



*Gabriel Borowski*

# Metody przetwarzania odpadów drobnoziarnistych na produkty użyteczne

MONOGRAFIE

# Metody przetwarzania odpadów drobnoziarnistych na produkty użyteczne

# Monografie – Politechnika Lubelska



Politechnika Lubelska  
Wydział Podstaw Techniki  
ul. Nadbystrzycka 38  
20-618 Lublin

Gabriel Borowski

# Metody przetwarzania odpadów drobnoziarnistych na produkty użyteczne



Politechnika Lubelska  
Lublin 2013

**Recenzenci:**

prof. dr hab. inż. Jan Siuta, Instytut Ochrony Środowiska - Państwowy Instytut Badawczy w Warszawie

dr hab. inż. Zdzisław Małecki, prof. nadzw., Instytut Badawczo-Rozwojowy Inżynierii Lądowej i Wodnej „Euroexbud” w Kaliszu

**Redakcja i skład: Gabriel Borowski**

Publikacja wydana za zgodą Rektora Politechniki Lubelskiej

© Copyright by Politechnika Lubelska 2013

ISBN: 978-83-63569-43-3

**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](http://www.biblioteka.pollub.pl)

**Druk:** TOP Agencja Reklamowa Agnieszka Łuczak

[www.agencjatop.pl](http://www.agencjatop.pl)

---

Elektroniczna wersja książki dostępna w Bibliotece Cyfrowej PL [www.bc.pollub.pl](http://www.bc.pollub.pl)

Nakład: 100 egz.

# SPIS TREŚCI

Streszczenie.....	7
Summary .....	8
Wykaz ważniejszych oznaczeń .....	9
Wprowadzenie .....	11
<b>CZĘŚĆ I. Przegląd metod przetwarzania odpadów drobnoziarnistych na produkty użyteczne .....</b>	<b>13</b>
1.1. Rodzaje odpadów .....	13
1.2. Zagęszczanie odpadów .....	15
1.2.1. Odpady w postaci ciekłej .....	15
1.2.2. Odpady sypkie .....	16
1.3. Aglomeracja odpadów .....	17
1.4. Brykietowanie odpadów .....	19
1.4.1. Brykietowanie odpadów hutniczych.....	19
1.4.2. Brykietowanie odpadów łóżyskowych .....	21
1.4.3. Brykietowanie odpadów węgla i biomasy .....	21
1.4.4. Popioły i żużle energetyczne .....	24
1.4.5. Brykietowanie popiołów ze spalania osadów ściekowych .....	27
1.5. Zeszklwienie odpadów .....	28
<b>CZĘŚĆ II. Badania własne .....</b>	<b>32</b>
2.1. Cel i problematyka badań.....	32
2.2. Zakres badań.....	33
2.3. Metodyka badań .....	35
2.3.1. Określenie cech fizycznych odpadów .....	35
2.3.2. Dobór brykietarki i parametrów pracy .....	37
2.3.3. Określenie stopnia zagęszczenia materiału.....	38
2.3.4. Ocena wytrzymałości brykietów.....	38
2.3.5. Ocena odporności brykietów na czynniki atmosferyczne .....	39
2.3.6. Analiza struktury brykietów.....	40
2.3.7. Ocena wpływu brykietów na środowisko .....	41
2.4. Brykietowanie odpadów energetycznych .....	42
2.4.1. Charakterystyka odpadów .....	42
2.4.2. Badania symulacyjne zagęszczania odpadów węgla kamiennego .....	47
2.4.3. Badania jakości brykietów węglowych .....	55
2.4.4. Wdrożenie brykietowania węgla .....	66
2.5. Brykietowanie popiołów ze spalania brykietów .....	71
2.5.1. Skład i właściwości popiołów.....	71

2.5.2. Przygotowanie mieszanki .....	72
2.5.3. Parametry brykietowania .....	73
2.5.4. Wytrzymałość brykietów .....	74
2.5.5. Wpływ czynników atmosferycznych na właściwości brykietów .....	75
2.5.6. Wymywalność składników z brykietów .....	75
2.6. Brykietowanie i zeszkliwienie popiołów ze spalania osadów ściekowych .....	76
2.6.1. Charakterystyka osadów i popiołów .....	76
2.6.2. Przygotowanie mieszanki .....	78
2.6.3. Parametry brykietowania .....	80
2.6.4. Parametry zeszkliwienia .....	80
2.6.5. Struktura zeszkionych brykietów .....	81
2.6.6. Wytrzymałość mechaniczna brykietów .....	81
2.6.7. Wpływ czynników atmosferycznych na właściwości brykietów .....	83
2.6.8. Wymywalność składników z brykietów .....	84
2.7. Dyskusja wyników badań .....	84
CZĘŚĆ III. Podsumowanie i wnioski .....	91
3.1. Podsumowanie .....	91
3.2. Wnioski .....	94
Bibliografia .....	96
Wykaz ilustracji .....	109
Wykaz tabel .....	111

# STRESZCZENIE

## **Metody przetwarzania odpadów drobnoziarnistych na produkty użyteczne**

W książce przedstawiono zagadnienia przetwarzania odpadów drobnoziarnistych dla otrzymania wyrobów o określonych właściwościach użytkowych. Przetwarzanie obejmowało, m.in. przygotowanie mieszanki odpadów oraz jej zagęszczenie w jednolite i trwałe brykiety.

Celem pracy było opracowanie metod przetwarzania drobnoziarnistych odpadów dla odzysku surowca oraz wytworzenia produktów użytecznych.

Wytypowano następujące rodzaje odpadów:

- muły i miały węgla kamiennego,
- popioły ze spalania brykietów węglowo-biomasowych,
- popioły lotne ze spalania osadów ściekowych.

Wyniki badań symulacyjnych, laboratoryjnych oraz wdrożeniowych wskazały na możliwość doboru korzystnych parametrów zagęszczania odpadów dla uzyskania odpornych na czynniki atmosferyczne i środowiska brykietów.

Zaprezentowano uniwersalny schemat badań nad przetworzeniem wielu rodzajów odpadów obejmujący:

- przygotowanie surowca, w szczególności rozdrabnianie i przesiewanie, dodanie lepiszcza, mieszanie wraz z korektą zawartości wody;
- brykietowanie, w tym dobór prasy oraz urządzeń do formowania brykietów, dobór układu podawania materiału, określenie nacisku jednostkowego oraz oporów tarcia zewnętrznego, ustalenie czasu sezonowania brykietów;
- ocenę jakości brykietów z uwzględnieniem wymogów ochrony środowiska.

Opracowane metody umożliwiły wytworzenie brykietów paliwowych do spalania w kotłach energetycznych, a także brykietów przydatnych na podbudowy drogowe, w produkcji elementów budowlanych oraz w geotechnice. Przedstawiono ponadto możliwość zastosowania zeszkliwienia brykietów popiołowych dla efektywnego unieszkodliwienia substancji niebezpiecznych dla środowiska.



# SUMMARY

## **Methods of fine-grained waste processing into useful products**

The problem of processing to obtain fine-grained waste products with appropriate, desirable properties has been presented in the book. In processing it is important to prepare the mixture of waste and to condense it into a form of uniform and durable briquette.

The research aimed at working out elaborated methods of fine-grained waste processing for recovery of raw materials and manufacturing useful products.

The following types of waste have been processed:

- coal fines,
- ashes from the combustion of carbon-biomass briquettes,
- fly ashes from the incineration of sewage sludge.

The research results of simulation, laboratory and implementation studies indicated the possibility of selecting favorable waste compressing parameters for obtained briquettes were resistable to weather and environmental factors.

The universal research scheme of fine-grained processing of different waste types has been developed. It includes:

- preparation of the material, in particular crushing and screening, adding binder and mixing, together with humidity correction;
- briquetting, including selection of press and briquetting equipment, material handling system selection, determining unit pressure and external friction, as well as specifying briquette seasoning period;
- assessing quality of briquettes, in terms of the environmental requirements.

The methods were developed for producing fuel-briquettes to combustion in power boilers, as well briquettes for road sub-base construction and used as a component of building materials or geotechnics. The book also presents the possibility of ash-briquettes vitrification as a method of disposal of waste containing hazardous substances to the environment.

## WYKAZ WAŻNIEJSZYCH OZNACZEŃ

$\mu$	-	współczynnik kinetycznego tarcia zewnętrznego,
$\theta$	-	kąt tarcia, °
$\rho$	-	gęstość, $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$
$\rho_0$	-	gęstość początkowa materiału, $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$
$\rho_s$	-	gęstość w stanie zsypanym, $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$
$\rho_u$	-	gęstość pozorną, $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$
$\tau$	-	naprężenia styczne, Pa
$\sigma$	-	naprężenie normalne, Pa
$\sigma_w$	-	naprężenia własne, Pa
$\nu$	-	liczba Poissona,
$\upsilon$	-	jednostkowy opór zagęszczania
$a$	-	szczelina między walcami, m
$A$	-	pole przekroju, $\text{m}^2$
$d$	-	wielkość ziarna, m
$D$	-	średnica walców roboczych, m
$E$	-	moduł Younga, Pa
$f$	-	porowatość,
$F$	-	siła ściskania, N
$H_p$	-	wysokość początkowa zagęszczanego materiału, m
$k$	-	liczba wgłębień formujących walca,
$K$	-	odporność brykieta na zrzut grawitacyjny, %
$K_0$	-	współczynnik sprężystości podłużnej,
$l$	-	przemieszczenie stempla, m
$m$	-	stopień rozdrobnienia,
$M$	-	masa, kg
$M_o$	-	moment obrotowy, $\text{N}\cdot\text{m}$
$M_s$	-	masa całkowite suchego ciała, kg
$M_w$	-	masa wody zawartej w ciele, kg
$M_z$	-	masa pozostałego nadziarna, kg
$p$	-	nacisk jednostkowy stempla, $\text{N}\cdot\text{m}^{-2}$
$P$	-	siła nacisku stempla, N
$q_u$	-	masa utrżęsona, kg
$P_e$	-	granica plastyczności, Pa
$P_s$	-	granica sprężystości, Pa
$R$	-	współczynnik rozbieżności,
$s$	-	stopień zagęszczenia,

- $t$  – czas, s
- $T$  – temperatura, °C
- $U$  – zawartość wody, %
- $v_w$  – prędkość obwodowa walców,  $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$
- $V_b$  – objętość brykietu,  $\text{m}^3$
- $w$  – zawartość wody (wilgotność), %
- $W$  – wodoodporność, %

## WPROWADZENIE

Przedstawiono metody przetwarzania odpadów rozdrobnionych (o wielkości ziaren od 0,01 do 2,0 mm) zwanych drobnoziarnistymi. Do odpadów drobnoziarnistych zalicza się najczęściej pyły, proszki, popioły i żużle. Niektóre z nich są zagospodarowane w sposób bezpośredni, częściej jednak wymagają przetworzenia do postaci użytkowej.

W przetwarzaniu odpadów stosuje się, między innymi, płukanie, suszenie, rafinowanie, homogenizowanie, scalanie, itp. Odpady zawierające substancje niebezpieczne unieszkodliwia się, np. metodami termicznymi.

W Polsce w roku 2011 wytworzono 123,5 mln Mg odpadów, w tym 115,8 mln Mg (93,7%) odpadów przemysłowych [Rocznik statystyczny przemysłu 2012]. Z ogólnej ilości wytworzonych w tym okresie odpadów przemysłowych odzyskano 70,0% (81,1 mln Mg), składowano 23,0% (26,6 mln Mg), a w inny sposób unieszkodliwiono 4,2% (4,8 mln Mg), czasowo magazynowano zaś 2,8% (3,3 mln Mg) tych odpadów. Według GUS z 2012 roku w latach 2010–2011 zmniejszył się udział odpadów odzyskanych o 9,2% oraz wzrósł udział odpadów składowanych o 21,1% w odniesieniu do lat 2000–2005. Zasadny jest więc rozwój technologii przetwarzania odpadów na produkty użyteczne.

Dane statystyczne wskazują ponadto, że w 2011 roku najwięcej drobnoziarnistych odpadów powstało z:

- wydobywania oraz wzbogacania węgla kamiennego i brunatnego – 28,3 mln Mg,
- energetycznego spalania węgla (mieszanki popiołowo-żużlowe – 10,4 mln Mg i popioły lotne – 8,7 mln Mg),
- flotacyjnego wzbogacania rud metali nieżelaznych (głównie miedzi),
- wytapiania (żużle wielkopieczowe i stalownicze).

Odpady z przetwórstwa węgla są wykorzystywane w niezadawalającym stopniu. Ich zasoby można odzyskać z mułów węglowych, odpadów poflotacyjnych, ścierów, pyłów koksowniczych, koksiku z procesów zgazowania węgla itp. Do końca roku 2011 nagromadzono na składowiskach 809,5 mln Mg odpadów górniczych. Istnieje możliwość energetycznego użytkowania mułów i miałów węgla jako paliwa podstawowego i uzupełniającego.

Poważnym problemem jest zagospodarowanie odpadów zawierających substancje niebezpieczne. W tej grupie znajdują się osady z przemysłowych i komunalnych oczyszczalni ścieków. W roku 2011 wytworzono 916,8 tys. Mg suchej masy osadów, które wykorzystano w rolnictwie (15,6%), stosowano do rekultywacji gruntów i nawożenia gleb (16,6%), przeznaczono do produkcji kompostu (3,4%) oraz przekształcono termicznie (9,3%) [Rocznik statystyczny 2012]. Pozostała część

osadów (55,1%) jest deponowana na składowiskach komunalnych lub gromadzona na terenie oczyszczalni ścieków. Są one kłopotliwe w zagospodarowaniu i wymagają opracowania takich metod przetwarzania, dzięki którym nastąpi redukcja lub unieszkodliwienie składników niebezpiecznych.

Przedmiotem niniejszej pracy jest przedstawienie zasad przetwarzania odpadów drobnoziarnistych (w tym niebezpiecznych), prowadzących do wytworzenia produktów użytecznych w:

- energetyce – jako alternatywne paliwo do spalania w kotłach centralnego ogrzewania;
- budownictwie – jako zamiennika kruszywa mineralnego na podbudowy drogowe;
- inżynierii lądowej i wodnej – do stabilizacji gruntów dla wykonawstwa budowlanych ziemnych i podziemnych oraz fundamentów budynków i nawierzchni drogowych, a także do wykonania drenaży wodnych;
- inżynierii środowiska – do bezpiecznego unieszkodliwiania metali ciężkich.

Termin „przetwarzanie odpadów” określono w Ustawie o odpadach z dnia 14 grudnia 2012 r. (Dz.U. 2013, Tom 1, poz. 21): „*Art. 3.1. Ilekroć w ustawie jest mowa o: (...) przetwarzaniu – rozumie się przez to procesy odzysku lub unieszkodliwiania, w tym przygotowanie poprzedzające odzysk lub unieszkodliwianie (...)*”.

Zgodnie z przepisami Ustawy o odpadach, przetwarzanie odpadów służy użytecznemu zastosowaniu przez zastąpienie innych surowców i ma na celu nadanie odpadom użytkowych właściwości.

W przetwórstwie odpadów mogą być stosowane – między innymi – procesy homogenizacji oraz formowania i zeszklwienia. W badaniach własnych stosowano brykietowanie prowadzone w temperaturze otoczenia lub nieco wyższej, w procesach tzw. obróbki na zimno.

# CZEŚĆ I

## PRZEGLĄD METOD PRZETWARZANIA ODPADÓW DROBNOZIARNISTYCH NA PRODUKTY UŻYTECZNE

### 1.1. Rodzaje odpadów

Rozróżnia się następujące rodzaje odpadów drobnoziarnistych, m.in.:

- 1. Pyły i szlamy hutnictwa żelaza i stali.** Odpady te powstają z przetwarzania surówki i produkcji stali. Plewa i Mysłək [2001] rozróżnili: żużel wielkopiecowy i konwertorowy, pył wielkopiecowy i stalowniczy, szlam wielkopiecowy i stalowniczy, pył z oczyszczania gazów odlotowych konwertorów tlenowych stalowni, pył z odpylania namiarowni wielkich pieców, pył z odpylania hali lejniczej, pył spiekalniczy oraz szlam spiekalniczy. Szlamy żelazonośne powstają przede wszystkim w wyniku mokrego odpylania gazów i spalin w takich instalacjach, jak: odpylnie mieszalni namiaru i ciągi chłodzenia gorącego spieku zwrotnego, oczyszczalnie gazu wielkopiecowego i oczyszczalnie gazu konwertorowego. Szlam wielkopiecowy jest najdrobniejszą frakcją materiałów wsadowych wychwyconą podczas mokrego oczyszczania gazu wielkopiecowego, osadzoną w osadnikach radialnych wielkich pieców. Szlam spiekalniczy powstaje wskutek odbioru na mokro pyłów z odpylania taśm spiekalniczych. Pyły żelazonośne są zatrzymywane w odpylni i gromadzone w zbiorniku, a następnie przewożone do namiarowni składników pylastych. Pył wielkopiecowy to drobiny materiałów wsadowych, wychwycone w odpylniku statycznym podczas suchego oczyszczania gazu wielkopiecowego.
- 2. Drobnoziarniste frakcje węgla** – produkty uboczne z wydobywania, wzbogacania i użytkowania węgla kamiennego i brunatnego. Należą do nich: muły węglowe, odpady poflotacyjne, ściery, pyły koksownicze, koksik z procesów zgazowania oraz zawęglone stałe produkty spalania paliw. W zależności od właściwości energetycznych muły węglowe, ściery, pył koksowniczy i koksik są często wykorzystywane jako paliwa samodzielne oraz jako jeden ze składników wytwarzanych mieszanek paliwowych. Drobnoziarniste węgle mogą być wzbogacane metodami fizycznymi i fizykochemicznymi, co pozwala uzyskać wysokoenergetyczne koncentraty węglowe [Hycnar i in. 2005].

- 3. Odpady przemysłu energetycznego.** Do nich zaliczono: żużle ze spalania węgla kamiennego i węgla brunatnego, popioły lotne z węgla kamiennego i z węgla brunatnego, mieszanki popiołowo-żużłowe z mokrego odprowadzania odpadów paleniskowych, mikrosfery z popiołów lotnych, stałe odpady z wapniowych metod odsiarczania spalin, w tym: gips poreakcyjny, produkty odsiarczania metodą półsuchą, produkty odsiarczania metodą suchą, mieszaniny popiołów lotnych i odpadów stałych z wapniowych metod odsiarczania gazów odlotowych metodami suchymi i półsuchymi odsiarczania spalin oraz spalania w złożu fluidalnym [Gawlicki, Roszczynialski 1995].
- 4. Odpady odlewnictwa żelaza.** Pochodzą z procesów termicznych w odlewniach żelaza. Zalicza się do nich odpady powstające w czasie sporządzania mas formierskich i rdzeniowych ze spoiwami organicznymi. W trakcie zalewania formy ciekłym metalem następuje znaczna redukcja szkodliwych substancji i powstają odpady przepalone, w postaci tzw. zużytych mas formierskich i rdzeniowych [Niesler 2007].
- 5. Odpady hutnictwa cynku – zgary, pyły z oczyszczania gazów odlotowych,** żużle z pieców szybowych oraz żużle z pieców obrotowych, a także szlamy z oczyszczania gazów odlotowych [Drzymała i in. 2000].
- 6. Odpady z odsiarczania spalin metodami wapniowymi.** Są to odpady obróbki termicznej. Wyróżniono następujące rodzaje tych odpadów [Piecuch 2006]:
  - stałe odpady z wapniowych metod odsiarczania gazów odlotowych,
  - produkty z wapniowych metod odsiarczania gazów odlotowych odprowadzane postaci szlamu,
  - mieszaniny popiołów lotnych i odpadów stałych z wapniowych metod odsiarczania gazów odlotowych.
- 7. Odpady przemysłu chemicznego.** Między innymi są to odpady organiczne z przeróbki ropy naftowej, z oczyszczania gazu ziemnego oraz z wysokotemperaturowej przeróbki węgla [Niemieć, Zamorska 2006]. Źródłami tych odpadów są: zakłady przetwórstwa ropy naftowej (rafinerie, petrochemie), kombinaty koksochemiczne, fabryki chemiczne (np. parafiny), kopalnie gazu ziemnego, zakłady przeróbki gazu ziemnego, zakłady zajmujące się regeneracją olejów, zakłady produkujące grafit syntetyczny i elektrody węglowe. Przemysł chemiczny generuje także odpady z produkcji, przygotowania do obrotu i stosowania związków nieorganicznych [Hryniewicz i in. 2008]. W 2011 roku powstało 5,34 mln Mg odpadów z produkcji chemikaliów i wyrobów chemicznych, z czego poddano odzyskowi i unieszkodliwiono 1,66 mln Mg (31,1%) [Rocznik statystyczny przemysłu 2012].

