5 rozdziale dotyczącym drobnoziarnistych odpadów węglowych w i z osadników). Wielkość zakładu i jego lokalizacja wynikły z rozeznania bazy surowcowej, powstał przy kopalni, która zgromadziła duże ilości odpadów poflotacyjnych bogatych w substancję węglową oraz z doświadczeń pierwszego zakładu zbudowanego w Linen [Hölter i Weber 1994, Hycnar i in. 1998]. W okresie swojej ponad 18-letniej pracy Zakład Wzbogacania Odpadów Poflotacyjnych wydobył i przerobił prawie 5 mln ton odpadów poflotacyjnych. Zakład funkcjonował do 2012 roku, aż do wyczerpania się ekonomicznych źródeł surowca. Jeszcze wcześniej, wzorcowy zakład flotacyjnego wzbogacania mułów zbudowany w Niemczech (w Linen), nie wytrzymał konkurencji rynkowej i został zlikwidowany.

Zakład wzbogacania zbudowano w bezpośrednim sąsiedztwie zwałowiska odpadów, z którego urabiano koparkami odpady poflotacyjne i przewożono samochodami do przeróbki. Surowiec z placu składowego przenośnikiem taśmowym podawano do

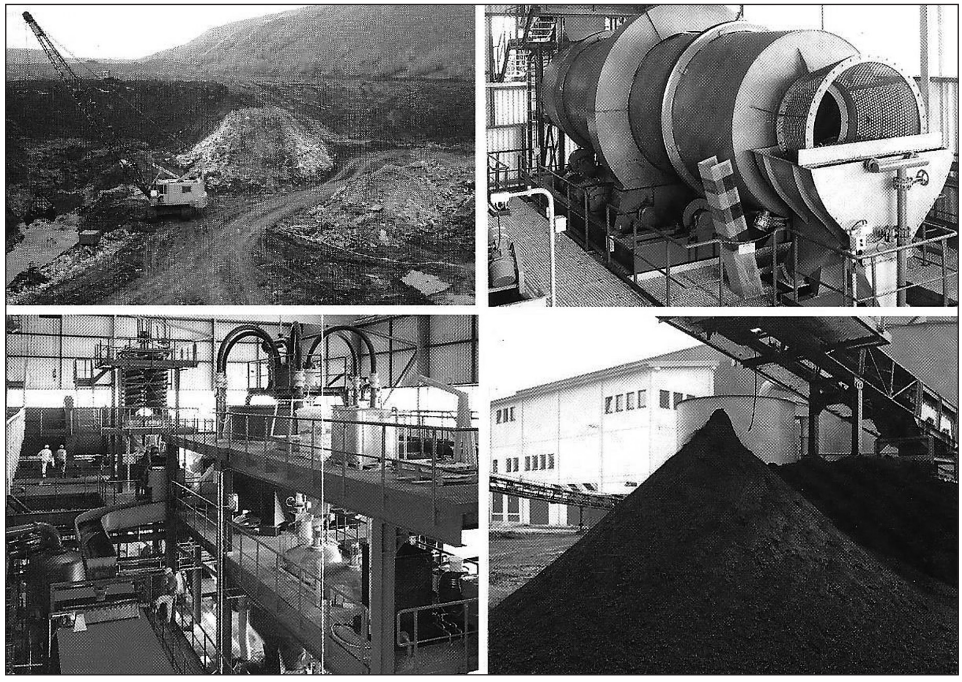


Rys. 5.8. Schemat technologiczny Zakładu Wzbogacania Odpadów Poflotacyjnych [Hölter i Weber 1994]. Wzbogacanie mułów weglowych (szlamów): 1 – węzeł zasilana nadawą, 2 – bęben rozmywczy, 3, 4 – przesiewacze, 5, 6 – węzeł wzbogacalników spiralnych, 7,8 – sita odwadniające, 9, 10 – wzbogacalniki flotacyjne, 11 – zagęszczalnik, 12 – prasa filtracyjna komorowa, 13, 14 – filtry próżniowe. Suszenie mułów, 15 – węzeł zasilania nadawą, 16 – suszarnia bębnowa, 17 – palenisko fluidalne generujące gorące spaliny do suszenia koncentratów i mułów, opalane mułem lub węglem, 18 – instalacja odpylajaca spaliny, 19 – wentylator, 20 – komin

bębna przemywającego dla uzyskania zawiesiny wodno-iłowej. Zawiesina poprzez zbiorniki i układy pompowe była kierowana do flotowników pneumatycznych, gdzie następowało wzbogacanie materiału, w wyniku flotacji uzyskiwano koncentrat węglowy i odpad wysokozapopielony. Koncentraty węglowe po wysuszeniu wstępnym na urządzeniach odwadniających kierowano do suszarki bębnowej w celu uzyskania końcowych parametrów jakościowych. Pierwotny schemat technologiczny podaje rysunek 5.8, a wygląd wybranych węzłów technologicznych przedstawia rysunek 5.9 [Hölter i Weber 1994].

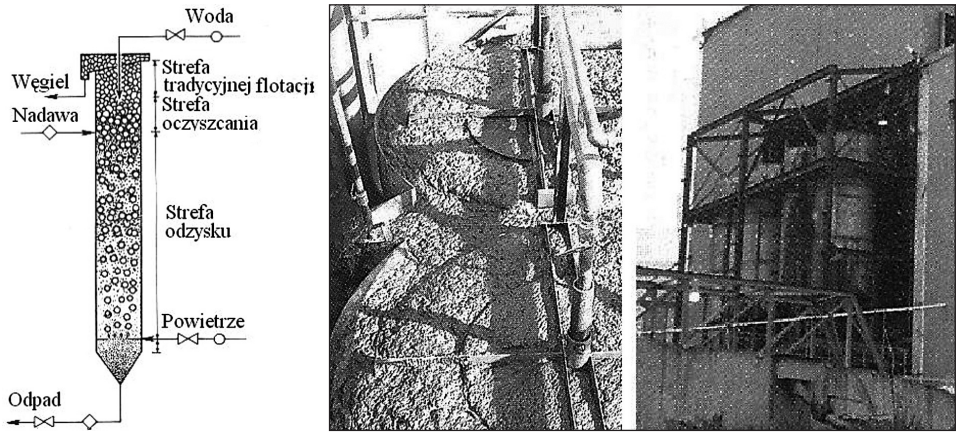
Prowadzone badania w kraju nad doskonaleniem technologii flotacji i inwentaryzacją jakościowo-ilościowa zasobów drobnoziarnistych odpadów węglowych na tym etapie nie uzasadniają podejmowania nowych przedsięwzięć inwestycyjnych w tym zakresie. Jakość odpadów poflotacyjnych ulegała dużym zmianom w miarę upowszechniania i doskonalenia procesów flotacyjnych, co praktycznie oznaczało, że już w latach 90. ubiegłego stulecia większość powstających odpadów stała się mało przydatna jako surowiec do wtórnej flotacji.

W oparciu o omówioną technologię w latach 90. ubiegłego wieku realizowano budowę zakładu wzbogacania mułów w kopalni Tyrgańskaja w Prokopiewsku w Rosji oraz planowano budowę zakładu „Fushun" w Chinach [Hölter i Weber 1994].



Rys. 5.9. Wygląd wybranych węzłów technologicznych Zakładu Wzbogacania Odpadów Poflotacyjnych POLHO [www.polho.slask.com.pl]

Mniej więcej w tym samym czasie, CAER (*Center for Applied Energy Research*, Lexington, KY, USA) opracował i wdrożył proces KEN-FLOTE odzysku węgla z odpadów drobnoziarnistych, oparty o technologię flotacji kolumnowej. Zbudowano instalację w Powell Mountain Coal Company o wydajności 20–32 Mg/h, składającą się z czterech flotowników kolumnowych (h = 6 m, d = 2 m) (rys. 5.10).



Rys. 5.10. Instalacja flotacji kolumnowej odzysku węgla z odpadów węglowych [Peters i Parekh 1992]

5.4.2. Aglomeracja olejowa

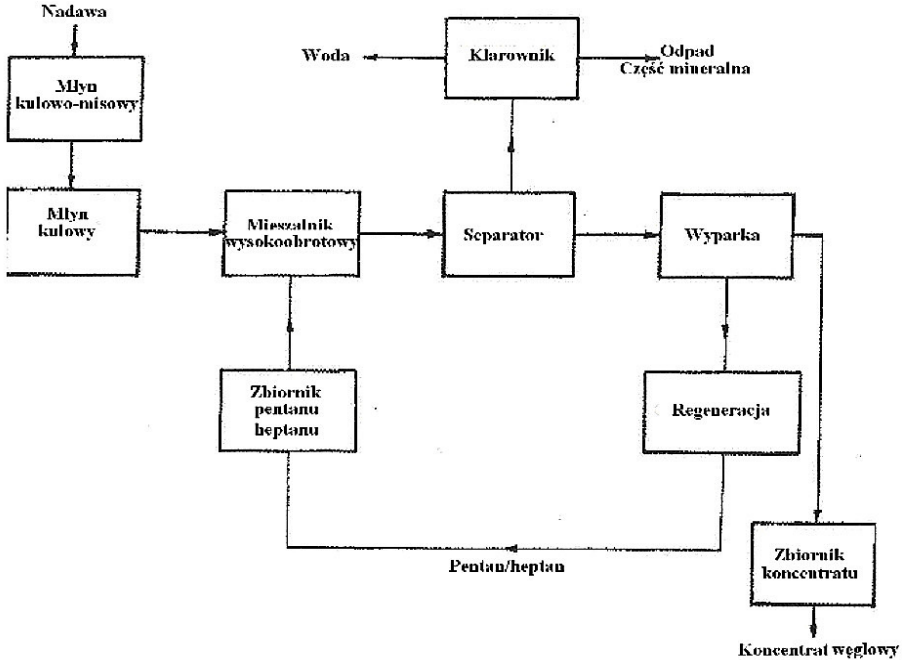
Zainteresowanie odzyskiem węgla z odpadów poflotacyjnych wynikało z kilku powodów, z jednej strony trudności pozyskania terenów pod osadniki dla wzrastającej ilości odpadów, z drugiej strony chęci odzyskania wysokiej jakości węgla koksowego. Ponadto, w tym czasie rozwijały się technologie produkcji paliwa węglowo-wodnego i ich poważnym problemem były koszty mikronizacji węgla, gdy w przypadku odpadów poflotacyjnych mieliśmy węgiel silnie rozdrobniony i o wysokiej jakości.

Przydatność metody aglomeracji olejowej dla odpadów drobnoziarnistych sprawdzano przy zastosowaniu heptanu i oleju średniocząsteczkowego.

W wyniku współpracy z amerykańską firmą Otisca, wspólnie przeprowadzono próby wydzielania koncentratów węglowych z mieszanin mułu i odpadu poflotacyjnego w technologii aglomeracji olejowej [Hycnar i in. 1998, Keller 1991].

Firma Otisca dysponowała własną technologią i była zaangażowana w opanowanie wytwarzania paliwa zawiesinowego do zasilania silników wysokoprężnych, lokomotyw spalinowych firmy General Electric. Dla ograniczenia zużycia cylindrów i tłoków silników wymagano, by uziarnienie węgla było poniżej 5 μm, a zawartość popiołu i siarki w nim nie przekraczała odpowiednio 0,6 i 0,8%; przy zawartości węgla w paliwie powyżej 65%.

Proces Otisca T polega na wielostopniowym przemiale węgla do wymaganego uziarnienia, zazwyczaj poniżej 5 μm. Ostatnim etapem przemiału jest dezintegrator o parametrach młyna koloidalnego. Ważnym elementem instalacji jest mieszalnik wysokoobrotowy, zapewniający intensywny kontakt pyłu węglowego z heptanem lub pentanem i zajście aglomeracji ziaren węgla. Mieszanina aglomeracyjna kierowana jest na sito, gdzie podlega rozdzieleniu od odpadu i nadmiaru heptanu. Instalacja jest hermetyczna i odzyskuje heptan, krążący w obiegu instalacji. Schematy instalacji procesu Otisca T pokazano na rysunku 5.11 [Mokrzycki i in. 1996].



Rys. 5.11. Schematy instalacji do aglomeracji olejowej w heptanie/pentanie węgla i odpadów węglowych [Mokrzycki i in. 1996]

Cztery próbki mułów/odpadów poflotacyjnych, pobranych z różnych węzłów obiegu mułowego poddano domieleniu do ziaren poniżej 5 μm i następnie aglomerowaniu w heptanie. Otrzymane koncentraty węglowe charakteryzowały się zawartością popiołu w granicach od 2,51 do 3,69% (odpady przed procesem zawierały od 47,8 do 69,8%), zawartością węgla od 74,4 do 75,5% (13,2–36,4%) i ciepłem spalania rzędu 35 MJ/kg. Natomiast z frakcji ziarnowej o uziarnieniu +100 Mesh (+150 μm), przed domieleniem, zawierającej 48,4% węgla uzyskano koncentraty o zawartości węgla w granicach od 61 do 63%. Zestawienie wyników przedstawia tabela 5.7 [Hycnar 2002a].

Tabela 5.7. Wpływ procesu Otisca na jakość otrzymywanych koncentratów węglowych

L.p.	Muł węglowy lub węgiel drobnoziarnisty	Udział. %	Zawartość, %			
			popiołu	siarki	części palnych	węgla
1.	Dostarczone próbki:					
1.1.	A – muł	–	69,76	–	12,93	17,31
1.2.	B – muł z osadnika	–	47,84	–	15,77	36,39
1.3.	C – placek filtracyjny	–	72,34	–	14,44	13,22
1.4.	D – nadawa na prasę filtracyjną	–	68,13	–	16,12	15,75
2.	Klasyfikacja ziarnowa:					
2.1.	A +150 µm	26,5	34,81	0,6	16,82	48,37
2.2.	A 150 µm	73,5	82,08	–	11,66	6,25
3.	OTISCA Proces frakcji +150µm					
3.1.	Węgiel o uziarnieniu 4,81 µm	63,3	3,69	0,50	21,93	74,38
	Część mineralna	36,7	88,49	–	9,17	2,32
3.2.	Węgiel o uziarnieniu 3,16 µm	61,4	2,78	0,48	21,87	75,35
	Część mineralna	38,6	85,76	–	9,39	4,85
3.3.	Węgiel o uziarnieniu 2,77 µm	63,6	2,51	0,48	22,19	75,30
3.4.	Część mineralna	36,4	91,26	–	8,03	0,71
	Węgiel o uziarnieniu 2,77 µm	34 754 kJ/kg				

Trudno klarujące się zawiesiny sedymentu, z wycieków odwadnianych w wirówkach flotokoncentratów, poddano aglomeracji olejem o średniej masie cząsteczkowej. Zawiesina sedymentu składająca się z cząstek węgla o uziarnieniu poniżej 40 µm, pod wpływem kontaktu z tym olejem ulega sedymentacji w ciągu kilkudziesięciu sekund. Uzyskiwany koncentrat węglowy zawierał do 30% wody, w stanie suchym zawartość popiołu nie przekraczała 8% [Hycnar i in. 2008].

Bazując na omówionych pozytywnych wynikach badań procesu aglomeracji olejowej, przeprowadzono próby z mułem z młodych węgli. Niestety, nie uzyskano pozytywnych wyników, prawdopodobnie struktura macerału jest w dużym stopniu hydrofilna (typowa dla młodych węgli).

5.4.3. Odzysk węgla w wirówkach o dużych wartościach sił odśrodkowych

Procesy opadania, zagęszczania i segregacji fazy stałej z układu zawiesinowego można znacznie przyspieszyć i zapewnić dokładniejsze rozdzielenie faz, poprzez zastosowanie pola sił odśrodkowych. Na fazę stałą zdyspergowaną w cieczy, w czasie jej wirowania, oddziaływują siły bezwładności, zwane siłami odśrodkowymi, stanowiące zależność pomiędzy masą fazy stałej, a warunkami wirowania [Hycnar 2002a]:

$$F_o = \frac{m\,\omega^2}{r} = \frac{G\,\omega^2}{g\,r} = \frac{4\,G\,\pi^2\,r\,n^2}{900\,g}\ ,\ \text{N} \tag{5.1}$$

gdzie: F_o – siła odśrodkowa, N,
m – masa ciała, kg,
ω – prędkość liniowa, m/s,
r – promień obrotu, m,
G – ciężar obracającego się ciała, kg·m/s^2,
n – liczba obrotów, 1/sek,
g – przyspieszenie ziemskie, 9,81 m/s^2.

Z równania (5.1) wynika, że na siłę odśrodkową największy wpływ wywiera liczba obrotów, a następnie promień oddziaływania. Generalnie przyjmuje się, że iloczyn tych wartości stanowi wartość stałą:

$$r\,n^2 = \text{const.}$$

Ważnym parametrem charakteryzującym procesy wirowania jest współczynnik rozdziału f będący stosunkiem przyspieszenia siły odśrodkowej do przyspieszenia ziemskiego:

$$f = \frac{\omega^2}{r\,g}$$

Wartość f wskazuje ilukrotnie przyspieszenie pola sił odśrodkowych jest większe od przyspieszenia ziemskiego.

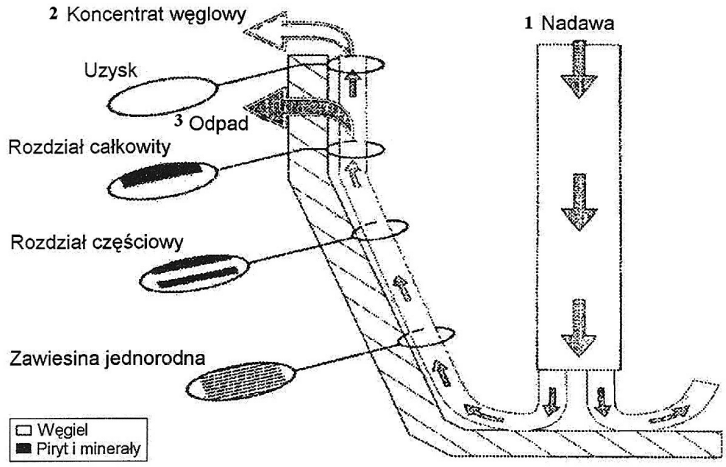
W przypadkach rozdziału systemów polidyspersyjnych, zawierających składniki mało zróżnicowane ciężarowo, poddanych działaniu sił odśrodkowych, potęgowana jest różnicą pomiędzy składnikami wielkością sił odśrodkowych ($\Delta G n^2$). Ten stan decyduje o wydzielaniu fazy stałej i selektywnym rozdziale składników.

Separacja składników fazy stałej z zawiesin w polu odśrodkowym zasadniczo różni się nie tylko od procesów sedymentacji w warunkach naturalnych, ale również od procesu klarowania i sedymentacji w wirówkach.

Przekrój wirowanej zawiesiny w bębnie wirówki przybiera kształt paraboli, wysokość x wytworzonego leja określa równanie:

$$x = \frac{(n\,R)^2}{1800}$$

Obserwacje procesu wirowania zostały wykorzystane do budowy bębnów wirówek separujących i nadania im kształtu kielichów, zapewniających rozdział składników w cienkiej warstwie wirowanej zawiesiny, co ilustruje rysunek 5.12 [Honaker 1995]. W przypadku wirówek sedymentacyjnych i filtracyjnych bęben wirówki wykonany jest zazwyczaj w formie cylindrów lub ściętych stożków.



Rys. 5.12. Schemat działania separatora wirówkowego [Honaker 1995]

Przytoczone teoretyczne uzasadnienie stosowania siły odśrodkowej do separacji składników fazy stałej, stanowi zaledwie małą część wiedzy zachodzących procesów, gdyż nie uwzględniają m.in. wpływu średnicy i kształtu wydzielanych ziaren, lepkości środowiska itd. [Sokołow 1991].

Przykłady technicznych rozwiązań separatorów o dużych wartościach sił odśrodkowych

Istnieje wiele sposobów odzysku cennych metali z odpadów przeróbczych rud metali nieżelaznych i żelaznych, poprzez ich rozdział w wirówkach o dużym natężeniu siły odśrodkowej. Do rozdziału stosowane jest przyspieszenie rzędu 50 do 600 m/s^2.

W praktyce przemysłowej najczęściej do rozdziału minerałów stosowane są wirówki firmy Falkon, aktualnie Sepro Mineral Systems Corp [Sepro Falcon 2012]. Ze względu na zasadę działania wirówki te dzielą się na:

- wirówki o działaniu półciągłym (Falcon SB),
- wirówki o działaniu ciągłym (Falcon C),
- wirówki dla minerałów poniżej 3 μm i natężeniu pola do 600 G's (Falcon UF).

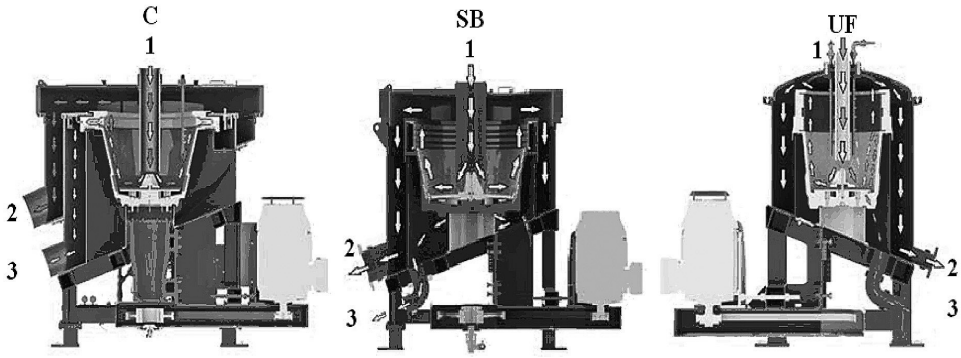
Wirówki typu SB stosowane są głównie do wydzielania metali szlachetnych (Au, Ag, Pt) w ciągach produkcyjnych, w pełni zautomatyzowanych. Produktem są wysokoprocentowe koncentraty metali.

Wirówki typu C stosowane są do odzysku ołowiu, cyny, tantalu, złota, srebra, węgla, rudy żelaza i konglomeratów metali z zawiesin przygotowanych surowców, procesów technologicznych i odpadów. Odzysk węgla z drobnoziarnistych odpadów powęglowych wymaga wydzielenia określonej frakcji organicznej, gwarantującej zróżnicowane ciężary węgla i frakcji mineralnej.

Wirówki typu UF stosowane są do odzysku koncentratów metali z bardzo drobnych materiałów o uziarnieniu poniżej 3 μm przy wykorzystaniu wysokiego pola grawitacyjnego rzędu 600 G's (od 50 do 600 G's).

Podstawową charakterystykę techniczną „Falcon Concentrators" podano w tabeli 5.8, a przekrój wirówek pokazano na rysunku 5.13.

W ciągu pierwszych 15-tu lat firma Falcon wyprodukowała 250 instalacji, zdobywając olbrzymie doświadczenie w wykorzystaniu pola sił odśrodkowych o dużym natężeniu; wartość rzędu 600-krotnie przekraczającej przyspieszenie ziemskie.



Rys. 5.13. Przekroje wirówek separujących minerały o wysokim gradiencie pola grawitacyjnego [Sepro Falcon 2012]: 1 – nadawa, 2 – lekka frakcja (węgiel), 3 – ciężka frakcja (składniki mineralne, w tym piryt)

Tabela 5.8. Charakterystyka techniczna wirówek firmy Falcon

Typ wirówki		Continuous C				Semi-Batch SB	Ultra-Fine UF	
Model		C400	C1000	C2000	C4000	L40, SB: -400, -750,-1350, -2500,-5200 (6 modeli)	UF 600	UF1500
Wydajność	Mg/h	1–5	5–27	20–60	45–100	0,25 do 400	0,5	2
Zawiesina	m^3/h	17	74	210	400	2,3 do 450	ok. 6	ok. 20
Maksymalne ziarno	mm	1,0				1 do 2	< 0,038	
Minimalne ziarno	μm	10				1,5 do 4,0	< 0,005	
Zawartość fazy stałej	%	65–72				55 do 70	5–15	
Przyspieszenie	G's	300				50 do 200	50–450	50–600
Moc silnika	kW	7,5	15	30	75	0,4 do 75	7,5	45
Wymiary	m	1,22×1,22 ×1,33	1,55×1,55 ×2,18	1,85×1,85 ×2,67	2,36×2,36 ×2,63	0,49×0,31×0,51 do 3,19×2,32×2,73	1,33×1,23 ×1,73	1,51×2,00 ×2,11
Waga	kg	1 215	2 525	4 615	10 150	35 do 6 900	1136	2 450

Oprócz omówionych wirówek firmy Falcon, szczególnie w procesach wzbogacania najcenniejszych minerałów i metali, stosowane są grawitacyjne separatory produkowane przez firmy: Kelsey, Knelson i Mozley. Porównanie podstawowych parametrów wymienionych separatorów grawitacyjnych przytacza tabela 5.9 [A new generation... 2004].

Tabela 5.9. Porównanie charakterystyk separatorów grawitacyjnych różnej produkcji [A new generation... 2004]

Producent	Wydajność jednostkowa, t/m²/h	Nakłady kapitałowe, tys. USD	Typowy test wzbogacania węgli			
			węgieł (uziarnienie)	uzysk składników palnych, %	wydzielony popiół, %	wydzielona siarka, %
Falcon	4,9 – 14,6	200 (Q > 50 t/h)	Illinois No. 5 (250 – 38 μm)	88,3	68,1	72,5
Kelsey	14,6 – 19,5	150 (Q = 5–15 t/h)	Wirringham (450 – 38 μm)	96.9	43,6	–
Knelson	1,0 – 3,9	150 (Q = 20 t/h)	Illinois No. 5 (250 – 38 μm)	84,2	69,1	70,3
Mozley	0,1 – 0,3	200 (Q = 5–15 t/h)	Pittsburgh No. 8 (180 – 0 μm)	86,1	72,9	64,4

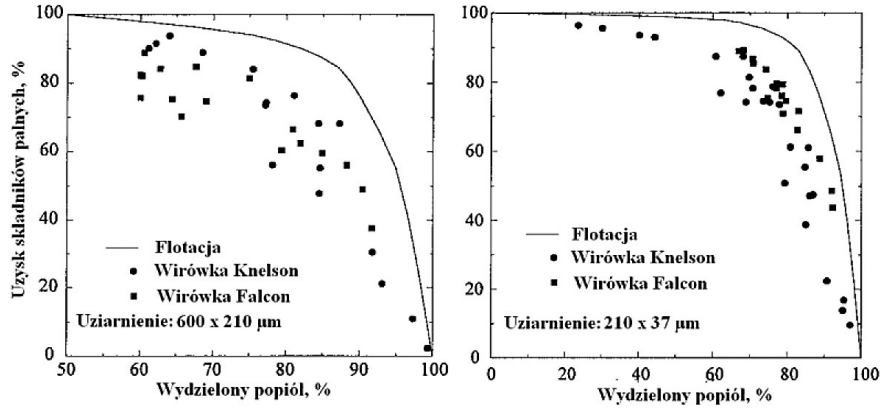
Zastosowanie pola sił odśrodkowych o dużym natężeniu do wydzielania koncentratów węglowych

Stosunkowo mało jest publikacji o zastosowaniu pola sił odśrodkowych o dużym natężeniu do wydzielania koncentratów węglowych [Akopow i in. 1975, Honaker i in. 1995, Laurila 1998]. W przypadku prób z mułem węglowym z osadnika na przemysłowej wirówce C-4000, w zależności od uziarnienia uzyskano [Honaker i in. 1995]:

- koncentrat powyżej 150 μm, odzysk węgla od 39,3 do 74,8% – średnio 65,9%; stopień usunięcia siarki pirytowej od 76,8 do 91,2% – średnio 85,5%,
- koncentrat 40 do 50 μm, odzysk węgla od 80,4 do 94,0% – średnio 87,6%; stopień usunięcia siarki pirytowej od 52,9 do 79,7% – średnio 66,6%.

Wpływ zawartości popiołu na odzysk palnych składników z węgla, w zależności od uziarnienia węgla i zastosowanej metody wzbogacania, na przykładzie amerykańskiego węgla ilustruje rysunek 5.14. Największy odzysk węgla gwarantuje flotacja z tym, że w warunkach USA koszty flotacyjnego wydzielania węgla są około 3 razy wyższe od wydzielania koncentratów węgla w Falcon concentrators.