**8. Odpady przemysłu drzewnego i papierniczego** – makulatura, tektura, masa celulozowa, płyty meblowe i meble. W 2011 roku wytworzono 3,92 mln Mg odpadów z tej grupy, które w większości poddano odzyskowi – 3,55 mln Mg (90,1%) [Rocznik statystyczny przemysłu 2012]. Coraz częściej wykorzystuje się je także do celów energetycznych, produkując paliwa alternatywne stanowiące zamiennik tradycyjnych surowców energetycznych [Stolarski i in. 2003; Wisz, Matwiejew 2005].

Wymienione rodzaje odpadów ziarnistych powinny być przetworzone odpowiednimi metodami do użytecznej postaci [Borowski 2009e].

Analizując wyniki prac badawczych różnych autorów [Eremin i in. 2003; Mi, Li 2006; Oeters i in. 2000; Drzymała 1993] dotyczących aglomeracji materiałów drobnoziarnistych stwierdzono, że bardzo ważnym elementem jest przygotowanie tego materiału obejmujące ujednorodnienie i zagęszczanie.

## 1.2. Zagęszczanie odpadów

### 1.2.1. Odpady w postaci ciekłej

Odpady drobnoziarniste w postaci ciekłej (szlamy) występują jako emulsje, zawiesiny lub sedymenty. Zawierają głównie oleje, smary, minerały oraz drobiny metali. Wodniste odpady stwarzają wiele trudności w odzyskiwaniu surowców. Zwykle gromadzone są w kontenerach lub w osadnikach. Podczas składowania występuje częściowe odwodnienie na skutek parowania [Hryniewicz i in. 2003].

Do odwadniania szlamów stosuje się procesy fizyczne oraz chemiczne [Borowski 2005]. Wśród nich są następujące procesy: filtracji, ultrafiltracji, flotacji, flokulacji, elektrokoagulacji, osmozy, ekstrakcji, mieszania, zagęszczania, sedymentacji, rozdrabniania, odwirowania, adsorpcji, desorpcji, stapiania, wymrażania, suszenia i destylacji. Ponadto stosowane są procesy: wymiany jonowej, neutralizacji, utleniania, hydrolizy, strącania, przemiany katalitycznej, elektrolizy, absorpcji i cementacji.

Filtracja z wykorzystaniem płytowej prasy filtracyjnej umożliwia zmniejszenie zawartości wody w szlamach do ok. 30–40%. Stosuje się ją do odwadniania osadów w oczyszczalniach ścieków, galwanizeriach, garbarniach oraz zakładach przemysłu spożywczego [Borowski, Kuczmaszewski 2005b].

W badaniach własnych wartości ciśnienia prasy filtracyjnej wynosiły od 0,3 MPa do 1,5 MPa (przeciętnie 0,5–0,6 MPa). Zagęszczając osady poszlifierskie uzyskano filtry o końcowym uwodnieniu 20–25% [Borowski, Kuczmaszewski 2005b]. Filtry można dosuszać dalej w sposób naturalny na poletku lub w suszarkach elektrycznych. Po dosuszeniu i ujednorodnieniu stanowią one materiał drobnoziarnisty o konsystencji sypkiej.



### 1.2.2. Odpady sypkie

Przygotowanie odpadów sypkich do zagęszczania obejmuje [Borowski 2008a]:

- dozowanie,
- transport,
- rozdrabnianie,
- przesiewanie i separację,
- mieszanie.

Dozowniki umożliwiają również mieszanie materiału w cylindrze maszyny przetwórczej lub podczas transportu przenośnikiem ślimakowym [Borowski 2009d]. Zbiornik dozownika jest wyposażony w mieszadło zapobiegające zawieszaniu się dozowanego komponentu. Możliwe jest przyłączenie kilku dozowników podających różne komponenty bezpośrednio do łącznika albo połączenie ich w stację dozującą z udziałem mieszalnika dającego wstępne wymieszanie składników przed podaniem do maszyny przetwórczej lub na transporter ślimakowy. Odpady mogą być dozowane bezpośrednio z silosów, kontenerów, pojemników lub worków.

Masy sypkie są transportowane najczęściej przenośnikami [Borowski 2005]:

- taśmowymi – służące do transportu materiałów luzem i zapakowanych w worki; wykonywane jako stałe, przejezdne, otwarte, kryte lub obrotowe;
- ślimakowymi – rurowe i korytkowe, o zmiennym skoku i różnej wydajności; wykonywane ze stali węglowej, kwasoodpornej lub odpornej na ścieranie;
- kubelkowymi – do transportu pionowego materiałów, o szerokim zakresie wydajności, wykonywane ze stali węglowej lub nierdzewnej;
- rynnami aeracyjnymi – do transportu materiałów pod niedużym kątem nachylenia do poziomu.

Podczas rozdrabniania odpadu do ziaren o określonych wymiarach następuje ujednocianie części. Do rozdrabniania słomy i trocin stosowano rozdrabniacze tnące [Borowski 2009c]. Do rozdrabniania odpadów mineralnych i skalnych stosuje się kruszarki: szczękowe, udarowe, walcowe, młotkowe, stożkowe lub kubizatory. Szeroko stosowane są kruszarki młotkowe do dokładnego i średniego kruszenia takich materiałów, jak: wapienie, kamień gipsowy, łupki, wapno palone i węgiel kamienny.

Przesiewanie, czyli sitowe frakcjonowanie według średnicy ziarna, prowadzone jest na sucho. Dostępne są różne rodzaje przesiewaczy: wstępne, klasyfikujące, odwadniające, odpylające oraz oczyszczające [Borowski, Kuczmaszewski 2005].

W przeróbce kopalni przesiewaniem nazywane jest sortowanie kruszywa i fragmentów skał za pomocą sit o różnych rozmiarach oczek, podobnie jak to ma miejsce w analizie sitowej [Lutyński 2005].

Mieszanie umożliwia ujednoczenie składu masy i dokładne rozproszczenie spoiwa na powierzchni ziaren, a również rozdrobnienie grudek masy do pojedynczych ziaren. Do mieszania odpadów ziarnistych proste i wygodne w stosowaniu są mieszarki bębnowe z mieszadłami łopatkowymi i ślimakowymi. Ważne jest, aby prędkość kątowna bębna  $\omega$  była mniejsza niż prędkość krytyczna  $\omega_{kr}$ , w której proces mieszania nie następuje, a wsad obraca się wraz z bębniem rozrzucony siłą odśrodkową na ściankach. Stopień napełnienia komory wynosi zwykle 0,7–0,8 [Borowski, Kuczmaszewski 2005b].

### 1.3. Aglomeracja odpadów

Aglomeracją to trwałe połączenie drobnych cząstek odpadu w większe skupiska zwane aglomeratami [Heim 2005]. Według tego autora aglomeracja występuje często niezależnie lub nawet wbrew zamiarom użytkownika i określana jest wtedy jako zbrylanie.

Najczęściej stosowane sposoby aglomeracji mas ziarnistych to:

- zestalanie,
- kompaktowanie,
- granulowanie,
- brykietowanie.

Zestalanie jest pod względem technologicznym najprostszą metodą aglomeracji materii ziarnistej i wymagająca najmniejszego nakładu energii [Rosik-Dulewska 2008]. Do zestalania stosowane są spoiwa mineralne, a przede wszystkim cementy. Sposób ten nie wymaga dużych nakładów inwestycyjnych i może być stosowany np. w zakładzie produkującym betonowe elementy budowlane.

W celu polepszenia związania cementu lub uzyskania lepszych właściwości betonów można stosować różne domieszki [Osiecka 2005]. W tabeli 1 przedstawiono podstawowe rodzaje domieszek stosowanych w mieszankach do zestalania wyrobów wykorzystywanych w przemyśle budowlanym.

**Tabela 1.** Podstawowe rodzaje domieszek i efekty ich zastosowania [Osiecka 2005]

Rodzaj domieszek	Przykłady domieszek	Efekty zastosowania
Uplastyczniające i upłynniające	lignosulfonian wapnia, żywica melaminowa, polikarboksylany	zwiększenie ciekłości mieszanki lub zwiększenie wytrzymałości
Przyspieszające wiązanie lub twardnienie	mrówczan wapnia	szybki przyrost wytrzymałości bez obróbki cieplnej
Opóźniające wiązanie	fosforan wapnia	utrzymywanie mieszanki w stanie ciekłym
Napowietrzające	abietynian sodu	wzrost odporności na warunki atmosferyczne
Przeciwrozowe	rodanek sodu	zwiększenie mrozoodporności
Uszczelniające	mikrokrzemionka	zmniejszenie nasiąkliwości

Granulowanie jest metodą bezciśnieniowej aglomeracji materiału w celu uzyskania produktu o zwiększonej wytrzymałości mechanicznej [Heim 2005]. Metoda ta była także realizowana przy stosowaniu zwiększonego ciśnienia (ciśnieniowo) w temperaturze otoczenia lub odpowiednio podwyższonej, w przesypującej się lub mieszanej warstwie materiału [Robak, Matuszek 2008].

Spoiwa zwiększa wytrzymałość produktu. Spoiwo do granulacji powinny charakteryzować [Altun i in. 2001]:

- zdolność wiązania poszczególnych rodzajów surowca,
- nadawanie odpowiedniej wytrzymałości mechanicznej granulom surowym i po okresie sezonowania lub utwardzenia,
- odporność na temperaturę,
- niewielka emisja zanieczyszczeń do atmosfery w razie spalania,
- brak substancji szkodliwych i toksycznych po rozpuszczeniu w wodzie,
- niski koszt pozyskania i przygotowania.

W wyniku granulowania otrzymuje się zwykle regularne granulki o porowatej strukturze, kształtach zbliżonych do kulistych i wymiarach kilkunastu milimetrów. Mają one znacznie większą gęstość nasypową niż materia wyjściowa [Hejft, Obidziński 2006].

Do przetwarzania materiałów droбноziarnistych najczęściej stosuje się granulowanie przesypowe na talerzu granulacyjnym. Pojedyncze ziarna tworzą trwałe aglomeraty tylko wtedy, gdy występują odpowiednio duże siły łączące te ziarna. Wymaga to dużego rozdrobnienia ośrodka sypkiego oraz utrzymania jego wilgotności na stałym poziomie [Hejft, Obidziński 2006].

Typowa zawartość wody granulatu wynosi od 11 do 20%, w zależności od rodzaju materii, i jest większa w masach o porowatych ziarnach, np. w popiołach lotnych. Granulki mogą mieć maksymalną średnicę ok. 20 mm. Według Robak i Matuszak [2008] wydajność granulowania gwałtownie się zmniejsza wraz ze wzrostem rozmiaru średnic granulek.

Wytrzymałość mechaniczna granulatu jest stosunkowo niewielka. Decydują o tym zarówno warunki formowania granulek, jak i stopień ujednorodnienia mieszaniny [Heim 2005].

Brykietowanie jest aglomeracją ciśnieniową umożliwiającą uzyskanie dużego stopnia zagęszczenia materii. Wymaga to zwiększeniem nakładu energetycznego [Hejft 2008].

Brykietowanie jest metodą otrzymania aglomeratów o różnych kształtach oraz wymiarach większych niż granulaty. Istotą brykietowania jest to, że w wyniku wywierania nacisku na materiał ziarnisty następuje wzajemne zbliżenie ziaren. Bliski bezpośredni kontakt ziaren sprzyja adhezji, która ma istotny wpływ na powierzchniowe łączenie (zespalenie) ziaren materiału [Drzymała 1993].

Do brykietowania najczęściej stosowane są prasy stemplowe, ślimakowe i walcowe [Hryniewicz 1997, Heim 2005]. Prasy stemplowe umożliwiają stosowanie wysokich nacisków. Ze względu na małą wydajność są stosowane w produkcji małoseryjnej oraz w badaniach laboratoryjnych. Prasy walcowe mają natomiast dużą wydajność. Najczęściej brykietuje się w nich drobnoziarniste materiały mineralne oraz odpady poprodukcyjne [Drzymała, Hryniewicz 1994, Giemza i in. 2007, Lazaro i in. 2007, Yusofa i in. 2005].

W wyniku brykietowania otrzymuje się zbrylony produkt, o określonym kształcie i wymiarach oraz dużej wytrzymałości mechanicznej. Brykietuje się masy włókniste wielokształtowe, przy czym mogą to być rozmaite mieszanki [Hejft 2002]. Masy włókniste powinny być rozdrobnione do stanu utraty ich sprężystości. Brykietowanie materiału włóknistego prowadzi praktycznie do zaniku jego dotychczasowej struktury i co za tym idzie niektórych właściwości, np. termoizolacyjnych.

Brykietowanie jest metodą dobrze znaną i często stosowaną do scalania materiałów sypkich z dodatkami wiążącymi (lepiszczami lub spoiwami) [Babanin, Eremin 2006; Hryniewicz 1997; Robak, Matuszek 2008]. Dodanie lepiszcza wpływa znacząco na zwiększenie wytrzymałości mechanicznej brykietów [Hryniewicz i in. 2006]. Dalszą poprawę właściwości mechanicznych uzyskuje się przez zastosowanie sezonowania brykietów [Borowski 2011d]. Dzięki tej właściwości brykiety można załadować, transportować i składować do czasu zagospodarowania, bez obawy o utratę ich spójności.

Brykietowanie odpadów spełnia zatem ważną rolę w gospodarce ze względu na umożliwienie racjonalnego wykorzystania bazy surowcowej i zasobów energii oraz spełnienie wymogów ochrony środowiska [Dec 1999; Drzymała, Hryniewicz 1999; Herting, Kleinebudde 2007; Kosturkiewicz 2005a; Loginov i in. 2001; Weyenberg i in. 2005].

## **1.4. Brykietowanie odpadów**

### **1.4.1. Brykietowanie odpadów hutniczych**

Zbrykietowane odpady hutnicze mogą być wykorzystane, najczęściej przez przetopienie w piecu elektrycznym [Babanin i in. 2006, Borowski i in. 2005, Karbowniczek i in. 2005].

Dobre brykiety uzyskano z odpadów walcownia stali – zendry hutniczej i pyłów żelazonośnych [Hryniewicz 2004], stosując melasę jako lepiszcze [Hryniewicz i in. 2006]. Wytworzono również brykiety bezlepiszczowe wyłączenie z pyłów żelazonośnych, stosując w tym celu brykietowanie na gorąco w temperaturze 500 °C, a następnie schładzanie brykietów do temperatury ok. 130 °C [Kaczmarczyk, Król 2007].

Brykietowano także szlamy konwertorowe z mokrego oczyszczania gazów konwertorowych. Brykiety stanowiły substytut złomu dodawanego jako wsad do przetopu w piecach stalowniczych [Hryniewicz i in. 2003]. Przygotowanie szlamów konwertorowych wymagało odwodnienia w prasie filtracyjnej do 15% oraz dodania lepszczu. Stosowano melasę oraz wapno palone, co wyeliminowało dalsze dosuszanie mieszanki. Do mieszanki dodawano również koksik lub miął węgla jako materiał egzotermiczny, Uzyskane brykiety sezonowano co najmniej 24 godziny, dzięki czemu nabywały one wytrzymałości mechanicznej wymaganej dla komponentów wsadu pieców stalowniczych.

Szczególnie uciążliwym odpadem są zaolejone mułki zgorzelinowe. Do mieszanki odpadów dodawano wapno palone, hydratyzowane lub pokarbidowe oraz melasę [Hryniewicz i in. 2006]. Mieszanę tę brykietowano w prasie walcowej. Brykiety utylizowano w piecu elektrycznym. Nie ulegały one rozpadowi podczas wytopu, a wydzielające się w wysokiej temperaturze gazowe składniki węglowodorowe nie stanowiły zagrożenia dla środowiska naturalnego.

Brykiety wytwarzano również z mieszaniny manganowego pyłu wielkopieczowego (odpadu z maszyny odlewniczej) oraz melasy [Kaczmarczyk, Król 2007]. Po sezonowaniu przez 24 godziny uzyskiwały dużą wytrzymałość mechaniczną, nie kruszyły się podczas transportu i stanowiły pełnowartościowy komponent wsadu wielkopieczowego w procesie wytapiania surówek odlewniczych.

W procesach hutniczych powstaje duża masa odpadów zawierających cynk. Do odpadów tych należą szlamy z cynkowania ogniowego, szlamy z elektrolizy cynku oraz pyły z elektrostalowni. Zagospodarowanie tych odpadów polegało na przetworzeniu tlenku cynku w procesie przewalowym, a następnie ich brykietowaniu. Brykiety wykorzystywano jako komponent uzupełniający wsad pieca szybowego do wytopu cynku i ołowiu [Hryniewicz 2002].

Tlenki cynku brykietowano na gorąco w temperaturze 550–800 °C [Drzymała i in. 2000]. Sposób ten okazał się energochłonny i wymagał stosowania skomplikowanej prasy walcowej, o wysokich kosztach eksploatacji. Ponadto brykiety rozpadały się po kilku dniach.

W innym sposobie brykietowania tlenku cynku na zimno uzyskano wyroby o wymaganej wytrzymałości mechanicznej dzięki stosowaniu lepszczu w postaci szkła wodnego (metakrzemianu sodu) [Babanin i in. 2007]. Niezbędna była także zmiana kształtu wgłębień formujących na powierzchniach walców brykieciarki.

Podczas wytwarzania cynku metodą hydroelektrometalurgiczną powstaje odpad zwany gąbką kadmową. Zagospodarowanie tego odpadu polegało na odwodnieniu i odpowietrzeniu, a następnie brykietowaniu w prasie walcowej. Brykiety stosowano jako wsad pieca elektrycznego, gdzie roztopiały się z destylacją kadmu [Orewczyk i in. 2001].

### 1.4.2. Brykietowanie odpadów łożyskowych

Podczas szlifowania kulek łożyskowych oraz innych elementów ze stali łożyskowej powstają drobne odpady z dużą zawartością żelaza. Odpady te występują w postaci szlamu zanieczyszczonego olejem i są zaliczane do grupy niebezpiecznych ze względu na zawartość związków chromu. Zagospodarowanie tych odpadów polegało na przetworzeniu ich metodą brykietowania w prasach walcowych oraz skierowaniu brykietów do przetopienia w piecach hutniczych [Hryniewicz i in. 2003, 2004; Borowski i in. 2005].

W ramach przygotowania odpadów do brykietowania w pierwszej kolejności określono skład chemiczny, właściwości fizyczne, rodzaj i zawartość lepiszcza oraz korzystną zawartość wody mieszanki. Jako lepiszcze stosowano m.in. melasę [Borowski i in. 2005a].

Możliwe jest także wytworzenie brykietów z odpadów przemysłu łożyskowego, zawierających jako dodatek lepiszcze dwuskładnikowe – w postaci melasy oraz wapna hydratyzowanego [Hryniewicz i in. 2003].

Do brykietowania odpadów łożyskowych stosowano prasę walcową wraz z układem formującym umożliwiającym wytwarzanie brykietów w kształcie „siodła”. Uzyskano trwale i wytrzymałe brykiety spełniające dopuszczalne wymagania hutnictwa i nadające się do wykorzystania jako komponent wsadu pieca stalowniczego [Borowski 2006a]. Brykiety przed przetopem sezonowano co najmniej przez 120 godzin.

Przetapianie brykietów prowadzono w łukowym piecu elektrycznym [Borowski, Lenik 2008]. Wsad składający się ze złomu stalowego oraz brykietów nagrzewano do temperatury około 1580 °C, aż ulegał roztopieniu. Następnie odlewano uzyskaną fazę ciekłą, a po jej zakrzepnięciu oceniano skład chemiczny stopu metalowego. Stwierdzono, że skład chemiczny kąpieli metalowej z brykietami jest zbliżony do składu chemicznego kąpieli powstałej po stopieniu samego złomu. Podczas przetopienia zawartość chromu uległa znacznemu zmniejszeniu i była zbliżona do zawartości w większości stali węglowych. Zauważono ponadto, że wprowadzenie brykietów do wytapiania stali nie powodowało zwiększonej emisji uciążliwych pyłów do atmosfery, a zawarte w brykietach węglowodory ulegały rozkładowi.

Zastąpienie we wsadzie pieca stalowniczego części złomu wytworzonymi brykietami okazało się w pełni uzasadnione i korzystne w procesie zagospodarowania żelazonośnych odpadów łożyskowych [Borowski, Lenik 2008].

### 1.4.3. Brykietowanie odpadów węgla i biomasy

W przetwórstwie górniczym powstają znaczne ilości drobnych części węgla jako produkty uboczne lub odpady. Wielu badaczy wskazuje na możliwość



stosowania brykietowania tych materiałów w celu uzyskania wyrobów wykorzystywanych jako nośniki energii w obiektach energetycznych [Majchrzak i in. 2005; Ściążko i in. 2006; Zawistowski i in. 2003].

Brykietowanie jest celowe do scalania drobnoziarnistych węgli oraz ich mieszanek z różnymi dodatkami [Hycnar 2006, Szpadt 2007, Kalembasa i in. 2007]. Produkowane obecnie brykiety zawierają miał węgla kamiennego, węgla brunatnego i koksu, często z dodatkiem trocin, torfu, słomy lub innych surowców [Lazaro i in. 2007]. Drobnoziarniste frakcje węglowe stanowią 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 [Boruk, Winkler 2009].

Znaczne ilości pyłów i proszków węglowych są składowane w osadnikach lub w wyrobiskach górniczych. Dotyczy to także m.in. fosfogipsów, w odniesieniu do których brak obecnie innego sposobu unieszkodliwiania [Hycnar i in. 2005].

Duże ilości mułów i miałów węgla czynią 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 Hycnar i in. [2005] rozwiązania pozwalają na zagospodarowanie nawet niskoenergetycznych odpadów węglowych. Węgiel drobnoziarnisty należy do materiałów wykazujących małą podatność na scalanie w prasach do brykietowania. Pożądane są więc działania mające na celu zmianę właściwości tego materiału.

Prowadzone przez Plíštil i in. [2005] badania scalania materiałów roślinnych wykazały ich dobrą podatność na scalanie, pod warunkiem odpowiedniego rozdrobnienia i suchości.

Spalanie biomasy wydziela dużo części lotnych, a spalanie węgla obfituje popiołem [Isobe i in. 2004]. 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 [Niedziółka, Zuchniarz 2006].

Biomasa jest przetwarzana w instalacjach nie wymagających dużych wydatków energii. Brykiety na ogół nie zawierają żadnych substancji wiążących i powstają w wyniku sprasowania samych trocin lub zrębków.

Brykiety i pelety najczęściej produkuje się ze zrębków wierzby energetycznej. Szacuje się, że z każdego hektara można uzyskać od 25 do 45 Mg zrębków [Niedziółka, Zuchniarz 2006]. Innym źródłem biomasy mogą być szybko rosnące topole lub wikliny.

W porównaniu ze spalaniem węgla zastosowanie mieszanek węglowo-biomasowych skutkuje zmniejszeniem emisji dwutlenku siarki do atmosfery, dzięki czemu nie jest wymagane odsiarczanie spalin [Wisł, Matwiejew 2005]. Współspalanie biomasy z węglem ma wiele zalet w porównaniu ze spalaniem tych paliw oddzielnie [Liszka, 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. 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 ok. 8%. Uzyskane wyniki prób spalania potwierdziły niewielki wpływ udziału biomasy na skład chemiczny uzyskanego popiołu. Spowodowane jest to znacznie mniejszą zawartością popiołu w biomacie 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 węgla (ok. 1000 °C i więcej). Z powodu niższej temperatury mięknięcia popiołu podczas spalania mieszanki węgla i biomasy ulega zwiększeniu prędkość 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, 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, 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 zapewniały kotły fluidalne. Należy zwrócić uwagę, że w procesie spalania w tych kotłach nie jest konieczne ani brykietowanie, ani granulowanie mieszanki [Hycnar 2006].

Sołtys [2005] opisał technologię produkcji brykietów węglowo-biomasowych zawierających ok. 20% wagowych biomasy. Jako wsad węglowy stosowano 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 [Borowski 2006b, 2009b].

#### **1.4.4. Popioły i żużle energetyczne**

Spalanie węgla i brykietów węglowych skutkuje powstawaniem dużych ilości żużli i popiołów lotnych. W ciągu roku w Polsce powstaje ok. 24 mln Mg popiołów i żużla. Tylko ok. 15% tej ilości wykorzystuje się gospodarczo [Lorenz 2005].

Dużym odbiorcą popiołów lotnych jest przemysł cementowy. Spełniają one rolę kruszywa i częściowo spoiwa w produkcji betonów komórkowych. Uzyskuje się wyroby o dobrych własnościach technicznych przy zmniejszonych kosztach produkcji [Gawlicki i Roszczyniński 1995, Jabłoński 1996]. W produkcji betonów kruszywowych popioły spełniają rolę drobnych kruszyw i częściowo zamiennika cementu. Poprawiają urabialność i zmniejszają ciepło hydratacji betonów, zwiększają szczelność i odporność na działanie siarczanów [Kosior-Kazberuk i Lelusz 2010].

Popioły lotne stosowane są jako dodatki aktywne. Zmieszane z klinkierem portlandzkim biorą udział w reakcjach chemicznych zmieniając cechy użytkowe spoiwa i prowadząc do powstania cementu pucolanowego. Stosuje się również popiół jako składnik masy surowcowej, z której wypalany jest klinkier portlandzki [Gawlicki, Roszczyniński 1995]. Popiół zwiększa masę cementu oraz poprawia jego mrozoodporność i odporność na działanie czynników agresywnych. Dodatek popiołu zmniejsza także skurcz betonów.

Popioły lotne i mikrosfery stosowano do produkcji niektórych odmian betonów i zapraw, w tym kompozytów betonowych [Kaszyńska 1994]. Dodatki popiołowo-mikrosferowe okazały się czynnikiem sprzyjającym w ochronie

kompozytów betonowych przed korozją. Możliwa jest też zamiana nawet do 30% cementu przez popiół w mieszance betonowej betonów wysokowartościowych. Na przykład Cementownia Kujawy przy produkcji 900 tys. Mg cementu wykorzystwała 270 tys. Mg popiołów zwilżonych oraz ok. 60 tys. popiołów suchych [Jabłoński 1996].

W górnictwie popioły lotne stosuje się do wypełniania wyrobisk podziemnych. Polega to na hydraulicznym włączaniu popiołów pod ciśnieniem 0,05–0,2 MPa [Pyssa 2005]. Stosowano je ponadto do „ekranowania” składowisk odpadów górnictwa węglowego. Powierzchnie składowiska pokrywa się warstwą uszczelniającą utworzoną z pulpy popiołowo-wodnej, gdzie udział popiołów wynosił 70%.

Popioły lotne stosuje się również do wyrobów ceramicznych, takich jak: cegły pełne, cegły kratówki, dziurawki oraz pustaki szczelinowe. Materiały te mogą być produkowane z surowców zawierających do 90% popiołów [Piotrowski, Uliasz-Bocheńczyk 2008].

Mieszkankę cementowo-popiołową stosuje się do budowy korpusu wałów przeciwpowodziowych. Mieszanka popiołu z niewielką ilością cementu poprawia właściwości wytrzymałościowe, a ponadto zastosowana w korpusie wału powoduje wystąpienia agregatów, tj. dużych zbrylonych kawałków, które usztywniają konstrukcję i nadają jej bardzo dobrą stateczność [Kosior-Kazberuk, Lelusz 2010].

Od wielu lat są prowadzone prace nad zastosowaniem popiołów do budowy nasypów komunikacyjnych oraz podbudowy dróg lokalnych [Pachowski 1976]. Wykorzystanie popiołu pozwala na znaczne obniżenie kosztu przy uzyskiwaniu takich samych parametrów stabilizacji, jakie są uzyskiwane przy zastosowaniu czystego wapna lub cementu. Takie wykorzystanie popiołu jest najprostszym sposobem utylizacji tych odpadów, niewymagającym dodatkowych procesów uszlachetniających oraz z zastosowaniem typowych maszyn do robót ziemnych. Jednym z przykładów takiej utylizacji popiołów jest wybudowana w 2003 r. droga do wsi Głogowiec w gm. Nowosolna, woj. łódzkie [Klimkiewicz 2004]. Wykorzystano popioły z Zespołu Elektrociepłowni Łódź S.A., gdzie powstaje 250 tys. Mg rocznie odpadów paleniskowych. Do podbudowy drogi o długości 1300 m i szerokości 4 m wykorzystano 3000 Mg popiołów i żużla, nawierzchnię natomiast wykonano z betonu. Koszt wybudowania drogi z betonu okazał się porównywalny z kosztem budowy drogi asfaltowej. Większa jest natomiast trwałość drogi betonowej oraz mniejszy koszt jej eksploatacji.

Popioły i żużle najczęściej wykorzystuje się do formowania korpusów dróg, stabilizacji gruntu oraz ulepszania warstwy spodniej i podbudowy dróg lokalnych o małym natężeniu ruchu [Granops 1994; Piotrowski, Uliasz-Bocheńczyk 2008]. Wykorzystanie popiołów i żużli w tym celu przedstawiono w tabeli 2.

**Tabela 2.** Wykorzystanie popiołów lotnych i żużli do budowy dróg [Huth, Kubisa 1996]

Część składowa drogi	Zastosowanie popiołu	Orientacyjne zużycie na 1 m <sup>2</sup> drogi (grubość 1 cm)	
		[%]	[kg·m <sup>-2</sup> ]
<b>Nawierzchnie bitumiczne</b>			
Bitumiczne warstwy powierzchniowe	wypełniacz	10–30	4
Bitumiczne warstwy wiążące	wypełniacz	6–18	2
Warstwy nośne	wypełniacz	14–24	3
<b>Warstwy nośne</b>			
Bitumiczne warstwy nośne	wypełniacz	10–30	4
Betonowe warstwy nośne	dodatek	2	1
Utwardzanie gruntu	grunt	30–100	30
<b>Warstwa spodnia, podbudowa</b>			
Wytwarzanie podbudowy	grunt	30–100	30
Ulepszanie warstwy spodniej i podbudowy	zamiast gruntu	30–100	30
<b>Pobocza</b>			
Wały chroniące przed hałasem	grunt	30–100	44

Z przedstawionych informacji wynika, że popioły sypkie stosuje się jako zamiennik cementu. Jednakże składowanie i transportowanie popiołów jest uciążliwe, ze względu na pylenie i znaczną objętość. Coraz częściej zatem poddaje się popioły granulowaniu lub brykietowaniu w prasie walcowej [Baykal, Doven 2000; Flore i in. 2009; Kuczyńska 2008].

Opracowano technologię granulacji w granulacjach talerzowych odpadów z płuczek węglowych i popiołów elektrowniowych, umożliwiającą wytworzenie lekkich kruszyw do zapraw betonowych oraz materiałów budowlanych [Białowiec i Janczukowicz 2009, Kępys 2008].

Podjęto też próby brykietowania odpadów elektrowniowych. Materiałem wyjściowym była mieszanina pyłów i popiołów z substancjami wiążącymi. Jako substancje wiążące stosowano pochodne celulozy (metylocelulozę, hydroetylocelulozę), a ponadto substancje przyspieszające twardnienie (tlenek wapnia i magnezu) oraz substancje grafitujące (grafit i aluminium) [Bultmann 2002].

Do wytwarzania brykietów stosowano również mieszaninę popiołu lotnego i włókien mineralnych z dodatkiem gliny oraz wapna hydratyzowanego. Przetopienie brykietów w piecu hutniczym umożliwiło odzysk włókien mineralnych [Stolarski i in. 2003].

### 1.4.5. Brykietowanie popiołów ze spalania osadów ściekowych

W Polsce istnieje ponad 2200 oczyszczalni ścieków komunalnych oraz prawie 1700 oczyszczalni ścieków przemysłowych. Produkują one rocznie ok. 450 tys. Mg suchej masy osadów ściekowych, z czego 188 tys. Mg kierowane jest do składowania oraz do spalania [Siuta 2005; Bień 2007]. Produkty spalania także są składowane [Siuta 2002; Kosturkiewicz 2005a].

Podjęto próby brykietowania osadów ściekowych powstających po oczyszczeniu ścieków komunalnych [Hryniewicz i in. 2004]. Przygotowano mieszanki osadów ściekowych z dodatkiem wapna palonego jako lepiszcza i brykietowano w prasach walcowych z zasypem grawitacyjnym oraz wymuszonym [Fytli, Zabaniotou 2008; Kosturkiewicz i in. 2003]. Otrzymano wytrzymałe mechanicznie brykiety oraz wypraski.

Brykietowano również mieszanki osadów ściekowych z odpadowym wapnem palonym oraz z miałem węgla kamiennego w celu podwyższenia wartości opałowej. Okazało się jednak, że ze wzrostem udziału miału węgla kamiennego następuje spadek wytrzymałości mechanicznej brykietów [Ściążko, Zieliński 2003].

Prowadzi się współspalanie osadów ściekowych z węglem w kotłach z rusztem posuwisto-zwrotnym lub walcowym. Osady współspalane z węglem powinny być odpowiednio odwodnione. W mieszance do współspalania stosowano maksymalnie 10% udziału osadów ściekowych [Kosturkiewicz 2006a,b].

Śladczyk i Niemczyk [2006] stosowali osady ściekowe jako składnik paliwa w piecu cementowym do produkcji klinkieru. Przetworzone osady mogą być alternatywnym paliwem w piecu cementowym [Pawłowski 2011].

Kolejną możliwością termicznego przekształcania osadów ściekowych jest ich współspalanie z odpadami komunalnymi. Proces współspalania prowadzi się w piecach obrotowych lub rusztowych. Wadą pieców obrotowych są duże rozmiary bębnow oraz wysokie straty ciepła spowodowane promieniowaniem i unoszeniem wraz ze spalinami [Mokrzycki, Uliasz-Bocheńczyk 2006].

Spalanie osadów stwarza jednak problemy zagospodarowania popiołu z komór spalania, odfiltrowanego popiołu lotnego, sorbentów oraz odprowadzanych ścieków technologicznych [Mokrzycki, Uliasz-Bocheńczyk 2006; Juraszka, Piecuch 2007; Bień, Wystalska 2009].

Współczesne instalacje do termicznego unieszkodliwiania odpadów pozwalają na emitowanie do atmosfery gazu spalinowego o znikomej zawartości szkodliwych substancji chemicznych, metali ciężkich i pyłów. Substancje szkodliwe pozostają jednak w popiele lub są wylapywane na sorbentach pozostających jako wtórny odpad po procesie spalania [Pająk 2005]. Zarówno popioły, jak i zużyte sorbenty, należy traktować jako materiały potencjalnie toksyczne (tab. 3).

**Tabela 3.** Zawartość metali ciężkich w osadach ściekowych [Pająk 2009]

L.p.	Pierwiastek	Typowe zawartości [mg·kg <sup>-1</sup> s.m.]	Ekstremalne zawartości [mg·kg <sup>-1</sup> s.m.]
1	Ołów	100 – 500	2970
2	Kadm	1 – 20	562
3	Cynk	2500 – 4000	10 000
4	Miedź	200 – 500	1250
5	Nikiel	100 – 300	950
6	Chrom	250 – 700	17 075

Jednym ze sposobów zagospodarowania popiołów ze spalania osadów ściekowych jest zestalenie w kompozycjach cementowych lub za pomocą żywic syntetycznych [Kępyś 2010].

Stosowano także powlekanie zestalonych produktów substancjami hydrofobowymi w celu zabezpieczenia przed pyleniem i wypłukiwaniem zanieczyszczeń. Tak zabezpieczona ostateczna pozostałość po spalaniu odpadów mogła być bezpiecznie składowana na składowiskach odpadów komunalnych [Kępyś 2010].

## 1.5. Zeszklwienie odpadów

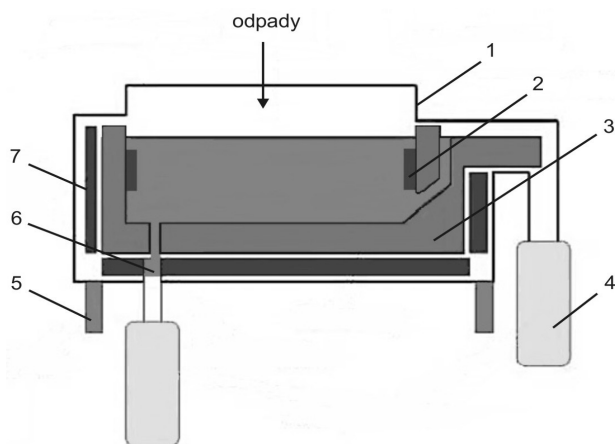
Jednym ze sposobów unieszkodliwienia osadów ściekowych jest granulowanie, a następnie spiekania lub zeszklwienie (witryfikacja) [Góralczyk i in. 2009]. Zeszklwienie stosuje się też do neutralizacji odpadów o złożonym składzie chemicznym i niekorzystnych właściwościach fizycznych, np. odpadów miedzionośnych, azbestu oraz żużli [Karamanov i in. 2007; Jackson i in. 2003; Lin, Weng 2001; Pelino 2000]. Stosowane jest też często do unieszkodliwiania odpadów radioaktywnych [Komarov i in. 2005; Cocic i in. 2010; Connelly i in. 2011; Ojovan, Lee 2011; Borowski, Wośko 2013]. Zeszklwienie stosuje się również do unieszkodliwiania popiołów z elektrociepłowni lub ze spalarni odpadów, szlamów garbarskich i poflotacyjnych, a także odpadów zawierających związki siarki i ołowiu [Pisciella i in. 2001, Xiao i in. 2008; Ribeiro i in. 2010; Bernardo, Dal Maschio 2011; Ingunza i in. 2011].

Zeszklwienie osadów ściekowych jest korzystne ze względu na dezaktywację metali ciężkich [Xu i in. 2010; Zou i in. 2011]. Stosując tę metodę uzyskano produkty o właściwościach umożliwiających ich wykorzystanie, głównie w przemyśle ceramicznym i budownictwie [Liew i in. 2004; Bernardo, Dal Maschio 2011; Żygadło, Latosińska 2008].

Zeszklwienie drobnoziarnistych mas przeprowadzano bez żadnych substancji dodatkowych, w specjalnych tyglach grzewczych. Podjęte próby

modyfikacji składu odpadów polegały na dodaniu substancji, które obniżyły temperaturę topnienia mieszanki podczas nagrzewania [Lin 2006, Uzunow 2009, Zhang i in. 2011].

Oprócz związków mineralnych unieszkodliwiane są również związki organiczne [Jordan i in. 2005]. Wymaga to dostarczenia znacznej ilości energii cieplnej i zastosowania specjalnych instalacji grzewczych. Do zeszkliwienia odpadów stosowane są instalacje jednostopniowe i dwustopniowe [International Atomic Energy Agency (IAEA) 2006]. W procesie jednostopniowym, w specjalnych tyglach nagrzewa się substancję do temperatury rzędu 1300–1450 °C, w której zachodzi częściowe upłynnienie odpadów, a następnie kontynuuje się wygrzewanie, aż zakończy się migracja składników (rys. 1).



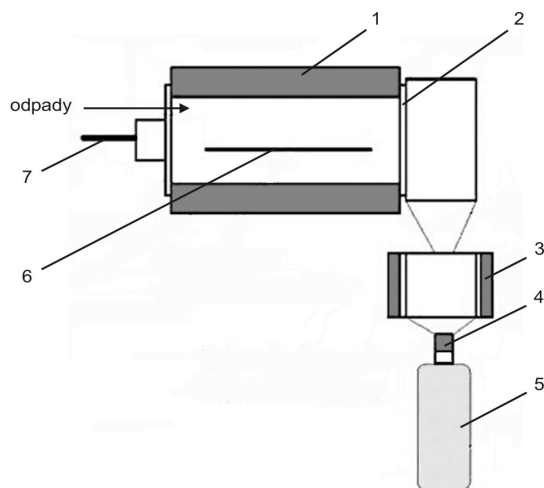
**Rys. 1.** Jednostopniowa instalacja do zeszkliwienia odpadów [IAEA 2006]:

- 1 – obudowa zbiornika, 2 – elektrody, 3 – wykładzina żaroodporna,
- 4 – zbiornik, 5 – przechylnia, 6 – kanał spustowy, 7 – przegrody chłodzące

W instalacji jednostopniowej konieczne jest dodanie rozdrobnionego szkła, który pełni rolę topnika i doprowadza mieszankę do półpłynnej postaci, często w formie pasty [IAEA 2006]. W procesie dwustopniowym nagrzewanie oraz wygrzewanie substancji odbywa się w oddzielnych urządzeniach (rys. 2).

Do nagrzewania stosuje się komorowe piece ceramiczne lub piece tyglowe, w których materia jest roztapiana przez indukcyjny przepływ prądu o dużym natężeniu. W procesie dwustopniowym roztopia się odpady niebezpieczne trudne do przetopienia i zwykle nie stosuje się żadnych dodatków (topników).

Dużym problemem jest sanitacja zanieczyszczonej ziemi [Bielińska, Mocalek-Płóćniak 2009]. Ze względu na wysoką zawartość krzemu, glinu i innych elementów składowych, ziemia jest dobrym materiałem do zeszkliwienia [Colombo i in. 2003].