Bazując na tych informacjach zlecono firmie Falcon przeprowadzenie oceny przydatności wirówek separujących do wydzielania węgla z mułu węglowego [Hycnar 2002a]. W wyniku przeprowadzonych prób na przemysłowej wirówce C-4000 wykazano możliwość uzyskania koncentratów węglowych o różnej



Rys. 5.14. Wpływ metody wzbogacania węgla na uzysk koncentratów węgla [Honaker i in. 1995]

Tabela 5.10. Charakterystyka koncentratów węglowych wydzielonych z mułu w Falcon Concentrator

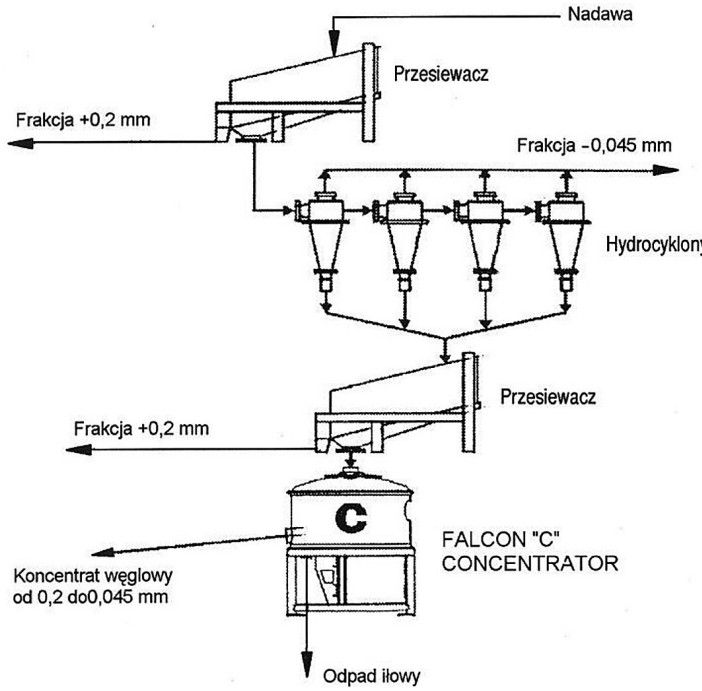
Rodzaj materiału	Zawartość frakcji ziarnowej, %			Zawartość popiołu, %	Zawartość siarki, %
	<44 µm	44–210 µm	>210 µm		
Mul w stanic surowym	61,3	27,6	11.1	41,9	0,84
- koncentrat węglowy				36,6	0,39
Mul surowy domielony	100,0		0	41,9	0,85
- koncentrat węglowy				16,5	1,24
Muł wzbogacony	0	100,0		18.2	1,43
Frakcja + 44 µm				9,6	0,87

zawartości popiołu i siarki, w zależności od sposoby przygotowania nadawy (tab. 5.10).

W oparciu o rezultaty tych badań opracowano schemat technologii procesu i założenia techniczno-ekonomiczne produkcji koncentratów węglowych z mułów zgromadzonych w osadnikach [Hycnar 2002b]. Dla warunków badanego mułu węglowego proces wzbogacania w Falcon Concentrator powinien być poprzedzony odilaniem zawiesiny w hydrocyklonach i odsiewem frakcji ziarnowej +0,2 mm (rys. 5.15).

5.4.4. Technologie chemicznego odsiarczania i demineralizacji węgla

Najpełniejsze odsiarczanie i odpopielanie węgli gwarantują tylko procesy chemiczne, należące do najdroższych metod uszlachetniania węgli. Spośród wielu opisywanych metod, za najbardziej zaawansowaną do wdrożeń uznano technologię Gravimelt opracowaną przez amerykański koncern TRW [Hycnar i in. 1994, 1995, Meyer 1993].

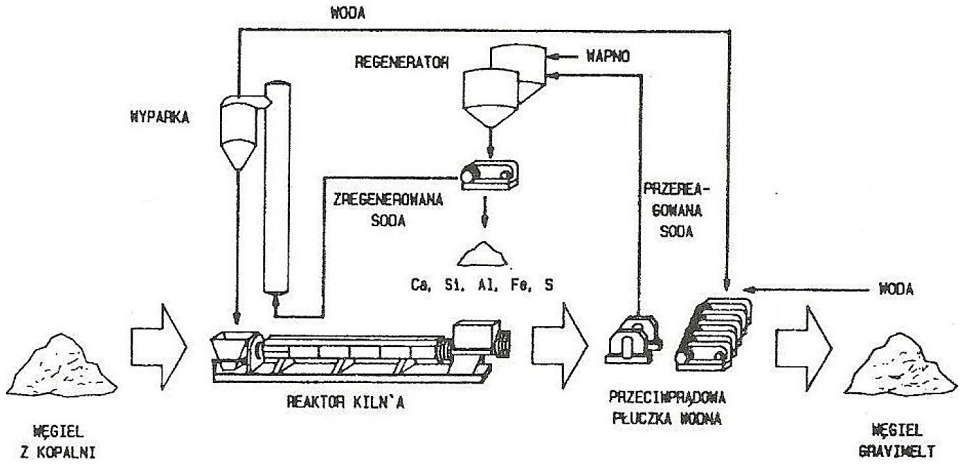


Rys. 5.15. Schemat technologiczny wzbogacania mułów węglowych w separatorze wirówkowym Falcon C

W wyniku zastosowania wodorotlenku sodu lub potasu, ze struktury węgła zostaje usunięta siarka ze związków nieorganicznych i organicznych, składniki mineralne i toksyczne metale. Reakcja ta zachodzi w temperaturze 280 do 420 °C w atmosferze gazu neutralnego.

Demineralizacja polega na stapianiu rozdrobnionego węgla (odpadów węglowych) ze stałym wodorotlenkiem w ogrzewanym obrotowym reaktorze. Wypadający z reaktora produkt poreakcyjny jest przemywany wodą, neutralizowany rozcieńczonym kwasem siarkowym i przemywany wodą, stanowiąc zdemineralizowany i odsiarczony węgiel. Dobierając udział wodorotlenku, temperaturę i czas reakcji istnieje możliwość regulowania zawartości siarki i popiołu w koncentracie węglowym. Schemat instalacji doświadczalnej procesu Gravimelt w ośrodku badawczym w Capistrano podano na rysunku 5.16.

Powstające z przemywania produktu poreakcyjnego roztwory ługu stanowią mieszaninę nie przereagowanego wodorotlenku sodu i soli sodowych, wyekstrahowanych związków siarki, glinokrzemianów. Rozpuszczalne w wodzie sole sodowe są następnie zamieniane w sole nierozpuszczalne i wytrącane z roztworu w formie soli wapniowych. Uzyskany przesącz stanowi roztwór wodorotlenku sodu, podlegający zatężeniu aż do uzyskania stałego NaOH, który następnie jest zawracany do procesu demineralizacji węgla. Wytrącone sole sodowe i wapnio-



Rys. 5.16. Schemat procesu demineralizacji i odsiarczania węgla według technologii Gravimelt [Hycnar i in. 1995, Meyer 1993]

we mogą zawierać koncentraty metali Al, Fe i inne, w przypadku zastosowania reakcji selektywnych umożliwiających rozdział poszczególnych związków.

Wykonane badania wykazały obniżenie zawartości siarki w węglu od wartości 1,45–1,77% do poniżej 0,66%; a zawartości popiołu od wartości 12,61–17,59% do 13,93–0,17%, co ilustrują dane w tabeli 5.11.

Wykonano próby chemicznego oczyszczania zasiarczonych miałów z dwóch kopalń. Z miałów o zawartości popiołu około 20% i zawartości siarki od 1,7 do 2,9% uzyskiwano koncentraty o zawartości popiołu poniżej 1% i zawartości siarki 0,13–0,17%, przy wzroście ciepła spalania od 23–24,5 MJ/kg do 30,3–31,2 MJ/kg (tab. 5.12).

Otrzymywane koncentraty węglowe charakteryzowały się silnie rozwiniętą powierzchnią właściwą i właściwościami jonowymiennymi [Hycnar i in. 1994

Tabela 5.11. Przykłady wpływu procesu Gravimelt na właściwości europejskich węgli [Hycnar i in. 1995]

Węgiel	Węgiel wyjściowy				Węgiel oczyszczony			
	siarka [%]	popiół [%]	wartość opałowa [MJ/kg]	części lotne [%]	siarka [%]	popiół [%]	wartość opałowa [MJ/kg]	części lotne [%]
1.	1.77	17,59	15,32	31,08	0,66	0,86	15,07	30,39
2.	1,50	12,61	14,77	34,04	0,46	0,72	14,69	29,20
3.	1,45	16,16	15,68	32,88	0,12	13,92	14,56	23,29
4.	1,77	17,59	15,32	31,08	0,06	12,49	14,98	24,70
5.	1,45	16,16	15,68	32,88	0,34	0,60	15,51	22,72
6.	1,45	16,16	15,68	32,88	0,08	0,17	14,66	24,57

Tabela 5.12. Porównanie parametrów jakości miałów [Hycnar i in. 1994]

Określenie *stan analityczny	Próba	Kopalnia Jan Kanty						Kopalnia Siersza		
		miał surowy			miał wzbogacony			miał surowy		
		a	b	c	a	b	c	a	b	c
Siarka [%]*	I	2,61	0,17	95,0	1,75	0,14	92,0	2,90	0,13	94,1
	II	–	–	–	–	–	–	2,90	0,17	97,1
Popiół [%]*	I	–	–	–	19,6	0,91	95,3	21,5	–	–
	II	–	–	–	–	–	–	21,5	19,7	8,3
Ciepło spalania [MJ/kg]*	I	–	–	–	24,5	30,3	23,7	23,1	31,2	35,2
	II	–	–	–	–	–	–	23,1	25,2	8,9
Części lotne [%]*	I	–	–	–	–	–	–	31,8	27,6	–
SO_2 [mg/Nm^3]	I	–	–	–	4 057	262	93,5	7 127	284,0	94,6
	II	–	–	–	–	–	–	7 127	236,2	96,7
Popiół [mg/Nm]	I	–	–	–	22,7	0,8	96,2	–	–	–

Objaśnienia: a – przed obróbką, b – po obróbce w procesie Gravimelt, c – procent zmian

i 1995]. Wysokie zapopielenie i mały stopień metamorfozy substancji węglowej mułów gwarantuje tworzenie węgli aktywnych o bardzo dużej zdolności sorpcyjnej.

Omawiana technologia jest uzasadnioną dla węgli i mułów węglowych, w przypadku zainteresowania dostawami węgla aktywnego i ewentualnym, odzyskiem rzadkich metali z ubocznych produktów chemicznej ekstrakcji oczyszczanych węgli.

6. ZAGADNIENIA EKSPLOATACJI DROBNOZIARNISTYCH ODPADÓW WĘGLOWYCH DEPONOWANYCH W OSADNIKACH

6.1. Problematyka zawiesin wodno-mułowych

Największe ilości spalanych mułów węglowych i odpadów poflotacyjnych pochodzą z eksploatowanych osadników o odbudowywanej objętości oraz osadników wyłączonych z eksploatacji. Znaczącym źródłem drobnoziarnistych odpadów węglowych dla energetyki są depozyty pochodzące z oczyszczania osadów dennych rzek i zbiorników wodnych. Szczególnie bogatym źródłem dobrej jakości mułów węglowych jest jezioro Dzierżno i kanał Gliwicki. Okresowo źródłem dostaw drobnoziarnistych odpadów są reaktywowane, wyłączone z eksploatacji osadniki, przekazane władzom terenowym jako tereny zrekultywowane, a następnie przeznaczone pod budownictwo inżynieryjne. W ten sposób, na rynku znalazły się znaczne ilości mułów węglowych na przykład w centrum Katowic i Jaworzna. Charakterystykę eksploatowanych mułów węglowych i odpadów poflotacyjnych oraz mułów wydzielanych w chodnikach dołowych podano w tabeli 6.1.

Przebadane złoża zdeponowanych drobnoziarnistych odpadów węglowych w 16 osadnikach i na jednej hałdzie nadpoziomowej dostarczyły bogatego zbioru wiadomości o składzie i właściwościach załądowanego materiału oraz o historii rozwoju technologii wzbogacania urobku. Depozyty odpadów poflotacyjnych w osadnikach wykazują niewielką zmienność składu i właściwości, wręcz można mówić o jednorodności złoża. W przypadku depozytów mułów węglowych mamy do czynienia ze złożem niejednorodnym pod względem składu i właściwości fizykochemicznych [Ercolani 1990].

W osadnikach o dużej powierzchni, w których zrzuty zawiesiny wodno-mułowej są stosunkowo małe, a ich strumienie są powolne, na trasie ich przepływu dochodzi do segregacji i wydzielania najcięższych ziaren mułów. W takich przypadkach obserwujemy tworzenie się łach (poletek) zróżnicowanych ciężarami ziaren. Zazwyczaj, z obwałowań osadników ziemnych można rozpoznać najcięższe łachy (piasek, ziarna skały i pył magnetytowy), następnie łachy bogate w węgiel, na końcu iłowe (rys. 6.1).

Proces składowania i odwadniania zawiesin wodno-mułowych w osadnikach związany jest z procesami sedymentacji fazy stałej na drodze przepływu zawiesiny od miejsca zrzutu do miejsca odprowadzającego nadmiar wody (mnich, studnia)

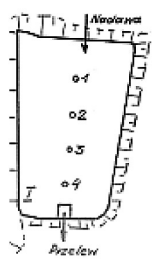
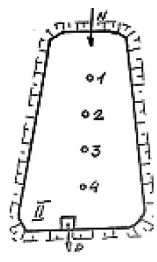
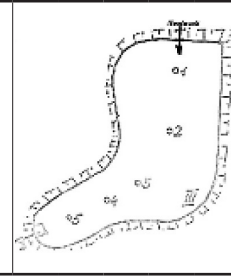
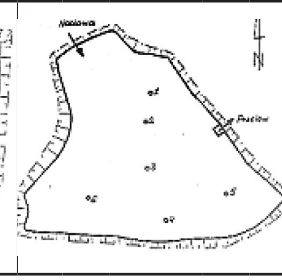
Tabela 6.1. Charakterystyka mułów wydzielanych w chodnikach dołowych

L.p.	Oznaczenie	Symbol	Jedno-stka	Opis próbki mułu (data, numer analizy, nazwa)			
				18.08.2010 5225/2010	24.08.2010 5348/2010	24.08.2010 5349/2010	19.08.2010 5226/2010
				osadnik, rej.„Sobieski”	osadnik, rej. „Piłsudski”, poz. 500 m, system BII	osadnik, rej. „Sobieski”, poz. 500 m	osadnik, rej. „Piłsudski”, poz. 500 m
1.	**Stan analityczny**						
1.1.	Wilgotność	W^a	%	3,3	8,5	5,3	8,9
1.2.	Popiół	A^a	%	67,7	22,9	62,9	46,8
1.3.	Ciepło spalania	Q_{sJ}^a	kJ/kg	7 143	21 001	8 277	12 552
1.4.	Wartość opałowa	Q_i^a	kJ/kg	6 720	19 984	7 773	11 812
1.5.	Siarka całkowita	S_t^a	%	0,66	0,94	0,73	0,63
1.6.	Wilgotność przem.	W_{ex}	%	45,3	23,7	46,3	47,8
2.	**Stan roboczy**						
2.1.	Wilgotność całkow.	W_t^r	%	47,1	30,2	49,1	52,4
2.2.	Popiół	A^r	%	37,0	17,5	33,8	24,4
2.3.	Wartość opałowa	Q_i^r	kJ/kg	2 570	14 669	3 043	4 999
2.4.	Siarka całkowita	S_i^r	%	0,36	0,72	0,39	0,33
3.	**Stan suchy i bezpopiołowy**						
3.1.	Części lotne	V^{daf}	%	46,55	37,42	43,68	36,21

Rys. 6.1. Widok na powierzchnię osadnika mułu węglowego, na którym można zaobserwować wydzielone łachy (fot. J.J. Hycnar)

z równoczesnym klarowaniem się wody z zawiesin. W zależności od rozwiązania osadnika i jego wielkości oraz występujących przepływów deponowane zawiesiny mułów podlegają segregacji ciężarowej, tworząc niejednorodne złoże często zmieniające się w miarę zapełniania osadnika, co zilustrowano na przykładzie zmienności zawartości popiołu w złożach czterech osadników (tabela 6.2).

Tabela 6.2. Zawartość popiołu w próbkach drobnoziarnistych odpadów węglowych pobranych z osadników

Głębokość poboru próbki, m	Zawartość popiołu, %																			
	osadnik 1				osadnik 2				osadnik 3					osadnik 4						
	próbka nr				próbka nr				próbka nr					próbka nr						
	01	02	03	04	01	02	03	04	01	02	03	04	05	01	02	03	04	05	06
1	45,6	41,8	25,6	34,0	42,7	22,4	29,8	30,3	28,5	29,0	33,2	46,3	43,6	37,8	38,0	17,2	38,6	41,4	38,7
2	59,9	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	37,2	–	–	–
3	–	24,3	1T,3	22,4	57,5	42,1	37,5	36,3	29,4	32,6	41,9	28,9	37,4	28,8	40,5	38,1	46,0	31,6	38,7
4	63,9	–	–	–	–	–	46,0	–	39,9	–	–	–	–	–	–	40,0	–	37,8	–
5	–	18,2	–	17,6	32,3	37,6	–	42,5	–	–	–	45,4	41,7	30,1	36,8	16,8	–	42,2	–
6	23,5	–	25,3	–	31,4	40,2	41,8	29,3	–	–	–	–	–	43,4	35,9	–	–	–	–
7	13,3	32,7	–	40,6	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
Średnia	41,2	29,2	22,7	28,6	41,0	35,6	38,8	34,6	32,6	30,8	37,5	40,2	40,9	35,0	37,8	29,9	42,3	38,2	38,7
Osadnik																				

Występujące różnice we właściwościach urabianych depozytów są wynikiem różnych sposobów prowadzonego zalądowania zawiesin mułowo-wodnych i następnie, czasu ich grawitacyjnego odwadniania oraz sposobu ich urabiania i składowania. Drobnoziarniste odpady węglowe znacząco się różnią między sobą, nie tylko z ich natury (rodzaj węgla, technologia wzbogacania), ale także stopnia ich segregacji i uwodnienia. Na właściwości odzyskiwanego depozytu duży wpływ ma sposób urabiania złoża w osadniku (selektywne, mechaniczne, hydrauliczne) i sposób składowania urobku (selektywne, w mieszaninie). Problemy tych nie stwierdza się, gdy mamy do czynienia z plackami pofiltracyjnymi drobnoziarnistych odpadów węglowych, pochodzących z bezpośredniej produkcji wybieranych ze zwałów/hałd (osadników). Placki mułowe stanowią mieszaninę stałych składników zawartych w zawiesinie wodno-mułowej.

Z analizy zjawisk przepływu i sedymentacji zawiesin w uporządkowanych układach hydraulicznych wynika, że odpowiednio kierując przepływami można uzyskać znaczącą segregację fazy stałej. W przypadku analizowanych osadników obserwujemy naturalne zjawisko przepływu zawiesiny najkrótszą drogą, zmieniającą się odpowiednio do stopnia wypełnienia osadnika, co nie oznacza optymalnych warunków sedymentacji mułów i oczyszczania wód nadosadowych [Ślączka 2004].

W energetyce spalającej węgiel oraz stosującej hydroodpopielanie i hydroodżużlanie, uzyskano pozytywne rezultaty przez wprowadzenie opaskowego (wzdłuż obwałowania) przemiennego zrzutu zawiesin żużlowo-popiołowych. W ten sposób wzmacniano istniejące obwałowania, a ponadto wydzieloną „grubą" frakcję (żużlową) zagospodarowano do nadbudowy obwałowań i w robotach inżynieryjnych [Hycnar 1985b].

Odpowiednio kształtując zrzuty zawiesin wodno-mułowych do osadników i wymuszając określone przepływy w osadnikach można uzyskiwać selektywną segregację mułu i tworzyć warunki do formowania się „złoża koncentratu węglowego" oraz uzyskiwać wysokiej czystości wody zrzutowe.

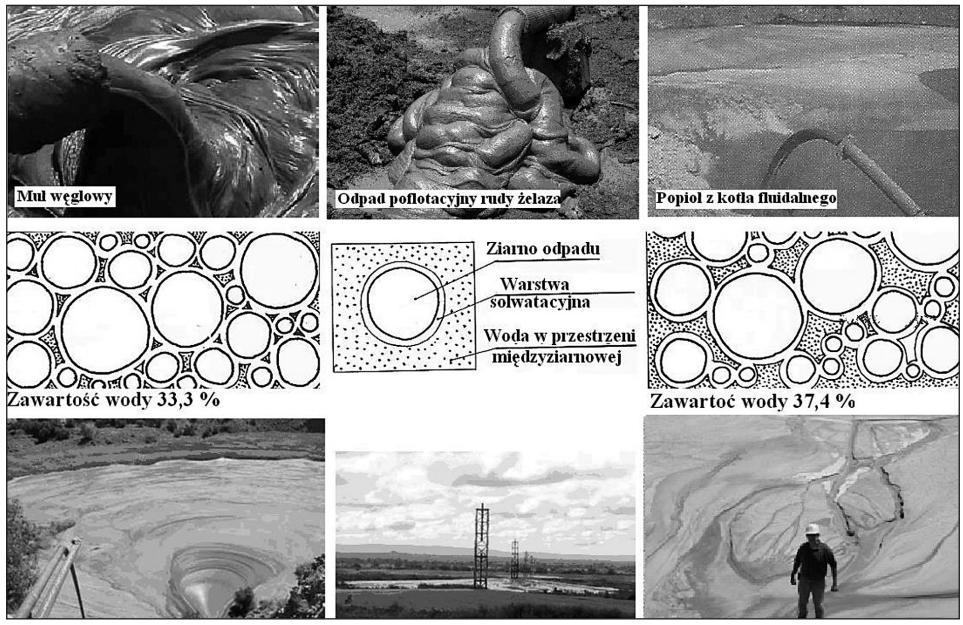
Nagromadzone duże ilości drobnoziarnistych odpadów węglowych w osadnikach zachęcają do ich eksploatacji i wzbogacania dla zapewnienia produkcji koncentratów węglowych. Często na przeszkodzie takich działań kopalń stoi „pozornie" nadmiar krajowego węgla na rynku energetycznym i dodatkowo importowany węgiel, skutecznie konkurujący z krajowymi paliwami oraz stosunkowo liberalne wymogi ochrony ziemi, dopuszczające eksploatację dzisiejszych składowisk odpadów. Zapomina się, że wydzielane koncentraty węglowe stanowią najtańsze źródła węgla. Należy również pamiętać, że osadniki zawiesin wodno-mułowych stanowią zagrożenie dla środowiska i ich istnienie zawiera w sobie ryzyko awarii miedzy innymi z tytułu:

- utrzymywania wysokiego poziomu wody nadosadowej,
- przemakania, rozmywania i zróżnicowanego zagęszczenia obwałowań,
- warunków atmosferycznych (erozja wietrzna i wodna, skoki temperaturowe itp.).

W krajach, które między innymi przeżyły nieszczęścia awarii składowisk zawiesin wodno-mułowych z procesów wydobycia i wzbogacania różnych minerałów, prowadzone są badania i próby oraz w mniejszym zakresie wdrożenia nowych bezpiecznych technologii składowania [Wang i in. 2014].

6.2. Technologie składowania drobnoziarnistych odpadów z procesów wydobywania i wzbogacania surowców mineralnych

Znaczna część prowadzonych prac nad opracowaniem technologii składowania drobnoziarnistych odpadów z wydobycia, wzbogacania i spalania węgla dotyczy zmiany ich konsystencji. Zazwyczaj proces ten polega na poddawaniu zawiesiny odpadów sedymentacji, zagęszczeniu i ujednorodnieniu do konsystencji „pasty", dającej się pompować na wymagane odległości, rozlewać i konsolidować (zestalać) w miejscu ich deponowania, bez wydzielania wody nadmiarowej, co ilustrują zdjęcia na rysunku 6.2.



Rys. 6.2. Przykłady transportu i składowania pasty drobnoziarnistych odpadów oraz model struktury „pasty"

Na właściwości „pasty" istotny wpływ wywiera rodzaj drobnoziarnistych odpadów, proces przygotowania i homogenizacji zagęszczonych zawiesin oraz zawartość wody. Niejednokrotnie, dla podwyższenia skuteczności wymienionych zachodzących procesów, do zawiesin dodawane są różnego rodzaju flokulanty (nie zawsze wpływające korzystnie na konsolidację odpadów w osadnikach), dodatki minerałów (bentonity, popioły) i spoiwa [Fourie 2012, Harris 2014, Hycnar 1995, Hycnar i in. 1993. Murphy i in. 2012, Wang i in. 2014]. W przypadku mułów węglowych i osadów z oczyszczania chodników wód dołowych uzyskano zadawalające wyniki zagęszczenia i konsolidacji poprzez dodatek do nich popiołów (szczególnie korzystne, popiołów fluidalnych) i siarczanu żelaza, otrzymując mieszaniny przydatne do ich pompowania i samozeskalania po ich zdeponowaniu [Murphy i in. 2012].

Istotą technologii „pasty" (znanej także jako „emulgat", „suspensja", „gęsta pulpa") jest zagęszczenie składników stałych i utworzenie jednorodnego złoża upakowanego, ulegającego konsolidacji i niejednokrotnie petryfikacji [Fourie 2012, Hycnar 1995, Murphy i in. 2012, Hycnar i in. 2013, Wang i in. 2014]. Wpływ zmiany konsystencji drobnoziarnistych odpadów na wskaźniki techniczne na przykładzie popiołów lotnych podano w tabeli 6.3. Analiza tych danych wskazuje na zestalenie złoża i jego odporność na czynniki zewnętrzne (erozję wietrzną i wodną).