**Rys. 2.** Dwustopniowa instalacja do zeszkliwienia odpadów [IAEA 2006]:  
 1 – płaszcz grzewczy, 2 – kołnierz izolacyjny, 3 – nagrzewnica indukcyjna,  
 4 – zawór spustowy, 5 – zbiornik, 6 – belka, 7 – układ napędowy

Proces zeszkliwienia polega na wytworzeniu nieprzepuszczalnej i trwałej szklistej struktury w wyniku podgrzania substancji do stanu półpłynnego, a następnie szybkiego jej schłodzenia. Składniki substancji, na przykład związki metali ciężkich, zamykane są szczelnie wewnątrz tej struktury, co uniemożliwia ich migrację do otoczenia. Substancje niebezpieczne unieszkodliwiane są zarówno przez wiązanie cząsteczek w strukturze krystalicznej szkliwa, jak i przez hermetyzację. Trwale związane są takie pierwiastki jak fosfor, bor i krzem. Upłynniane są one podczas nagrzewania do fazy ciekłej i po schłodzeniu stanowią integralną część sieci krystalicznej szkliwa [Uzunow 2009].

Takie składniki odpadów jak kobalt, ołów, sód, magnez, lit i cez podlegają natomiast hermetyzacji. Składniki te stanowią intruzyjne dodatki uwięzione w strukturze sieci krystalicznej. Hermetyzacja w wyniku przenikania nietopliwych związków do sieci krystalicznej może zachodzić zarówno w trakcie nagrzewania rozdrobnionych odpadów z dodatkiem sproszkowanego szkła, jak i podczas schładzania [Bingham, Hand 2006].

Zeszkliwienie okazało się więc skuteczne do przetwarzania odpadów zawierających substancje niebezpieczne [Huang i in. 2007, Erol i in. 2008]. Pozytywne rezultaty uzyskano w badaniach procesu zeszkliwienia popiołów lotnych ze spalania pyłu węgla brunatnego i kamiennego, gdzie do przetapiania niemodyfikowanych popiołów lotnych wykorzystano metodą grzania oporowego w ceramicznym tyglu [Kordylewski i in. 2003]. Jako istotną wadę tego procesu określono konieczność poniesienia znacznych nakładów energetycznych w przeliczeniu na jednostkową masę wyrobu.

Mniejszy wydatek energetyczny uzyskano nagrzewając granulowane odpady w piecu obrotowym. Żygadło i Latosińska [2008] opracowali skład mieszanki, poddali granulowaniu oraz nagrzewali granule w temperaturze 1100–1200 °C. Po stopieniu powierzchni bryłek i przemianach fazowych chłodzono je w wodzie, doprowadzając do wytworzenia szklistej, szczelnej powłoki. Zachowany został więc pierwotny kulisty kształt bryłki, w przeciwieństwie do wytapiania w kadziach i tyglach. Zeszklone granulaty znalazły zastosowanie jako zamiennik keramzytu stosowanego w budownictwie, a także jako materiał do izolacji i drenaży w ogrodnictwie [Uzunow 2009].



# CZEŚĆ II

## BADANIA WŁASNE

### 2.1. Cel i problematyka badań

Realizację programu badań poprzedzono przyjęciem następującej tezy:

- zagospodarowanie wielu rodzajów odpadów drobnoziarnistych wymaga opracowania sposobów modyfikacji ich właściwości oraz formy.

Powyższa teza stanowi podstawę sformułowania celu naukowego i użytkowego pracy:

- **celem naukowym** jest opracowanie metod przetwarzania wybranych rodzajów odpadów na produkty użyteczne, w tym odpadów zawierających substancje niebezpieczne dla środowiska;
- **celem użytkowym** jest przekształcenie wybranych rodzajów odpadów w produkty użyteczne oraz bezpieczne dla środowiska.

Badania dotyczyły przetwarzania odpadów drobnoziarnistych na jednorodne bryły (brykiety), w wyniku czego odpady te nabyły odpowiednich właściwości fizycznych, chemicznych i mechanicznych. Badano właściwości brykietów w celu określenia możliwości ich wykorzystania z uwzględnieniem wymogów środowiska.

Przedstawiono następujące zagadnienia:

- analizowano literaturę dotyczącą przetwarzania odpadów drobnoziarnistych w aspekcie brykietowania;
- opracowano schemat badań przetwarzania wielu rodzajów drobnoziarnistych odpadów przemysłowych oraz oceny jakości produktów;
- przedstawiono metodykę badawczą;
- opracowano metody przetwarzania odpadów energetycznych do produkcji brykietów paliwowych;
- opracowano metody brykietowania popiołów ze spalania paliw (brykietów węglowych) do wykorzystania jako surowce budowlane;
- opracowano metody przetwarzania odpadów niebezpiecznych (ze spalania osadów ściekowych) na produkty przydatne w budownictwie;
- podsumowano wyniki badań i sformułowano wnioski.

## 2.2. Zakres badań

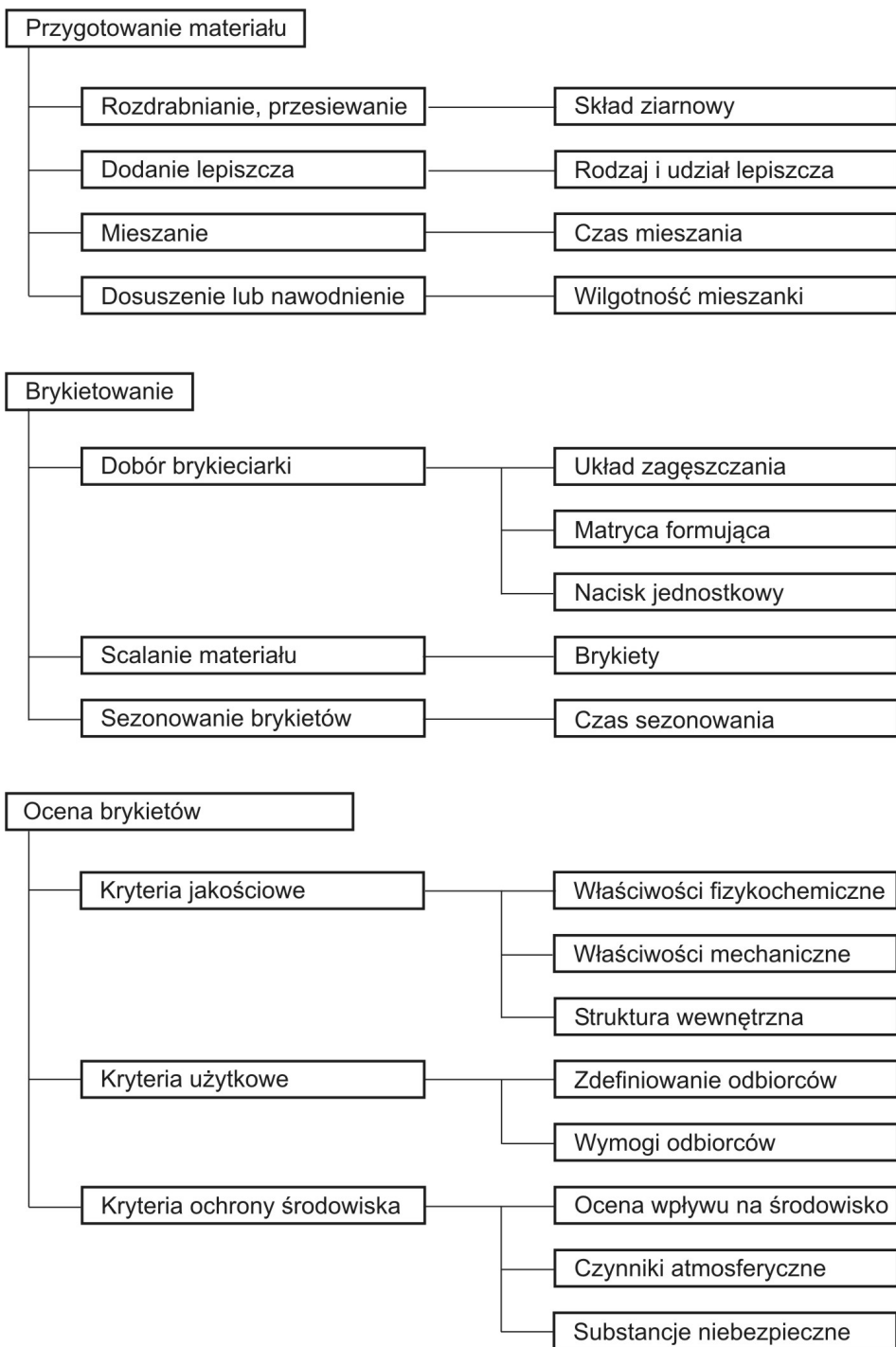
Z przeglądu literatury wynika, że na proces formowania i właściwości wyrobów wpływały, między innymi, przygotowanie mieszanki materiału oraz odpowiednie jej zagęszczenie w prasie do brykietowania. Dobór wszystkich parametrów przetwarzania często odbywało się w sposób intuicyjny i wymagało przeprowadzenia wielu prób.

Na podstawie dotychczasowej wiedzy teoretycznej i doświadczeń własnych opracowano uniwersalny schemat badań przetwarzania odpadów drobnoziarnistych (rys. 3). Doświadczenia własne przetwarzania odpadów przedstawiono w wielu publikacjach [Borowski, Kuczmazewski 2005a, Borowski 2006a,b, Borowski 2007b, Borowski 2008b, Borowski 2009a, Borowski 2010, Borowski 2011b, Borowski 2012c].

W oparciu o przedstawiony schemat określono następujący zakres badań własnych:

1. Określenie cech fizykochemicznych odpadów przeznaczonych do brykietowania.
2. Wyznaczenie optymalnej wilgotności mieszanki.
3. Ocena podatności na scalanie w zależności od rodzaju i zawartości lepiszcza.
4. Ocena wpływu parametrów mieszania na jednorodność mieszanki.
5. Badania symulacyjne brykietowania.
6. Eksperymentalne brykietowanie w celu określenia wpływu parametrów tych procesów na jakość brykietów.
7. Badania pilotowo-wdrożeniowe.
8. Ocena mechanicznych właściwości brykietów.
9. Ocena wpływu sezonowania brykietów.
10. Ocena wpływu czynników środowiska.
11. Określenie odporności brykietów z uwzględnieniem warunków atmosferycznych.
12. Ocena struktury wewnętrznej brykietów.
13. Określenie wartości użytkowych brykietów.
14. Ocena oddziaływania substancji niebezpiecznych.

Zgodnie ze schematem (rys. 3) badania przetwarzania odpadów drobnoziarnistych zrealizowano w trzech etapach. W pierwszym etapie badano proces ujednorodnienia odpadów do określonej frakcji ziarnowej, dobrano rodzaj i udział lepiszcza, dobrano zawartość wody mieszanki oraz czas mieszania. Odpowiednią frakcję ziarnową uzyskano przez rozdrabnianie i przesiewanie. Następnie dodano lepiszcze organiczne lub mineralne. W wielu wypadkach korzystny udział



**Rys. 3.** Schemat badań przetwarzania odpadów droбноziarnistych

lepiszcza wynosi 5–10% masy mieszanki. W trakcie mieszania korygowano zawartość wody zależnie od rodzaju układu formującego i urządzenia do scalania w brykiety. Stosując prasy stemplowe zawartość wody mieszanki doprowadza się do zakresu 5–9%, natomiast przy stosowaniu pras walcowych zawartość wody jest większa i wynosi kilkanaście procent, a nawet dochodzi do 25% [Borowski 2011d].

W drugim etapie dokonano wyboru prasy oraz urządzeń do formowania brykietów. Stosując prasę stemplową oraz matrycę zamkniętą uzyskano prawidłowe brykiety przy stosunkowo małych siłach nacisku stempla, rzędu 20–80 kN. Stosowanie pras stemplowych jest zalecane do brykietowania materiałów trudnych do scalania innymi metodami [Hryniewicz, Janewicz 2008].

Wybierając prasę walcową należy dobrać walce z odpowiednimi wgłębieniami stanowiące matrycę otwartą, do której podaje się materiał w sposób ciągły z zasobnika, w którym może być on wstępnie zagęszczany. W prasach walcowych należy stosować duże siły docisku walca, rzędu 100–10 000 kN i więcej [Hryniewicz 1997, Hryniewicz i in. 2004].

Po uformowaniu brykietów stosowano ich sezonowanie, przez co najmniej 96 godzin. Sezonowanie brykietów bardzo wilgotnych jest poprzedzone intensywnym dosuszaniem w suszarkach termicznych.

W trzecim etapie dokonano oceny brykietów z uwzględnieniem kryteriów jakościowych, użytkowych oraz ochrony środowiska przy zastosowaniu odpowiednich laboratoryjnych przyrządów pomiarowych. Badania obejmują, między innymi, testy odporności mechanicznej, jednorodności struktury wewnętrznej, wodoodporności oraz wymywalności substancji niebezpiecznych. Istotne jest, aby ocena brykietów uwzględniała wymogi potencjalnych odbiorców związane z określoną przydatnością produkowanych brykietów. Na przykład brykiety paliwowe przeznaczone do spalania w kotłach muszą mieć możliwie dużą wartość energetyczną. Składniki stosowane jako spoiwa muszą również być łatwopalne i nie mogą pozostawiać szkodliwych związków w popiele oraz zanieczyszczać atmosfery podczas spalania.

## **2.3. Metodyka badań**

### **2.3.1. Określenie cech fizycznych odpadów**

Do badań wytypowano następujące odpady:

- muły i miały węgla kamiennego,
- popioły ze spalania brykietów węglowo-biomasowych,
- popioły ze spalania osadów ściekowych.

Odpady te występują w dużych ilościach – stanowią ponad 50% odpadów przemysłowych ogółem [Rocznik statystyczny przemysłu 2012]. Odzysk surowców, wynoszący średnio 70% jest nadal niewystarczający, dlatego podjęto próbę zintensyfikowania procesów odzysku.

Do określenia cech fizycznych wymienionych odpadów wykonano pomiary:

- składu granulometrycznego,
- zawartości wody,
- gęstości właściwej i usypowej,
- czasu mieszania.

Skład granulometryczny określono metodą analizy sitowej na sucho, zgodnie z PN-ISO 2591-1. Do badania pobrano losowo próbki odpadów o masie 200 gram.

Zawartość wody wyznaczono przy użyciu laboratoryjnej wagosuszarki firmy KETT, typu FD-620. Dokładność pomiarów wynosiła  $\pm 0,1\%$ , przy temperaturze suszenia ustawionej na wartość  $105\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Zawartość wody w procentach obliczono ze wzoru:

$$w = \frac{M_w}{M} \cdot 100\%, \quad (1)$$

ponieważ  $M = M_s + W$  to:

$$w = \frac{W}{M_s + W} 100\%, \quad (2)$$

gdzie:  $M_w$  – masa zawartej w ciele związanej mechanicznie wody, kg,

$M$  – masa wilgotnego ciała, kg,

$M_s$  – masa całkowicie suchego ciała, kg,

$W$  – masy wody, kg.

Gęstość właściwą określono według normy PN-75/B-04481 metodą piknometryczną, natomiast gęstość nasypową według normy PN-80/C-04532 za pomocą gęstościomierza.

Masę nasypową obliczano ze wzoru:

$$\rho_s = \frac{m_1 - m_0}{V_1} [\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}] \quad (3)$$

gdzie:  $m_1$  – masa napełnionego naczynia pomiarowego, kg,

$m_0$  – masa pustego naczynia pomiarowego, kg,

$V_1$  – objętość naczynia pomiarowego,  $\text{m}^3$ .

Czas mieszania komponentów dobrano eksperymentalnie za pomocą mikrowskaźników. Mikrowskaźnikami były cząstki żelaza o jednakowych rozmiarach, barwione na jaskrawy kolor barwnikami spożywczymi. Dodając porcję mikrowskaźników w procesie mieszania można szybko i niskim kosz-

tem zweryfikować homogenizację mieszanki. Stopień zmieszania oceniono obliczając udział cząsteczek mikrowskaźników w produkcie końcowym, używając mikroskopu i programu MicroScan for Windows. Program ten umożliwia obróbkę pobranego obrazu mikroskopowego przez ustawienie jasności, kontrastu bądź nasycenia. Wykorzystać można zestaw funkcji filtrujących, arytmetyczno-logicznych, poprawy kontrastu i segmentacji. Wykonuje się pomiary wielkości geometrycznych i obliczenie wielkości średnich, a także pól powierzchni i obwodu cząsteczek. Do mieszania stosowano elektryczną mieszarkę łopatkową (pionową). W trakcie mieszania dodawano lepiszcza w ilości wagowo od 5% do 10% masy materiału.

### 2.3.2. Dobór brykietciarki i parametrów pracy

Do brykietowania mieszanek odpadów wybrano następujące prasy:

1. Laboratoryjną prasę hydrauliczną PH-300 w Katedrze Podstaw Techniki Politechniki Lubelskiej. Maksymalna siła docisku stempla w tej prasie wynosi 300 kN, przemieszczenie stempla zaś 400 mm. Do prasy wykorzystano matrycę formującą własnej konstrukcji, umożliwiającą uzyskanie cylindrycznych brykietów o średnicy 30 mm i wysokości ok. 20 mm. Objętość uformowanego brykietu wynosiła ok. 14,1 cm<sup>3</sup>.
2. Przemysłową prasę walcową własnej konstrukcji, udostępnioną do testów w przedsiębiorstwie Grill Impex Sp. z o.o. Brykietciarkę tę charakteryzowały następujące parametry pracy:
  - prędkość obwodowa walców,  $v_w = 0,3 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ,
  - szczelina między walcami,  $a = 1,2 \text{ mm}$ ,
  - siła docisku walca,  $P_w = 400 \text{ kN}$ ,
  - moment obrotowy,  $M_o = 19 \text{ kNm}$ ,
  - wydajność prasy walcowej,  $W_p = 800 \text{ kg}\cdot\text{h}^{-1}$ ,
  - układ walców roboczych – poziomy,
  - średnica walców roboczych,  $D = 500 \text{ mm}$ ,
  - liczba rzędów wgłębień formujących,  $n = 7$ ,
  - liczba wgłębień w jednym rzędzie,  $k = 22$ ,
  - zasobnik grawitacyjny.

Matryca formująca umożliwiała uzyskanie brykietów osiowosymetrycznych w kształcie baryłki o rozmiarach 60 × 40 mm i objętości około 50 cm<sup>3</sup>.

Mieszanek dostarczano do zasobnika prasy walcowej przenośnikiem taśmowym. Brykiety po opuszczeniu komory walcowniczej spadały na ruszt separatora, gdzie nastąpiło oddzielenie podziarna, które przenośnikiem transportowano do kontenera. Podziarno z kontenera podawano ponownie do zasobnika brykietciarki.

### 2.3.3. Określenie stopnia zagęszczenia materiału

Nacisk stempla matrycy formującej w kształcie walca powoduje zagęszczenie materiału, a wielkość zmniejszenia jego objętości jest określana jako stopień zagęszczenia [Hryniewicz 1997]. Stopień zagęszczenia obliczono stosując zależność:

$$s = \frac{H_p}{H_p - l} [-], \quad (4)$$

gdzie:  $H_p$  – wysokość początkowa zagęszczanego materiału, m,  
 $l$  – przemieszczenie stempla, m.

### 2.3.4. Ocena wytrzymałości brykietów

Wytrzymałość mechaniczną brykietów określono na podstawie następujących testów laboratoryjnych:

- 1) testu odporności na zrzut grawitacyjny,
- 2) testu ściskania do momentu zniszczenia struktury brykietu.

Odporność brykietu na zrzut grawitacyjny oceniano przez procentowy ubytek masy po trzykrotnym zrzućeniu porcji brykietów z wysokości 2,0 m na stalową płytę o grubości 20 mm. Po każdym zrzućeniu przesiewano próbki przez sito o wymiarach oczek  $8 \times 8$  mm, które stanowią dopuszczalne minimalne wymiary brykietów przeznaczonych do utylizacji. Odporność brykietów na zrzut  $K$  obliczono z następującego wzoru:

$$K = \frac{M_z}{M} 100\%, \quad (5)$$

gdzie:  $M$  – masa brykietów przed zrzućeniem, kg,  
 $M_z$  – masa nadziarna pozostającego na sicie, kg.

Określona doświadczalnie minimalna odporność grawitacyjna na zrzut powinna wynosić co najmniej 90% [Hryniewicz 1997]. Oznacza to, że dopuszczalny ubytek masy przy załadunku, transporcie i rozładunku brykietów powinien wynosić powyżej 10%.