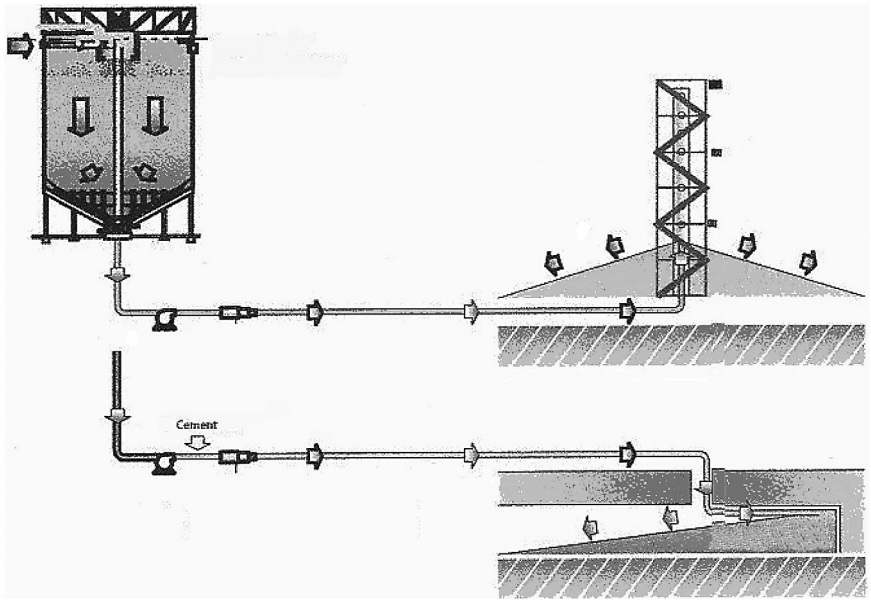
Technologie „pasty" znane pod symbolami, między innymi P&TT (*Paste and Thickened Tailing*), DCP (*Deep Cone Paste*) i DCT (*Deep Cone Thickener*),

Tabela 6.3. Porównanie wskaźników technicznych składowania drobnoziarnistych odpadów w technologii zagęszczania tradycyjnej i nowej „pasty" na przykładzie popiołów lotnych [Hycnar 1995]

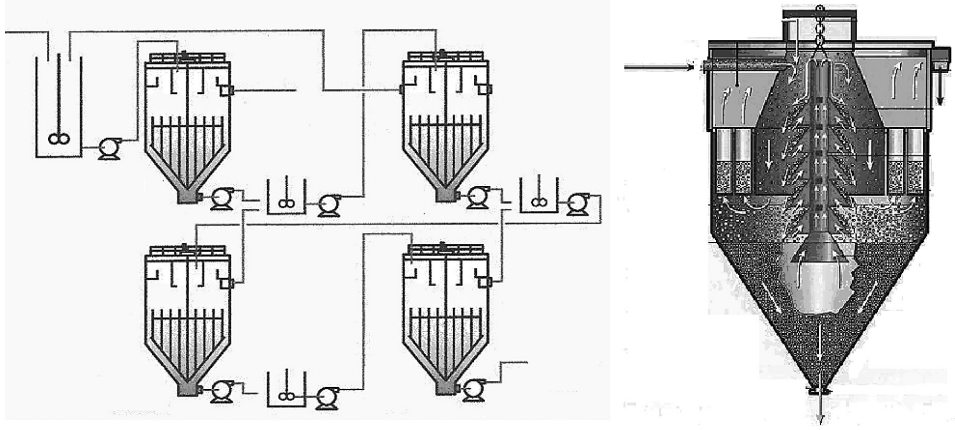
Wyszczególnienie	Technologia		Efekt w stosunku do technologii tradycyjnej
	tradycyjna	nowa	
Stosunek ilości popiołu do wody	1:10–40	3–1:1	– zmniejszenie ilości wody do transportu popiołu od 20 do 120 razy
Ilość masy wody do preparowania i transportu w stosunku do ilości popiołu – 100%	od 1 000 do 4 000	133–200	– zmniejszenie energochłonności – zmniejszenie materiałochłonności – ograniczanie powierzchni pod instalacje
Ilość wody wydzielonej, koniecznej do odprowadzenia ze składowiska, w porównaniu z ilością zdeponowanego popiołu – 100%	od 1 000 do 4 000	0–200	– możliwość wyeliminowania udbioru wody nadmiarowej ze składowiska
Charakterystyka złoża popiołu	luźne, w dużym stopniu rozfra-kc|onowane	upakowane, homoge-nizowane	
– masa objętościowa szkieletu wysuszonego przy 105 °C,	od 0,95 do 1,0	od 0,93 do 1,1	– zwiększenie masy popiołów składowanych na jednostce powierzchni
– wodoprzepuszczalność, m/s	$3{,}3 \cdot 10^{-4}$	$3{,}5 \cdot 10^{-4}$	– tysiąckrotne zmniejszenie przenikania wody przez złoże
– wymywalnosć składników rozpuszczalnych w wodzie z popiołu, np, SO_4, g/dcm^3	bardzo duża	mała	– zmniejszenie wymywalności z popiołów składników rozpuszczalnych w wodzie
			– zmniejszenie zanieczyszczenia gleby, wód
– erozja wietrzna (wtórne pylenie), % mas.	bardzo duża (19,9%)	bardzo mała (1,2–1,4%)	– praktycznie wyeliminowanie pylenia wtórnego – wyeliminowanie stosowania specjalnych środków przeciw pyleniu składowisk (np. błonotwórczych)
– procesy zestalania złoża (petryfikacja)	powolne	szybkie	– szybka petryfikacja dzięki właściwościom wiążącym popiołu

stosowane są od około pół wieku w górnictwie rud i zakładach wzbogacania kopalin niewęglowych [Wang i in. 2014]. W górnictwie węglowym zostały po raz pierwszy zastosowane w 2007 roku w kopalni Lone Mountain w Lee Country (USA), do zagospodarowania mułów węglowych [Murphy i in. 2012, Wang i in. 2014].

Uniwersalną technologię „pasty" oferuje firma EIMCO wchodząca w skład FLSmidt [Gupta i Bethell 2012], dająca możliwość lokowania zagęszczonych drobnoziarnistych odpadów na składowiskach powierzchniowych, jak również w podziemnych wyrobiskach górniczych, co ilustruje schemat na rysunku 6.3.



Rys. 6.3. Technologia firmy EIMCO zagęszczania i deponowania „pasty" drobnoziarnistych odpadów górniczych i przeróbczych w osadnikach powierzchniowych i w wyrobiskach górniczych [Eimco 2010]



Rys. 6.4. Technologia firmy EIMCO zagęszczania zawiesin wodnych drobnoziarnistych odpadów w zagęszczalnikach stożkowych [Eimco 2010]

Zagęszczenie zawiesin wodno-mułowych prowadzone jest przeciwprądowo w stożkowych zagęszczalnikach (dekantatorach) (rys. 6.4).

Omówiona technologia „pasty" jest również znana i stosowana w naszym kraju, głównie do lokowania odpadów poflotacyjnych i mułów węglowych oraz ich mieszanin z popiołami lotnymi w wyrobiskach górniczych, nie tylko

do ich deponowania, ale również do wypełniania i uszczelniania wyrobisk górniczych [Kronenberg 1995, Mazurkiewicz i in. 1997, Palarski i in. 2012, Stankiewicz i Góralczyk 2012]. Upowszechnienie gęstej pulpy rozpoczęło się od wdrożenia w Elektrowni Łagisza technologii „emulgatu" do lokowania popiołów w pobliskim składowisku oraz w wyrobiskach sąsiedniej kopalni węgla kamiennego, do której gęstą pulpę podawano 5-cio kilometrowym rurociągiem [Hycnar i in 1993].

Omawiane technologie gęstej pulpy mogą być dobrym rozwiązaniem w przypadku wydzielania koncentratów węglowych z mułów węglowych dla zagospodarowania frakcji wodno-iłowej.

6.3. Technologie wydzielania koncentratów węglowych z depozytów drobnoziarnistych odpadów

Przykładem może być projekt techniczno-ekonomiczny produkcji koncentratów węglowych z mułów (mieszanina mułów i odpadów poflotacyjnych) zgromadzonych w sąsiadujących pięciu osadnikach (25 ha), w ilości przekraczającej 2 mln ton [Hycnar 2001b].

Z analizy jakości mułów z osadników wynikają następujące wnioski:

- złoża mułów w osadnikach są stosunkowo dobrze wymieszane i zapopielenie ich frakcji ziarnowej waha się w małym zakresie,
- w złożach w poszczególnych osadnikach brak „gniazd" znacząco zróżnicowanych zawartością popiołu i węgla,
- zgromadzone muły zawierają frakcje ziarnowe:
  - +125 μm w ilości około 23% o zapopieleniu średnio 7,6%,
  - +75 μm w ilości około 34% o zapopieleniu średnio 11%,
  - +45 μm w ilości około 37% o zapopieleniu średnio 11,2%,
- koncentraty węglowe wydzielane z omawianych mułów w ilości około 40% zawierają średnio 18% popiołu.

Po uwzględnieniu potrzeby wyłączenia jednego osadnika z bilansu materiałowego, do urobienia pozostało 1,76 mln ton, z tego do przeróbki zaliczono 1,5 mln ton mułów. W zależności od przyjętego rozwiązania węzła wydzielania koncentratów węglowych, odzysk węgla oceniono na:

- 305 tys. ton o uziarnieniu +125 μm,
- 505 tys. ton o uziarnieniu +75 μm,
- 530 tys. ton o uziarnieniu +45 μm,
- 600 tys. ton o zapopieleniu 18%.

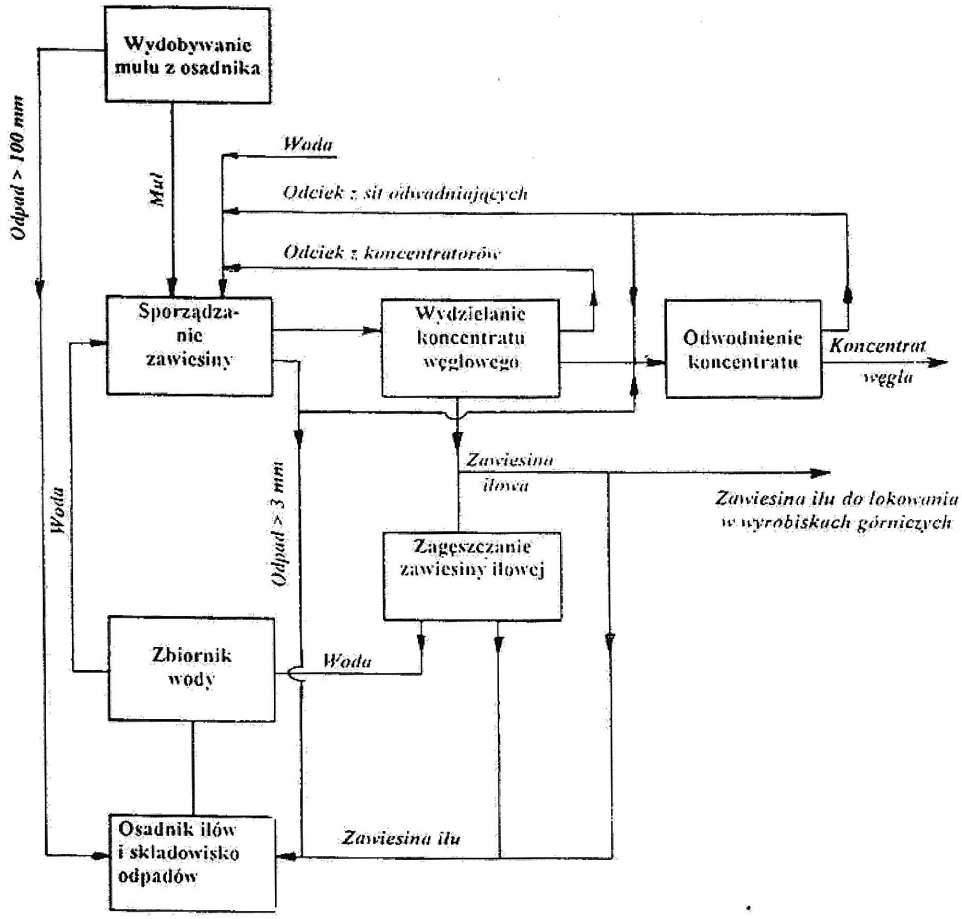
Czasokres produkcji koncentratów węglowych oceniano na 4 lata, przy 8 miesięcznej eksploatacji instalacji w ciągu 20 dni w miesiącu, na dwie zmiany.

Docelowa wydajność przerobowa mułu wynosi 200 Mg/h. Na proces odzysku koncentratów węglowych składają się następujące węzły technologiczne:

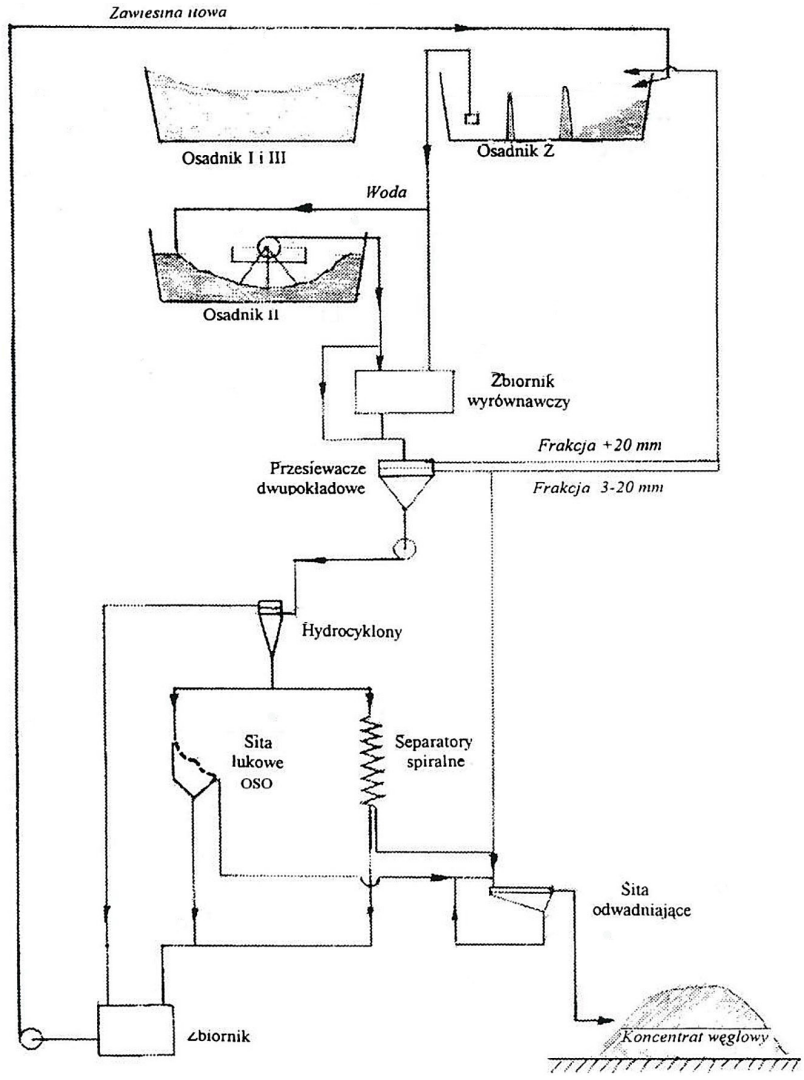
- węzeł wydobywania depozytu z osadników i ich transport,
- węzeł sporządzania zawiesin mułu w wodzie o wymaganym stężeniu,
- węzeł wydzielania koncentratów węglowych,
- węzeł odwadniania i magazynowania koncentratów węglowych,
- węzeł zagospodarowania odpadów iłowych.

Schemat powiązań poszczególnych węzłów technologicznych pokazano na rysunkach 6.5 i 6.6.

Węzeł wydobywania depozytu z osadników i transport. W przypadku zawodnionych osadników najkorzystniej jest stosować hydrourabianie złoża strumieniem wody i tłoczenie pulpy do węzła przygotowania zawiesiny. Wyko-

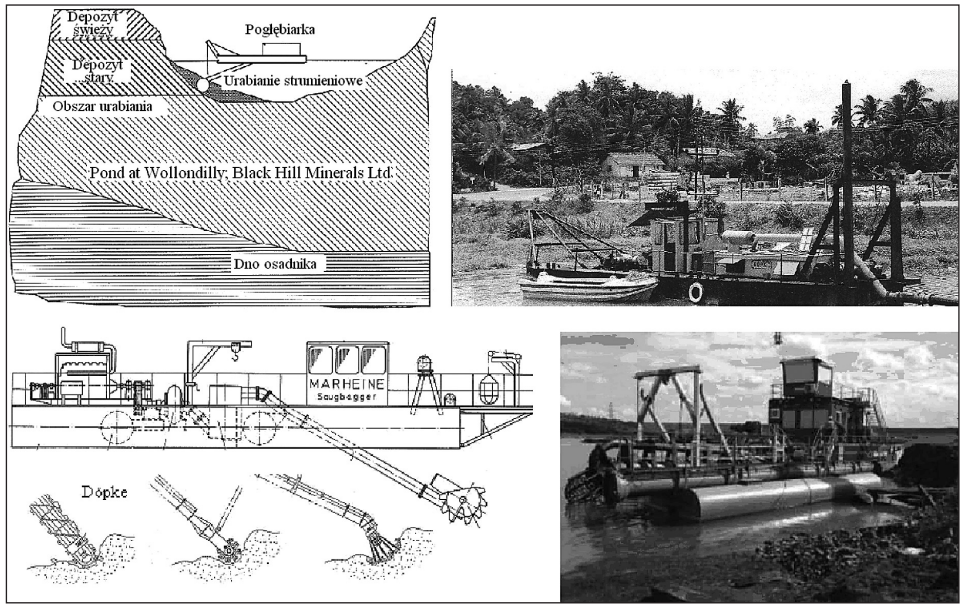


Rys. 6.5. Schemat powiązań węzłów technologicznych instalacji odzysku koncentratów węglowych z mułów zgromadzonych w osadnikach ziemnych



Rys. 6.6. Schemat zminimalizowanego pełnego cyklu technologicznego odzysku koncentratów węglowych ze zdeponowanych mieszanin odpadów poflotacyjnych i mułów węglowych

nane rozeznania stosowanych rozwiązań dla wydobywania mułów węglowych z zawodnionych osadników w Czechach oraz usuwania osadów dennych z rzek/portów w kraju, jednoznacznie wskazują na dużą skuteczność tej technologii. Rozwiązaniem mogą być rzeczne kutry (hydrofulery) wyposażone w wielofunkcyjne organy urabiające, przydatne do osadów o różnej twardości oraz tratwy z zamontowanymi pompami ssąco-tłoczącymi, systemem napędowym, sterowania głębokością urabiania i prędkością przemieszczania (rys. 6.7).



Rys. 6.7. Przykłady hydrourabiania depozytów węglowych z osadników zalanych wodą

Osadniki z odwodnionymi, względnie zestalonymi depozytami wymagają zazwyczaj ich mechanicznego urabiania, następnie rozluźnienia ich struktury i sporządzenia zawiesiny wodno-mułowej w bębnie rozmywczym lub mieszalniku wirnikowym.

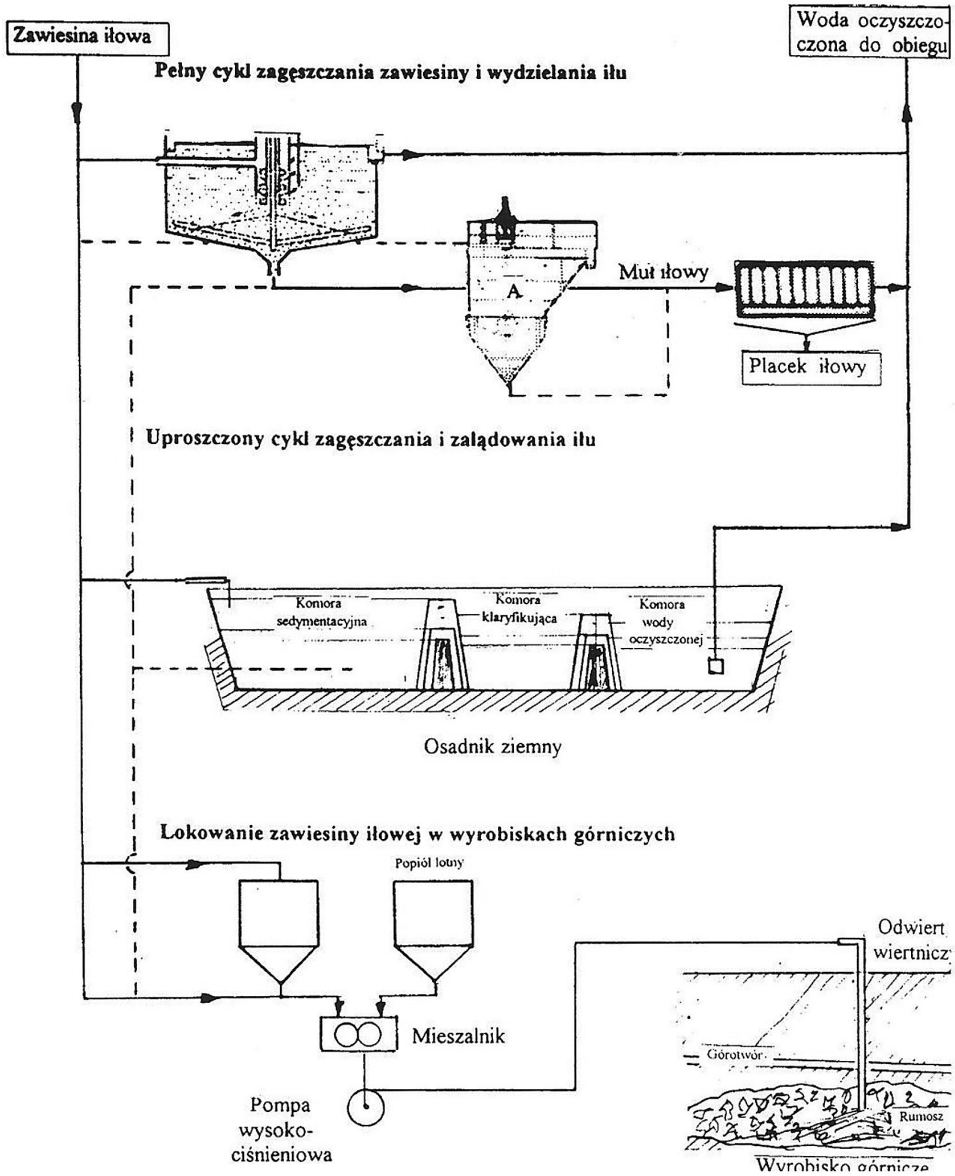
Węzeł sporządzania zawiesin mułu w wodzie o wymaganym stężeniu. Surowe muły urabiane mechanicznie, po odsianiu i ewentualnym dokruszeniu, podlegają rozmywaniu w bębnie lub mieszalniku wirnikowym, gdzie jednocześnie sporządzana jest zawiesina o wymaganej zawartości mułu do odzysku węgla. Zawiesiny z hydrourabiania podlegają analogicznemu procesowi odsiewania zanieczyszczeń i sporządzania zawiesin technologicznych.

Węzeł wydzielania koncentratów węglowych. Sporządzona zawiesina o wymaganej zawartości fazy stałej poddawana jest wstępnemu odileniu w hydrocyklonie, a następnie klasyfikacji ziarnowej na odśrodkowych sitach odwadniających (sita OSO), względnie na sitach łukowych lub w separatorach spiralnych.

Węzeł odwadniania i magazynowania koncentratów węglowych. Do odwodnienia otrzymanego koncentratu węglowego brano pod uwagę wibracyjne sita odwadniające lub wirówkę odwadniającą z koszem o szczelinach 0,05 mm. Odwodniony koncentrat węglowy wymaga składowania w zamkniętych lub półzamkniętych magazynach.

Węzeł zagospodarowania odpadów iłowych. Założono łączenie wszystkich odcieków iłowych oraz, w zależności od miejscowych warunków, poddanie

ich zagęszczeniu w osadnikach ziemnych lub w instalacjach wodno-iłowych; względnie wykorzystania ich do sporządzania mieszanek (pulpy) do izolowania wyrobisk górniczych, co ilustruje rysunek 6.8.



Rys. 6.8. Alternatywne rozwiązania gospodarki iłowej: A – osadnik lamelowy zastępujący osadnik promieniowy

Projekt ujmował również program zagospodarowania opróżnionych osadników, między innymi do:

- odbudowy pojemności składowej odpadów,
- odzyskania terenów poprzez ich rekultywację techniczną i biologiczną,
- zaadaptowania do innych funkcji.

Przeprowadzone analizy ekonomiczne projektu wykazały, że prosta stopu zwrotu nakładów inwestycyjnych wynosi 1,23 roku.

W ostatnich latach można jednak odnotować postęp w zakresie wykorzystania i wzbogacania drobnoziarnistych odpadów węglowych z wyłączonych z eksploatacji osadników mułów węglowych i odpadów poflotacyjnych. Firma Eco Carbo-Julia s.c. uruchomiła Zakład Recyklingu Odpadów Węglowych produkując granulowane paliwo na potrzeby kotłów z paleniskami fluidalnymi [Kral i Ciołeszayńska 2012] i koncentrat węglowy wydzielany w instalacji hydrocyklonów [Repka i in. 2012], przeznaczony dla energetyki oraz jako składnik surowca do flotacji.

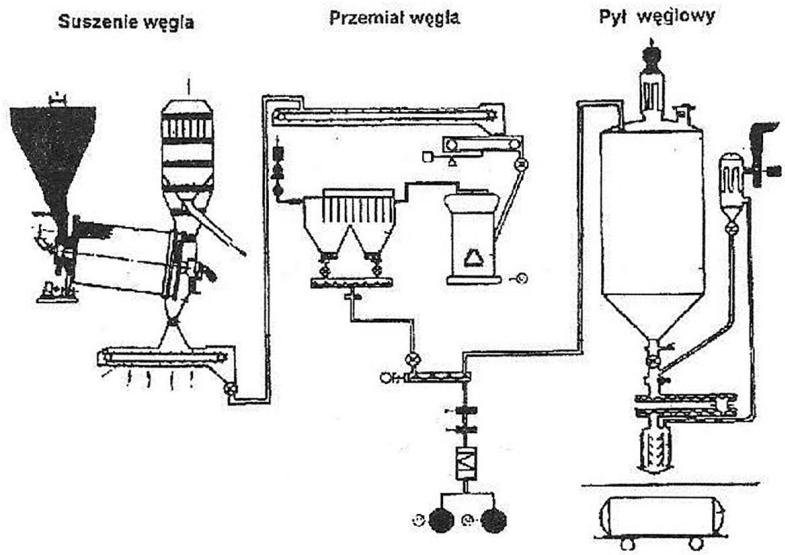
7. PRZYKŁADY ENERGETYCZNEGO WYKORZYSTANIA DROBNOZIARNISTYCH FRAKCJI WĘGLOWYCH

7.1. Możliwości wykorzystania drobnoziarnistych frakcji węglowych

Przykładem największego wykorzystania węgli i ich mieszanin z mułami i odpadami poflotacyjnymi w postaci pyłu są kotły i piece z paleniskami pyłowymi, w których pył węglowy rozpylany z palników nie tylko zapewnia efektywne spalanie pyłu węglowego, ale również pozwala na regulację składu spalin (np. NO_x). Zazwyczaj pył węglowy jest wytwarzany w ramach instalacji nawęglania kotłów pyłowych (elektrownie, elektrociepłownie, ciepłownie), pieców cementowych, wielkich pieców itp. (rys. 7.1) [Hycnar i Blaschke 2002].

W przypadkach mniejszego zapotrzebowania na pył węglowy (hutnictwo, piece komunalne), w wielu krajach pył węglowy w atmosferze azotu dowożony jest w autocysternach do odbiorców. W zależności od wymagań stawianych na pył węglowy do ich produkcji dobierane są odpowiednie sortymenty węgla lub/i koncentraty węglowe, odzyskiwane z odpadów poflotacyjnych w procesie flotacji.

Występujące w kopalniach drobnoziarniste odpady węglowe, ze względu na swoje właściwości kaloryczne, stosowane są jako paliwo samodzielne, dodatek



Rys. 7.1. Schemat instalacji produkcji pyłu z węgla brunatnego wg. Braunkohlen-Staub

do paliw podstawowych lub jako składnik mieszanek paliwowych. Muły węglowe i odpady poflotacyjne z bieżącej produkcji i z osadników w największych ilościach stosowane są jako paliwo uzupełniające do opalania kotłów z paleniskami fluidalnymi i pyłowymi. Ze względu na zawartość iłów, muły takie stosowane są również jako paliwo dodatkowe do opalania pieców klinkierowych.

W literaturze jest stosunkowo dużo publikacji na temat paliw zawiesinowych sporządzanych z drobnoziarnistych wysokojakościowych węgli i mułów węglowych oraz odpadów poflotacyjnych.

Dla przybliżenia aktualnych problemów zagospodarowania drobnoziarnistych frakcji węglowych omówiono zagadnienia wykorzystania paliw zawiesinowych sporządzanych z pyłów i mułów węglowych oraz zagadnienia spalania mułów lub odpadów poflotacyjnych w paleniskach fluidalnych.

7.2. Suspensje węglowo-wodne jako paliwa zawiesinowe

W ostatnich latach rośnie zainteresowanie produkcją i stosowaniem suspensji węglowo-wodnych do opalania kotłów i pieców oraz reaktorów zgazowujących, jako zamiennika olejów opałowych i gazu ziemnego oraz węgla. Działania te mają na celu obniżenie kosztów wytwarzania energii, a w przypadku zastępowania węgla obniżenie emisji zanieczyszczeń do środowiska.

Suspensje węglowo-wodne (skróty: suspensje i sww) są przedmiotem wieloletnich badań w większości krajów, które dysponują dużymi zasobami węgla lub/i energetyką opartą o spalanie importowanych paliw kopalnych [Khodakov 2007, Kumar 2012, Tras 1997, Wibberley i in. 2008, Yuhi i in. 2007]. Również w naszym kraju prowadzono studia i badania nad właściwościami suspensji węglowo-wodnych i możliwościami ich wykorzystania [Ściążko i in. 1996, Hycnar 2001b, Hycnar i Kadlec 2001, Kijo-Kleczkowska 2010, Szymkiewicz i Fraś 2013, Kowalski i in. 2014].