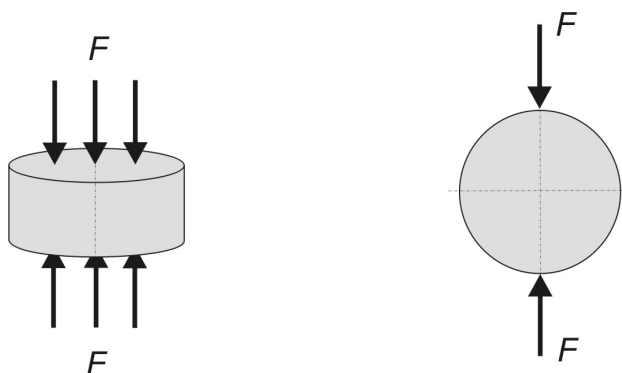
Testy ściskania brykietów wykonano wykorzystując maszynę wytrzymałościową Zwick Z100 w Politechnice Lubelskiej. Polegały one na ściskaniu brykietu umieszczonego między płaskimi szczękami urządzenia badawczego, aż do momentu jego uszkodzenia. Podczas procesu ściskania rejestrowano zależność nacisku jednostkowego stempla od jego przemieszczenia. W przypadku wykorzystania brykietów w energetyce wymagana minimalna wartości nacisku jednostkowego powinna wynosić co najmniej 1,0 MPa [Borowski 2008a, 2009a].

Wykorzystanie brykietów jako kruszywa w budownictwie stawia wyższe wymogi minimalnej wartości nacisku jednostkowego, która powinna wynosić co najmniej 2,5 MPa [Borowski 2010].

Dla brykietów o kształcie walcowym stosowano test osiowy ściskania, obciążenie przyłożono wzdłuż osi walca (rys. 4). Test ten polega na pomiarze siły wzdłużnej, tj. przyłożonej wzdłuż głównej osi symetrii próbki. Wytrzymałość na ściskanie jest to największy opór, jaki siłom ściskającym stawia materiał, przeciwdziałając zniszczeniu [Piątek 2008]. Wartość liczbowa tej wytrzymałości stanowi iloraz siły ściskającej, która spowodowała zniszczenie struktury materiału i powierzchni, na którą działa siła ściskająca. Wytrzymałość na ściskanie  $R_{co}$  w teście osiowym określono wzorem [Borowski 2012a]:

$$R_{co} = \frac{F_n}{A} \text{ [MPa]}, \quad (6)$$

gdzie:  $F_n$  – siła ściskająca (niszcząca) próbkę, N,  
 $A$  – pole przekroju próbki ściskanej, m<sup>2</sup>.



**Rys. 4.** Sposoby badania wytrzymałości na ściskanie brykietów o kształcie walcowym: a) test osiowy, b) test średnicowy

Wpływ sezonowania brykietów na zmianę ich wytrzymałości sprawdzono przez pomiary nacisku jednostkowego w teście ściskania w maszynie wytrzymałościowej, które były wykonywane po 1, 4, 11, 28, 40, 60 i 90 dobach od wytworzenia.

### 2.3.5. Ocena odporności brykietów na czynniki atmosferyczne

Mrozoodporność badano metodą pośrednią, określoną przez normę PN-88/B-06250. Badanie polegało na poddaniu badanego brykietu cyklicznemu zamrażaniu w powietrzu i odmrażaniu w wodzie. Jeden cykl trwał 6 godzin,



a próbkę poddano trzem takim cyklom. Następnie badano wytrzymałość próbek na ściskanie. Stopień mrozoodporności określono na podstawie zależności pomiędzy wytrzymałością, a ubytkiem masy.

Badanie nasiąkliwości, czyli zdolności wchłaniania wody przez brykiety przy ciśnieniu atmosferycznym, polegało na stopniowym zanurzaniu próbek w wodzie. Nasiąkliwość  $N_w$  określono jako stosunek masy wchłoniętej wody do masy próbki materiału suchego ze wzoru:

$$N_w = \frac{m_n - m_s}{m_s} \cdot 100\%, \quad (8)$$

gdzie:  $m_s$  – masa próbki w stanie suchym, kg,  
 $m_n$  – masa próbki w stanie nasyconym wodą, kg.

Badania wodoodporności brykietów polegały na całkowitym zanurzeniu w wodzie wysuszonych próbek (o wilgotności 1–2%) i określeniu procentowego ubytku ich masy w trakcie nawadniania. Wodoodporność brykietów uznaje się za dobrą, jeśli po co najmniej 30 minutach całkowitego zanurzenia nie następuje jego dezintegracja. Wodoodporność obliczono ze wzoru:

$$W = \frac{M}{M_p} 100\%, \quad (9)$$

gdzie:  $M_p$  – masa początkowa brykietów, kg,  
 $M$  – masa brykieta w danym okresie nawadniania, kg.

### 2.3.6. Analiza struktury brykietów

Strukturę brykietów analizowano wykorzystując stanowisko badawcze umożliwiające komputerową obróbkę obrazu rozpatrywanego przekroju próbki. Głównymi elementami wyposażenia stanowiska są mikroskop z kamerą oraz komputer PC wyposażony w kartę TV do przechwytywania obrazów cyfrowych przekazywanych przez kamerę. W komputerze zainstalowany jest program „MicroScan for Windows” służący do przetwarzania pobranych obrazów bitowych.

Rozpatrywaną próbkę umieszczono na stoliku pomiarowym i odpowiednio oświetlono za pomocą oświetlacza światłowodowego. Za pomocą mikroskopu dobrano optymalne powiększenie fragmentu przekroju, tak aby uzyskać wyraźny obraz elementów struktury próbki. Widoczny na monitorze komputera obraz mikroskopowy modyfikowano za pomocą programu MicroScan. Program ten umożliwia zmianę podstawowych parametrów, takich jak jasność, kontrast bądź nasycenie. Można także zastosować bardziej zaawansowany zestaw funkcji filtrujących, arytmetyczno-logicznych, poprawy kontrastu i segmentacji. Program

pozwała na dokonanie pomiarów wielkości geometrycznych i obliczeń wielkości średnich, a także pola powierzchni i obwodu [Borowski 2007c].

Przygotowanie materiału badawczego obejmowało usunięcie z próbki wszelkich zabrudzeń oraz dokładne dogładzenie powierzchni będącej przedmiotem obserwacji. Usunięcie zanieczyszczeń z powierzchni badanego materiału, tzw. odtłuszczenie, polegało na przemyciu lub spryskaniu odpowiednim środkiem odtłuszczającym najczęściej acetonem lub benzyną ekstrakcyjną. Po odtłuszczeniu powierzchnię próbki osuszono, a następnie przeprowadzono dogładzanie za pomocą pilników oraz ściernych narzędzi nasypowych. Stosowano kilka rodzajów ściernych narzędzi nasypowych o różnej ziarnistości, np. P120, P320, P500.

Przed umieszczeniem przygotowanej próbki na stoliku pomiarowym skalibrowano mikroskop. Stosowano w tym celu specjalną płytkę wzorcową, za pomocą której dobrano powiększenie i odpowiadające mu jednostki pomiarowe na obrazie w monitorze komputera. Dzięki temu uzyskano komputerowy obraz w skali odpowiadającej wymiarom rzeczywistym próbki, co umożliwiło późniejszy pomiar wielkości liniowych, powierzchni i obwodu.

Komputerowa obróbka obrazu umożliwiła uzyskanie informacji o strukturze materiału, w szczególności dotyczących kształtu i wymiarów ziaren, lokalizacji dodatków i wtrąceń oraz dostarczyła informacji o wadach strukturalnych, takich jak pęcherze, pęknięcia i odpryski.

### **2.3.7. Ocena wpływu brykietów na środowisko**

Oznaczono wymywalność substancji potencjalnie niebezpiecznych z brykietów, które mogą być w bezpośrednim kontakcie z wodą. Określono substancje wyflukiwane z brykietów, takie jak: chrom, kadm, miedź, ołów, nikiel, cynk i rtęć. Do oznaczenia pobrano 5-gramowe próbki odpadów, które dodano do 500 ml zakwaszonej (do pH = 4) wody destylowanej. Wymywanie jonów z roztworu odbywało się w procesie wytrząsania trwającym 5 godzin. Następnie zawiesinę odwirowano i oddzielono klarowny roztwór do badań zawarty w nim substancji. Stężenia jonów oznaczono stosując metodę plazmowej spektrometrii emisyjnej za pomocą spektrometrów ICP-AES oraz ICP-MS.

W przypadku użytkowania brykietów jako alternatywnego paliwa stałego wyznaczono wielkości emisji spalin. Emisje gazów i pyłów do atmosfery określono w procesie spalania w warunkach zbliżonych do panujących w konwencjonalnym piecu centralnego ogrzewania. Strumień gazów spalinowych wydostających się z pieca poddawano analizie za pomocą analizatora spalin typu IMR 2000 firmy Atut Sp. z o.o. Analizator ten jest wielofunkcyjnym urządzeniem wyposażonym w czujniki elektrochemiczne gazów: O<sub>2</sub>, CO, NO,

SO<sub>2</sub>, NO<sub>2</sub> oraz czujnik podczerwieni do pomiaru CO<sub>2</sub>. Wyniki analiz spalin były zbierane przez cały okres pomiarowy, a następnie przetwarzane przy wykorzystaniu komputera.

Pomiar ciepła spalania i wartości opałowej brykietów paliwowych przeprowadzono w kalorymetrze KL-12 firmy BitPrecyzja, zgodnie z procedurą zawartą w normie PN-EN 14918 2010. Oznaczenie polegało na całkowitym spalaniu próbki paliwa w atmosferze tlenu pod ciśnieniem w bombie kalorymetrycznej zanurzonej w wodzie, oraz na pomiarze przyrostu temperatury tej wody. Parametry spalania paliwa były wyliczane w sposób automatyczny i przedstawione na cyfrowym wyświetlaczu kalorymetru.

## 2.4. Brykietowanie odpadów energetycznych

### 2.4.1. Charakterystyka odpadów

Do badań pobrano próbki odpadów, które mogą być potencjalnym źródłem ciepła podczas spalania:

- 1) miały i muły węglowe z procesów przeróbki węgla kamiennego w kopalni Lubelski Węgiel „Bogdanka”,
- 2) rozdrobnione trociny drzew liściastych z zakładu stolarskiego.

Postać, uziarnienie i miejsca poboru próbek przedstawiono w tabeli 4.

**Tabela 4.** Odpady energetyczne pobrane do badań

L.p.	Rodzaj materiału	Postać	Uziarnienie przed rozdrobnieniem [mm]	Miejsce poboru próbek
1	Węgiel kamienny	miał, muł	0,10 – 1,50	Zakład Przeróbki Mechanicznej Węgla w kopalni Lubelski Węgiel „Bogdanka”
2	Biomasa	trociny, zrębki	0,50 – 5,00	Usługowy Zakład Stolarski Tadeusz Izdebski w Parczewie

**Ad. 1.** Odpady górnictwa węgla kamiennego, zwane również odpadami powęglowymi, powstają w procesach wydobycia, wzbogacenia i przetwarzania kopalni. Zawilgocony i niskokaloryczny odpad węglowy jest szczególnie kłopotliwym materiałem w transporcie, wyładunku i procesie spalania. Największą frakcją odpadów powstających w zakładzie przerobczym w Bogdance stanowią muły i miały węglowe o kaloryczności 20–23 MJ/kg w udziale ok. 86% masy ogółem. W pierwszej kolejności z odpadów 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 osadnikach promieniowych i na taśmowych prasach filtracyjnych, oraz są gromadzone w zbiornikach odpadów. Zawartość wody mułów i miałów magazynowanych w zbiornikach wynosiła około 12%.

**Ad. 2.** Trociny, wióry i zrębki drewna stanowią produkt uboczny zakładu stolarskiego mając zastosowanie do produkcji płyt wiórowych. Część trocin pozyskanych z drewna o niskiej jakości technologicznej stanowi produkt wykorzystywany do formowania jako pelety. Pelety z trocin po obróbce drewna drzew liściastych mają wysoką wartość kaloryczną i są wykorzystywane do spalania w kominkach i grillach. Produkt ten często miesza się z innymi rodzajami biomasy pozyskanej z plantacji roślin szybko rosnących, np. wierzby wiciowej.

Drobnoziarniste materiały są często zanieczyszczone, zawilgocone i niejednorodne, toteż wykonano następujące czynności:

- muły i miał węglowy dosuszano do zawartości wody poniżej 10% w suszarce elektrycznej, odseparowano zanieczyszczenia skalne, rozdrobniono w udarowym młynku elektrycznym do uziarnienia poniżej 0,5 mm (rys. 5);
- 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 (rys. 6).



Rys. 5. Odpady węgla kamiennego



Rys. 6. Rozdrobniona biomasa

W tabeli 5 przedstawiono parametry odpadu węglowego z Zakładu Przeróbki Mechanicznej Węgla w kopalni Lubelski Węgiel „Bogdanka”.

**Tabela 5.** Parametry odpadu węglowego z kopalni Lubelski Węgiel „Bogdanka”

Lp.	Wyszczególnienie	Miano	Wartość
1	Typ węgla	wg PN-82/G-97002	32.1
2	Zawartość części lotnych	V <sup>a</sup> [%]	27,36
3	Spiekalność	Wg Rogi RI	13
4	Podatność przemiałowa	GrH	75
5	Zawartość pierwiastka C	C <sub>t</sub> <sup>a</sup> [%]	58,52
6	Zawartość pierwiastka H	H <sub>t</sub> <sup>a</sup> [%]	3,49
7	Zawartość pierwiastka Cl	Cl <sup>a</sup> [%]	0,031
8	Stężenie radionuklidów	Ra <sup>226</sup> [Bq·kg <sup>-1</sup> ]	34 ± 3
		Ra <sup>228</sup> [Bq·kg <sup>-1</sup> ]	29 ± 2
		Ra <sup>224</sup> [Bq·kg <sup>-1</sup> ]	31 ± 3
		K <sup>40</sup> [Bq·kg <sup>-1</sup> ]	142 ± 13

Określono skład granulometryczny rozdrobnionego odpadu węgla kamiennego oraz biomasy za pomocą analizy sitowej. Wyniki tej analizy przedstawiono w tabelach 6 i 7.

**Tabela 6.** Wyniki analizy sitowej węgla

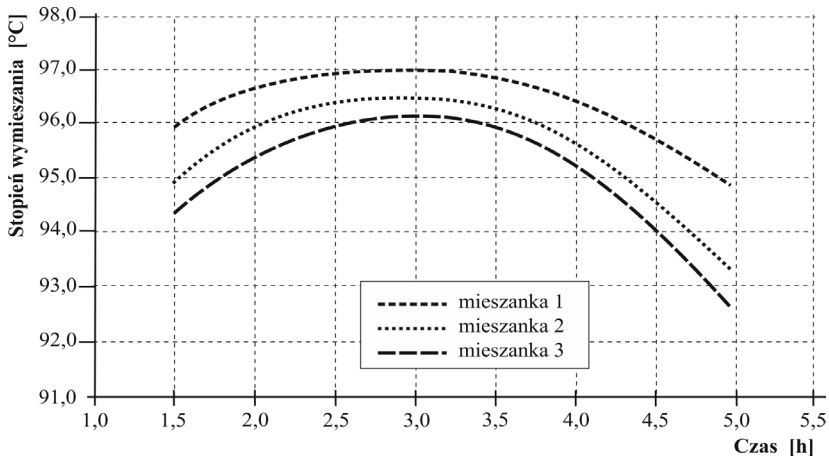
Wielkość ziarna d [mm]	Nominalna wielkość oczka [mm]	Fracje sitowe	
		[g]	[%]
$d > 0,50$	0,50	3	1,54
$0,50 \geq d > 0,40$	0,40	32	16,41
$0,40 \geq d > 0,30$	0,30	46	23,59
$0,30 \geq d > 0,20$	0,20	61	31,28
$0,20 \geq d > 0,10$	0,10	38	19,49
$d \leq 0,10$	końcowe podziarno	15	7,69
Suma	–	195	100,00
Straty	–	5	2,50

**Tabela 7.** Wyniki analizy sitowej biomasy

Wielkość ziarna $d$ [mm]	Nominalna wielkość oczka [mm]	Frakcje sitowe	
		[g]	[%]
$d > 2,00$	2,00	11	5,55
$2,00 \geq d > 1,50$	1,50	74	37,38
$1,50 \geq d > 1,00$	1,00	58	29,29
$1,00 \geq d > 0,50$	0,50	45	22,73
$d \leq 0,50$	końcowe podziarno	10	5,05
Suma	–	198	100,00
Straty	–	2	1,00

Przedstawione w tabelach 6 i 7 dane wskazują, że 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.

Czas mieszania dobrano eksperymentalnie. Badania prowadzono przy napełnieniu elektrycznej mieszarki łopatkowej do ok. 2/3 całkowitej jej objętości. Zależność między czasem mieszania a stopniem wymieszania dla trzech wariantów mieszanek węglowo-biomasowych (różniących się udziałem składników) przedstawiono na rysunku 7.



**Rys. 7.** Zależność między czasem mieszania a stopniem wymieszania mieszanek węglowo-biomasowych

Największy stopień wymieszania uzyskano po czasie mieszania 3 minuty. Po przekroczeniu czasu mieszania wynoszącego 3,5 minuty można zauważyć zmniejszenie stopnia wymieszania.

Określono skład chemiczny próbek odpadów węgla kamiennego oraz biomasy (tab. 8). Stwierdzono w biomacie około czterokrotnie więcej niż w węglu tlenu, prawie połowę mniej węgla organicznego, a także mniej siarki i azotu.

**Tabela 8.** Podstawowe składniki chemiczne węgla kamiennego i biomasy

Składnik	Jednostki	Węgiel kamienny	Biomasa z drewna liściastego
Węgiel (C)	%	81,0	52,8
Tlen (O)	%	7,0	30,2
Wodór (H)	%	3,5	6,0
Azot (N)	%	1,1	0,5
Siarka (S)	%	0,9	0,1
Chlor (Cl)	%	0,08	0,1

Zbadane właściwości fizyczne odpadów węgla i biomasy przedstawiono w tabeli 9.

**Tabela 9.** Właściwości pobranych próbek węgla i biomasy

Parametr	Jednostki	Muły i miały węgla kamiennego	Biomasa z drewna liściastego
Zawartość wody	%	8,1	12,0
Gęstość usypowa	kg·m <sup>-3</sup>	800	150
Gęstość właściwa	kg·m <sup>-3</sup>	1200	660
Wartość opałowa	kJ·kg <sup>-1</sup>	27 000	17 900
Ciepło spalania	kJ·kg <sup>-1</sup>	28 600	19 700
Zawartość części lotnych	%	26,6	66,5
Zawartość popiołów	%	22,2	2,0

Wartość opałowa biomasy w stanie suchym wynosi maksymalnie 18 000 kJ·kg<sup>-1</sup> i jest o 33% niższa niż wartość opałowa odpadów węgla kamiennego. Z analizy piśmiennictwa wynika, że zmierzona wartość opałowa biomasy jest niewystarczająca do stosowania jej jako głównego źródła energii cieplnej w energetyce zawodowej. Chętnie natomiast będzie stosowana w kotłach indywidualnych centralnego ogrzewania, głównie ze względu na małe pozostałości popiołów w palenisku oraz niską emisję związków siarki do atmosfery.

Biomasa ma małą gęstość usypową, a więc zajmuje większą objętość przy składowaniu w porównaniu z węglem (tab. 9). Duża objętość może mieć wpływ na wysokie koszty transportu biomasy.



## 2.4.2. Badania symulacyjne zagęszczania odpadów węgla kamiennego

Częścią badań własnych była komputerowa symulacja zagęszczania drobnoziarnistych odpadów węgla w brykiety z zastosowaniem metody elementów skończonych (ang. Finite Element Method – FEM) [Borowski 2007a, 2011c].

Metoda elementów skończonych umożliwia określenie rozkładu gęstości i nacisków jednostkowych w trakcie zagęszczania oraz rozkładu naprężeń w brykietach po opuszczeniu wgłębienia formującego [Galen, Zavaliangos 2005; Sinka i in. 2001]. Pozwala ponadto określić siłę docisku i parametry części roboczych brykieciarki. Ułatwia przygotowanie realistycznej symulacji komputerowej wraz z określeniem założeń do projektowania systemu prasującego, geometrii wgłębień formujących oraz pozostałych warunków procesu produkcji brykietów o wymaganych właściwościach [Coube, Brewin 2002; Dec 2002; Drzymała 2000].

Dwuwymiarową analizę za pomocą programu ABAQUS przeprowadził Dec i in. [2003]. Modelowano scalanie materiału w prasie z gładkimi walcami, o średnicy 100 mm.

Wyniki modelowania procesu brykietowania metodą elementów skończonych przedstawili także Zavaliangos i in. [2002, 2003]. Analizując dostępne modele procesu zagęszczania i scalania stwierdzono największą przydatność modelu Gursona, opisującego warunki plastyczności mechaniki ośrodków ciągłych. Model ten opisano zależnością:

$$\Phi = \left( \frac{\sigma}{\sigma_Y} \right)^2 + 2q_1 f \cosh \left( \frac{3q_2 p}{\sigma_Y} \right) - (1 + q_3 f^2) = 0 \quad (10)$$

gdzie:  $p$  – składowa wzdłużna nacisku,  
 $f$  – porowatość,  
 $\sigma_Y, q_1, q_2, q_3$  – stałe materiałowe.

Założeniem modelu Gursona jest istnienie w materiale porowatości, wyrażonej udziałem objętościowym porów, oraz inicjacja nowych porów w trakcie procesu odkształcenia. Model ten jest często stosowany do rozwiązywania zagadnień oddziaływania cząstek w strukturach o znacznym zagęszczeniu, zakładając kulisty kształt pojedynczego ziarna. Mniej przydatny natomiast jest w strukturach o większej porowatości [Galen, Zavaliangos 2005].

Stwierdzono, że podczas brykietowania w walcach z wgłębieniami proces zagęszczania rozpoczyna się wcześniej oraz występują większe siły docisku niż przy brykietowaniu w gładkich walcach ekwiwalentnych. Uzyskano znaczne różnice prognozowanych wartości sił i momentów w obu wariantach procesu. Wyniki symulacji procesu brykietowania w walcach z wgłębieniami oraz ekwiwalentnych wykazały jednoznacznie, że stosowanie



układów zastępczych jest niewłaściwe do analiz procesu brykietowania [Zavaliangos i in. 2003].

Do opracowania modeli scalania materiałów sypkich wykorzystuje się także metodę elementów dyskretnych (ang. discrete element modelling – DEM). Cząstki materiałów przedstawia się w formie definiowanych obiektów geometrycznych. Ze względów praktycznych preferowane są sfery lub aglomeraty sfer. Same cząstki uznaje się za sztywne i nie mogą one na siebie nachodzić. Metodę tę wykorzystano do modelowania procesu scalania materiałów drobnoziarnistych z uwzględnieniem różnorodności wymiarów poszczególnych ziaren substancji, ich kształtu oraz wzajemnego oddziaływania [Cunningham i in. 2004]. Niedogodnością tej metody jest bardziej czasochłonna obróbka wyników symulacji w porównaniu z innymi metodami modelowania [Schneider, Cocks 2002].

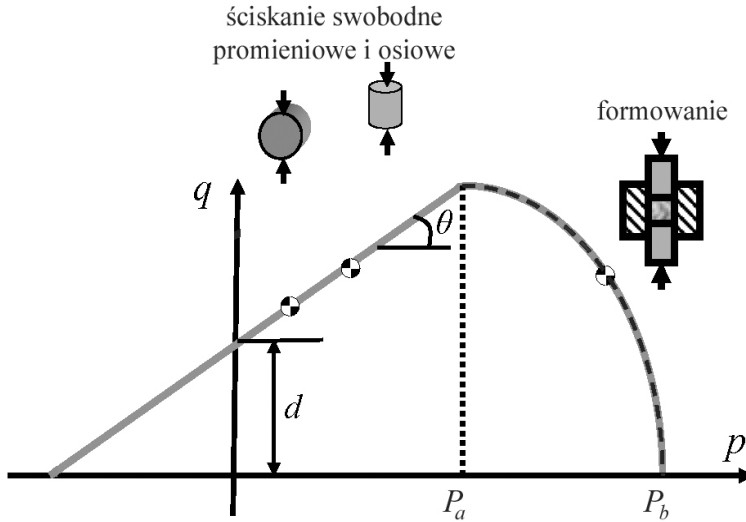
Istotnym czynnikiem wpływającym na wyniki modelowania jest anizotropowość materiałów. Wykazano, że przy brykietowaniu w matrycy zamkniętej anizotropowy charakter mają m.in. naprężenia wewnętrzne [Galen, Zavaliangos 2005]. Eksperyment polegał na wytwarzaniu próbek o kształcie walcowym z materiałów o różnej podatności na scalanie – o ziarnach miękkich podatnych na brykietowanie oraz ziarnach twardych, trudno poddających się brykietowaniu. Przeprowadzono testy ściskania próbek oraz określono wartości naprężeń wzdłużnych i poprzecznych względem osi brykietu.

Stwierdzono, że w materiałach o ziarnach miękkich wartości naprężeń wzdłużnych są mniejsze w porównaniu do wartości naprężeń poprzecznych. W materiałach o ziarnach twardych obserwowano zależność odwrotną. W obu wypadkach naprężenia były funkcją stopnia zagęszczenia, przy czym w materiale podatnym na brykietowanie anizotropowość zwiększała się ze wzrostem zagęszczenia, w materiałach niepodatnych zaś zwiększała się ich izotropowość. Zatem w procesie scalania rozkład naprężeń wewnętrznych istotnie zależy od rodzaju i właściwości materiału, a nie tylko od kształtu i ułożenia ziaren [Galen, Zavaliangos 2005].

W kolejnej opracowanej metodzie modelowania z wykorzystaniem struktur wieloelementowych (ang. Multi-Particle Finite Element Method – MPFEM) brane są pod uwagę tylko istotne właściwości materiałów sypkich, np. tarcie wewnętrzne między ziarnami [Zavaliangos 2003]. Metoda polega na stworzeniu siatki elementów skończonych dla pojedynczych ziaren rozpatrywanej substancji. Wykorzystując tę metodę można uwzględnić zarówno właściwości mechaniczne poszczególnych ziaren, jak i zjawiska kontaktowe na ich powierzchni. Metoda jest przydatna do symulacji zjawisk deformacji struktury wewnętrznej w razie znacznego zagęszczenia materiału drobnoziarnistego.

Często jest stosowany model Drucker-Prager Cap (DPC). Powstał on w wyniku modyfikacji modelu Mohra-Coulomba. Model DPC reprezentuje sprężysto-plastyczny stan odkształceń w procesie zagęszczania, z uwzględnieniem tarcia

wewnętrznego poszczególnych ziaren substancji (rys. 8). Model ten wykorzystano do symulacji scalania w matrycy zamkniętej tlenków wolframu oraz innych materiałów drobnziarnistych z obróbki metali [Zavaliangos 2003].



**Rys. 8.** Obszar zastosowań modelu matematycznego Drucker-Prager Cap:  $p$  – nacisk jednostkowy stempla,  $\sigma$  – naprężenia normalne,  $\tau$  – naprężenia styczne,  $P_s$  – granica sprężystości,  $P_e$  – granica plastyczności,  $\theta$  – kąt tarcia [Zavaliangos 2003]

W modelu DPC wartości odkształceń sprężysto-plastycznych zależą od stopnia zagęszczenia ośrodka. Przebieg krzywej odkształceń przedstawia zależność liniowa w pierwszej fazie, co odpowiada warunkom ściskania swobodnego, oraz zależność eliptyczną w drugiej fazie dla warunków ściskania w matrycy zamkniętej. Druga część przedstawionego wykresu reprezentuje zatem przebieg odkształceń plastycznych materiałów sypkich scalanych w prasach do brykietowania z zastosowaniem matrycy zamkniętej [Zavaliangos 2003]. Matematyczny opis modelu DPC przedstawia następująca zależność:

$$F_C = \sqrt{(p - P_a)^2 + (Rq)^2} - R(d + P_a \tan(\theta)) = 0 \quad (11)$$

gdzie:  $R$  – współczynnik rozbieżności ( $0,0 < R < 1,0$ ), a pozostałe oznaczenia jak na rysunku 8.

Granice sprężystości  $P_a$  oblicza się z następującego równania:

$$P_a = \frac{P_b - Rd}{1 + R \tan(\theta)} \quad (12)$$

Odształcenia plastyczne materiału sypkiego dotyczące niewielkich nacisków jednostkowych można opisać zależnością liniową Mohra-Coulomba:

$$F_s = \sigma - p \tan(\theta) - \tau \quad (13)$$

gdzie:  $F_s$  – siła ściskania stempla.

Zastosowanie modelu DPC do symulacji materiałów drobnoziarnistych wymaga kalibrowania współczynników równania (zmiennych) na podstawie wyników pomiarów laboratoryjnych [Sinka i in. 2003].

Własne symulacje komputerowe miały na celu określenie zależności rozkładu stopnia zagęszczenia od oporów tarcia zewnętrznego na powierzchniach matrycy i narzędzi formujących w przypadku formowania walcowych kształtek z miazgi węglowej. Wykorzystano program ABAQUS ver. 6.6. W programie zaimplementowane są powszechnie stosowane modele matematyczne mające zastosowanie w różnych procesach inżynierskich. Program zawiera również model Drucker-Prager Cap.

Parametry modelu DPC (tab. 10) dobrano opierając się na wynikach przeprowadzonych badań doświadczalnych scalania w walcowej matrycy zamkniętej próbek odpadów węglowych [Borowski 2011c].

**Tabela 10.** Określenie współczynników modelu Drucker-Prager Cap

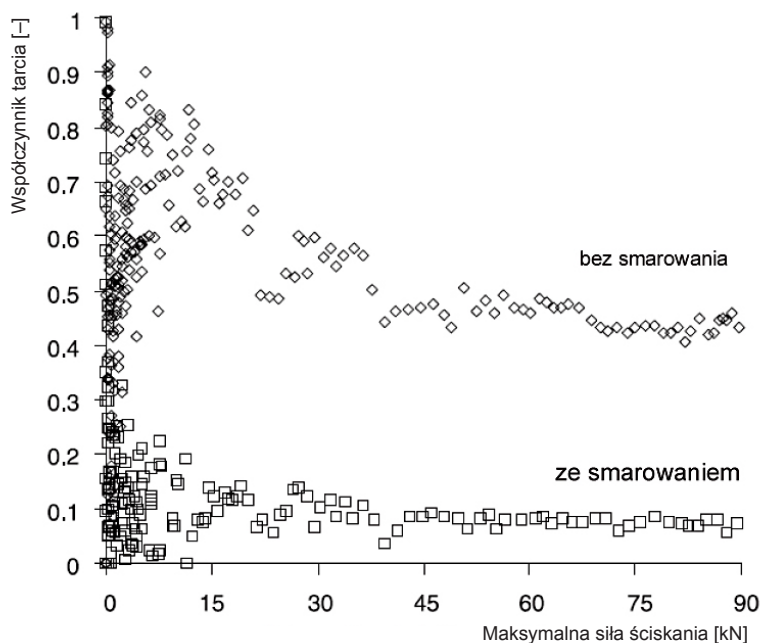
Stopień zagęszczenia $s$ [-]	Moduł Younga $E$ [Pa]	Współczynnik Poissona $n$ [-]	Naprężenia styczne $t$ [Pa]	Kąt tarcia $\varphi$ [°]	Współczynnik rozbieżności $r$ [-]	Granica plastyczności $P_e$ [Pa]
1,60	4,50e+07	0,016	2,68e+04	54,4	0,270	6,09e+05
1,80	1,77e+08	0,035	7,23e+05	68,8	0,312	4,03e+06
2,00	4,82e+08	0,061	1,16e+06	68,3	0,586	1,07e+07
2,20	1,05e+09	0,094	3,12e+06	68,0	0,640	2,05e+07
2,40	2,06e+09	0,136	5,85e+06	68,1	0,690	3,58e+07
2,60	3,71e+09	0,187	1,05e+07	67,4	0,789	6,47e+07
2,80	6,32e+09	0,250	1,86e+07	66,5	0,907	1,28e+08

Wykorzystano prasę stemplową wraz z matrycą formującą umożliwiającą uzyskanie walcowych brykietów o średnicy 30 mm. Ujednorodniony materiał poddawano do komory matrycy i ścisniano przemieszczeniem górnego stempla prasy o wartość ok. 20 mm z położenia początkowego, wynoszącego 40 mm od powierzchni stempla dolnego. W każdej próbce określono stopień zagęszczenia materiału oraz podstawowe właściwości materiałowe niezbędne do skalibrowania modelu (tab. 10).

Zbadano ponadto stopień zagęszczenia drobnoziarnistych węgli w zależności od warunków tarcia zewnętrznego – bez smarowania oraz ze smarowaniem powierzchni narzędzi formujących (tab. 11).

**Tabela 11.** Stopień zagęszczenia drobnoziarnistych węgli w zależności od warunków tarcia zewnętrznego

Nr próbki	Przemieszczenie stempla, $l$ [mm]	Stopień zagęszczenia, $s$ [-]	Warunki tarcia
1	20,4	2,39	bez smarowania
2	19,7	2,24	
3	18,9	2,04	
4	18,5	1,97	
5	18,1	1,89	
6	17,6	1,78	
7	20,6	2,41	ze smarowaniem
8	19,7	2,24	
9	18,9	2,04	
10	18,6	1,99	
11	18,2	1,91	
12	17,6	1,78	

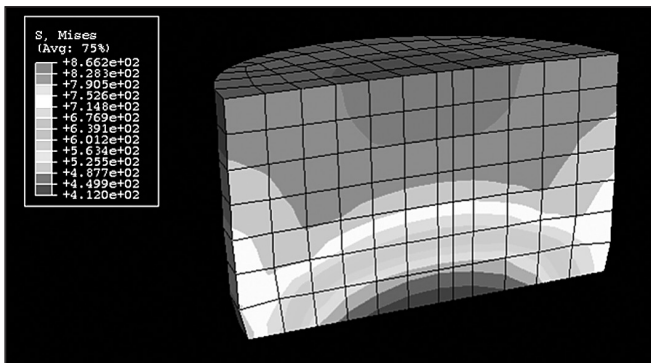


**Rys. 9.** Wpływ oporów tarcia na maksymalną siłę nacisku w prasie stemplowej [Cunningham i in. 2004]

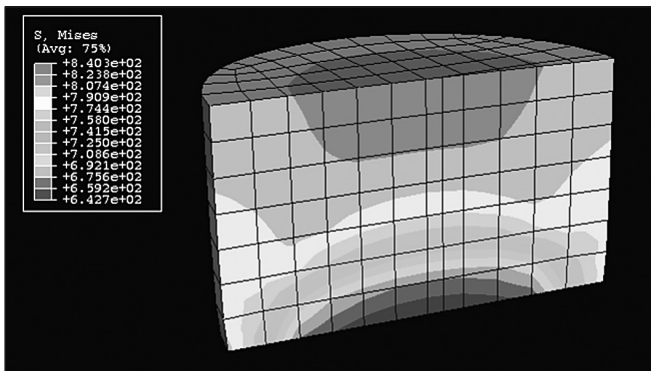
Do kalibracji parametrów modelu DPC wykorzystano także wyniki badań podane przez Cunningham i in. [2004], dotyczące wpływu oporów tarcia na maksymalną siłę nacisku w prasie stempłowej. Przedstawiono je na rysunku 9.

Wyniki doświadczeń laboratoryjnych wskazują, że warunki tarcia w procesie brykietowania mają stosunkowo niewielki wpływ na stopień zagęszczenia materiału. Mają natomiast znaczny wpływ na wartości nacisków jednostkowych prasy.

Do przeprowadzenia symulacji komputerowej wybrano siatkę typu C3D8R, zastosowaną do połówki walcowego elementu ze względu na jego symetrię. Założono, że powierzchnia stempli dociskowych jest sztywna, a odkształcenia zachodzą tylko w materiale drobnoziarnistym. Górny stempel przemieszczał się z prędkością  $1 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$ , dolny zaś był nieruchomy. Gęstość właściwa materiału wynosiła  $1000 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ . Na rysunkach 10 i 11 pokazano przekroje brykietów obrazujące wyniki symulacji rozkładu stopnia zagęszczenia węgla w zależności od oporów tarcia zewnętrznego.



Rys. 10. Symulacja stopnia zagęszczenia brykietu formowanego bez smarowania



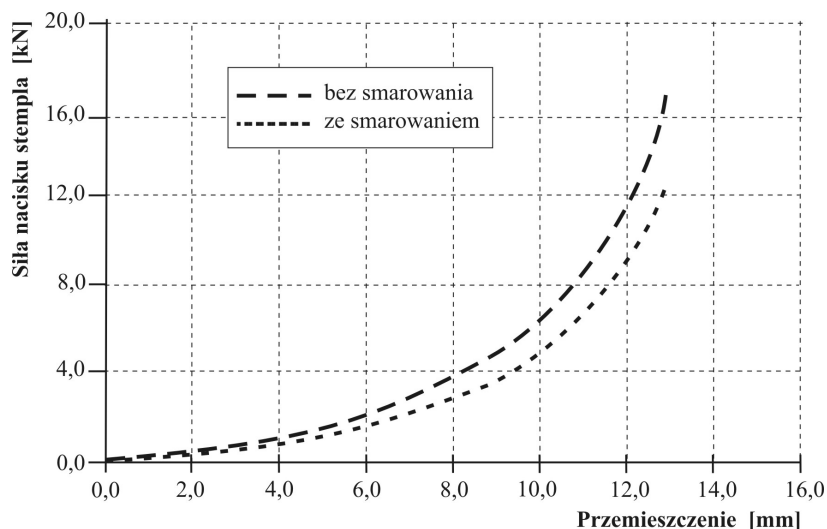
Rys. 11. Symulacja stopnia zagęszczenia brykietu formowanego z zastosowaniem smarowania

Wyniki symulacji wskazują, że brykiety formowane przy niższych oporach tarcia charakteryzuje bardziej jednorodna struktura wewnętrzna. Zagęszczenie struktury wewnętrznej brykietów przebiega warstwowo – większe jest przy powierzchni stempla górnego i w środku przekroju, mniejsze natomiast na brzegach i przy powierzchni stempla dolnego. Zarówno dla małych, jak i dużych oporów tarcia zewnętrznego obserwowano znaczne przemieszczanie się warstw materiału drobnoziarnistego podczas brykietowania.

Mniejsze opory tarcia w naczyniu formującym umożliwiają zastosowanie mniejszych sił nacisku prasy podczas wytwarzania brykietów o określonym stopniu zagęszczenia (tab. 12, rys. 12).

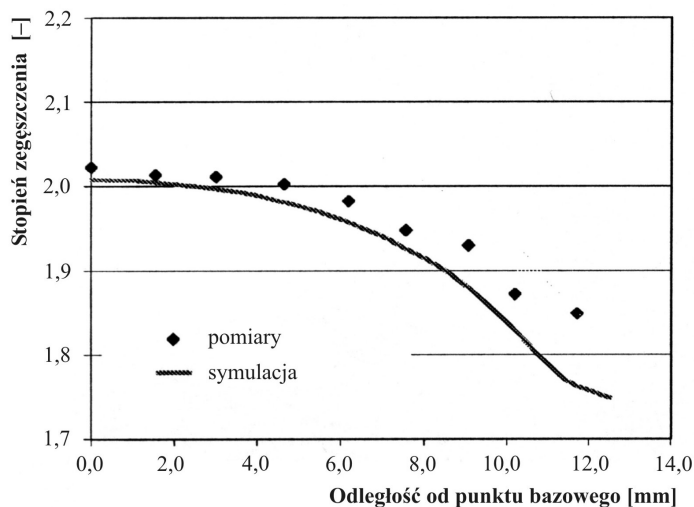
**Tabela 12.** Wyniki symulacji zależności siły nacisku prasy od współczynników tarcia

Siła nacisku prasy, $P$ [kN]	Współczynnik tarcia, $\mu$ [-]	
	bez smarowania	ze smarowaniem
3	0,65	0,15
10	0,60	0,13
20	0,52	0,12
40	0,42	0,08
60	0,37	0,07
80	0,35	0,06

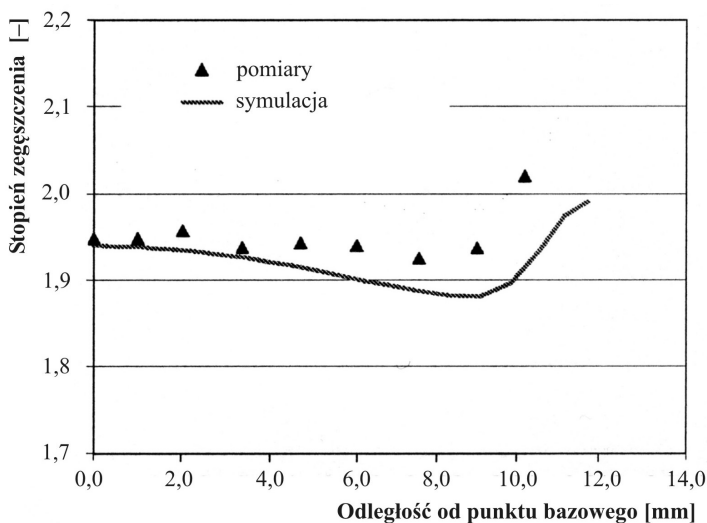


**Rys. 12.** Zależność siły nacisku od przemieszczenia stempla podczas zagęszczania

Uzyskane wyniki symulacji poddano weryfikacji doświadczalnej. W tym celu wykonano pomiary mikrotwardości powierzchni przekroju poprzecznego brykietu. Na rysunkach 13 i 14 porównano uzyskane rezultaty z wynikami symulacji stopnia zagęszczenia.