Przy bardzo bogatym piśmiennictwie dotyczącym badań suspensji węglowo-wodnych, stosunkowo mało jest publikacji omawiających doświadczenia z ich wytwarzaniem i spalaniem [Alekseenko 2011, Brujew i in. 1994, Ercolani i Tiberio 1994, Morozow 2012, Mosin i in. 2008, Murko i in. 2013, Puzyriew i in. 2001, Serant i in. 2008, Trubeckij i in. 2002] .

Suspensje węglowo-wodne były i są częściowo stosowane w krajach (alfabetycznie): Chiny, Francja, Indonezja, Japonia, Kanada, Rosja, Szwecja, Ukraina, USA, Włochy i ZSRR. W XXI wieku największy udział w produkcji i rozwoju technologii wytwarzania sww, jako zamiennika olejów opałowych i gazu ziemnego mają Chiny, Japonia i Rosja oraz prawdopodobnie już w niedalekiej przyszłości Ukraina i Indonezja.

W Europie w latach 80-tych znaczące osiągnięcia w badaniach i rozwoju technologii uzyskano we Włoszech, gdzie w Porto Torres zbudowano zakład

wzbogacania węgla i wytwarzania suspensji węglowo-wodnej o zdolności przerobowej 500 Gg/a [Ercolani i in. 2003]. W miarę ustępowania skutków ówczesnego kryzysu paliwowego zainteresowanie Europy suspensjami węglowo-wodnymi i węglem odpowiednio malało.

Włoskie doświadczenia natomiast zostały wykorzystane przy budowie największej instalacji produkcji suspensji o wydajności 3000 Gg/a w kopalni, instalacji transportu rurowego 262 km i instalacji spalania w elektrociepłowni Nowosybirskaja nr 5 [Ercolani 1990, Ercolani i in. 2003]. Niestety inwestycja nie została zakończona i po krótkim okresie jej niepełnej eksploatacji została wyłączona z eksploatacji [Trubeckij 2008]. W ostatnich latach na terenie Rosji opracowano kilka nowych technologii produkcji suspensji węglowo-wodnych oraz dokonano nielicznych wdrożeń opalania kotłów i pieców o małej i średniej mocy [Alekseenko 2011, Morozow 2012, Murko i in. 2013].

Największym producentem i użytkownikiem suspensji węglowo-wodnej są Chiny [Soedjanto i Zhou 2009]. Roczna produkcja suspensji węglowo-wodnej określana jest na 15 000 do 20 000 Gg/a i jest spalana w około 90 zakładach energetycznych o mocy od 1,5 do 200 MWe (tab. 7.1) [Zhou 2009]. W miejscowości Nanhai w 2005 roku uruchomiono blok o mocy 200 MWe opalany tylko suspensją. Stosowanie suspensji węglowo-wodnej przyniosło oszczędność 1500 Gg/a olejów opałowych. Jednocześnie, można dowiedzieć się ze źródeł największego chińskiego producenta suspensji Sino Clean Energy Inc., że w 2012 roku zapotrzebowanie na suspensję przekroczyło 40 000 Gg i że jest stosowana do opalania przeszło 700 kotłów i setek pieców przemysłowych [Investor presentation 2011, CER Report 2011].

W ostatnich latach obserwuje się nawrót zainteresowań suspensjami węglowo-wodnymi, nie tylko jako zamiennika olejów opałowych i gazu ziemnego, ale także jako alternatywy dla węgla poprzez możliwość wytwarzania z niego paliwa ekologicznego i sposobu obniżania emisji zanieczyszczeń gazowych.

Zainteresowanie wytwarzaniem i stosowaniem suspensji węglowo-wodnych wynikało/wynika między innymi z:

- konieczności zmniejszenia zużycia paliw płynnych (Włochy, Chiny, Ukraina),
- możliwości obniżenia kosztów spalania paliw płynnych (Włochy, Szwecja, ZSRR, Rosja),

Tabela 7.1. Struktura wydajności kotłów stosujących suspensję węglowo-wodną w Chinach

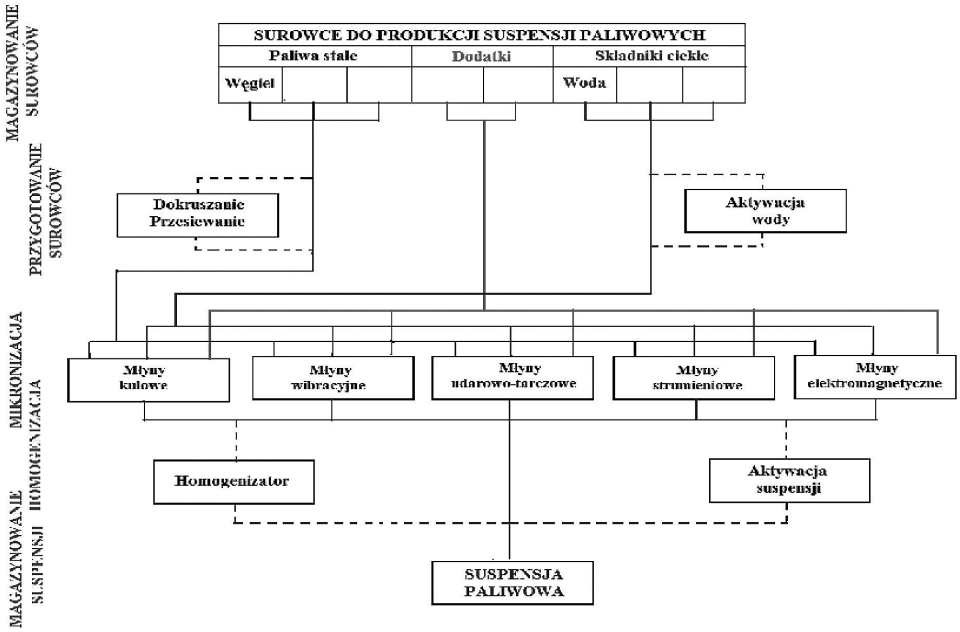
Określenie	Wydajność kotła, Mg/h											
	4	10	20–24	35	45	60–65	75	130	220	320	410	670
Ilość kotłów	8	11	3	2	2	5	2	1	6	3	2	3
Udział, %	16,8	22,9	6,3	4,1	4,1	10,4	4,1	2,1	12,5	6,3	4,1	6,3
Zużycie suspensji, Gg/a	–	–	–	–	–	–	–	–	–	960	1260	1340

- stosowanego systemu hydrotransportu węgla (m.in. USA, ZSRR),
- zagospodarowania silnie zawodnionych węgli i odpadów (Rosja, Francja, Polska),
- podwyższenia sprawności procesów spalania,
- obniżenia emisji zanieczyszczeń gazowych z kotłów opalanych węglem,
- potrzeb technologicznych np. przygotowanie wsadu do zgazowania węgla.

7.2.1. Badania i próby produkcji suspensji węglowo-wodnej

Po przeanalizowaniu warunków poprawy jakości spalania węgli oraz możliwości zastępowania paliw płynnych w istniejących i nowobudowanych obiektach energetycznych Konsorcjum Przedsiębiorstw Robót Górniczych i Budowy Szybów w Mysłowicach powołało Zespół do opracowania i wdrożenia technologii produkcji suspensji węglowo-wodnej [Michalik i in. 2013, Michalik 2014, Hycnar i in, 2014c].

Ze względu na to, że w kraju brak badań nad technologiami wytwarzania suspensji węglowo-wodnej, przeprowadzono analizę stosowanych zagranicą rozwiązań i opracowano program kompleksowych badań i prób, pod kątem ich wdrożenia do przeróbki węgli kamiennych z uwzględnieniem istniejących w kraju warunków (rys. 7.2).

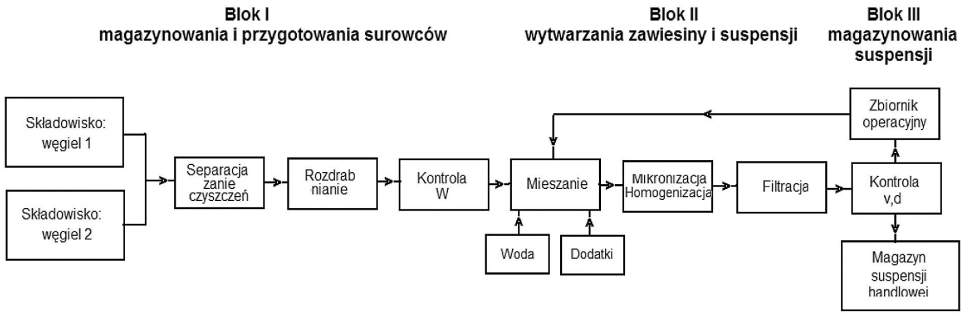


Rys. 7.2. Schemat realizacji studiów i badań w zakresie warunków wdrożenia technologii produkcji suspensji węglowo-wodnej

Prowadzone badania i próby na urządzeniach modelowych i przemysłowych pozwoliły na skonkretyzowanie schematu technologicznego produkcji i zastosowanie suspensji węglowo-wodnej z i dla węgla kamiennego, obejmującego:

- blok I, magazynowania i przygotowania surowców,
- blok II, sporządzania zawiesiny i wytwarzania suspensji węglowo-wodnej,
- blok III, magazynowania i dystrybucji suspensji węglowo-wodnej,
- blok IV, magazynowania i przygotowania suspensji węglowo-wodnej do spalania.

Schemat blokowy wytwarzania suspensji węglowo-wodnej ilustruje rysunek 7.3.



Rys. 7.3. Schemat technologiczny wytwarzania suspensji węglowo-wodnej

Dla docelowej instalacji przemysłowego wytwarzania suspensji węglowo-wodnej dokonano doboru podstawowych urządzeń i wyposażenia technicznego, gwarantujących produkcję suspensji w ilości 10 do 20 Mg/h. Doskonalenie technologii i weryfikacje wytypowanych podstawowych urządzeń są prowadzone na instalacji doświadczalnej o wydajnościach 1 do 8 Mg/h.

W dotychczas prowadzonych analizach rozwiązań wyeliminowano stosowanie młynów kulowych i prętowych oraz młynów wibracyjnych do przemiału węgla i homogenizacji zawiesin węglowo-wodnych, jako urządzeń bardzo energochłonnych i wymagających stosunkowo dużych uzupełnień elementów narażonych na ścieranie. Zdając sobie sprawę, że koszty tradycyjnego przemiału węgla stanowią znaczącą pozycję w kosztach wytwarzania suspensji, przeprowadzono szereg badań, które potwierdziły możliwość obniżenia tych kosztów i stały się podstawą do dokonania zgłoszenia patentowego [Hycnar i in. 2914c].

W docelowej instalacji pilotowej, w zależności od zapotrzebowania na suspensję i dostępności określonego węgla oraz polityki cenowej na paliwa, założono dwa ciągi technologiczne z różnymi agregatami mieląco-homogenizującymi, z możliwością włączenia trzeciego agregatu.

W zależności od wielkości zapotrzebowania, zakłada się systematyczne (uzgodnione) dostawy suspensji węglowo-wodnej do odbiorcy lub/i budowę instalacji tworzenia suspensji przy wybranym obiekcie energetycznym.

7.2.2. Właściwości fizykochemiczne suspensji węglowo-wodnej

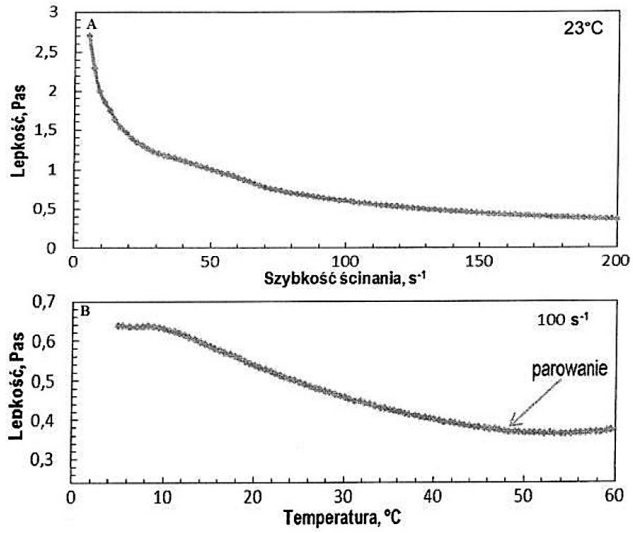
Właściwości handlowe suspensji węglowo-wodnych zazwyczaj ograniczone są do określenia zawartości węgla, lepkości, wartości opałowej, zapopielenia i zawartości siarki (tab. 7.2). Natomiast, na potrzeby opracowania technologii produkcji i spalania suspensji węglowo-wodnej konieczny jest większy zakres badania węgli branych pod uwagę jako surowca, optymalizacji mikronizacji węgla i tworzenia suspensji węglowo-wodnych oraz czynników wpływających na stabilność suspensji.

Tabela 7.2. Charakterystyka fizykochemiczna suspensji węglowo-wodnych

L.p.	Właściwość	Chiny	Rosja			Konsorcjum
			Inskaja	Biełowo–Nowosibirsk	Amalthea	
1.	Skład suspensji, %:					
1.1.	– zawartość węgla	> 60,1	55,6	57–65	50–68	55–61
1.2.	– zawartość popiołu	< 10,0	18,0	12–18	8	5,8
1.3.	– zawartość siarki	< 0,8	–	–	–	0,3
1.4.	– zawartość dodatków	≤ 1	–	1,5	< 1	0,0
2.	Zawartość ziaren, %:					
2.1.	< 250 μm	–	–	–	–	> 98,0
2.2.	< 45 μm	80–85	19,3	–	–	> 88,0
2.3.	– granice uziarnienia, μm	38	0–350	–	20–120	0–200
3.	Lepkość dynamiczna, cPs przy szybkości ścinania 100 s^{-1} i 20 °C	1 200±200	1 000	<800	750–1 200	800–1 100
4.	Wartość opałowa, kJ/kg	> 17 000	12 870		12 600–18 900	15 500–18 000
5.	Trwałość suspensji, miesiące [dni]	3	–	24	[5]	[5]

Badania kilku rodzajów węgla i różnych technologii ich mikronizacji wykazują duży ich wpływ na właściwości uzyskiwanych suspensji. Ważnym parametrem jest właściwość reologiczna suspensji określana jako lepkość, która w dużym stopniu zależy od temperatury (rys. 7.4). Wpływ temperatury praktycznie jest ograniczony do zakresu 5 do 60 °C; niższa temperatura od 5 °C prowadzi do zamarznięcia i najczęściej zniszczenia struktury suspensji. W warunkach eksperymentalnych natomiast przy temperaturze wyższej od 60 °C następował rozkład suspensji i odparowanie wody. Ważną obserwacją jest zachowanie się suspensji w zależności od szybkości ścinania. Wzrost szybkości ścinania prowadzi do spadku lepkości dynamicznej suspensji; wielkość tych zmian w obszarze wzrostu szybkości ścinania od 20 do 200 s^{-1} powoduje spadek lepkości w zakresie 2,5 do 9,4 razy.

Niejednokrotne oceny płynności (pompowalności) suspensji w stanie bezruchu nie są miarodajne i wymagają uwzględnienia oceny płynności suspensji znajdującej się w ruchu, z tych to między innymi powodów w wymaganiach



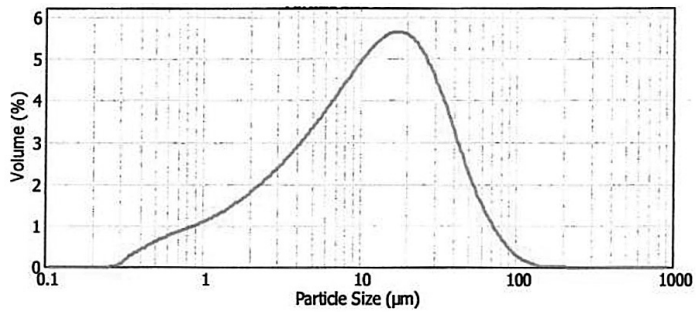
Rys. 7.4. Zależność lepkości suspensji węglowo-wodnej: a) od szybkości ścinania, b) od temperatury

technicznych na suspensje handlowe podawany jest pomiar lepkości przy prędkości 100 lub/i 200 s^{-1}.

Bardzo ważnym parametrem jakości suspensji jest uziarnienie zawartego węgla. Wysokie rozdrobnienie węgla silnie wpływa na efektywność spalania suspensji – ze wzrostem rozdrobnienia maleje wielkość niedopału (koksiku) w produktach spalania (rys. 7.5). Stopień rozdrobnienia węgla wpływa także na lepkość i stabilność suspensji.

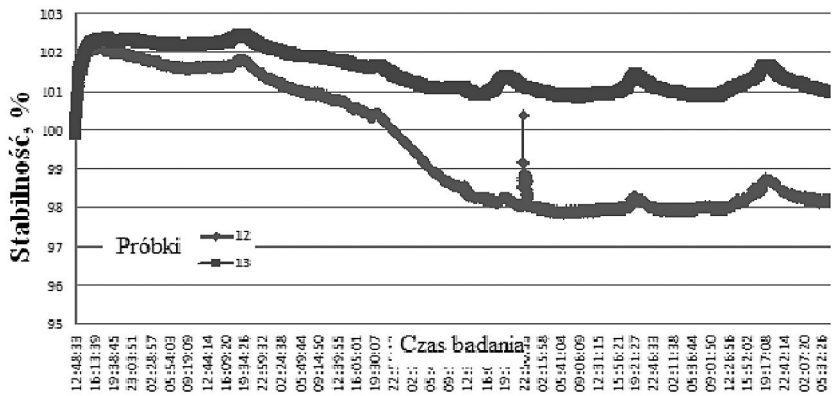
W zależności od zastosowanego węgla, stopnia mikronizacji i homogenizacji uzyskiwane suspensje charakteryzowały się różną stabilnością układu zawiesinowego, co ilustruje rysunek 7.6.

Na właściwości reologiczne i stabilność suspensji węglowych można w znacznym stopniu wpływać, stosując odpowiednio dobrane dodatki obniżające lep-



Rys. 7.5. Charakterystyka ziarnowa węgla w suspensji węglowo-wodnej

a)



b)

Rys. 7.6. Porównanie stabilności struktury suspensji węglowo-wodnych oznaczanych na aparacie Sedimentation Analizer RF-3000: a) przykładowe wyniki badań, b) widok aparatu (fot. J.J. Hycnar)

kość (plastyfikatory) i stabilizujące zawiesiny węgla w wodzie (stabilizatory). Dodatek tego rodzaju substancji w ilości od 1,0 do 1,5% liczony na zawarty węgiel znacząco poprawia właściwości uzyskiwanych suspensji, lecz niestety może w istotny sposób wpływać na wzrost ceny suspensji. Z tych to powodów, rozpowszechnione jest okresowe recyrkulowanie zmagazynowanych w zbiornikach suspensji bez dodatków.

7.2.3. Kierunki stosowania suspensji węglowo-wodnych

Spośród wielu wymienionych wcześniej kierunków zagospodarowania suspensji węglowo-wodnych, w warunkach naszego kraju, najbardziej interesujące jest:

- zastępowanie olejów opałowych i gazu ziemnego,
- zastępowanie węgla w tych przypadkach, gdy przekraczane są wskaźniki emisyjne,

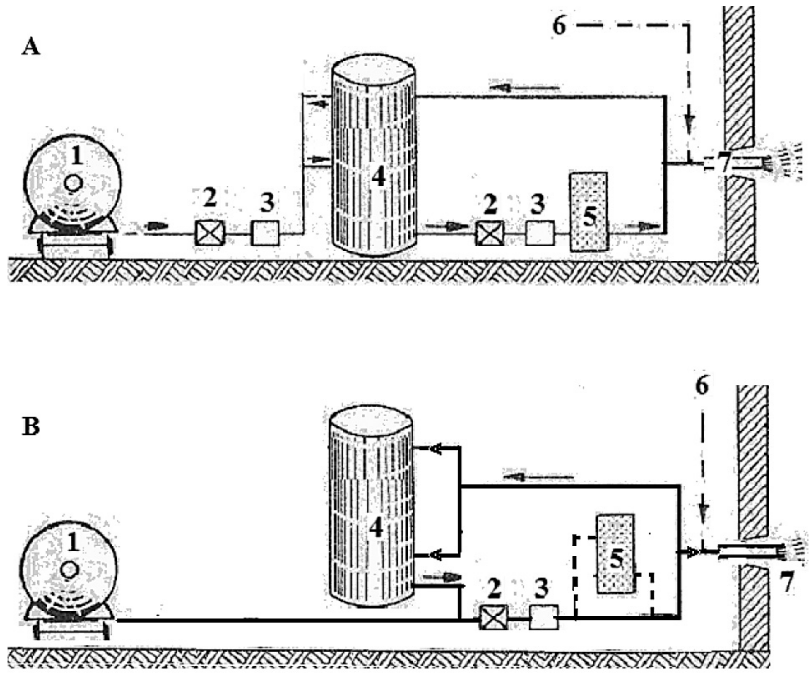
- współspalanie z innymi paliwami, do podtrzymywania spalania, podwyższania sprawności procesów spalania itp.,
- przygotowanie wsadu do procesu zgazowania węgli.

Zakres prac adaptacyjnych na kotłach lub piecach zależy od wielu czynników, w tym od tego czy zastosowana suspensja:

- będzie dowożona albo będzie wytwarzana na miejscu zastosowania,
- będzie paliwem podstawowym, czy paliwem uzupełniającym,
- ma zastąpić olej opałowy lub gaz,
- ma zastąpić stosowany węgiel.

W wielu przypadkach konieczne jest wyposażanie kotłów w instalację rozpałkową (gaz, lekki olej opałowy).

Zastosowanie suspensji z zewnętrznych dostaw, w kotłach opalanych olejami lub gazem wymaga instalacji do przyjmowania, składowania i przygotowania suspensji do spalenia (rys. 7.7) oraz rozbudowy ciągu spalinowego o urządzenia odpylające spaliny oraz zabudowy odżużlacza. Dla zmniejszenia zakresu modernizacji można zastosować przedpalenisko, pozwalające na



Rys. 7.7. Schemat instalacji magazynowania i przygotowania do spalania suspensji węglowo-wodnej: A – instalacja dla dużych odbiorców, B – instalacja dla małych odbiorców, 1) cysterna/kontener, 2) filtr, 3) pompa, 4) zbiornik suspensji, 5) podgrzewacz, 6) powietrze sprężone/para wodna, 7) palnik

rozwiązanie problemu wydzielającego się żużla i znaczne zmniejszenie ilości popiołu lotnego w spalinach. Jeżeli suspensja zawiera poniżej 5% popiołu, istniejące układy odpopielania kotłów mazutowych są zazwyczaj wystarczające.

W przypadku zastosowania suspensji do opalania węglowych kotłów rusztowych, pyłowych i fluidalnych istniejąca instalacja nawęglania wymaga uzupełnienia tylko o instalację przyjmowania, składowania i przygotowania suspensji do spalania. Do rozpylania i spalania suspensji węglowo-wodnych stosowane są odpowiedniej konstrukcji palniki, zazwyczaj z czynnikiem rozpylającym, jakim jest sprężone powietrze lub para wodna.

7.2.4. Aspekty ekonomiczne i ekologiczne stosowania suspensji węglowo-wodnych

Skąpe wyniki badań i prób krajowych z pełnego „cyklu produkcji i zastosowania" suspensji węglowo-wodnych utrudnia dokonanie obiektywnej oceny efektów ekonomicznych i ekologicznych. W tej sytuacji interesujące są wyniki uzyskiwane w zagranicznej energetyce (tab. 7.3).

W Chinach i Rosji obniżka kosztów wytwarzania energii cieplnej i elektrycznej wynika z różnic cen pomiędzy analizowanymi paliwami i waha się w szerokim zakresie od 30 do 60%. Wykonana przez Foster Wheeler analiza kosztów

Tabela 7.3. Porównanie efektów stosowania suspensji węglowo-wodnych z paliwami tradycyjnymi

L.p.	Określenie	Chiny			Rosja	
1.	Cena paliw:	USD/Mg [USD/1 000 m^3]				
1.1.	- węgiel kamienny	–	103		100	
1.2.	- węgiel brunatny	–	–		30	
1.3.	- olej opałowy	298,0	591		750 (mazut M-100)	
1.4.	- gaz ziemny	–	440		500	
1.5.	- suspensja ww	99,9	125		57–65	
2.	Koszty energii:			USD/MW	USD/Mg pary	
2.1.	- cieplnej, USD/Gcal	–	–	–	–	
2.2.	- elektrycznej, USD/MWh	–	–	–	–	
					Kocioł KZ-120	DKWR
2.3.	- gaz ziemny	–	52	121	51,4	6,5–13
2.4.	- olej opałowy	23,4	62	143	–	–
2.5.	- suspensja	16,5	28	66	23,6	61,5
2.6.	- węgiel	–	21	58	–	22,0
2.7.	Obniżka kosztów, %:					
2.8.	- względem oleju	29,6	46,1	54	–	62,2
2.9.	- względem gazu	–	54,8	45	54,2	–

Uwaga: 1 cal = 4,1868 J

budowy w USA elektrociepłowni opalanej węglem i suspensją węglowo-wodną, w porównaniu do opalanej olejem, nie tylko wykazała duże oszczędności na paliwach, ale także na kosztach adaptacji kotłów na omawiane paliwa. W przypadku kotła opalanego suspensją węglowo-wodną czas zwrotu nakładów wynosił 2,5 roku, a opalanego węglem 3,1 roku; natomiast bez uwzględniania kosztów odsiarczania spalin czasy zwrotu nakładów wyniosły 1,0 i 2,3 lata.

Obecność ziaren węgla w wodzie umożliwia dobre rozpylenie paliwa w komorze paleniskowej. Duże rozdrobnienie ziaren węgla decyduje o szybkim ich suszeniu, odgazowaniu, zapłonie i paleniu się. Obecność wody w suspensji, w warunkach spalania węgla, wpływa także na zachodzące reakcje chemiczne, w wyniku czego w produktach spalania w minimalnych ilościach występuje CO, H_2 i CH_4 oraz niespalony węgiel (koksik).

Proces spalania suspensji w porównaniu do spalania samego węgla przebiega w niższej o 100 do 150 °C temperaturze, pomimo stosunkowo wysokiej temperatury zapłonu (450–650 °C) i palenia (950–1050 °C). Wszystkie te czynniki zapewniają wysoką sprawność termiczną wykorzystania paliwa (powyżej 98%) oraz znacząco wpływają na obniżenie emisji NO_x w spalinach (25–50%).

Pomiary zasiarczenia spalin z kotła ciepłowniczego, w którym zastąpiono olej opałowy suspensją węglowo-wodną, wykazały przeszło dwukrotne obniżenie emisji SO_2 (węgiel 0,35% S; mazut 1–2% S). W przypadku zastosowania suspensji w kotle opalanym węglem stwierdzono, że popiół lotny zawierał poniżej 4,8% części palnych, podczas gdy popioły lotne ze spalania tego typu węgla w podobnych kotłach zawierają 50% i więcej części niespalonych.

Znaczącą ekologiczną alternatywą dla węgla jest wdrożenie do spalania suspensji węglowo-wodnych. Poprzez dobór węgla można w szerokim zakresie regulować i kształtować właściwości suspensji. Stosując węgiel wysokiej jakości uzyskujemy suspensje które mogą zastępować oleje opałowe i gaz, a w przypadku zastąpienia węgla mogą powodować one wzrost sprawności procesów spalania i duże obniżenie emisji zanieczyszczeń do zagospodarowania i poprawienie efektywności energetycznej spalania.

7.3. Zastosowanie drobnoziarnistych odpadów węglowych do opalania palenisk fluidalnych kotłów i pieców

Rozpowszechnienie kotłów i pieców z paleniskami fluidalnymi (nazywanych kotłami fluidalnymi) wynika z szeregu ich zalet w porównaniu do kotłów pyłowych i rusztowych, a mianowicie [Hycnar i Foltyn 2005, Niesler 2011, Nowak 2009]:

- prostszy system magazynowania, przygotowania i transportu węgla do spalania,
- możliwość obniżenia powstawania i emisji NO_x w spalinach,

- możliwość spalania różnych rodzajów paliw stałych i płynnych, a w szczególności węgli i odpadów węglowych o dużym zróżnicowaniu kalorycznym i zapopieleniu oraz możliwość równoczesnego spalania różnych paliw,
- możliwość jednoczesnego odsiarczania spalin z procesem fluidalnego spalania paliw oraz dodatkowego odsiarczania spalin w ciągu spalinowym,
- możliwość budowy i eksploatacji kotłów fluidalnych na parametry podkrytyczne, krytyczne i supernadkrytyczne,
- możliwość podwyższania sprawności kotłów fluidalnych poprzez zastępowanie:
  - stałego złoża złożem cyrkulacyjnym,
  - atmosferycznego, paleniskiem ciśnieniowym,
  - atmosferycznego, paleniskiem tlenowym,
- w szeregu przypadkach, uboczne produkty spalania są łatwiejsze do zagospodarowania.

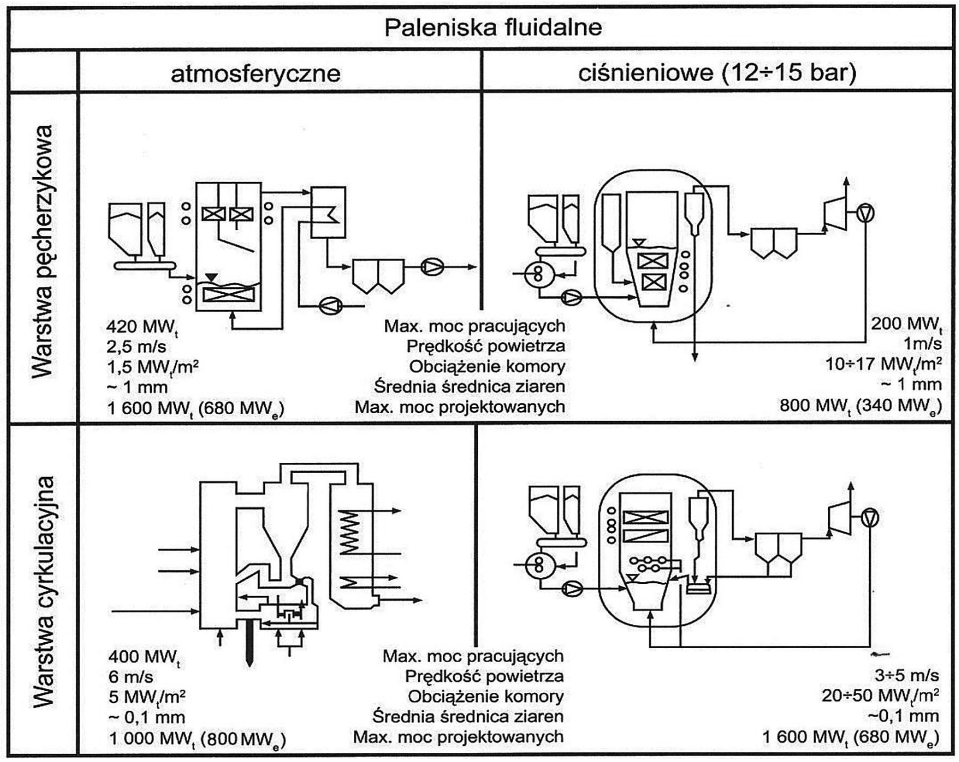
Paleniska fluidalne analogicznie jak wszystkie rozwiązania techniczne, mają w porównaniu do kotłów pyłowych także następujące wady:
- konieczność stosowania wentylatorów o większej mocy,
- intensywniejsze zachodzenie erozji,
- większa skłonność do żużlowania, w przypadkach nie przestrzegania temperatur fluidalnego spalania paliw,
- większe powierzchniowe straty ciepła,
- mniejsza sprawność spalania,
- większe pole przekroju kotła,
- większa ilość ubocznych produktów spalania (m.in. z tytułu stosowania wapienia).

Przegląd rozwiązań technologicznych palenisk fluidalnych stosowanych w kotłach energetycznych i ciepłowniczych podano na rysunku 7.8. Natomiast, przekrój kotłów fluidalnych ze stacjonarną warstwą fluidalną i cyrkulacyjną ilustruje rysunek 7.9.

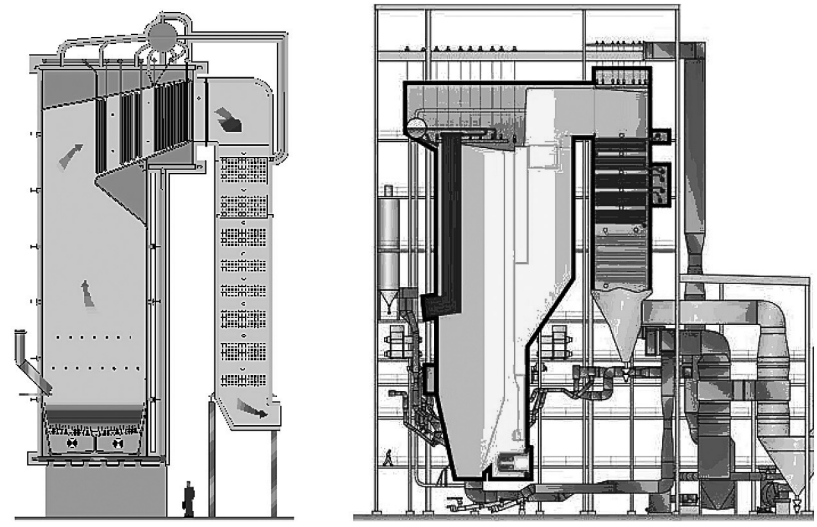
7.3.1. Wymagania dotyczące paliw do palenisk fluidalnych

Analiza budowanych i eksploatowanych kotłów fluidalnych wykazuje, że jakość spalanych paliw węglowych jest bardzo zróżnicowana i wynika z odmienności zakładanych celów oraz konstrukcji palenisk.

Większość dużych kotłów fluidalnych budowana jest pod kątem spełnienia wymagań obiektów energetycznych (wydajność i parametry mediów), dla których jakość dobieranych paliw jest w znacznym zakresie zbliżona. Stwierdzane różnice wynikają zazwyczaj z rozwiązań palenisk stosowanych przez poszczególne firmy np. Foster Wheeler, Alstom, Rafako (EVT) itd. Znaczna część kotłów fluidalnych



Rys. 7.8. Przegląd rozwiązań technologicznych kotłów fluidalnych [Hycnar 2005]



Kocioł ze złożem stacjonarnym (pęcherzykowym)

Kocioł ze złożem cyrkulacyjnym

Rys. 7.9. Przekrój kotłów fluidalnych ze stacjonarną warstwą fluidalną (BFB) i cyrkulacyjną (CFB)

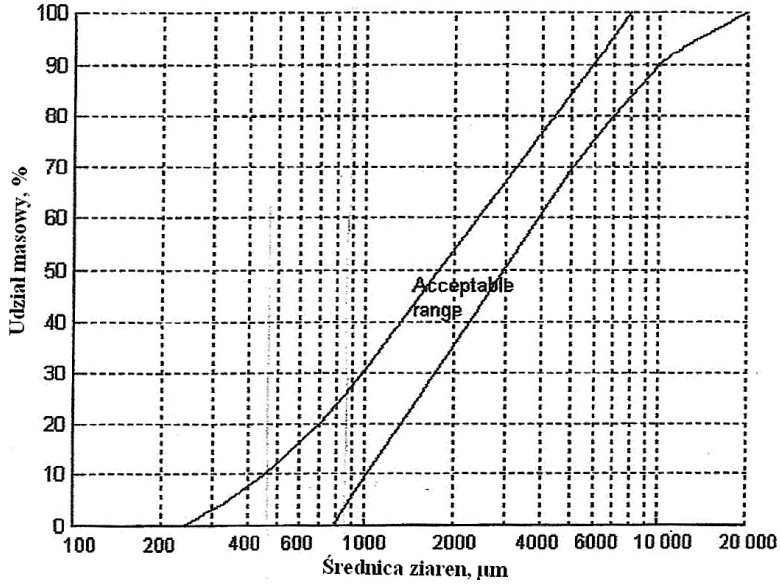
podporządkowana jest zagospodarowaniu określonych rodzajów paliw i ich mieszanin oraz odpadów węglowych, biomasy itd.

Specyfika procesów spalania fluidalnego stawia konkretne wymagania fizykochemiczne dla paliw węglowych, przy jednoczesnym dużym liberalizmie, co do zawartości siarki i popiołu oraz wilgotności. Sam proces fluidalnego spalania, niezależnie od spalanego paliwa, gwarantuje niską emisję tlenków siarki i azotu, dzięki niższej temperaturze spalania paliw i obecności nadmiaru sorbentu.

W warunkach naszego kraju większość budowanych i eksploatowanych kotłów fluidalnych i wytwarzanych paliw do kotłów fluidalnych spełnia wymagania prezentowane przez wytwórców kotłów (Foster Wheeler, Rafako) i dotyczy paliw ziarnistych i stosowanych sorbentów (wapieni). Wymagania stawiane dla węglal kamiennego do kotłów fluidalnych przedstawiono w tabeli 7.4. Założenia projektowe określają zakres zmian danego parametru, a wymagania gwarancyjne uśredniają wartość parametrów i stają się podstawą do rozliczeń gwarancyjnych.

Spośród wielu wymienionych parametrów, szereg z nich posiada szczególne znaczenie, należy do nich, między innymi, rozkład ziarnowy spalanego paliwa, wpływający na zjawisko fluidyzacji i zachodzenie reakcji chemicznych spalania węgla i odsiarczania spalin. Wymogi w tym zakresie przedstawia rysunek 7.10.

Ważnymi parametrami są też charakterystyki temperaturowe topliwości popiołów (punkt mięknienia, topnienia i płynięcia), niedotrzymanie których może powodować zalewanie i zapiekanie paleniska (np. rusztu itp). Z tych to wzglę-



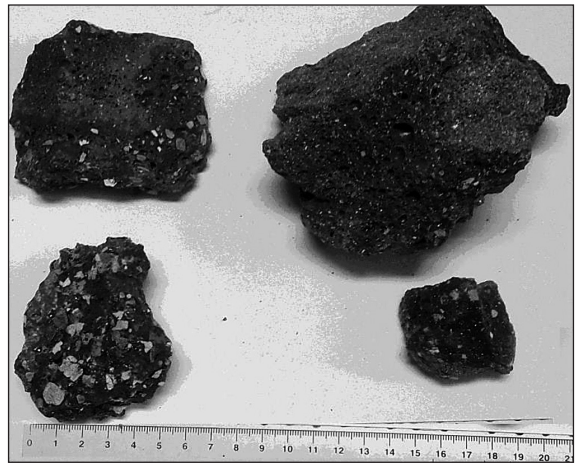
Rys. 7.10. Zalecany przez firmę Foster Wheeler rozkład ziarnowy węgli kamiennych do opalania kotłów fluidalnych

Tabela 7.4. Charakterystyka fizykochemiczna węgla do kotłów fluidalnych

Parametr	Jed-nostka	Wartość na paliwo fluidalne			Paliwo z KWK Brzeszcze Piast Janina
		projektowy zakres		gwaran-cyjna	
		minimalna	maksymalna		
Stan roboczy popiołu					
Wartość opałowa	MJ/kg	18	22	19	19,0
Wilgotność całkowita	%	–	25	18	18,0
Wilgotność przemijająca	%	–	<10	<10	10
Popiół	%	9,8	35	18	18
Siarka całkowita	%	–	1,4	1,2	–
Węgiel	%	41,85	57,53	50,2	50,38
Wodór	%	3,3	5,33	3,27/3,47	3,47
Tlen	%	5,5°	11,17	8,5	8,20
Azot	%	0,66	1,35	0,65/0,738	0,738
Chlor	%	–	<0,43	<0,27	0,27
Części lotne	%	30	45	–	37,00
Alkalia wpaliwie(rozpuszczalne w słabym kwasie) Na + K	%	–	<0,4	–	0,3
Gęstość nasypowa	kg/m^3	900	1 000	550	950
Rozkład ziarnowy: > 100%, > 90%, > 50%, > 10%	 mm mm mm mm	 – – – –	 – – – –	 10 6 2 0,4	 – – – –
Temperatury topliwości popiołu					
Punkt mięknięcia:					
– atmosfera redukcyjna	°C	1 150	1 280/1 310	1 150	1 150
– atrnosfera utleniająca	°C	1 250	1 357	–	–
Temperatura topnienia:					
– atrnosfera redukcyjna	°C	1 200	1 460	–	–
– atmosfera utleniająca	°C	1 310	1 500	–	–
Temperatura płynięcia:					
– atmosfera redukcyjna	°C	1 250	1 480	–	–
v atmosfera utleniająca	°C	1 340	1 500	–	–

dów, ważna jest również znajomość składu chemicznego popiołu i przestrzeganie zakresu dopuszczalnych zmian. Niedotrzymywanie składu chemicznego popiołów i temperatury złoża fluidalnego może być powodem tworzenia bardzo niebezpiecznych spieków dla pracy kotłów (rys. 7.11).

W naszym kraju dostawcami paliwa do kotłów fluidalnych są, między innymi, kopalnie węgla kamiennego: Brzeszcze, Halemba, Janina, Piast, Sobieski, Ziemowit.

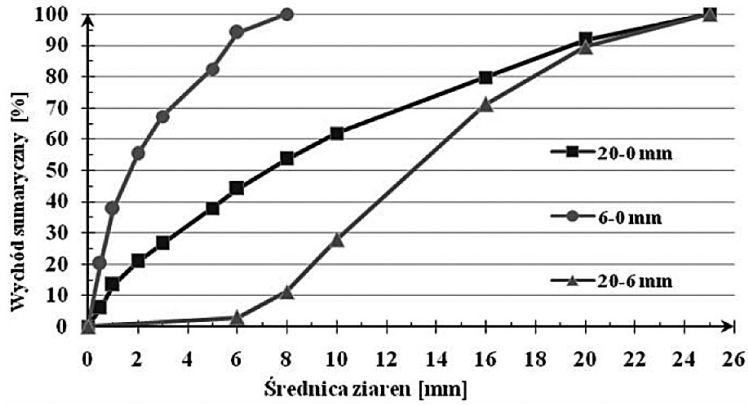


Rys. 7.11. Wygląd spieków pobranych z rusztu kotła fluidalnego (fot. J.J. Hycnar)

W latach 2008–2010 w KWK Ziemowit opracowano technologię i rozpoczęto produkcję paliwa do kotłów fluidalnych dla energetyki zawodowej. Dla zwiększenia efektu ekonomicznego oraz przystosowania oferty do rynku energetyki zawodowej i indywidualnych odbiorców kopalnia przemodelowała zakład przeróbczy, uzyskując nowe produkty handlowe, którymi są [Wypych i Śliwińska 2010]:

- miał surowy o uziarnieniu 6–0 mm o wartości opałowej powyżej 18 000 kJ/kg,
- miał surowy o uziarnieniu 20–6 mm o wartości opałowej powyżej 21 000 kJ/kg,
- miał wzbogacony o uziarnieniu 20–6 mm o wartości opałowej powyżej 24 000 kJ/kg,
- muł węglowy o uziarnieniu 1–0 mm i wartości opałowej około 14 000 kJ/kg.

Krzywe uziarnienia miału (20–0), paliwa do kotłów fluidalnych (6–0) i paliwa do pieców retortowych podaje rysunek 7.12.



Rys. 7.12. Krzywe uziarnienia miału (20–0), paliwa do kotłów fluidalnych (6–0) i paliwa do pieców retortowych (20–6 mm) [Wypych i Śliwińska 2010]

Wydzielony na przesiewaczach miał może być skierowany do wagonów przez szybki załadunek, do produkcji paliwa do kotłów fluidalnych w klasie ziarnowej 6–0 mm lub do magazynowania na kopalnianym składzie węgla.

Produkowany miał w klasie ziarnowej 6–0 mm przeznaczony jest do spalania w nowoczesnych kotłach fluidalnych stosowanych w energetyce zawodowej. Proces jest realizowany na dwóch systemach przesiewaczy wibracyjnych z pokładami strunowymi. Odsiane klasy 6–0 mm poprzez zbiornik o pojemności 700 Mg ładuje się do wagonów na niezależnym szybkim załadunku. Zaprojektowany układ został całkowicie zautomatyzowany i przystosowany do centralnego sterowania z dyspozytorni ZPMW. Produkowane paliwo do kotłów fluidalnych o kaloryczności około 18 000 kJ/kg spełnia wymogi głównych odbiorców.

W kraju rozpowszechnione jest również spalanie drobnoziarnistych frakcji odpadów węglowych w formie mułów węglowych i odpadów poflotacyjnych, stanowiących do 20% bilansu paliwowego. W zależności od rozwiązań układu zasilania kotła, muł węglowy/odpad poflotacyjny, po odpowiednim przygotowaniu (rozdrobnieniu, upłynnieniu), może być dozowany do paleniska w następujący sposób:

- bezpośrednio do paleniska (równolegle do ciągu węglowego),
- w mieszaninie z podstawowym paliwem węglowym,
- bezpośrednio do paleniska w postaci pulpy mułowo-wodnej,
- bezpośrednio lub w mieszaninie z podstawowym paliwem węglowym w postaci granulatu.

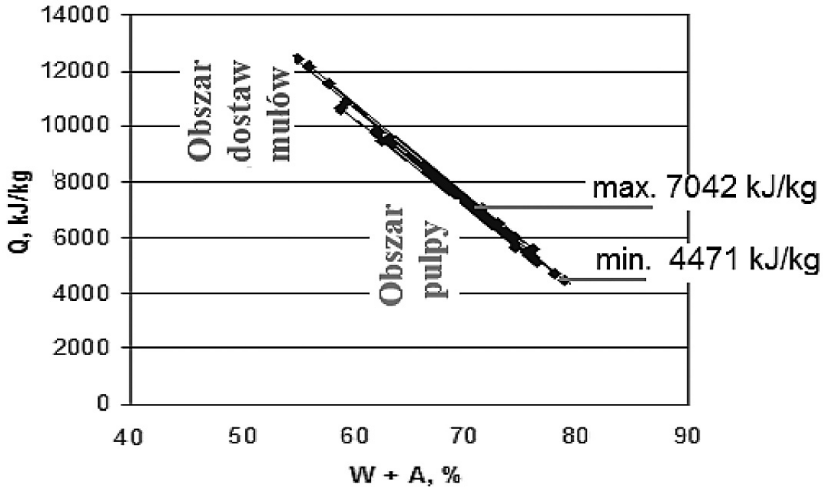
Przygotowanie pulpy mułowo-wodnej. W rozwiązaniach stosowanych w krajowych elektrowniach, odwodnione w kopalniach muły węglowe na prasach filtracyjnych lub/i z osadników dowożone są samochodami samowyładowczymi do zbiornika przyjmującego, zlokalizowanego w stacji przygotowania pulpy mułowo-wodnej. Rozdrobnione muły są mieszane z wodą w mieszarce do uzyskania jednorodności pulpy (zawartość wody około 40%) i następnie przetłaczane do zbiornika pośredniego, z którego tłoczone są do dysz, zapewniających rozbryzg pulpy w palenisku. Instalacje pracują z wydajnością wynoszącą od 8 do 45 m^3/h, przy średnim ciśnieniu tłoczenia pulpy 6,4 MPa.

O scharakteryzowanym rozwiązaniu spalania mułów węglowych w postaci pulpy utarła się opinia, że jest to kopia rozwiązania francuskiego, jednakże są duże różnice. W rozwiązaniu francuskim zawiesina mułowo-wodna z zagęszczalnika w kopalni jest bezpośrednio tłoczona do elektrowni (około 16 km), do bezpośredniego spalania w kotle fluidalnym. W rozwiązaniach w naszych elektrowniach, odwodnione w kopalniach muły węglowe z pras filtracyjnych lub/i osadników są dodatkowo uwadniane w elektrowniach, by sporządzić z nich zawiesinę mułowo-wodną (pulpę). Takie rozwiązanie znacząco obniża wartość opałową spalanych mułów oraz podwyższa koszty paliwa (moc urządzeń do sporządzania pulpy średnio 440 kW).

Dobrą ilustracją strat kaloryczności jest przeprowadzona w jednej z elektrociepłowni analiza jakości spalonej pulpy mułowo-wodnej (tab. 7.5 i rys. 7.13). Średnia wartość opałowa pulpy wyniosła 5573 kJ/kg, podczas gdy średnia wartość opałowa dostarczanych mułów w tym okresie przekraczała 9000 kJ/kg.

Tabela 7.5. Charakterystyka pulpy mułowo-wodnej spalanej w kotle fluidalnym BFC

Parametr	Wartość			Wartości średnie miesięczne										
	średnia	max.	min.											
W+A	75,3	78,8	71,3	76,3	74,5	75,3	71,3	72,8	74,4	78,8	75,8	77,9	75,6	75,8
W_t^r	40,9	48,2	36,2	39,6	41,5	37,4	36,2	41,0	39,0	45,6	48,2	42,6	39,1	39,5
A^r	34,4	36,7	27,6	36,7	33,0	37,9	35,1	31,8	35,4	33,2	27,6	35,3	36,5	36,3
Q_i^r	5 573	7 042	4 471	5 111	5 639	5 535	7 042	6 562	5 969	4 471	5 507	4 701	5 425	5 341



Rys. 7.13. Rejestr obszarów kaloryczności dostaw mułów węglowych i spalanej pulpy mułowo-wodnej

Odzyskanie „kalorii" w procesie spalania mułów węglowych i ich mieszanin zależeć będzie przede wszystkim od energetyki. Potencjał techniczny większości kopalń i dostawców mułów węglowych może zapewnić dostawy gotowych mieszanek o określonych parametrach energetycznych (mieszanki miałów z mułami, paliwo wydzielone z urobku), jak również nowego produktu, jakimi są granulowane muły węglowe (ZG Sobieski i Janina; KWK Piast; Haldex). Takie rozwiązania są realne tylko w tych przypadkach, kiedy eksploatacja paleniska fluidalnego nie wymaga stosowania pulpy jako regulatora procesów termicznych.

Granulowane muły węglowe. Aktualnie najbardziej perspektywicznym rozwiązaniem problemów „strat kaloryczności" jest upowszechnienie i masowe wdrożenie mułów granulowanych. Zebrane doświadczenia wskazują, że kaloryczność dostarczanych i oferowanych granulowanych mułów węglowych znacznie przekracza średnią wartość opałową spalanej pulpy (tab. 7.6). Stosowanie granulowanych mułów, w porównaniu do pulpy, zwiększa średnio ich kaloryczność o około 2000 kJ/kg. Ponadto, wdrożenie do spalania granulowanych mułów węglowych obniża koszty przygotowania paliwa do spalania. Granulowane muły węglowe mogłyby być dodawane do paliwa podstawowego lub/i równolegle z paliwem podstawowym podawane do komory spalania.

Tabela 7.6. Właściwości surowych i granulowanych mułów węglowych w porównaniu do właściwości pulpy mułowo-wodnej [Hycnar i in. 2015]

Parametr	Jednostki	Pulpa średnia	Muły węglowe placki				Granulowane muły			
			min–max	średnia	37 J	38 J	XI–XII 2011	2012	2013	2014
W+A	%	75,3	–	58,5	70,1	67,6	68,6	–	65,2	69,0
W_t^r	%	40,9	25,0–37,3	31,0	27,5	28,3	27,0	25,4	24,4	24,9
A^r	%	34,4	19,4–45,5	27,5	42,5	39,3	41,6	43,4	40,8	44,1
Q_i^r	MJ/kg	5,573	6,4–10,3	8,300	7.311	8,211	7,702	7,583	8,487	7,479
$Q_i^r - Q_{i\,pulpy}^r$	MJ/kg	–	0,8–4,7	2,727	1,738	2,638	2,129	2,010	2,914	1,906

7.3.2. Rozpowszechnienie kotłów fluidalnych zagranicą i w kraju

Ogólnoświatowa strategia ochrony środowiska w zakresie spalania węgla sprowadza się do respektowania zasad technologii czystego węgla, powszechnie znanych pod symbolem CCT (*Clean Coal Technology*). W wielu krajach, jako podstawowe kierunki dalszego rozwoju energetyki opartej o węgiel, przyjęto wdrażanie w następującej kolejności:

- spalanie węgla w kotłach pyłowych na parametry nadkrytyczne i ultra nadkrytyczne,
- spalanie węgla w kotłach z paleniskami fluidalnymi z cyrkulującym złożem,
- zgazowanie węgla.

Dokonana przez Bank Światowy analiza zainstalowanych urządzeń energotwórczych opartych o spalanie węgla wykazała, że moc ich wynosi 1289 GW_e, zapewniając wyprodukowanie 64% całkowitej światowej produkcji energii elektrycznej na koniec 2005 roku. Moc zainstalowanych bloków z cyrkulacyjnym złożem fluidalnym została oceniona na 40 000 GW_e co stanowiło zaledwie 3,1% zainstalowanej światowej mocy. Należy jednak podkreślić, że upowszechnienie bloków CFB nie jest równomiernie rozłożone na świe-

cie i aż 54,5% ich mocy przypada zaledwie na cztery kraje: Chiny, USA, Niemcy i Indie (tab. 7.7).

Porównując rozwój energetyki opartej o spalanie węgla, której „wiek" przekroczył dobre 120 lat z 30 letnim wdrażaniem palenisk fluidalnych w energetyce, należy stwierdzić, że upowszechnienie tej technologii następuje dynamicznie. W roku 2009 w Polsce oddano do eksploatacji blok fluidalny o mocy 460 MW_e – obecnie w Europie polska energetyka eksploatuje największą ilość dużych bloków energetycznych z paleniskami fluidalnymi mocy około 2500 MW_e. Większe przyrosty ilości i mocy bloków z paleniskami fluidalnymi odnotowano w Chinach.

W krajach Unii Europejskiej za kotłami fluidalnymi przemawiają także względy ekonomiczne, nieodzowne nakłady inwestycyjne na paleniska fluidalne w porównaniu do innych systemów spalania węgla zostały wycenione najniżej (tab. 7.8).