Rys. 13. Rozkład stopnia zagęszczenia w przekroju poprzecznym brykietu wytworzonego bez stosowania smarowania



Rys. 14. Rozkład stopnia zagęszczenia w przekroju poprzecznym brykietu wytworzonego z zastosowaniem smarowania

Stwierdzono dużą zgodność wyników symulacji z uzyskanymi pomiarami, potwierdzając tym samym dobre dopasowanie zastosowanego modelu matematycznego.

### 2.4.3. Badania jakości brykietów węglowych

#### Wytrzymałość mechaniczna

W procesie brykietowania odpadów węglowych z biomasą uzyskano brykiety, które poddano ocenie przydatności do wykorzystania jako alternatywne paliwa będące źródłem energii cieplnej. Brykiety wytworzono w warunkach laboratoryjnych z mieszanki węgla z biomasą w udziałach masowych wynoszących od 0 do 30%. Przygotowane pierwsze partie brykietów nie zawierały lepszczka.

Określono wytrzymałość mechaniczną brykietów w zależności od nacisku prasy i dodatku biomasy (tab. 13). Stosując prasę stemplową wraz z matrycą własnej konstrukcji uzyskano brykiety w kształcie walcowym o wymiarach  $\phi 3,0 \times 2,0$  cm, objętości ok. 14,1 cm<sup>3</sup> oraz średniej masie 24,5 gram. Brykiety testowano w postaci świeżej – pobrane nie później, niż po 30 minutach od wytworzeniu.

**Tabela 13.** Wytrzymałość brykietów w zależności od nacisku prasy i udziału biomasy

Nr serii	Udział biomasy [%]	Siła nacisku stempla [kN]	Nacisk jednostkowy [MPa]	Właściwości mechaniczne	
				wartość nacisku niszcząca brykiet [MPa]	odporność na zrzut grawitacyjny [%]
1	0,0	20,0	2,83	0,81	82,6
		30,0	4,25	0,89	89,0
		40,0	5,66	1,02	87,5
2	15,0	20,0	2,83	1,08	80,0
		30,0	4,25	1,81	89,0
		40,0	5,66	1,42	91,5
3	20,0	20,0	2,83	1,18	86,7
		30,0	4,25	2,11	91,2
		40,0	5,66	2,12	94,1
4	25,0	20,0	2,83	1,14	90,7
		30,0	4,25	2,30	95,6
		40,0	5,66	2,03	94,8
5	30,0	20,0	2,83	1,12	84,6
		30,0	4,25	1,29	90,0
		40,0	5,66	1,05	88,7



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 MPa do 5,66 MPa przy udziale biomasy 20% oraz 25%. Jednakże przy 25-procentowym udziale biomasy i nacisku jednostkowym 5,66 MPa uzyskano wyroby o mniejszej odporności mechanicznej w porównaniu z wyrobami uzyskanymi przy nacisku 4,25 MPa. Duże zmniejszenie wytrzymałości zanotowano dla brykietów z udziałem biomasy wynoszącym 30%, co dyskwalifikowało ich użytkową przydatność.

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. 14). Testowano brykiety świeże (po 30 minutach od wytworzenia) i sezonowane w okresie 120 godzin.

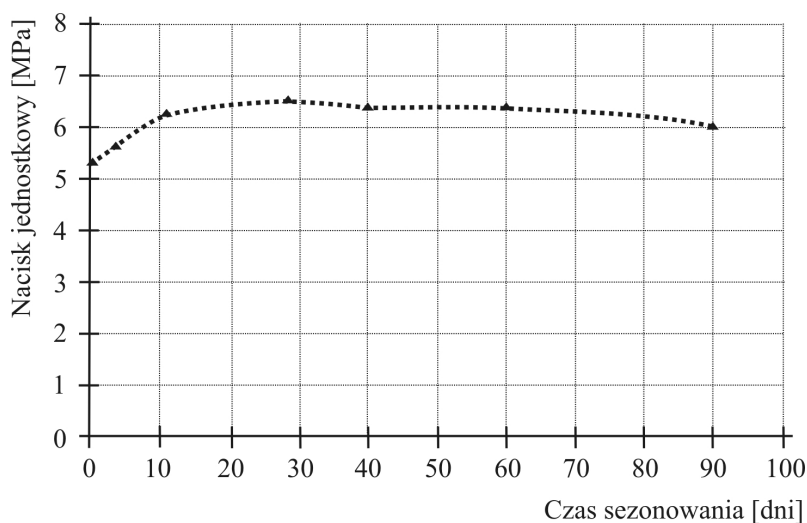
**Tabela 14.** Wytrzymałość brykietów w zależności od procentowego udziału lepiszcza

Nr serii	Udział biomasy [%]	Udział lepiszcza [%]	Wartość nacisku jednostkowego niszczonego 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

Wyniki testów wskazują, że jest możliwe uzyskanie dobrych brykietów zarówno z odpadów węglowych, jak z dodatkiem biomasy oraz lepiszcza. Najlepszy efekt uzyskano stosując około 8-procentowy udział skrobi w brykietowanej masie odpadów węgla z 20-procentowym dodatkiem biomasy. Stwierdzono korzystny wpływ sezonowania na dalsze zwiększenie odporności mechanicznej brykietów.

Przeprowadzono kolejne testy, aby określić ewentualną zmianę wytrzymałości brykietów w dłuższym terminie sezonowania w warunkach pokojowych podczas składowania w magazynie. W tym celu sprawdzano systematycznie wytrzymałość brykietów na ściskanie od momentu wytworzenia do 90 dni sezonowania (rys. 16).

Minimalny czas sezonowania gwarantujący uzyskanie wysokiej wytrzymałości mechanicznej wynosi 4–5 dni. Z pomiarów pokazanych na rysunku 15 wynika, że brykiety osiągają największą wytrzymałość po ok. 28 dniach od wytworzenia. Po 90 dniach sezonowania zaobserwowano zmniejszenie się wytrzymałości brykietów.



**Rys. 15.** Zależność wytrzymałości na ściskanie od czasu sezonowania brykietów

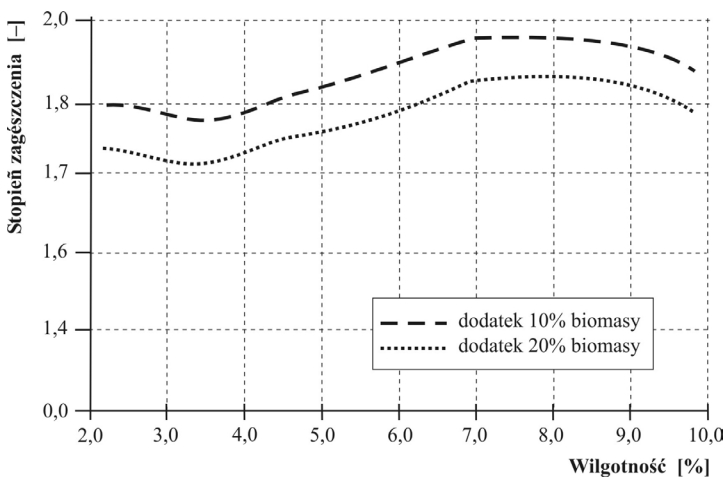
Kolejne badania pozwoliły określić optymalny zakres wilgotności mieszanki węgla z 20-procentowym udziałem biomasy w zależności od stopnia zagęszczenia oraz wytrzymałości brykietów świeżych i sezonowanych. Dane wskazują, że nie wszystkie brykiety paliwowe mają wystarczającą odporność określoną testem na zrzut grawitacyjny (tab. 15).

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 warunkach przemysłowych

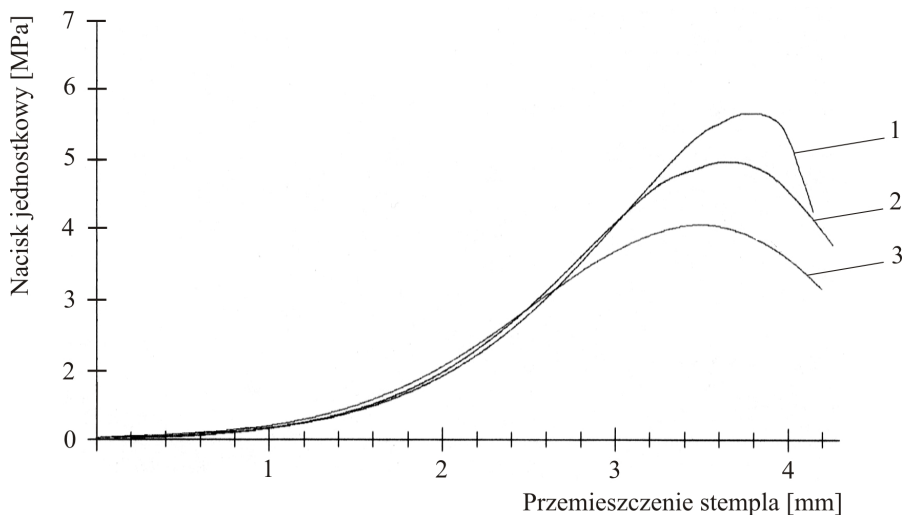
**Tabela 15.** Właściwości mechaniczne brykietów świeżych i sezonowanych w zależności od zawartości wody mieszczanki i stopnia zagęszczenia

Nr próby	Zawartość wody [%]	Stopień zagęszczenia [-]	Wartość nacisku jednostkowego niszcącego 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

przebiega w mniej sprzyjających warunkach niż w próbach laboratoryjnych, więc wyniki z próby 1 oraz 8 uznano za niewystarczające. Nie uzyskano zatem pozytywnych rezultatów przy scalaniu materiału o zawartości wody większej niż 10% oraz mniejszej niż 5%. Z danych na rysunku 16 wynika, że korzystny zakres wilgotności mieszczanki węgla z biomasą przeznaczoną do brykietowania powinien wynosić od 7 do 9%. Na rysunku 17 przedstawiono natomiast przykładowe wykresy ściskania brykietów w teście osiowym ściskania w maszynie wytrzymałościowej.



**Rys. 16.** Zależność między wilgotnością a stopniem zagęszczenia materiału



**Rys. 17.** Wykresy ściskania brykietów w teście osiowym:

- 1 – maksymalny nacisk jednostkowy 5,66 MPa,
- 2 – maksymalny nacisk jednostkowy 4,95 MPa,
- 3 – maksymalny nacisk jednostkowy 4,15 MPa

Przebieg krzywych ściskania wskazuje, że zniszczenie brykietów w teście osiowym wymaga większej maksymalnej siły nacisku w relacji do parametrów z jakimi były wytworzone. Obserwowano wyższą odporność brykietów na ściskanie, jeżeli były formowane pod większym naciskiem prasy (krzywa nr 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 testach ściskania zauważono, że w początkowej fazie małym przyrostom siły nacisku odpowiadają duże przemieszczenia ruchomych szczęk głowicy (rys. 17), pomiędzy którymi znajduje się badana próbka. Spowodowane to jest znaczną porowatością brykietów paliwowych. Następuje proces wzajemnego dociskania drobnoziarnistych składników brykietu. W kolejnej fazie procesu ściskania widoczny jest gwałtowny wzrost nacisku względem przemieszczenia głowicy, aż do zniszczenia próbki.

### Struktura wewnętrzna brykietów

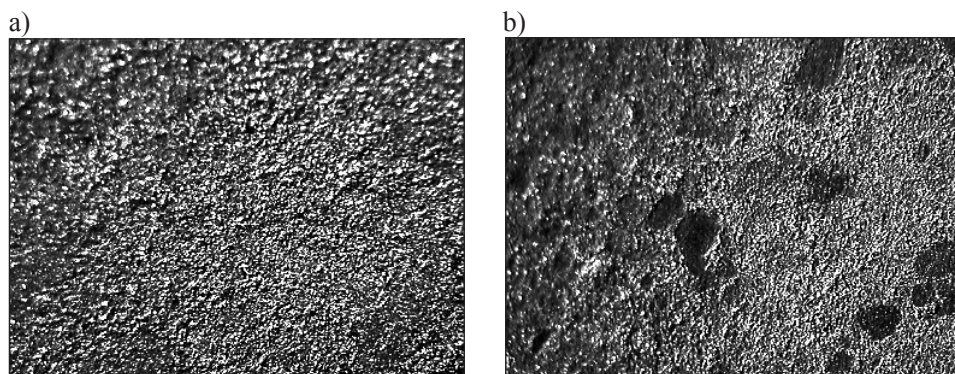
Analizowano strukturę wewnętrzną próbek brykietów węglowych wytwarzanych w prasach stemplowych oraz walcowych, a także oceniono wpływ dodawanych środków wiążących na właściwości tej struktury. Jako środki wiążące stosowano skrobię, melasę oraz wapno hydratyzowane.

Zakres prac był następujący:

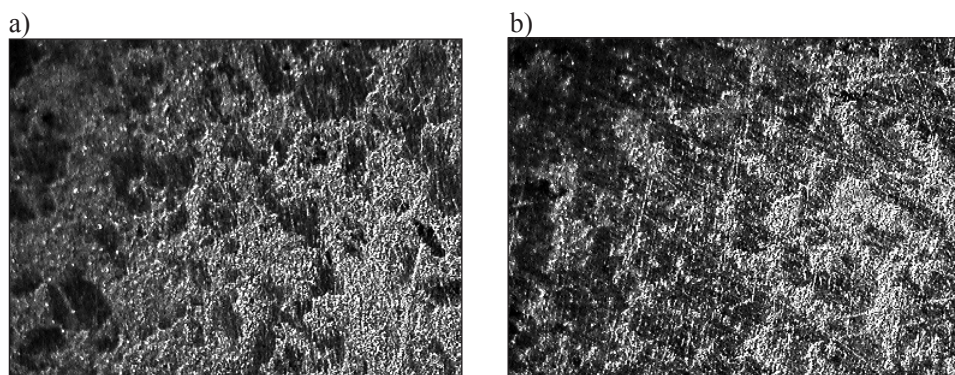
- określono ułożenie ziaren w brykietach po uformowaniu w prasie stemplowej i walcowej,
- określono rozmieszczenie lepiszcza w przekroju brykieta w zależności od jego udziału masowego,
- obserwowano powstawanie pęcherzy oraz pęknięć wewnątrzstrukturalnych.

Struktura brykieta węglowego wykonanego w prasie stemplowej bez dodatków wiążących jest jednorodna, bez widocznych pęcherzy i pęknięć (rys. 18a). Ułożenie ziaren jest nieregularne.

Struktura brykieta z dodatkiem melasy jako lepiszcza wyraźnie różni się od struktury brykieta bezlepiszczowego (rys. 18b). Dobrze widoczne są ciemniejsze wtrącenia materiału wiążącego. Wpływ udziału melasy na strukturę brykieta wytworzonego w prasie stemplowej można zauważyć porównując rysunki 19a i 19b.



**Rys. 18.** Struktura brykieta z węgla wykonanego w prasie stemplowej:  
a) bez lepiszcza; b) z melasą



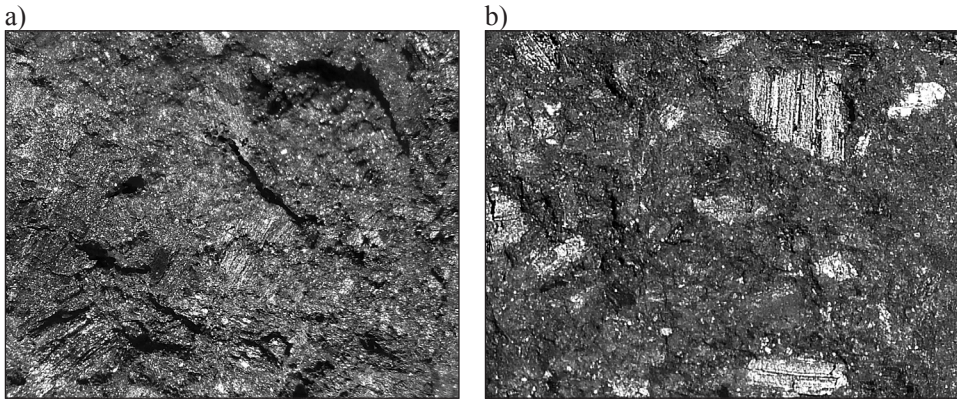
**Rys. 19.** Struktura brykieta wykonanego w prasie stemplowej:  
a) z dodatkiem 6% melasy, b) z dodatkiem 8% melasy



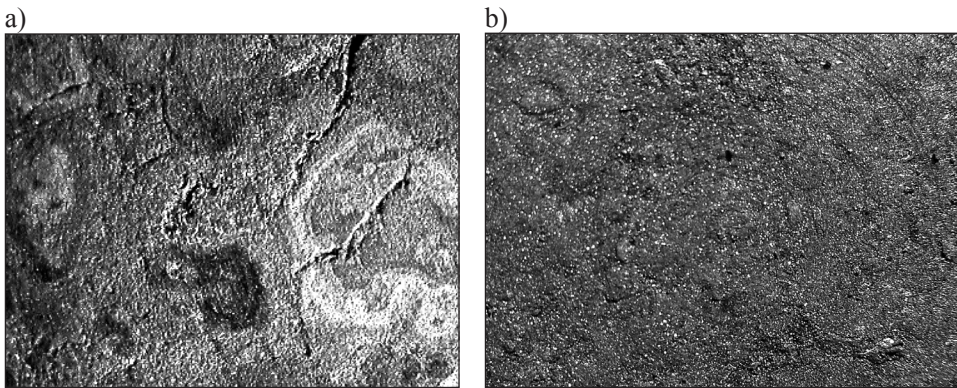
Podczas obserwacji mikroskopowych zauważono, że większemu udziałowi procentowemu melasy w masie brykietu odpowiada bardziej zwarta budowa strukturalna.

Brykiety węglowe wytworzone w prasie walcowej bez dodatków wiążących charakteryzuje niejednorodność (rys. 20a). Dobrze widoczne są pęcherze i pęknięcia powodujące osłabienie struktury. Szczeliny te powiększają się podczas sezonowania, co dyskwalifikuje brykiet do użytkowego wykorzystania. Dodatek skrobi jako lepiszcza poprawia jednorodność struktury brykietu (rys. 20b).

Analizując fotografie brykietów z dodatkiem różnych lepiszczy stwierdzono duże znaczenie dokładnego mieszania składników przeznaczonych do brykietowania. W pierwszym etapie materiał ten mieszano ręcznie (rys. 21a), jednak bardziej jednorodną strukturę brykietów uzyskano zmieniając sposób mieszania i mieszając materiał w mieszarce elektrycznej (rys. 21b).



**Rys. 20.** Struktura brykietu z węgla wykonanego w prasie walcowej:  
a) bez lepiszcza; b) z lepiszczem skrobiowym



**Rys. 21.** Struktura brykietu z materiału mieszanego:  
a) ręcznie, b) w mieszarce elektrycznej

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 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 odpadów 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 16.

**Tabela 16.** 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 ulegały one 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 17.

**Tabela 17.** Wartość opałowa brykietów

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

Wyniki pomiarów wskazują, że wartość opałowa brykietów węgla z biomasą zmniejsza się ze wzrostem zawartości biomasy. Jednakże zmniejszenie kaloryczności jest stosunkowo niewielkie. Wartość opałowa brykietów z 20-procentowym udziałem biomasy jest 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 2011e], 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:

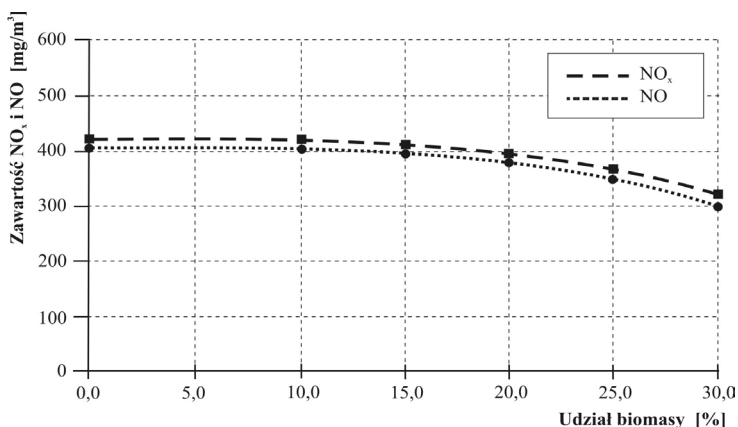
- sumę tlenków azotu – NO<sub>x</sub>,
- zawartość dwutlenku siarki – SO<sub>2</sub>,
- zawartość tlenku węgla – CO,
- zawartość dwutlenku węgla – CO<sub>2</sub>,
- zawartość siarkowodoru – H<sub>2</sub>S.