Tabela 7.7. Zestawienie mocy bloków energetycznych opalanych węglem na świecie i w wybranych krajach na koniec 2005 roku

Obszar	Bloki opalane węglem	Metoda spalania węgla				
		kotły z paleniskami pyłowymi (PC) na parametry			kotły z paleniskami fluidalnymi (CFB)	instalacje zgazowania (IGCC)
		podkrytyczne (supC-PC)	naddkrytyczne (SC-PC)	ultra nadkrytyczne (USC-PC)		
Świat:						
- moc, MW_e	1 289 000	960 229	263 740	21 583	40 000	3 448
- udział, %	100,0	74,5	20,5	1,7	3,1	0,3
Moc (MW_e) w:						
- USA	335 892	251 324	75 000	–	8 800	768
- Japonia	43 214	12 019	13 800	17 115	–	280
- Niemcy(szacunk.)	52 600	38 844	8 488	3 468	1 800	–
- Rosja (szacunk.)	44 600	32 840	11 760	–	–	–
- Chiny (2006)	400 000	360 000	28 000	2 000	10 000	–
- Indie	67 710	66 499	–	–	1 211	–

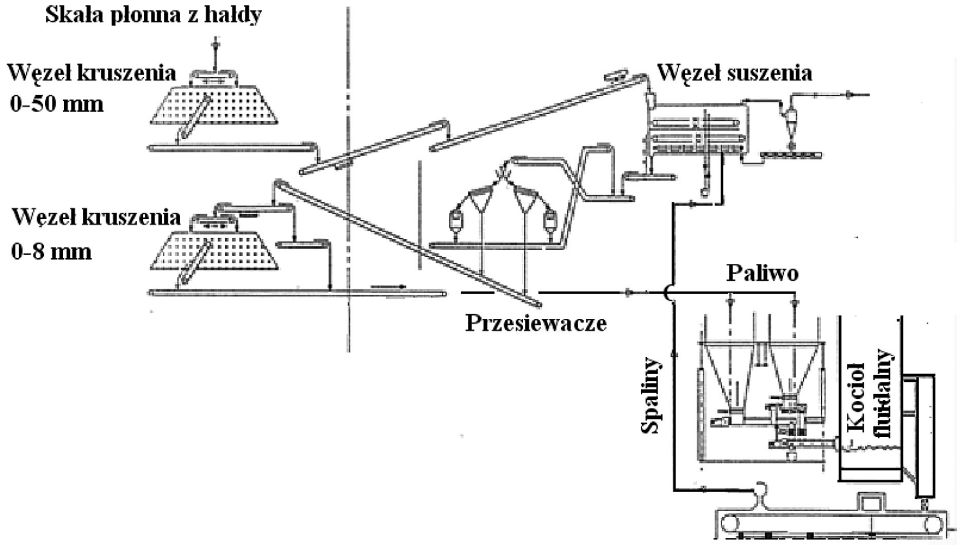
Tabela 7.8. Porównanie jednostkowych nakładów inwestycyjnych w zależności od zastosowanego źródła energii pierwotnej i zastosowanego paleniska węglowego

Lp.	Bloki energetyczne	Nakłady inwestycyjne, EUR/MW			Sprawność termiczna, %		
		1995 r.	2010 r.	2020 r.	1995 r.	2010 r.	2020 r.
1.	Układ kombinowany z turbiną gazową (GTCC)	559	550	528	55	60	62
2.	Układ parowo-gazowy zintegrowany ze zgazowaniem (IGCC)	1 661	1 552	1 333	46	49	50
3.	Paleniska fluidalne	1 249	1 179	1 040	44	45	47
4.	Nadkrytyczne	1 336	1 262	1 114	44	48	51
5.	Ogniwa paliwowe	1 828	1 128	820	61	*66*	71

7.3.3. Zagraniczne doświadczenia stosowania palenisk fluidalnych

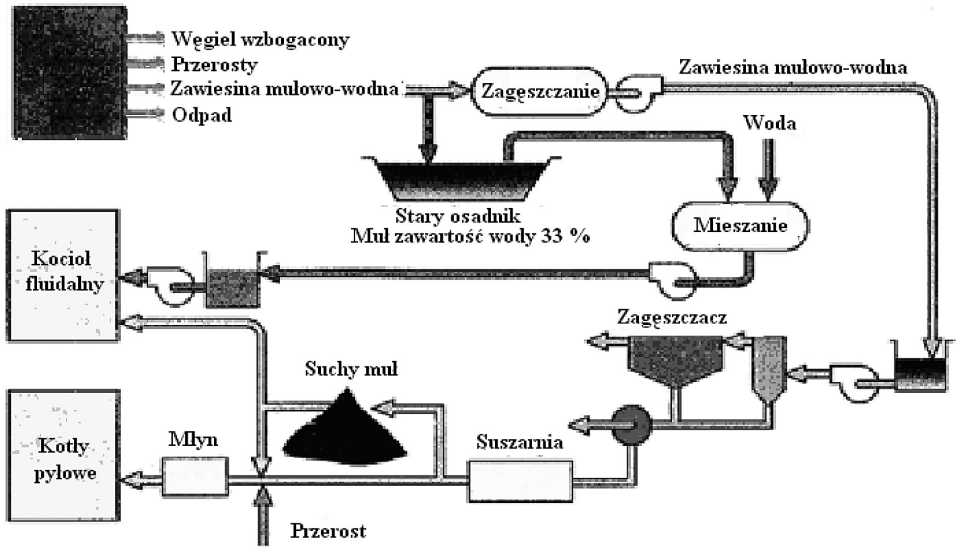
Analiza zagranicznych rozwiązań kotłów fluidalnych wykazuje, że w wielu przypadkach udało im się powiązać potrzeby energetyczne z problemami występującymi w sąsiadujących kopalniach, co jest najczęściej wspólnym interesem.

Belgia. Na terenie byłej kopalni węgla kamiennego w Beringen, zbudowano kocioł ciepłowniczy ze stacjonarnym złożem fluidalnym, opalany koncentratem węglowym uzyskiwanym ze skały płonnej. Zgromadzone odpady węglowe na hałdzie nadpoziomowej (około 5 mln ton) dokruszano i następnie rozsiewano (rys. 7.14). Wydzielona klasa ziarnowa 10–0 mm „koncentrat węglowy" stanowi podstawowe paliwo dla kotła fluidalnego, o wilgotności 5–12%, zawartości popiołu 70–77%, zawartości części lotnych 14,5–11% i wartości opałowej 5250 do 7900 kJ/kg.



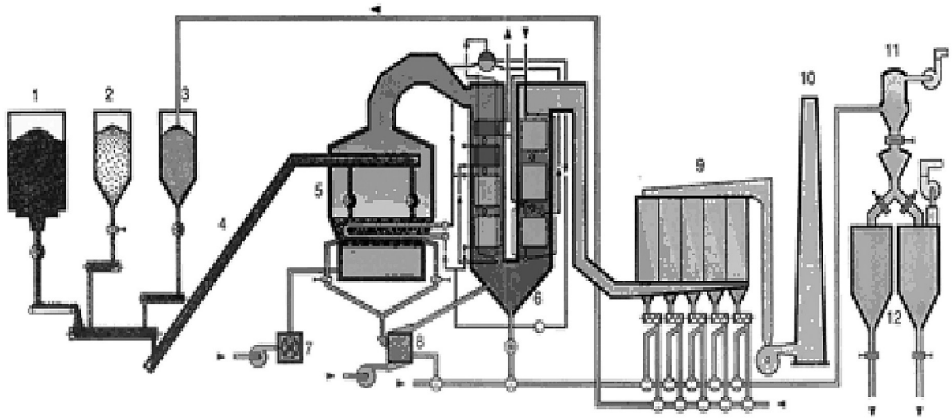
Rys. 7.14. Schemat produkcji paliwa ze skały płonnej z hałdy kopalnianej

Francja. Zawiesina mułu węglowego w wodzie z bieżącej produkcji przesyłana jest rurociągiem z kopalni w Carling do elektrowni Emile Huchet (odległość ok. 16 km), gdzie po zagęszczeniu podlega suszeniu; suche muły stanowią paliwo dla kotłów pyłowych i częściowo fluidalnych (rys. 7.15) [Gouville i in. 2015, Hycnar 2006a]. Natomiast muły czerpane z osadników w postaci pulpy mułowo-wodnej (33% wody) przesyłane są do elektrowni do bezpośredniego spalania w kotłach fluidalnych. Spalana pulpa charakteryzuje się wartością opałową 10 500 kJ/kg, zawilgoceniem 33% i zawartością popiołu 45%, natomiast osuszone muły odpowiednio: 20 300 kJ/kg, 8% i 28%. Rozwiązanie to wyeliminowało potrzebę odwadniania mułów z bieżącej produkcji i stosowania transportu kołowego.



Rys. 7.15. Schemat gospodarki mułowo-wodnej w kopalni w Carling i elektrowni Emile Huchet

Niemcy. W Gneisenau przy kopalni BAG-Westfalen dobudowano kocioł ze stacjonarnym paleniskiem fluidalnym (33 Mg/h pary), opalany odpadami poflotacyjnymi o wartości opałowej 11 400 kJ/kg. Palenisko zasilane jest mieszaniną o wartości 6400 kJ/kg, w wyniku zmieszania odpadów poflotacyjnych z wapieniem i zawracanymi zawęglonymi popiołami lotnymi (rys. 7.16).

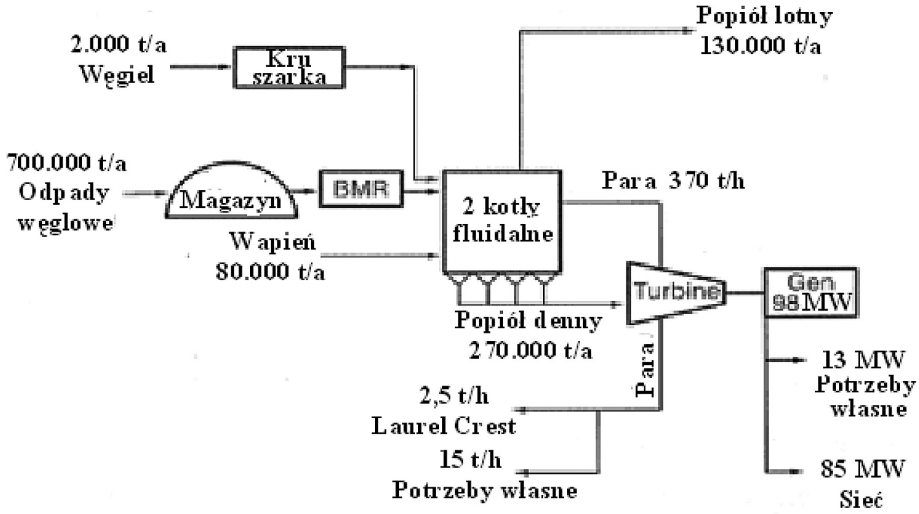


Rys. 7.16. Schemat kotła fluidalnego opalanego odpadami poflotacyjnymi: 1) odpad poflotacyjny, 2) wapień, 3) zawęglony popiół lotny, 4) podajnik mieszaniny, 5) kocioł fluidalny, 6) ciąg konwekcyjny, 7) wentylator doprowadzający powietrze do złoża, 8) pneumotransport popiołu lotnego, 9) filtr spalin, 10) komin, 11) filtr odpylający, 12) zbiorniki popiołów fluidalnych

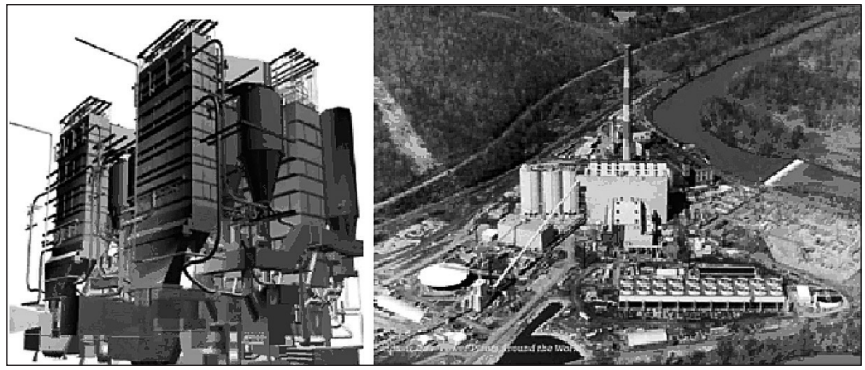
USA. Elektrociepłownia w Gilberton o mocy 80 MW_e z 2 kotłami fluidalnymi ze złożem cyrkulacyjnym o wydajności każdy około 160 ton/h, opalanymi odpadami z kopalni antracytu. Spalane muły charakteryzują się wartością opałową w granicach 5814 do 11 628 kJ/kg i zawartością popiołu 80 do 50% [Hycnar i Foltyn 2005].

Interesujące jest także rozwiązanie w elektrociepłowni w Cambria County (Pa) o mocy 85 MW_e z dwoma kotłami fluidalnymi opalanymi odpadami węglowymi (700 000 Mg/rok) i węglem surowym (2000 Gg/rok; wartość opałowa 13 500 kJ/kg; A^r = 65%; S^r = 3%; W^r = 10,5%) (rys. 7.17).

Największym na świecie obiektem energetycznym opartym o spalanie odpadów węglowych w dwóch kotłach fluidalnych CFB (Alstom) jest elektrownia o mocy 521 (2×260) MW_e w Steward (Pa) (rys. 7.18). Elektrownia rocznie zużywa



Rys. 7.17. Schemat kotła fluidalnego opalanego odpadami węglowymi i urobkiem



Rys. 7.18. Największy kocioł fluidalny opalany odpadami węglowymi (Steward, USA)

3,5 Tg dpadów węglowych i około 750 Gg wapienia (95% redukcji SO_2); jednostkowe zużycie odpadów węglowych wynosi 482 Mg/h i 92 Mg/h wapienia; wypad popiołu fluidalnego około 300 Mg/h. Spalane odpady węglowe charakteryzują się wartością opałową 12,8 MJ/kg (11,6–14 MJ/kg); zawartością: siarki 2,75% (2–4,25%), popiołu 51% (25–58%), wilgoci 8,7% (7–12%), części lotnych 11% (9–30%) i węgla elementarnego 29,32% (25–35%). Odpady węglowe w ilości 100 Tg (mln ton) znajdują się na hałdzie w odległości około 50 mil.

Ukraina. W górnictwie węgla kamiennego rozpowszechniona jest modernizacja kotłów rusztowych na fluidalne, w których paliwem są odpady poflotacyjne. Dla zmniejszenia niedopału, odpady poflotacyjne są granulowane od ziarna 6 do 13 mm [Reszniak i in. 1999, Surgaj 1989]. Interesujące są wyniki prac nad przygotowaniem paliwa do kotłów fluidalnych poprzez tworzenie mieszanek z wysokozawęglonych popiołów lotnych ze spalania antracytu (zawierających powyżej 20% węgla) z dodatkiem mułów węglowych [Czerniawski i in. 2011].

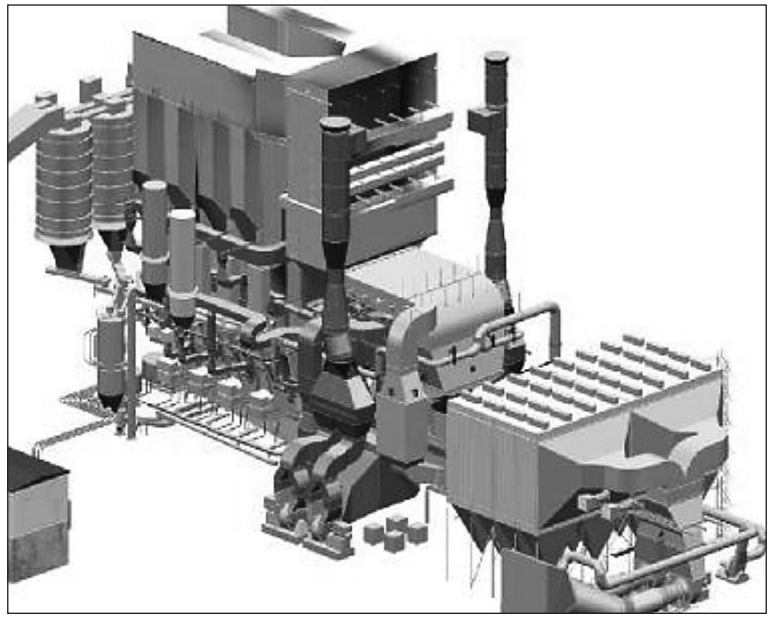
7.3.4. Krajowe doświadczenia stosowania palenisk fluidalnych

Pierwsze duże kotły fluidalne w energetyce zawodowej zostały uruchomione w latach 1996–1997 w Elektrociepłowni Żerań (2 kotły OFz 450 Mg/h) zbudowane przez Rafako (EVT), opalane węglem kamiennym. Wkrótce uruchomiono dalsze jednostki:

- w 1997 r. w Elektrociepłowni Bielsko Biała (kocioł OFz 230 t/h); w 2012 zbudowano również kocioł OFz-230; opalane węglem kamiennym, mułem węglowymi i biomasą;
- w 1998 r. w Zakładach Farmaceutycznych POLPHARMA (2 kotły Rafako OFz 75 Mg/h), węgiel kamienny;
- w latach 1998–2004 w Elektrowni Turów (3 kotły CFB 657 Mg/h i 3 kotły CFB 702 Mg/h); 2015–2017 nowy blok o mocy 430–450 MW_e z dodatkową instalacją odsiarczania spalin; kotły konstrukcji Foster Wheeler opalane węglem brunatnym;
- w latach 1999 i 2002 w Elektrociepłowni Chorzów ELCHO (2 kotły CFB Foster Wheeler po 420 Mg/h), węgiel kamienny;
- w latach 1999–2002 w Elektrowni Jaworzno II (2 kotły Foster Wheeler po 70 MW_e, węgiel kamienny + muły węglowe; w 2013 r. nowy kocioł opalany biomasą;
- w 2000 r. w Elektrociepłowni Katowice (kocioł Foster Wheeler CFB 480 t/h), węgiel kamienny + pulpa mułowo-wodna + biomasa;
- w 2000 r. w Elektrociepłowni Tychy (kocioł CYMIC 135 t/h), węgiel kamienny, przebudowano na biomasę; w 2013–2016 nowy kocioł Foster Wheeler 65 MW_e;
- w latach 2001 i 2003 w Elektrowni Siersza (2 kotły Rafako OFz 425 Mg/h), węgiel kamienny + pulpa mułowa–wodna;

Tabela 7.9. Zestawienie pracujących i budowanych kotłów fluidalnych w Polsce [Hycnar 2006, Krupka 1999, Nowak 2009]

Lokalizacja	Rok uruchomienia	Typ paleniska fluidalnego – dostawca	Moc, MW	Wydajność kotłów, Mg/h	Paliwo	Gwarantowana emisja, mg/m^3 (6% O_2)			
						NO_x	SO_2	CO	pył
El. Turów	1998 2000 2002 2004	CFB Bl. 1, 2 i 3 z cyklonem zewnętrznym Bl. 4, 5 i 6. Kompakt Foster Wheeler	3x235 3x262	3x667 3x704	węgiel brunatny (bl.5 i 6 + biomasa)	371 371	347 347	– 150	50 50
EC Katowice	2000	CFB Cyklon chłodzony parą Foster Wheeler	1 x 120	1x480	węgiel kamienny + muły	460	540	200	50
El. Jaworzno II	1999	CFB Bl. 2 i 3. Kompakt Foster Wheeler	2x70 2x(180)	2x260	węgiel kamienny + muły	470	560	310	50
ELCHO Chorzów	2003	CFB Bl. 1 i 2. Kompakt Foster Wheeler	2x113	2x430	węgiel kamienny	246	383	200	50
EC Żerań	1997 2001	CFB Bl. A. Gorący cyklon CFB Bl. B. Cyklon chłodzony parą Rafako	1x (315) 1x (315)	2x450	węgiel kamienny	200 200	200 200	250 150	50 50
EC Bielsko-Biała	1997	CFB Gorący cyklon Rafako	1x (177/165)	1x230	węgiel kamienny + muły	250	300	250	50
Polpharma Stargard	1997 1998	CFB Gorący cyklon Rafako	2x (60,2)	2x75	węgiel kamienny	250	300	250	50
EC Tychy	1999	CFB Cyklon wewnętrzny Kvaerner	1x37 + (70)	1x135	węgiel kamienny + biomasa	–	–	–	–
EC Ostrołęka	1997	BFB	1 x (35)	1x40	kora + zrębki drzewne	326	357	271	50
EC Siersza	2001 2002	CFB Bl. 1 i 2, gorący cyklon Rafako	2x (3363)	2x425	węgiel kamienny + muły + biomasa	308	337	–	50
PEP Świecie	2003	CFB Gorący cyklon	1x	1x234	biomasa + węgiel kamienny	300	250	200	50
El. Łagisza	2009	CFB Kompakt. - nadkrytyczne - η ≥ 45,3% Foster Wheeler	1x460	1x1295 /1108	węgiel kamienny	200	200	200	30
EC Częstochowa	2010	CFB Foster Wheeler	1x66 (182)	–	węgiel + biomasa	–	–	–	–
EC Saturn	2010	BFB	–	1x100	–	–	–	–	–
El. Szczecin	2011	–	–	1x230	biomasa	–	–	–	–
El. Jaworzno II	2012	CFB Rafako	1x50	1x201	biomasa	–	–	–	–
El. Połaniec	2012	CFB Foster Wheeler	1x190 (447)	–	biomasa	–	–	–	–
El. Konin	2012	CFB Foster Wheeler	1x55 (154)	–	biomasa	–	–	–	–
EC Biclsko-Biala	2013	CFB Foster Wheeler	1x50 (157)	–	węgiel	–	–	–	–
EC Wrocław	2014	CFB	1x208 (300)	–	biomasa	–	–	–	–



Rys. 7.19. Model kotła fluidalnego z cyrkulacyjnym złożem firmy Foster Wheeler o mocy 460 MW_e

- w 2003 r. w Mondi Packaging Paper w Świeciu (kocioł CFB 234 Mg/h), odpady celulozowe;
- w 2009 r. w Elektrowni Łagisza, największy kocioł fluidalny wybudowany przez firmę Foster Wheeler o mocy 460 MW, wydajności 1300 Mg/h, opalany węglem kamiennym;
- w 2010 r. w EC Fortuna Heat Polska Częstochowa (kocioł Rafako OFz 66, główne paliwo węgiel kamienny + biomasa (odpady drzewne, wierzba energetyczna);

W kilku elektrociepłowniach dokonano konwersji kotłów pyłowych na kotły fluidalne opalane biomasą (EC Łódź, EC Białystok).

Efektem wdrożenia kotłów fluidalnych do eksploatacji było uzyskanie znaczącego obniżenia emisji SO_2 (przy Ca:S = 1,5 o około 80%, a przy Ca:S = 2,5 o około 97%) i NO_x (o 50 do 80%), co ilustrują dane zawarte w tabeli 7.9.

Kocioł fluidalny w El. Łagisza oddawany do eksploatacji w 2009 roku to „pierwszy na świecie kocioł z cyrkulacyjnym złożem fluidalnym (CFB) na parametry nadkrytyczne o mocy znamionowej 460 MW_e, to również największy na świecie kocioł z cyrkulacyjnym złożem fluidalnym" (rys. 7.19).

8. PODSUMOWANIE I WNIOSKI

W monografii przedstawiono wyniki badań oraz wdrożeń nad możliwościami podwyższenia energetycznej wartości drobnoziarnistych odpadów węglowych dla ich zagospodarowania jako surowców oraz materiałów. Wzięto pod uwagę takie drobnoziarniste paliwa jak: muły węglowe i odpady poflotacyjne oraz ich mieszaniny, odpady z produkcji wyrobów grafitowo-węglowych, produkty uboczne z przeróbki mechanicznej węgla oraz przeróbki biomasy.

W oparciu o analizę literatury stwierdzono, że analizowane drobnoziarniste frakcje węglowe, a w szczególności muły węglowe i odpady poflotacyjne, mogą być stosowane nie tylko jako paliwa samodzielne lub składniki mieszanek paliwowych, ale także jako dodatki do mas ceramicznych i klinkieru, jako materiał uszczelniająco-izolacyjny wyrobiska górnicze lub powierzchni zwałów węgla i składowisk odpadów oraz jako środek do melioracji gleb lekkich.

Drobnoziarniste odpady węglowe najczęściej wydzielane są z obiegów gospodarki wodno-mułowej poprzez ich zagęszczenie w osadnikach promieniowych lub lamelowych. Wstępnie zagęszczona zawiesina podawana jest do dalszego odwodnienia na urządzeniach filtracyjnych lub jest kierowana do osadników ziemnych. Po zagęszczeniu frakcje węglowe mogą być granulowane dla uzyskania paliw lub materiałów wykorzystywanych do produkcji kruszyw spiekanych lub składników wsadu hutniczego.

Do scalania mułów węgli na paliwa wykorzystywane jest również brykietowanie. Brykiety te są zagospodarowywane jako paliwa samodzielne lub uzupełniające w obiektach energetycznych lub w kotłach małej mocy centralnego ogrzewania.

Przedstawiono także możliwości odzysku substancji węglowych oraz podwyższenia efektywności energetycznej wydzielonych frakcji węgla za pomocą metody selektywnego wydzielania cieków bogatych w węgiel z obiegów wodno-mułowych, metody klasyfikacji ziarnowej, densymetrycznej i opartych o różnice właściwości powierzchniowych ich składników oraz metody „głębokiego" wzbogacania drobnoziarnistych odpadów górniczych.

Nagromadzone duże ilości drobnoziarnistych odpadów węglowych w osadnikach zachęcają do ich eksploatacji i wzbogacania dla zapewnienia produkcji koncentratów węglowych. W tym aspekcie omówiono wyniki prowadzonych prac nad opracowaniem technologii składowania drobnoziarnistych odpadów z wydobycia, wzbogacania i spalania węgla. Przedstawiono ponadto zagadnienia wykorzystania paliw zawiesinowych sporządzanych z pyłów i mułów węglowych oraz zagadnienia spalania mułów lub odpadów poflotacyjnych w paleniskach fluidalnych. Pokazano przykłady zastosowania drobnoziarnistych odpadów węglowych do opalania palenisk fluidalnych kotłów i pieców.

Na podstawie przedstawionych w opracowaniu rozważań sformułowano następujące wnioski:

1. Podwyższenie kaloryczności drobnoziarnistych odpadów węglowych można realizować metodami stosunkowo prostymi i niewymagającymi dużych nakładów finansowych, z wykorzystaniem istniejących lub zmodyfikowanych technologii wydzielania, zagęszczania oraz scalania materiału.
2. Metodą wydzielania można uzyskać paliwo podstawowe dla kotła fluidalnego, o wilgotności 5–12%, zawartości popiołu 70–77%, zawartości części lotnych 14,5–11% i wartości opałowej od 5250 do 7900 kJ/kg.
3. W wyniku zagęszczenia i wzbogacenia zawiesin wodno-mułowych w procesie wirowania uzyskano frakcje węglowe o wartości opałowej powyżej 14 000 kJ/kg. Zastosowanie wirówki sedymentacyjnej w tym procesie przynosi efekty zwiększenia produkcji zagęszczonych węgli oraz obniżenia kosztów ich wywozu i deponowania o 75%.
4. W procesie granulowania drobnoziarnistych frakcji węglowych uzyskano paliwo o zawartości popiołu 35–40%, zawartość siarki 0,7–1,0% oraz wartości opałowej 8000–11 000 kJ/kg.
5. Metodą brykietowania w warunkach przemysłowych uzyskano węglowe brykiety paliwowe o zawartości popiołu 12,2%, zawartości części lotnych 26,6%, zawartości siarki 0,9% oraz wartości opałowej około 23 000 kJ/kg. Dodatek biomasy do brykietu węglowego, w udziale masowo 20%, przynosi korzyści zmniejszenia zawartości popiołu do wartości 2,1% oraz zawartości siarki do wartości 0,05%.

LITERATURA

1. Aghazadeh S., Gharabaghi M., Azadmehr A. 2016. *Increasing the useful heating value of coal using a physico-chemical process*. International Journal of Coal Preparation and Utilization, 36(4), s. 175–191.
2. A new generation of gravity recovery equipment 2004. Centrifugal concentrators for all gravity mineral recovery and cleaning. Falcon Concentrators Inc.
3. Akopow M.G., Błagow I.S., Bunin G.M. 1975. *Grawitacionnyje i specjalnyje mietody obogaszczenija miełkich kłassow uglej*. Niedra, Moskwa, Russia.
4. Alekseenko S.V. 2011. *Novel approaches to combustion of organic fuels*. 7 International Seminar on Flame Structure and First Young Researchers' School on Flame Study, July 11–15.2011. Novosibirsk, Russia.
5. Alwaeli M., Czech Ł. 2009. *Możliwości gospodarczego wykorzystania odpadów poflotacyjnych*. Archiwum Gospodarki Odpadami i Ochrony Środowiska, 11(3).
6. Battaglia A. 1963. *Odwadnianie produktów wzbogacania i obiegi wodne płuczek*. WG-H. Katowice
7. Białas M., Białas J., Lutyński A., Kasztan A., Narloch G. 2001. *Wydzielanie ziaren węglowych z zawiesin odpadowych*. Gospodarka Surowcami Mineralnymi, 17, z spec.
8. Bieńko W. 2004. *Lubelski Węgiel „Bogdanka" S.A. – technologia zakładu przeróbki mechanicznej węgla*. Inżynieria Mineralna, 2(13), s. 45–49.
9. Blaschke W. 1994. *Calorfic value curves for steam coal*. Gospodarka Surowcami Mineralnymi, 10(2).
10. Borowski G. 2008. *Badania właściwości mechanicznych brykietów węgla z biomasą*. Postępy Nauki i Techniki, 2, s. 81–89.
11. Borowski G. 2007. *The possibility of utilizing coal briquettes with a biomass*. Environment Protection Engineering, 33(2), s. 79–86.
12. Borowski G. 2009a. *Badania brykietów węglowo-biomasowych wykorzystywanych do celów energetycznych*. W: Kotowicz J. (red.) Rynek ciepła 2009, Wydawnictwo Kaprint, Lublin, s. 299–308.
13. Borowski G. 2009b. *Technologiczne aspekty brykietowania surowców energetycznych*. W: Biegańska J., Landrat M. (red.) Paliwa z odpadów 2009, Politechnika Śląska w Gliwicach, s. 209–216.
14. Borowski G. 2009c. *Possibilities of utilization of energy briquettes*. In: Schwarz H., Leonowicz Z. (Eds.) Proceedings of the 8th International Conference on Environment and Electrical Engineering. Published by Technical University of Cottbus, Germany, s. 110–113.
15. Borowski G. 2011. *Wykorzystanie brykietowania do zagospodarowania odpadów*. Monografia. Lubelskie Towarzystwo Naukowe, Lublin.
16. Borowski G. 2013. *Pilot tests for utilization of fine coal to fuel briquettes production*. Archives of Waste Management and Environmental Protection, 15(2), s. 9–18.

17. Borowski G., Hycnar J.J. 2013. *Utilization of fine coal waste as a fuel briquettes*. International Journal of Coal Preparation and Utilization, 33(4), s. 194–204.
18. Boruk S., Winkler I. 2009. *Ecologically friendly utilization of coal processing waste as a secondary energy source*. In: Energy and Environmental Challenges to Security. Springer Publishers, s. 251–259.
19. Brujew G.G., Kolesnikowa S.M., Baranow M.Ł. 1994. *Połuczienie wodougolnych suspenzii iz smiesi kuznieckowo i kansko-aczinskowo ugliej*. Ugol, 11.
20. Brzeziński R. 2013. *Z odpadów kopalnie będą robić paliwa*. www.ecorynek.com (25 listopada 2013).
21. CER Report 2011. Sinco Clean Energy Inc., April.
22. Couch G.R. 1998. *Adding value to coal clearing wastes*. IEA Coal Research.
23. Czerniawski N.W., Roskołupa A.I., Batrak A.A. 2011. *Sowmiestnoje sżiganie uglierodsoderżaszczewo materiała zołootwałow antracitowych TES i szlamów w kipjaszczem słoje*. Elektriczeskie Stancji nr 11.
24. de Mello Martins P., de Mattos Vidal D. 2006. *Tubos geotexteis para acondicionamento e desaguaamento de rejeitos de mineracao*. Anais do 12° Encontro de Iniciacdo Cientijica e Pos-Graduacdo do ITA-XII ENCITA.
25. Dijcker R., Van Der Wijk, Artieres O., Dortland G., Lostumbo J. 2011. *Geotextile enabled smart monitoring solutions for safe and effective management of tailing and waste sites*. In: Proceeding Tailings and Mine Waste, Vancouver, B.C, November 6 to 9, 2011.
26. Eimco Deep Cone® Paste Thickeners. FLSmidth 2010.
27. Ercolani D., Carniani E., Donati E. 2003. *Palne zawiesiny wodno-weglowe*. Wiadomości Górnicze, 2.
28. Ercolani D., Tiberio U. 1994. *Start-up and initial operating experience of Port Torres integrated plant for production and utilization of beneficiated coal-water fuels*. In: The 19th International Technical Conferenc Coal Utilization & Fuel Systems "The Greening of Coal". March 21–24, 1994. Florida, USA.
29. Ercolani D. 1990. *Siberian coal-water fuel pipeline heads CWF challenge*. MPS.
30. Feliks J. 2006. *Grudkowanie wibracyjne w porównaniu z klasycznymi sposobami grudkowania*. Inżynieria Chemiczna i Procesowa, 972(29).
31. Feliks J. 2012. *Badania laboratoryjne granulowania mułów węglowych*. W: X Ogólnopolskie Sympozjum Granulacja. Nałęczów 5–8.05.2012.
32. Feliks J. 2014. *Próby techniczne i stanowiskowe grudkownia mułów weglowych*. W: Innowacyjne i przyjazne dla środowiska techniki i technologie przeróbki surowców mineralnych. Monografia. Komag, Gliwice.
33. Fine screening solutions since 1951. Derrich Co. USA 2005, www.DerrickCorp.com.
34. Fluidized bed boiler Beringen – Unit 2. CMI. Seraing Belgique 1997.
35. Fourie A.B. 2012. *Perceived and realized benefits of paste and thickened tailings for surface deposition*. The Journal of The Southern African Institute of Mining and Metallurgy, 112, Nov.

36. Fecko P., Tora B. 2013. *Coal waste: handling, pollution impacts and utilizatio*n. In: The Coal Handbook: Towards Cleaner Production. Woodhead Publishing Limited, s. 63–84.
37. Fraś A., Przystaś R., Hycnar J.J. 2013. *Ekonomiczne aspekty gospodarki odpadami w zakładach górniczych Południowego Koncernu Węglowego*. W: XXVII Konferencja z cyklu Zagadnienia surowców energetycznych i energii w gospodarce krajowej. Zakopane, 13–16 października 2013.
38. Galos K., Szluga J. 2014. *Management of hard coal mining and processing wastes in Poland*. Gospodarka Surowcami Mineralnymi – Mineral Resources Management, 30(4).
39. Gasification of solid and liquid fuel for power generation. Technology Status Reporter 008. DTI (UK). July 1999.
40. Geotube® Dewatering Technology provides an efffective solution for dewatering aggregate tailings. TenCate Geotube' Bulletin G2006-08, September 2006.
41. Gibrat R., Chenin F. 1954. *The transport, preparation and utilization of colliery tailings at the emile huchet power station*. Digests of a paper published in August, in Part II of the Proceedings. Paper No 1630.
42. Giemza H., Gruszka G., Hycnar J.J., Józefiak T., Kiermaszek K. 2007. *Optymalizacja zagospodarowania sedymentu węglowego – technologia brykietowania sedymentu*. Polityka Energetyczna, 10(2), s. 417–429.
43. Giemza H., Gruszka G., Hycnar J.J., Józefiak T., Kiermaszek K. 2009. *Technologie odzysku drobnoziarnistych materiałów i odpadów węglowych na potrzeby produkcji paliw i energetyki*. XXIII Konferencja z cyklu: Zagadnienia Surowców Energetycznych i Energii w Gospodarce Krajowej „Dylematy polskiej polityki energetycznej", Zakopane 11–14 październik 2009.
44. Girczys J. 1996. *Odpadowe muły węglowe*. Prace Naukowe GIG, No 815, Katowice.
45. Gnutek M., Moroń W., Rybak W. 2002. *Problematyka zapłonu i współzapłonu węgli i biomasy*. Czysta Energia, 9.
46. Gouville P., Foucher J.-C., Moreau D. 2012. *Achievable combustion efficiency with Alstom's CFB boilers for burniing discard coal*. The Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy, 112, June.
47. Grubb D.G., Cheng S.C.J., Diesing W.E. 1999. *High altitude exposure testing of geotextiles in the Peruvian Andes*. Geosynthetics International, 6(2).
48. Grudziński Z. 2005. *Analiza porównawcza jakości mułów węgla kamiennego pochodzących z bieżącej produkcji i zdeponowanych w osadnikach ziemnych*. W: VII Konferencja „Kompleksowe i szczegółowe problemy inżynierii środowiska", Koszalin – Ustronie Morskie.
49. Gupta B.K., Bethell P. 2012. *Deep cone thickener at lone mountain processing plant*. In: Klima M.S.W., Arnold B.J., Bethell P.J. (Eds.) Challenges in fine coal processing, dewatering and disposal. Society for Mining Metallurgy and Exploration.

50. Harris J. 2014. *Recovery Export*. Coalview Ltd. Fall.
51. Halat Z., Hycnar J.J. 2008. *Properties and utilization of drilling waste*. In: 21 World Miting Congress & Expo 2008. Krakow.
52. Hölter ABT GmbH. Gladbeck 1990. *Turning slag heaps and carbon slega into an economic resorce*.
53. Hölter H., Weber A. 1994. *Modern ecological techniques in the coal preparation*. In: 12th International Coal Preparation Congress. May 23–27, 1994, Cracow.
54. Honaker R.Q., Parekh B.K., Chunggh Y.P. 1998. *Integration of advanced fine particle technologies for efficient carbon recovery from refuse ponds*. In: 13th International Coal Preparation Congress. May 23–27, 1998, Cracow, 1998.
55. Honaker R.Q., Wang D., Ho K. 1995a. *Application of the Falcon Concentrator for fine coal cleaning*. Mineral Engineering, 9(11).
56. Honaker R.Q.,Wang D., Ho K. 1995b. *Fine coal circuitry study using column flotation and gravity and gravity separation*. ICCI Project Number 94-1/I.1A-1P. Final Technical Report. August 31.
57. Hrapiec J., Dziwok A., Kurczabiński L., Jaroń-Kocot M. 1998. *Składowanie odpadów poflotacyjnych i ich mieszanin z popiołami lotnymi*. Przegląd Górniczy, 4.
58. Hycnar J.J. 1983. *Utilization of crushed-coal wastes in coal fired power plants*. In: Symposium on the Utilization of Waste from Coal Mining and Preparation. UN ECE Coal Committee. Tatabanya, Hungary 17–22 October 1983.
59. Hycnar J.J. 1985a. *Składowanie odpadów z elektrowni*. Gaz, Woda i Technika Sanitarna, 4.
60. Hycnar J.J. 1985b. *Zagospodarowanie młynowych odpadów węglowych*. Gospodarka Paliwami i Energią, nr 1.
61. Hycnar J.J. 1995. *Własności fizykochemiczne suspensji popiołowo-wodnych*. Energetyka, nr 1.
62. Hycnar J.J. 2001a. *Założenia techniczno-ekonomiczne produkcji koncentratów węglowych z mułów zgromadzonych w osadnikach kopalni węgla kamiennego Chwałowice*. Ecocoal CC. Katowice.
63. Hycnar J.J. 2001b. *Ciekłe paliwo węglowe – suspensje węglowo-wodne*. Wiadomości Górnicze, 2.
64. Hycnar J.J. 2002a. *Zastosowanie wirówek do separacji minerałów*. Inżynieria Mineralna, nr 1, z spec.
65. Hycnar J.J. 2002b. *Technologie przetwarzania odpadów kompleksu paliwowo-energetycznego*. Inżynieria Mineralna, nr 1, z spec.
66. Hycnar J.J. 2006a. *Czynniki wpływające na właściwości fizykochemiczne i użytkowe stałych produktów spalania paliw w paleniskach fluidalnych*. Wydawnictwo Górnicze, Katowice.
67. Hycnar J.J. 2006b. *Paleniska fluidalne przykładem racjonalnego rozwiązywania problemów odpadów*. Polityka Energetyczna, t. 9, z. spec.

68. Hycnar J.J. 2015. *Methods of increasing the calorific value of fine coal waste*. Inżynieria Mineralna – Journal of the Polish Mineral Engineering Society, January – June, s. 33–55.
69. Hycnar J.J., Blaschke W. 2002. *Ekologiczne, ekonomiczne i techniczne czynniki decydujące o roli węgla w bilansach paliwowo-energetycznych*. Polityka Energetyczna, 5(1).
70. Hycnar J.J., Borowski G., Bugajczyk M. 2012. *Próby wytwarzania brykietów z pyłu koksowego jako alternatywnego paliwa stałego*. Rynek Energii 3(118), s. 87–92.
71. Hycnar J.J., Bugajczyk M. 2004. *Kierunki racjonalnego zagospodarowania drobnoziarnistych odpadów węglowych*. Polityka Energetyczna, t. 7, z. spec.
72. Hycnar J.J., Foltyn R., Olkuski T., Blaschke A.S. 2005. *Kierunki energetycznego wykorzystania drobnoziarnistych odpadów z wydobycia i wzbogacania węgla kamiennego*. W: Materiały IX Ogólnopolskiej Konferencji „Kompleksowe i szczegółowe problemy inżynierii środowiska", Politechnika Koszalińska.
73. Hycnar J.J., Foltyn R. 2005. *Przegląd rozwoju techniki fluidalnego spalania paliw*. Karbo, 3.
74. Hycnar J.J., Fraś A., Przystaś R., Józefiak T., Baic I. 2011. *Zastosowanie popiołów fluidalnych do granulowania mułów węglowych*. W: XXI Międzynarodowa Konferencja „Popioły z Energetyki". Zakopane, 19–21 października 2011.
75. Hycnar J.J., Fraś A., Przystaś R, Foltyn R. 2013. *Stan i perspektywy podwyższenia jakości mułów węglowych dla energetyki*. W: XXVII Konferencja „Zagadnienia surowców energetycznych i energii w gospodarce krajowej". Zakopane, 13–16.10.2013.
76. Hycnar J.J., Borowski G., Józefiak T. 2014a. *Conditions for the preparation of stable ferrosilicon dust briquettes*. Inżynieria Mineralna – Journal of the Polish Mineral Engineering Society, 33(1), s. 155–162.
77. Hycnar J.J., Fraś A., Przystaś R., Borowski M. 2014b. *Wpływ dodatku popiołów na zawiesiny trudno wodoodsączalne*. W: XXI Międzynarodowa Konferencja „Popioły z Energetyki". Zakopane, 22–24 października 2014.
78. Hycnar J.J., Fraś A., Przystaś R., Foltyn R. 2015a. *Możliwości podwyższenia jakości mułów węglowych dla energetyki i przemysłu*. Piece Przemysłowe & Kotły, 2.
79. Hycnar J.J., Pasiowiec P., Wajs J., Tora B. 2015b. *Poprawa możliwości technologicznych oczyszczania wody odciekowej z instalacji odwadniania żużla przy zastosowaniu odśrodkowych sit odwadniających OSO*. W: Materiały Konferencji KOMEKO 2015.
80. Hycnar J.J., Gądek M., Jachowicz R., Nikodem W. 1993. *New metod of energetic waste dumping in ash-water saspension form complying with higher environmental protection reqquirements*. In: 4-th International Symposium on the Reclamation, Treatment and Utilization of Coal Nining Wastes, Kraków, 6-10 September 1993.
81. Hycnar J.J., Górski M. 2003. *Uwarunkowania współspalania węgla i biomasy*. Polityka Energetyczna, 6, z. spec., s. 309–320.

82. Hycnar J.J., Józefiak T. 2007. *Brykietowanie odpadów drobnoziarnistych*. W: VIII Śląskie Seminarium Ochrony Środowiska. Bytom, 01.06.2007.
83. Hycnar J.J., Kadlec D. 2001. *Założenia techniczno-ekonomiczne produkcji koncentratów węglowych z mułów zgromadzonych w osadnikach kopalni węgla kamiennego Chwałowice*. Ecocoal CC. Katowice.
84. Hycnar J.J., Kadlec D. 2003. *Aktualizacja bilansu jakościowego i ilościowego wybranych mułów węglowych*. Ecocoal CC – Haldex. Katowice.
85. Hycnar J.J., Kadlec D. 2008. *Technologia zagospodarowania odcieku z wirówek odwadniających flotokoncentrat*. Ecocoal CC. Katowice.
86. Hycnar J.J. i in. 1995. *Technologie czystego węgla – odsiarczanie i demineralizacja za pomocą silnych zasad*. Studia, Rozprawy, Monografie PAN, 40, Kraków.
87. Hycnar J.J., Pasiowiec P., Brożyna J. 2010. *Segregation, classification and dewatering of fly ash and bottom ash*. In: Proceedings of the III International Scientific and Practical Workshop "Ashes From TPPS". April 22–23, 2010 Moscow, Russia.
88. Hycnar J.J., Pasiowiec P., Tora B. 2016. *Methods of increasing the calorific value of fine coal waste, Part II*. In: Proc. of XVII International Coal Preparation Congres. 28.06-01.07, Sain-Petrsburg, Russia.
89. Hycnar J.J., Pasiowiec P., Walkowicz J., Tora B. 2011. *Zasady doboru sit dla instalacji odwadniania i klasyfikacji żużli z kotłów pyłowych i rusztowych*. Czasopismo Techniczne.
90. Hycnar J.J., Pinko L., Dziwok M. 1998. *Wzrost cen energii elektrycznej powodowany kosztem ochrony środowiska*. Karbo-Energochemia-Ekologia, 8.
91. Hycnar J.J., Rondio K., Ścieżko M. 1994. *Test on demineralization of high sulphur steam coal fines in TRW gravimelt process*. In: The XII International Coal Preparation Congress. 23–27 May, 1994, Cracow.
92. Hycnar J.J., Szymanek A., Michalik A., Kula H., Trąbka S., Fraś A., Sikora L., Foltyn R. 2014. *Zakres i warunki stosowania suspensji węglowo-wodnych*. Piece Przemysłowe i Kotły, XI–XII.
93. Investor presentation. Sinco Clean Energy Inc. 2011, April.
94. Karbownik A., Chaber M. 1999. *Wykorzystanie mułów węglowych a ochrona środowiska*. Karbo, 10.
95. Keller D.V. 1991. *A preliminary rapport on the application of the Otisca T-process*. Otisca Industries Ltd. Siracusi, USA.
96. Khodakov G.S. 2007. *Coal-water suspensions in power engineering*. Thermal Engineering, 54(1), 36–47.
97. Kijo-Kleczkowska A. 2010. *Analiza procesu atomizacji zawiesinowego paliwa węglowo-wodnego*. Energetyka, 5.
98. Kijo-Kleczkowska A. 2013. *Combustion of coal-mule briquettes*. Archives of Mining Sciences, 58(3), s. 719–728.

99. Kot J. 2012. *Doświadczenia z użytkowania instalacji odzysku części stałych z zawiesiny wodno-mułowej zawierającej ziarna o wymiarach wyłącznie <25 µm w KWK „Jas-Mos”*. Szkoła Eksploatacji Podziemnej, 20–24 luty 2012, Kraków.
100. Kowalski Z., Banach M., Kulczycka J., Lelek Ł., Staroń A. 2014. *Proekologiczna technologia produkcji energii elektrycznej na bazie paliw wodno-węglowych*. W: XXVIII Konferencja „Zagadnienia surowców energetycznych i energii w gospodarce krajowej”, 12–15.10.2014, Zakopane.
101. Kral O., Ciołeszayńska U. 2012. *Innowacyjne paliwo energetyczne z odpadów poflotacyjnych węgla kamiennego*. Czasopismo Techniczne, s. 150–153.
102. Kronenberg J. 1995. *Backfiling and mine drainage with KOS pumps*. Mining Magazine, January.
103. Krupka S. 1999. *Kotły z cyrkulacyjnym złożem produkcji Rafko SA*. Energetyka, 12.
104. Kubica K. 2003. *Spalanie biomasy i jej współspalanie z węglem – techniki, korzyści i bariery*. W: Materiały II Seminarium „Czysta i zielona energia – czyste powietrze w woj. śląskim”, Katowice.
105. Kubica K., Ściążko M., Raińczak J. 2003. *Współspalanie biomasy z węglem*. Polityka Energetyczna, 6, z. spec., s. 297–308.
106. Kuczyńska I. 1980. *Metoda grudkowania bezciśnieniowego jako sposób przygotowania do utylizacji odpadowych mułów węglowych*. W: XIV Krakowska Konferencja nt. Przeróbki Kopalin. Kraków.
107. Kuczyńska I., Sztaba K. 1981. *Przygotowanie mułów odpadowych z zakładów przeróbki węgla kamiennego do utylizacji metodą grudkowania bezciśnieniowego*. W: Konferencja Odpadowa. 10–19.10.1981, Sofia.
108. Kuczyńska I. 2010. *Alternative fuels prepared from coal mud*. In: International Coal Preparation Congress 2010.
109. Kumar Singh A. 2012. *Rheological investigation of coal water slurries with and without additive*. Thapar University Patiala – 147004, India.
110. Laurila M. 1998. *Gravity separation of fine coal – an alternative to frith flotation*. Coal Age, 7.
111. Lazaro M.J., Boyano A., Galvez M.E., Izquierdo M.T., Moliner R. 2007. *Low-cost carbon-based briquettes for the reduction of NO emissions from medium-small stationary sources*. Catalysis Today, 119, s. 175–180.
112. Lech B., Koperski T. 2012. *Odpady wydobywcze z kopalń węgla kamiennego – wyzwania i oczekiwania*. P&B, nr 3.
113. Lenartowicz M., Gruszka G., Pyc A., Kaczmarczyk H. 2014. *Obniżenie kosztów eksploatacji odwadniania odpadów poflotacyjnych poprzez zastosowanie nowoczesnej prasy filtracyjnej*. W: Materiały Konferencji Inżynierii Mineralnej MEC. 15–18 września 2014, Istebna.
114. Lisowski A. 1997. *Podsadzka hydrauliczna w polskim górnictwie.* Wydawnictwo Śląsk Sp. z o.o., Katowice.

115. Liszka M., Majchrzak H. 2005. *Analiza efektów ekologicznych w procesie współspalania węgla i biomasy na przykładzie Elektrowni Opole*. Energetyka, 3.
116. Lorenz U. 2005. *Skutki spalania węgla kamiennego dla środowiska przyrodniczego i możliwości ich ograniczania*. W: Materiały Szkoły Eksploatacji Podziemnej. Sympozja i Konferencje nr 64. Wyd. Instytutu Gospodarki Surowcami Mineralnymi i Energią PAN, Kraków, s. 97–112.
117. Lutyński A. 2005. *Wydzielanie ziaren węglowych z odpadów drobnoziarnistych*. W: Materiały IX Ogólnopolskiej Konferencji pt. „Kompleksowe i szczegółowe problemy inżynierii środowiska", Politechnika Koszalińska.
118. Lutyński A., Lutyński M. 2014. *Assessment of coal slurry deposits energetic potential and possible utilization paths*. Physicochemical Problems of Mineral Processing, 50(1), s. 159–168.
119. Lutyński A., Szpyrka J. 2012. *Badania podatności na wzbogacania mułów węglowych zdeponowanych w osadnikach ziemnych*. Czasopismo Techniczne, 150–153.
120. Łyszczarz L. 1996. *Utylizacja odpadowych materiałów górniczych z kopalni „Bogdanka"*. Wiadomości Górnicze, 7–8.
121. Majchrzak H., Ściążko M., Zuwała J. 2005. *Produkcja energii odnawialnej w BOT Elektrownia Opole S.A. Stan obecny i perspektywy rozwoju*. Energetyka, 5, 343–351.
122. Mazurkiewicz M., Piotrowski Z., Tajduś A. 1997. *Lokowanie odpadów w kopalniach podziemnych. Część I.* Biblioteka Szkoły Eksploatacji Podziemnej. Kraków.
123. Meyer R.A. 1993. *Gravimelt process for coal desulfurization and demineralization IEA*. In: 2nd International Conference on the Clean Coal and Efficient Use of Coal and Lignite. Its Role in Energy, Enviornment and Life. Dec. 3, 1993, Hong Kong.
124. Mi J., Li X.-J. 2006. *Design and simulation analysis of industrial coal briquetting machine*. Science and Technology, 37(5), s. 986–990.
125. Michalik A., Hycnar J.J., Kula H., Fraś A., Sikora L. 2013. *Zakres i warunki stosowania suspensji węglowo-wodnych*. W: XXVII Konferencja z cyklu „Zagadnienia surowców energetycznych i energii w gospodarce krajowej", 13–16.10.2013, Zakopane.
126. Michalik A. 2014. *Suspensje węglowo-wodne – ekologiczne wykorzystanie węgla kamiennego*. Biuletyn Górniczy GIPH, nr 1–2.
127. Mokrzycki E. i in. 1996. *Technologie czystego węgla na etapie przeróbki i przygotowania węgla do procesu użytkownika*. Studia, Rozprawy PAN, 3.
128. Morozow A.G. 2012. *Wodougol – Sowriemiennyje podchody k ispolzowaniju*. Amaltea Serwis Moskwa, 06.
129. Morozow A.G., Korienjugina N.W. 2009. *Gidroudarnyje technologii w proiwodstwie wodougolnowo topliwa*. Ugol, 11.
130. Mosin S.I., Morozow A.G., Dirlagin G.N. 2008. *Rossijskij opyt wniedrienija promyszlennoj technologii proizwodstwa wodougolnowo topliwa*. Nowostki Tiepłosnabżienija, 9.

131. Murko V.I., Fedyaev V.I., Aynetdinov H.L., Baranowa M.P. 2013. *Environmentally clean technology of fine waste coal utilization*. In: XVII International Coal Preparation Congress, 1–6 October 2013, Istambul, Turkey.
132. Murphy Ch., Benett Ch., Klinger G., Cousns B. 2012. *Alternatives to coal mine tailing impoundment – evaluation of three dewatering metods at rockspring coal mine*. Society for Miting, Metallurgy and Exploration. Seattle, Washington, February.
133. Nelson R.F., Brattlof B.D. 1993. *Sludge pressure filtration with fly ash addition*. Journal WPCF, 51(5).
134. Niedziółka I., Zuchniarz A. 2006. *Analiza energetyczna wybranych rodzajów biomasy pochodzenia roślinnego*. MOTROL – Motoryzacja i Energetyka Rolnictwa, tom 8A, s. 232–237.
135. Niesler J. 2011. *Rozwój palenisk fluidalnych w energetyce*. Piece Przemysłowe & Kotły, XI–XII.
136. Niesler M. 2012. *Wykorzystanie popiołów z energetyki i mułów węglowych do produkcji brykietów ze szlamów konwertorowych*. Prace IMŻ, 3.
137. Nowak W. 2009. *State of CFB technology in Poland*. In: The 58th Technical Meeting IEA-FBC, May 2009, Xian, China.
138. Olszewski P., Świnder H., Klupa A., Ciszek K. 2012. *Możliwość zagospodarowania wybranych odpadów z procesów czystych technologii węglowych*. Prace Naukowe GIG. Górnictwo i Środowisko, 4.
139. Szymkiewicz A, Fraś A., Borowski M., Jagiełło Z., Przystaś R., Hycnar J.J., Józefiak T.M., Szczygielski T. 2009. *Sposób otrzymywania stałej mieszanki paliwowej*. Patent P.389379 z dnia 26.10.2009 r.
140. Przystaś R., Hycnar J.J., Józefiak T.M.., Baic I. 2011. *Sposób otrzymywania granulatu opałowego z wykorzystaniem odpadów powydobywczych*. Zgłoszenie patentowe P.396624 z dnia 13.10.2011 r.
141. Szymkiewicz A., Fraś A. 2013. *Sposób otrzymywania suspensji węglowo-wodnej*. Zgłoszenie patentowe P.402768.
142. Palarski J., Plewa F., Mysłek Z. 2012. *Odzysk i unieszkodliwianie odpadów w górnictwie podziemnym*. Monografia. Wydział Górnictwo i Geologia. Politechnika Śląska. Gliwice.
143. Peters W.J., Parekh B.K. 1992. *Column flotation results at powell mountain coal company*. Energeia CAER, 3(2).
144. Piechaczek, Gruszka G., Kiermaszak K. Pyc A., Iero E. 2012. *Odwodnienie sedymentu węglowego z użyciem pras filtracyjnych na przykładzie prasy GHT 1500 zabudowanej w ZPMW KWH Jas-Mos*. Konferencja Komeko 2012.
145. Plíštil D., Brožek M., Malaták J., Roy A., Hutla P. 2005. *Mechanical characteristics of standard fuel briquettes on biomass basis*. Res. Agr. Eng., 51(2), s. 66–72.
146. Purohit P., Tripathi A.K., Kandpal T.C. 2006. *Energetics of coal substitution by briquettes of agricultural residues*. Energy. 31, s. 1321–1331.

147. Puzyriew Je.M., Murko W.I., Zawjagin W.N., Fedjajew W.I., Browczienko S.A., Dziuba D.A., Niechoroszij I.Ch., Agliulin W.N. 2001. *Rezultaty opytno-promyszlennych ispytanij raboty mazutowo kotła DKWR na wodougolnom topliwie*. Tiepłoenergietika, nr 2.
148. Repka V., Kral O., Repkova M., Pavlik R. 2012. *Możliwość wykorzystania mułu węglowego ze stawów osadowych należących do firmy EKO CARBO – Julia Sp. z o.o. w Wałbrzychu, Polska*. Czasopismo Techniczne, 150–153.
149. Reszniak A. i in. 1999. *Ekonomiczeskaja effektiwność i perspektywy primienija topok niskotemperaturowo kipiaszczowo słoja*. Ugol Ukrainy, nr 2.
150. Rolnik R. 2009. *Zastosowanie wysoko wydajnych przesiewaczy w technologii klasyfikacji oraz wzbogacaniu ziarn drobnych i bardzo drobnych*. Maszyny Górnicze, nr 2.
151. Ściążko M., Tramer A., Kasprzak E., Karuga S. 1996. *Coal-water slury fuels on the basisb coking coals*. In: Proceedings of XIV Pitspurgh International Conference „Energy and Coal", Pitsburgh.
152. Ściążko M., Zieliński H. 2003. *Termochemiczne przetwórstwo węgla i biomasy*. Wydawnictwo Instytutu Chemicznej Przeróbki Węgla i Instytutu Gospodarki Surowcami Mineralnymi i Energią PAN, Zabrze-Kraków.
153. Ściążko M., Zuwała J., Pronobis M. 2006. *Zalety i wady współspalania biomasy w kotłach energetycznych na tle doświadczeń eksploatacyjnych pierwszego roku współspalania biomasy na skalę przemysłową*. Energetyka, 3, s. 207–220.
154. Sepro Falcon C, SB and UF gravity concentrators. mineral processing and aggregate specialists. Langley, British Columbia V1M 4A3 Canada 2012.
155. Serant F., Agapov K., Kuźmin A., Ovchinniko Yu., Pugach L. 2008. *Development and application of promising technologies for firing coal-water fuels*. Coal-Gen Europe 2008, July, Warsaw.
156. Skarżyńska K.M. 1995. *Reuse of coal mining waste in civil engineering*. Waste Management, 1(1).
157. Ślączka A. 2004. *Reologia zawiesiny węglowo-wodnej o dużym zagęszczeniu*. Inżynieria Mineralna, styczeń-czerwiec.
158. Sobko W., Baic I., Blaschke W. 2011. *Depozyty mułów węglowych – inwentaryzacja i identyfikacja ilościowa*. Rocznik Ochrony Środowiska, 3(2), s. 1405–1415.
159. Sobota J. 1994. *Wpływ jakości węgla kamiennego na cieplne parametry pracy oraz zużycie elementów kotłów energetycznych*. W: Materiały VIII Konferencji „Zagadnienia surowców energetycznych w gospodarce krajowej", Zakopane.
160. Soedjanto P.H., Zhou Z. 2008. *Application of coal water slurry in power generation*. Zhejiang University, Hangzhou, China.
161. Sokołow W.I. 1991. *Centrifugirowanije*. Chimija. Moskwa.
162. Sołtys J. 2005. *Nowe paliwo – brykiety BC*. Czysta Energia, 10, s. 32.
163. Stankiewicz J., Góralczyk S. 2012. *Kierunki gospodarczego wykorzystania odpadów po procesach wzbogacania depozytów mułów węglowych*. Czasopismo Techniczne, 150–153.

164. Stolarski M., Szczukowski S., Tworkowski J. 2003. *Energetyczne wykorzystanie biomasy lignino-celulozowej pozyskiwanej z gruntów rolniczych*. Ekologia Praktyczna, 5(14).
165. Surgaj N.C. 1989. K nowemu podjomu ugolnowo Donbaska. Ugol Ukrainy, nr 5.
166. Szczygielski T. 2015. *Minerały antropogeniczne a gospodarka o obiegu zamkniętym*. Politechnika Warszawska. Instytut Badań Stosowanych. Warszawa.
167. Szymkiewicz A., Hycnar J.J., Fraś A., Przystaś R., Józefiak T., Baic I., 2012. *Application of fluidized bed combustion ashes for enhancement of mining waste management*. In: Proceedings of the IV International Scientific and Practical Workshop Ashes from TPPS. April 19–20, Moscow.
168. Taulbee D., Patil D.P., Honaker R.Q., Parekh B.K. 2009. *Briquetting of coal fines and sawdust. Part I: Binder and briquetting-parameters evaluations*. International Journal of Coal Preparation and Utilization, 29(1), s. 1–22.
169. Temmerman M., Rabier F., Jensen P.D., Hartmann H., Böhm T. 2006. *Comparative study of durability test methods for pellets and briquettes*. Biomass and Bioenergy, 30, s. 964–972.
170. Thomas J., Hajduková J., Malíková P., Vidlář J., Matúšková V. 2014. *The study of the interaction between flotation tailings and flocculants in separation process of coal*. Inżynieria Mineralna – Journal of the Polish Mineral Engineering Society, January – June, s. 259–268.
171. Trass O. 1997. *Beneficiated coal slurry fuels – overview and prospects*. In: XIV International Pittsburgh Coal Conference. Pittsburgh.
172. Trubeckij K.N., Zaidenvarg A.S., Kondratiew A.S., Murko V.I., Kassiichin G.A., Niecharoszij I.Ch. 2008. *Wodougolnoje topliwo – rezultaty razrabotki i perspektiwy primienieniaja w Rossii*. Tiepłoenergietika, nr 5.
173. Trubeckij K.N., Murko V.I., Zaidenvarg V.E., Nekhoroshy I.K., Korzhov V.M. 2002. *Production of coal-warer fuel in a coal preparation plant*. In: XIV International Coal Preparation Congress and Exhibition. South African Institute of Mining and Metallurgy.
174. Ulbricht R. (red.) 2005. *Energetyczne wykorzystanie biomasy*. Materiały pokonferencyjne. Wydawnictwo Politechniki Opolskiej.
175. Wang Ch., Harbottle D., Liu Q., Xu Z. 2014. *Current State of fine mineral tailings treatment: A critical review on theory and practice*. Minerals Engineering, 58, s. 113–131.
176. Watts M., Trainer E. 2011. *Disposadlof coal mine slurry waste using geotextile containers at the North River Mine, Chevron Mining Inc*. Tailings and Mine Waste, 10. London.
177. Wibberley L., Palfreyman D., Scaife P. 2008. *Efficient use of coal water fuels*. CSIRO Energy Technology, April 2008, Australia.
178. Wiłun Z. 1987. *Zarys geotechniki*. WKŁ, Warszawa.

179. Wisz J., Matwiejew A. 2005. *Biomasa – badania w laboratorium w aspekcie przydatności do energetycznego spalania*. Energetyka, 9.

180. Woźniakowski B., Kuczyńska I. 1992. *O ekonomicznych aspektach wykorzystania mułu węglowego do rekultywacji i detoksykacji terenów zdewastowanych przez przemysł*. Wiadomości Górnicze, nr 4.

181. Wróbel J., Fraś A., Przystaś R., Hycnar J.J., Tora B. 2013. *By-products of enrichment of coal as a source of fuels and aggregates*. In: XVII International Coal Preparation Congress, 1–6 October 2013, Istambul, Turkey.

182. Wypych W., Śliwińska B. 2010. *Tworzenie nowych produktów nowymi technikami i technologiami w KWK „Ziemowit"*. Zeszyty Naukowe Instytutu Gospodarki Surowcami Mineralnymi i Energią PAN, nr 78, Kraków.

183. Yilmaz E. 2011. *Advances in reducing large volumes of environmentally harmful mine waste rocks and tailings*. Gospodarka Surowcami Mineralnymi, 27(2).

184. Yuhi W., Li B., Li W., Chen H. 2007. *Effects of coal characteristics on the properties of coal water slurry*. Coal Preparation, 25(4),

185. Zawistowski J., Ściążko M., Raińczak J., Robak J. 2003. *Współspalanie z węglem biomasy i paliw alternatywnych*. Wyd. Instytutu Chemicznej Przeróbki Węgla w Zabrzu i Instytutu Gospodarki Surowcami Mineralnymi i Energią PAN. Zabrze-Kraków.

186. Zhou Z. 2009. *The application...* Zhejiang University, Hangzhou, China.

187. Zuba M., Tomas A., Matusiak P. 2015. *Rozdrabniacz produktów filtracji MR300 konstrukcji ITG Komag*. Konferencja KOMEKO 2015.

188. www.polho.slask.com.pl – Zakład Wzbogacania Odpadów Poflotacyjnych POLHO

Spis rysunków

Rys. 1.1. Zależność wartości opałowej mułów węglowych od zawartości balastu ... 10
Rys. 1.2. Wygląd i konsystencja mułu węglowego wydobywanego z osadnika ziemnego ... 14
Rys. 2.1. Wpływ rodzaju urządzeń filtracyjnych na zawartość balastu i wartość opałową mułów węglowych ... 17
Rys. 2.2. Schemat ideowy porównania efektów odwodnienia nadawy w zależności od zastosowanej prasy filtracyjnej ... 18
Rys. 2.3. Wpływ zagęszczenia nadawy do wirówki sedymentacyjnej na ciepło spalania filtratu i produktu odwodnionego ... 19
Rys. 2.4. Przykłady struktur fazy stałej w zawiesinach wodno-mineralnych ... 20
Rys. 2.5. Przebieg zależności stopnia odwodnienia mułu węglowego od ilości dodawanego popiołu do zawiesiny wodno-mułowej (średnia ze wszystkich badań obejmująca popioły denne i lotny oraz zawiesiny z i bez flokulanta) 25
Rys. 2.6. Przepony z rurami drenażowymi ... 27
Rys. 2.7. Schemat eksploatacji zbiorników elastycznych ... 28
Rys. 2.8. Budowa i eksploatacji parku odwadniania zawiesin wodno-mułowych za pomocą kontenerów GeoTube® w kopalni North River ... 29
Rys. 3.1. Schemat przygotowania drobnoziarnistych frakcji węglowych do aglomerowania i granulowania ... 35
Rys. 3.2. Przegląd urządzeń rozdrabniających dla placków filtracyjnych ... 37
Rys. 3.3. Przegląd urządzeń przydatnych do aglomerowania mułów węglowych 38
Rys. 3.5. Wygląd mułów węglowych ... 39
Rys. 3.4. Porównanie wyglądu mułu węglowego w zależności od sposobu jego obróbki ... 39
Rys. 3.6. Granulat z mułu o zawartości wody 40% i z mułu o zawartości wody 29% 42
Rys. 3.7. Przegląd podstawowych schematów granulowania mułów węglowych i odpadów poflotacyjnych ... 44
Rys. 3.8. Schemat instalacji granulowania mułów węglowych w Zakładzie Górniczym Sobieski w Tauron Wydobycie SA ... 49
Rys. 3.9. Wygląd poszczególnych węzłów technologicznych instalacji granulowania mułów węglowych ... 50
Rys. 4.1. Wykresy ściskania brykietów w teście osiowym ... 59
Rys. 4.2. Struktura brykietu z węgla wykonanego w prasie stemplowej ... 60
Rys. 4.3. Struktura brykietu z materiału mieszanego ... 60
Rys. 4.4. Zmiany zawartości tlenków azotu w zależności od procentowego udziału biomasy w brykietach ... 63
Rys. 4.5. Zmiany zawartości dwutlenku siarki w zależności od procentowego udziału biomasy w brykietach ... 63
Rys. 4.6. Zmiany zawartości tlenku węgla w zależności od procentowego udziału biomasy w brykietach ... 63

Rys. 4.7. Zmiany zawartości siarkowodoru w zależności od procentowego udziału biomasy w brykietach 64
Rys. 4.8. Zmiany zawartości dwutlenku węgla w zależności od procentowego udziału biomasy w brykietach 64
Rys. 4.9. Schemat linii produkcyjnej brykietów 65
Rys. 4.10. Kształt brykietów węglowych produkowanych w warunkach przemysłowych 66
Rys. 5.1. Przykładowe przebiegi zależności zawartości popiołu od wielkości uziarnienia mułów węglowych i odpadu poflotacyjnego 72
Rys. 5.2. Schemat technologiczny wydzielania koncentratów węglowych z mułów węglowych i odpadów poflotacyjnych 73
Rys. 5.3. Wygląd i schemat działania przesiewacza Stack Sizer 74
Rys. 5.4. Schemat instalacji z sitem łukowym do klasyfikacji zawiesin wodno-mułowych 76
Rys. 5.5. Schemat funkcjonowania klasyfikacji ziarnowej i odwodnienia zawiesin na sitach OSO 79
Rys. 5.6. Odśrodkowe sito odwadniające OSO 80
Rys. 5.7. Instalacja doświadczalna klasyfikacji i odwadniania zawiesin wodnych zawierających fazę stała o uziarnieniu poniżej 800 μm 81
Rys. 5.8. Schemat technologiczny Zakładu Wzbogacania Odpadów Poflotacyjnych 84
Rys. 5.9. Wygląd wybranych węzłów technologicznych Zakładu Wzbogacania Odpadów Poflotacyjnych POLHO 85
Rys. 5.10. Instalacja flotacji kolumnowej odzysku węgla z odpadów węglowych 86
Rys. 5.11. Schematy instalacji do aglomeracji olejowej w heptanie/pentanie węgla i odpadów węglowych 87
Rys. 5.12. Schemat działania separatora wirówkowego 90
Rys. 5.13. Przekroje wirówek separujących minerały o wysokim gradiencie pola grawitacyjnego 91
Rys. 5.14. Wpływ metody wzbogacania węgla na uzysk koncentratów węgla 93
Rys. 5.15. Schemat technologiczny wzbogacania mułów węglowych w separatorze wirówkowym Falcon C 94
Rys. 5.16. Schemat procesu demineralizacji i odsiarczania węgla według technologii Gravimelt 94
Rys. 6.1. Widok na powierzchnię osadnika mułu węglowego, na którym można zaobserwować wydzielone łachy 98
Rys. 6.2. Przykłady transportu i składowania drobnoziarnistych odpadów węglowych w postaci „pasty" oraz model jej struktury 101
Rys. 6.3. Technologia firmy EIMCO zagęszczania i deponowania "pasty" drobnoziarnistych odpadów górniczych i przeróbczych w osadnikach powierzchniowych i w wyrobiskach górniczych 103
Rys. 6.4. Technologia firmy EIMCO zagęszczania zawiesin wodnych drobnoziarnistych odpadów w zagęszczalnikach stożkowych 103
Rys. 6.5. Schemat powiązań węzłów technologicznych instalacji odzysku koncentratów węglowych z mułów zgromadzonych w osadnikach ziemnych 105

Rys. 6.6. Schemat zminimalizowanego pełnego cyklu technologicznego odzysku koncentratów węglowych ze zdeponowanych mieszanin odpadów poflotacyjnych i mułów węglowych 106
Rys. 6.7. Hydrourabianie depozytów odpadów z osadników zalanych wodą 106
Rys. 6.8. Alternatywne rozwiązania gospodarki iłowej 108
Rys. 7.1. Schemat instalacji produkcji pyłu z węgla brunatnego według Braunkohlen-Staub 110
Rys. 7.2. Schemat realizacji studiów i badań w zakresie warunków wdrożenia technologii produkcji suspensji węglowo-wodnej 113
Rys. 7.3. Schemat technologiczny wytwarzania suspensji węglowo-wodnej 114
Rys. 7.4. Zależność lepkości suspensji węglowo-wodnej 116
Rys. 7.5. Charakterystyka ziarnowa węgla w suspensji węglowo-wodnej 116
Rys. 7.6. Porównanie stabilności struktury suspensji węglowo-wodnych oznaczanych na aparacie Sedimentation Analizer RF-3000 117
Rys. 7.7. Schemat instalacji magazynowania i przygotowania do spalania suspensji węglowo-wodnej 118
Rys. 7.8. Przegląd rozwiązań technologicznych kotłów fluidalnych 122
Rys. 7.9. Przekrój kotłów fluidalnych ze stacjonarną warstwą fluidalną (BFB) i cyrkulacyjną (CFB) 122
Rys. 7.10. Zalecany przez firmę Foster Wheeler rozkład ziarnowy węgli kamiennych do opalania kotłów fluidalnych 123
Rys. 7.11. Wygląd spieków pobranych z rusztu kotła fluidalnego 125
Rys. 7.12. Krzywe uziarnienia miału, paliwa do kotłów fluidalnych i paliwa do pieców retortowych 125
Rys. 7.13. Rejestr obszarów kaloryczności dostaw mułów węglowych i spalanej pulpy mułowo-wodnej 127
Rys. 7.14. Schemat produkcji paliwa ze skały płonnej z hałdy kopalnianej 130
Rys. 7.15. Schemat gospodarki mułowo-wodnej w kopalni w Carling i elektrowni Emile Huchet 131
Rys. 7.16. Schemat kotła fluidalnego opalanego odpadami poflotacyjnymi 131
Rys. 7.17. Schemat kotła fluidalnego opalanego odpadami węglowymi i urobkiem 132
Rys. 7.18. Największy kocioł fluidalny opalany odpadami węglowymi (Steward, USA) 132
Rys. 7.18. Model kotła fluidalnego z cyrkulacyjnym złożem firmy Foster Wheeler o mocy 460 MW_e 135

Spis tabel

Tabela 1.1. Ciepło spalania węgli w stanie bezpopiołowym i suchym w zależności od ich typu 9
Tabela 1.2. Właściwości fizykochemiczne drobnoziarnistych odpadów węglowych spalanych w energetyce 12
Tabela 1.3. Skład i właściwości wybranych krajowych i zagranicznych drobnoziarnistych odpadów węglowych 13
Tabela 2.1. Porównanie zużycia mediów kosztów odwodnienia odpadów poflotacyjnych w zależności od stosowanych pras filtracyjnych w KWK Krupiński 18
Tabela 2.2. Charakterystyka fizyko-chemiczną popiołów zastosowanych w badaniach i próbach doziarniania zawiesin trudno oddających wodę 21
Tabela 2.3. Charakterystyka procesu filtracji i właściwości mułów uzyskiwanych z zawiesin wodno-mułowych z dodatkiem popiołu dennego z Elekrowni Jaworzno II 22
Tabela 2.4. Charakterystyka właściwości mułów uzyskiwanych z zawiesin wodno-mułowych z dodatkiem popiołu dennego z El Jaworzno II (seria II) 23
Tabela 2.5. Charakterystyka właściwości mułów uzyskiwanych z zawiesin wodno-mułowych z dodatkiem popiołu dennego z EC Katowice 23
Tabela 2.6. Charakterystyka właściwości mułów uzyskiwanych z zawiesin wodno-mułowych z dodatkiem popiołu lotnego z El Jaworzno III 24
Tabela 2.7. Wpływ czasu odsączania zawiesin w zbiorniku elastycznym Geotube® na zagęszczenie osadu 30
Tabela 2.8. Wpływ dodatku popiołu dennego na wytrzymałość granulatu, utworzo- nego do przeciwdziałania samozagrzewowi związków pirytowych zawartych w mule węglowym 32
Tabela 2.9. Wpływ dodatku CaO na stopień związania siarki w popiele w procesie spalania odpadów wysokosiarkowych 33
Tabela 3.1. Porównanie uziarnienia aglomeratów z mułów węglowych 41
Tabela 3.2. Wpływ spoiw na uziarnienie aglomeratów z mułów węglowych 42
Tabela 3.3. Porównanie właściwości mułów węglowych w zależności od sposobu ich przygotowania do spalania 51
Tabela 4.1. Charakterystyka badanych materiałów 55
Tabela 4.2. Podstawowe składniki chemiczne węgla kamiennego i biomasy 55
Tabela 4.3. Właściwości pobranych próbek węgla i biomasy 55
Tabela 4.4. Wytrzymałość brykietów w zależności od nacisku prasy i udziału biomasy 55
Tabela 4.5. Wytrzymałość brykietów w zależności od procentowego udziału lepiszcza 57
Tabela 4.6. Właściwości mechaniczne brykietów świeżych i sezonowanych w zależności od zawartości wody w mieszczance oraz stopnia zagęszczenia..... 58
Tabela 4.7. Wyniki testów wodoodporności brykietów 61
Tabela 4.8. Wartość opałowa brykietów 62
Tabela 4.9. Materiały testowane w próbach przemysłowych brykietowania 66

Tabela 4.10. Właściwości wytrzymałościowe brykietów z prasy walcowej w zależności od udziału lepiszcza 67
Tabela 4.11. Właściwości wytrzymałościowe brykietów z prasy walcowej w zależności od czasu sezonowania 67
Tabela 4.12. Porównanie właściwości dwóch rodzajów przemysłowych brykietów paliwowych 68
Tabela 5.1. Charakterystyka mułów wydzielanych z cieków obiegu wodno-mułowego zakładu wzbogacania węgla 70
Tabela 5.2. Skład i właściwości odpadów pofiltracyjnych i sedymentu węglowego 71
Tabela 5.3. Wyniki klasyfikacji ziarnowej mułów węglowych na sicie Derrik Stack Sizer 75
Tabela 5.4. Wyniki klasyfikacji ziarnowej mułów węglowych na sitach łukowych .. 76
Tabela 5.5. Charakterystyka sit OSO z wkładką sitową w obudowie kierownicy 80
Tabela 5.6. Zestawienie wyników prób i badań oraz dokonanych modernizacji na instalacji OSO 81
Tabela 5.7. Wpływ procesu Otisca na jakość otrzymywanych koncentratów węglowych 88
Tabela 5.8. Charakterystyka techniczna wirówek firmy Falcon 91
Tabela 5.9. Porównanie charakterystyk separatorów grawitacyjnych różnej produkcji 92
Tabela 5.10. Charakterystyka koncentratów węglowych wydzielonych z mułu w Falcon Concentrator 93
Tabela 5.11. Przykłady wpływu procesu Gravimelt na właściwości europejskich węgli 95
Tabela 5.12. Porównanie parametrów jakości miałów 96
Tabela 6.1. Charakterystyka mułów wydzielanych w chodnikach dołowych 98
Tabela 6.2. Zawartość popiołu w próbkach drobnoziarnistych odpadów węglowych pobranych z osadników 99
Tabela 6.3. Porównanie wskaźników technicznych składowania drobnoziarnistych odpadów w technologii zagęszczania tradycyjnej i nowej („pasty") na przykładzie popiołów lotnych 102
Tabela 7.1. Struktura wydajności kotłów stosujących suspensję węglowo-wodną w Chinach 112
Tabela 7.2. Charakterystyka fizykochemiczna suspensji węglowo-wodnych 115
Tabela 7.3. Porównanie efektów stosowania suspensji węglowo-wodnych z paliwami tradycyjnymi 119
Tabela 7.4. Charakterystyka fizykochemiczna węgla do kotłów fluidalnych 124
Tabela 7.5. Charakterystyka pulpy mułowo-wodnej spalanej w kotle fluidalnym BFC 127
Tabela 7.6. Właściwości surowych i granulowanych mułów węglowych w porównaniu do właściwości pulpy mułowo-wodnej 128
Tabela 7.7. Zestawienie mocy bloków energetycznych opalanych węglem na świecie i w wybranych krajach na koniec 2005 roku 129
Tabela 7.8. Porównanie jednostkowych nakładów inwestycyjnych w zależności od zastosowanego źródła energii pierwotnej i zastosowanego paleniska węglowego 129
Tabela 7.9. Zestawienie pracujących i budowanych kotłów fluidalnych w Polsce 134

STRESZCZENIE

Metody podwyższania kaloryczności drobnoziarnistych odpadów węglowych

Autorzy przedstawili wyniki badań oraz wdrożeń nad możliwościami podwyższenia energetycznej wartości drobnoziarnistych odpadów węglowych dla ich zagospodarowania w procesach energetycznego spalania. Wzięto pod uwagę takie drobnoziarniste paliwa jak: muły węglowe i odpady poflotacyjne oraz ich mieszaniny, odpady z produkcji wyrobów grafitowo-węglowych, produkty uboczne z przeróbki mechanicznej węgla oraz przeróbki biomasy. Szczegółowo przedstawiono właściwości mułów węglowych i odpadów poflotacyjnych, w aspekcie ich zastosowania przede wszystkim jako paliwa samodzielne lub składniki mieszanek paliwowych. Opisano procesy wydzielania oraz zagęszczenia frakcji węglowych. Przedstawiono możliwości ich granulowania oraz brykietowania dla uzyskania produktów energetycznych.

Omówiono przykładowe procesy odzysku substancji węglowych oraz podwyższenia efektywności energetycznej wydzielonych frakcji węgla z zastosowaniem metody selektywnego wydzielania odcieków bogatych w węgiel z obiegów wodno-mułowych, metody klasyfikacji ziarnowej, densymetrycznej i opartych o różnice właściwości powierzchniowych ich składników oraz metody „głębokiego" wzbogacania drobnoziarnistych odpadów węglowych.

Zaprezentowano wyniki własnych prac badawczych dotyczących produkcji koncentratów węglowych oraz opracowania technologii składowania drobnoziarnistych odpadów z wydobycia, wzbogacania i spalania węgla. Przedstawiono ponadto zagadnienia wykorzystania paliw zawiesinowych sporządzanych z pyłów i mułów węglowych oraz zagadnienia spalania mułów lub odpadów poflotacyjnych w paleniskach fluidalnych. Pokazano przykłady zastosowania drobnoziarnistych odpadów węglowych do opalania palenisk fluidalnych kotłów i pieców.

We wnioskach stwierdzono, że korzystne jest zastosowanie metody zagęszczenia i wzbogacenia zawiesin wodno-mułowych w procesie wirowania, gdzie uzyskano frakcje węglowe o wartości opałowej powyżej 14 000 kJ/kg. Dużą efektywnością wyróżnia się również metoda granulowania drobnoziarnistych frakcji węglowych, gdzie uzyskano paliwo o wartości opałowej do 11 000 kJ/kg. Największą wartość opałową (około. 23 000 kJ/kg) osiągnięto metodą brykietowania uzyskując węglowe brykiety paliwowe. Stwierdzono, że w przypadku dodania masowo 20% biomasy, brykiety te cechują się małą zawartością popiołu oraz siarki.

SUMMARY

Methods of increasing the calorific value of fine coal waste

The authors presented the results of research and implementations of the possibilities of increasing the energy value of fine coal waste for its use in the processes of combustion. Such fine fuels as coal mules and flotation tailings with mixtures thereof, waste from the production of graphite-carbon, by-products from coal processing and processing of biomass were taken into account. The properties of coal slurry and tailings were presented in detail, in terms of their application – especially as a stand-alone fuel or fuel blending components. The processes of separation and density fraction coal were describes. The possibilities of granulation and briquetting for obtaining energy products were shown.

The authors discussed the processes for recovery of carbonaceous substances and to increase the energy efficiency of separated fractions of coal using the method of selective isolation streams rich in carbon from the circuit water and mud, methods of grain-sorting, density scan and based on differences in surface properties of the ingredients and the method of „deep" enrichment of fine coal waste.

The results of research on the production of coal concentrates and the development of storage technology of fine waste from the extraction, enrichment and combustion of coal were presented. Additionally, the use of fuels suspension prepared from dust and coal slurry and issues of combustion mules or tailings in a fluidized bed furnaces were discussed. Finally, examples of the use of fine waste coal sunbathing furnaces fluidized bed boilers and furnaces were given.

In the conclusions it is stated that the preferred method is the use of the densification and enrichment the water-mud suspension spinning process, wherein coal fractions obtained with a calorific value exceeding 14 000 kJ/kg. High efficiency is also characteristic for granulation method of fine coal fractions, where the fuel was obtained with a calorific value to 11 000 kJ/kg. The greatest calorific value (approx. 23 000 kJ/kg) was achieved by briquetting method to produce coal fuel briquettes. It has been found that in the case of adding 20% by weight biomass briquettes are characterized by a low ash and sulfur content.

Dr inż. Jan J. Hycnar specjalista z zakresu energetyki bazującej na paliwach kopalnych i górnictwa węgla kamiennego, ze szczególnym uwzględnieniem problematyki ekologicznej i odpadów. Działa w ramach Ecocoal Consulting Center w Katowicach na rzecz górnictwa i energetyki, w zakresie optymalizacji ilości, jakości i zagospodarowania ubocznych produktów wydobycia, wzbogacania i spalania węgla. Autor i współautor 5 książek i skryptów, 2 monografii, przeszło 250 publikacji krajowych i zagranicznych oraz 17 patentów.

Dr hab. inż. Gabriel Borowski, profesor nadzwyczajny Politechniki Lubelskiej, zajmuje się zagadnieniami przetwarzania odpadów przemysłowych w celu odzysku i zagospodarowania surowców. Założyciel oraz Redaktor naczelny czasopisma „Journal of Ecological Engineering" oraz Prezes Lubelskiego Oddziału Polskiego Towarzystwa Inżynierii Ekologicznej (PTIE).

ISBN: 978-83-7947-207-9