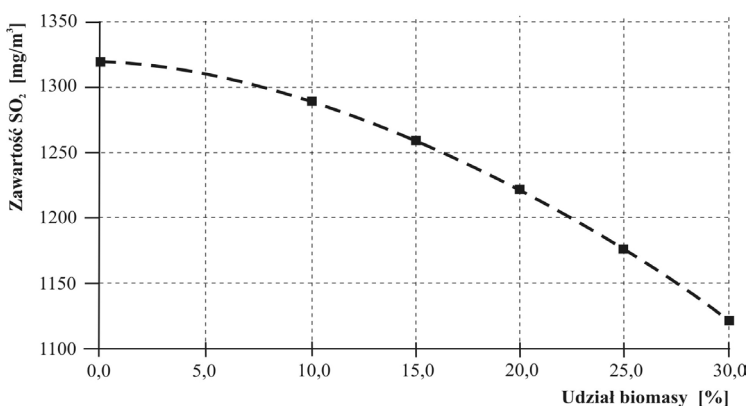
Zakres zmian zawartości wymienionych gazów spalinowych w zależności od procentowego udziału biomasy (w przedziale od 0 do 30%) w mieszance z węglem przedstawiono na rysunkach 22–26.

Analiza składu spalin wykazała, że tylko zawartości tlenu węgla i siarkowodoru wykazują wyraźny wzrost przy spalaniu brykietów z udziałem biomasy (rys. 24 i 25). Dodatek biomasy w ilości nieprzekraczającej 20% masy mieszanki nie zmienia w znacznym stopniu wskaźników zanieczyszczeń gazów spalinowych.

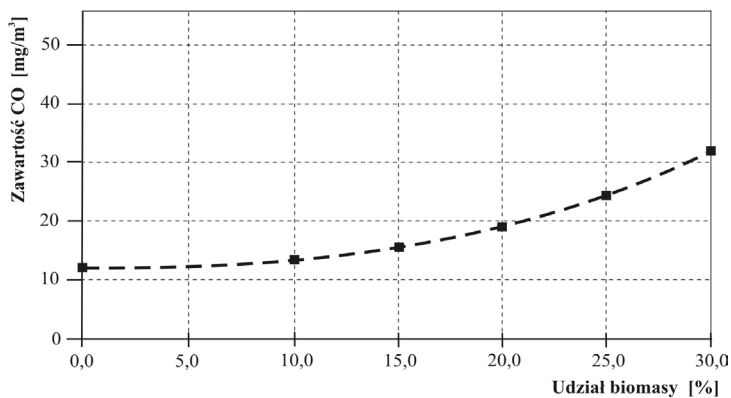
Zawartość tlenków azotu i dwutlenku siarki zmniejsza się wraz ze wzrostem udziału biomasy (rys. 22 i 23), co jest zgodne z przewidywaniami wynikającymi ze składu chemicznego. Zmiany zawartości tlenu węgla, dwutlenku węgla i siarkowodoru (rys. 24–26), wskazują na niewystarczającą ilość powietrza wprowadzaną do pełnego spalania brykietu paliwowego. Do spalania mieszanki węgla i biomasy wymagana jest większa ilość powietrza, niż do spalania samego węgla [Gnutek i in. 2002].



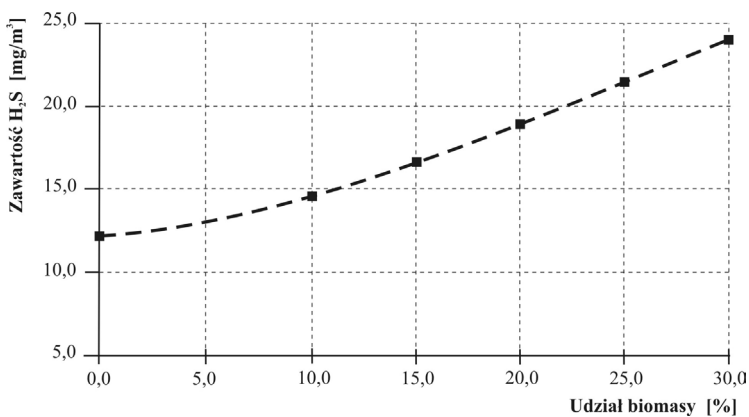
**Rys. 22.** Zmiany zawartości tlenków azotu w zależności od procentowego udziału biomasy w brykietach



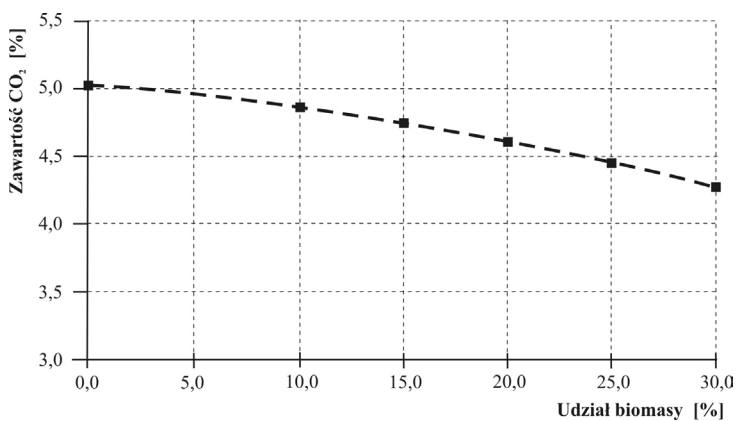
**Rys. 23.** Zmiany zawartości dwutlenku siarki w zależności od procentowego udziału biomasy w brykietach



**Rys. 24.** Zmiany zawartości tlenku węgla w zależności od procentowego udziału biomasy w brykietach



**Rys. 25.** Zmiany zawartości siarkowodoru w zależności od procentowego udziału biomasy w brykietach

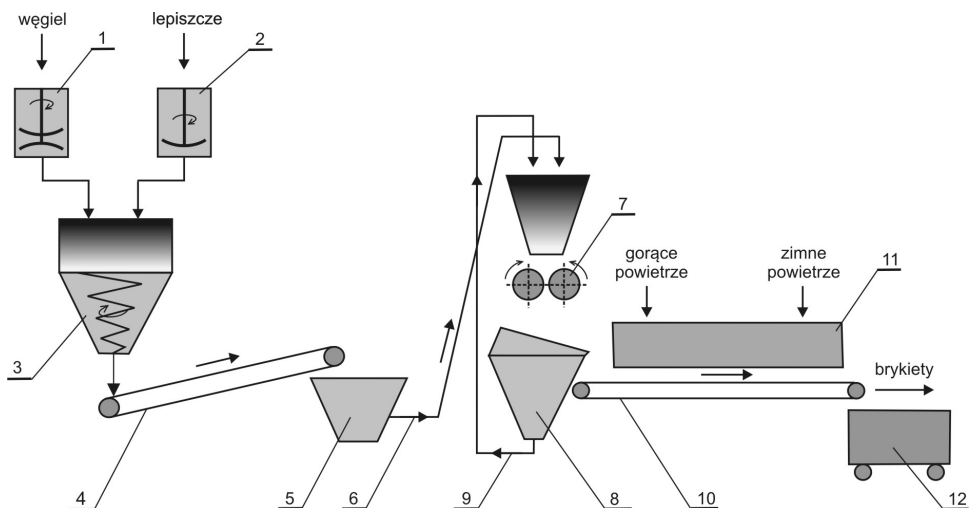


**Rys. 26.** Zmiany zawartości dwutlenku węgla w zależności od procentowego udziału biomasy w brykietach

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

#### 2.4.4. Wdrożenie brykietowania węgla

Wdrożenie brykietowania węgla kamiennego prowadzono w przedsiębiorstwie Grill-Impex Sp. z o.o. w Sieluniu k. Pułtusza. Firma jest również znaczącym producentem brykietów do grilla z węgla drzewnego. Testowano także możliwości brykietowania innych odpadów – koksiku i biomasy. Firma ma linię do produkcji brykietów o wydajności  $800 \text{ kg} \cdot \text{h}^{-1}$  (rys. 27).



**Rys. 27.** 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 (rys. 28). Brykiety po odsianiu na ruszce separatora – 8 są transportowane przenośnikiem taśmowym – 10 do suszarki tunelowej – 11 (rys. 29). Oddzielone od brykietów podziarno jest zawracane przenośnikiem kubelkowym – 9 do kosza zasypowego brykieciarki



**Rys. 28.** Prasa walcowa w linii produkcyjnej



**Rys. 29.** Suszarka tunelowa w linii produkcyjnej



**Rys. 30.** Brykiety węglowe z przemysłowej linii produkcyjnej

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<sup>3</sup> i kształcie jak na rysunku 30.

Próby przemysłowego brykietowania prowadzono w prasie walcowej o nacisku jednostkowym 110 MPa dla mieszanek drobnoziarnistych węgla (odpadowe muły i miały) z dodatkiem lepszczu oraz z dodatkiem 20% biomasy (trociny). Rodzaje testowanych mieszanek przedstawia tabela 18.

**Tabela 18.** Materiały testowane w próbach przemysłowych brykietowania

Nr testu	Rodzaj materiału	Rodzaj lepszczu	Udział lepszczu	Zawartość wody
1	Odpad węgla kamiennego	melasa	8%	12,0
			13%	18,5
			18%	26,0
2	Odpad węgla kamiennego	melasa + skrobia (1:1)	10%	24,8
3	Odpad węgla kamiennego	skrobia	8%	24,0
4	Odpad węgla kamiennego + 20% biomasy	melasa	8%	24,5
5	Odpad węgla kamiennego + 20% biomasy	brak	0%	25,0

Odpady brykietowano w prasie walcowej, wytwarzając partie brykietów co najmniej po 200 kg każda. Z każdej partii pobierano próby do testów wytrzymałościowych nie później niż 30 minut po opuszczeniu suszarki (nie sezonowane). Wyniki testów przedstawiono w tabeli 19.

Próby uzyskania wytrzymałych brykietów węglowych z dodatkiem melasy nie dały zadowalających efektów. Niezależnie od udziału melasy uzyskano brykiety o mniejszej niż wymagane minimum wytrzymałości na ściskanie (poniżej 1,0 MPa). Przy dużym udziale lepszczu występowało znaczne zwiększenie oporów elementów roboczych oraz transportowych maszyn.

Przy zastosowaniu lepszczu dwuskładnikowego (melasy i skrobi) uzyskano brykiety, które także nie spełniały minimalnych wymogów wytrzymałościowych. W kolejnym teście do odpadów węgla dodano samą skrobię ziemniaczaną, co przyniosło dobre rezultaty. Uzyskane brykiety miały dużą odporność na ściskanie oraz na zrzut grawitacyjny. Najkorzystniejsze parametry wytrzymałościowe uzyskano dla brykietów z 8-procentowym udziałem skrobi oraz 24-procentową początkową wilgotnością mieszanki. W trakcie produkcji przemysłowej testowano właściwości wytrzymałościowe brykietów w zależności od czasu sezonowania (tab. 20).

**Tabela 19.** Właściwości wytrzymałościowe brykietów z prasy walcowej w zależności od udziału lepiszcza

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

Wyniki testów sezonowania brykietów węglowych z dodatkiem lepiszcza skrobiowego potwierdzają podwyższenie ich wytrzymałości mechanicznej już po 4–5 dniach od wyprodukowania. Korzystne właściwości brykietów utrzymują się przez długi czas od daty produkcji. W wypadku ich przechowywania w warunkach pokojowych (w magazynie) ich wytrzymałość stopniowo zmniejsza się po trzech miesiącach sezonowania.

**Tabela 20.** 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	2,28	97,3
7	90	2,15	96,7

Pozytywne rezultaty uzyskano także w próbach przemysłowej produkcji brykietów z rozdrobnionego węgla kamiennego oraz 20-procentowym dodatkiem masy 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 próbek okazały się porównywalne (tab. 21).

**Tabela 21.** Porównanie właściwości dwóch rodzajów przemysłowych brykietów paliwowych

Parametr	Jednostki	Brykiet węglowy z biomasą	Brykiet węglowy ze skrobią
Gęstość właściwa	kg·m <sup>-3</sup>	1120	1200
Wartość opałowa	kJ·kg <sup>-1</sup>	18 520	23 675
Ciepło spalania	kJ·kg <sup>-1</sup>	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 paliwo do spalania w kotłach energetycznych centralnego ogrzewania małej mocy w gospodarstwach domowych. Brykiety węgla z biomasą, ze względu na małą zawartość siarki, są ponadto dobrym paliwem do grilowania mięs w gastronomii.

Stosowanie niemodyfikowanej skrobi jako lepiszcza okazało się korzystne do produkcji brykietów z odpadów węgla. Niewskazane w tym wypadku jest wykorzystanie melasy jako środka wiążącego. Odpady węgla w połączeniu z biomasą z powodzeniem mogą służyć do produkcji ekologicznych brykietów paliwowych. Stwierdzono, że dodanie biomasy usprawniło proces spalania brykietów w kotłach energetycznych.

## 2.5. Brykietowanie popiołów ze spalania brykietów

### 2.5.1. Skład i właściwości popiołów

Wykorzystanie popiołów ze spalania brykietów węglowo-biomasowych stanowi coraz większy problem ze względu na systematyczny wzrost zapotrzebowania na pozyskanie energii cieplnej. Niektóre rodzaje popiołów mogą być wykorzystane bezpośrednio do nawożenia bądź ulepszenia gleb [Rozporządzenie Ministra Środowiska z dnia 5 kwietnia 2011 r. w sprawie procesu odzysku R10 (Dz.U. z 2011 r. Nr 86, poz. 476)]. Większość popiołów może być wykorzystana po przeprowadzeniu odpowiednich modyfikacji. Jednym ze sposobów zagospodarowania popiołów jest ich dodatek do podbudowy drogowej.

Badano próbki popiołów dennych ze spalania brykietów z przydomowych kotłów niskotemperaturowych. Wykorzystując drobnoziarniste odpady węgla kamiennego z dodatkiem 20% masy drewna liściastego wytworzono w prasie walcowej brykiety paliwowe. Po spaleniu miały one postać drobnego pyłu mineralnego w kolorach od jasno- do ciemnoszarego oraz jasnobrązowym. W tabeli 22 podano skład chemiczny tego popiołu.

**Tabela 22.** Skład chemiczny popiołu ze spalania brykietów paliwowych

Rodzaj związku chemicznego	Zawartość związku w popiele [%]
SiO <sub>2</sub>	46,21
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	24,54
CaO	7,72
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	5,67
K <sub>2</sub> O	5,15
MgO	3,42
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	1,98
Inne	5,31

Z danych wynika (tab. 22), że analizowane popioły składały się w przeważającej części z tlenków krzemu oraz glinu. Poza tym zawierały tlenki wapnia, żelaza, kadmu, manganu i potasu. Inne związki oraz niespalone cząstki węgla występowały w niewielkich ilościach.

Właściwości fizyczne popiołów ze spalania brykietów paliwowych i przedstawiono w tabeli 23.



**Tabela 23.** Właściwości fizyczne popiołu ze spalania brykietów paliwowych

Parametr	Jednostka	Wartość
Zawartość wilgoci	%	2,00
Gęstość usypowa	kg·m <sup>-3</sup>	620,00
Temperatura topnienia	°C	850–900
Udział cząstek:		
d = 100 μm	%	23,4
d = 75 μm		42,1
d = 50 μm		21,7
d = 25 μm		7,8

Popioły miały postać szklistych, zwykle kulistych cząstek o średnicy najczęściej od 100 do 50 μm. Ich temperatura topnienia wynosiła poniżej 900 °C, a gęstość usypowa powyżej 600 kg·m<sup>-3</sup>. Zawartość wilgoci w popiołach nie przekraczała dwóch procent.

## 2.5.2. Przygotowanie mieszanki

Przygotowanie mieszanki do brykietowania polegało na dokładnym wymieszaniu popiołów z dodatkiem od 5% do 10% masowo spoiwa. Jako spoiwa stosowano melasę, wapno hydratyzowane oraz cement. Do części brykietów dodano spoiwo dwuskładnikowe (wapno i cement) w równym udziale masowym. Przygotowano też partię materiału bez dodatków spoiwa (tab. 24).

**Tabela 24.** Parametry mieszanek do brykietowania

Nr partii	Rodzaj mieszanki	Udział spoiwa [%]	Masa mieszanki [kg]
1	Popioły bez spoiwa	–	21,4
2a	Popioły z melasą	5,1	26,3
2b		8,2	27,4
2c		10,0	20,3
3a	Popioły z wapnem hydratyzowanym	4,8	21,5
3b		7,9	22,6
3c		9,9	20,5
4a	Popioły z wapnem hydratyzowanym i cementem (1 : 1)	5,0	23,1
4b		8,1	26,9
4c		10,1	24,7

Do mieszania składników zastosowano laboratoryjną elektryczną mieszarkę łopatkową. Czas mieszania wynosił ok. 3 minuty. W trakcie mieszania dodawano porcjami wodę doprowadzając materiał do wilgotności ok. 6%.

### 2.5.3. Parametry brykietowania

Przygotowane partie mieszanek popiołowych formowano w brykiety wykorzystując laboratoryjną prasę hydrauliczną PH-300, o maksymalnej sile nacisku stempla do 300 kN. Stosowano matrycę formującą własnej konstrukcji, umożliwiającą uzyskanie brykietów walcowych o średnicy 30 mm i wysokości ok. 20 mm [Borowski, Kuczmazewski 2005b]. Dobrano eksperymentalnie siły ściskania prasy, aby uzyskane brykiety łatwo opuszczały matrycę formującą i nie rozkruszały się przy spadaniu do pojemnika zbiorczego.

Początkowo brykiety wytwarzano przy wartości siły ściskania wynoszącej 80 kN, a następnie przy wartościach 70 kN, 50 kN, 30 kN oraz 20 kN. Stosowanie dużej wartości siły stwarzało trudności w usuwaniu brykietów z matrycy formującej, ze względu na zakleszczanie się. Z kolei brykiety formowane małą siłą (20 kN) rozkruszały się przy spadaniu do pojemnika zbiorczego.

Wyznaczona wartość siły ściskania prasy umożliwiającą uzyskanie prawidłowych kształtek z analizowanych materiałów wynosiła 30 kN, co odpowiadało naciskowi jednostkowemu 4,25 MPa (tab. 25).

**Tabela 25.** Cechy fizyczne brykietów popiołowych w zależności od nacisku prasy

Lp.	Rodzaj mieszanki	Siła ściskania [kN]	Nacisk jednostkowy stempla [MPa]	Masa [g]	Objętość [mm <sup>3</sup> ]	Gęstość [kg·m <sup>-3</sup> ]
1	Popioły bez spoiwa	80	11,33	31,44	148,36	2119,2
2	Popioły z melasą	70	9,91	26,30	115,02	2160,4
3	Popioły z melasą	50	7,08	22,10	117,28	1884,4
4	Popioły z wapnem hydratyzowanym	50	7,08	27,39	120,10	2280,6
5	Popioły z melasą	30	4,25	30,27	137,91	2194,9
6	Popioły z wapnem hydratyzowanym	30	4,25	21,35	115,87	1842,6
7	Popioły z wapnem hydratyzowanym i cementem	30	4,25	23,61	120,10	1965,9
8	Popioły z melasą	20	2,83	26,91	127,17	2116,1
9	Popioły z wapnem hydratyzowanym	20	2,83	24,57	128,58	1910,9

Otrzymano walcowe brykiety o masie średnio 26,0 g i objętości 125,6 mm<sup>3</sup>. Gęstość właściwa brykietów wynosiła średnio 2052 kg·m<sup>-3</sup> (tab. 25).

## 2.5.4. Wytrzymałość brykietów

Ocenę wytrzymałości mechanicznej brykietów popiołowych przeprowadzono na podstawie testów osiowego ściskania oraz zrzutu grawitacyjnego. Minimalną wytrzymałość brykietów w teście ściskania określono na podstawie wymagań stawianych kruszywom budowlanym przeznaczonym do budowy nawierzchni drogowej w celu stabilizacji podłoża oraz wykonania warstw konstrukcyjnych przedstawionych w normie PN-S-96012:1997. Wytrzymałość ta powinna wynosić co najmniej 2,5 MPa.

W zrealizowanych badaniach wytrzymałościowych brykietów popiołowych uwzględniono rodzaj i udział procentowy stosowanego spoiwa. Testowano wyroby uzyskane do 30 minut po wytworzeniu (świeże) oraz sezonowane przez 120 godzin. Wyniki pomiarów przedstawiono w tabeli 26.

**Tabela 26.** Wytrzymałość mechaniczna brykietów popiołowych

Nr próby	Rodzaj spoiwa	Udział spoiwa [%]	Maksymalna wartość nacisku jednostkowego stempla w teście osiowym [MPa]		Odporność na zrzut grawitacyjny [%]	
			brykiet świeży (0,5 h)	brykiet sezonowany (120 h)	brykiet świeży (0,5 h)	brykiet sezonowany (120 h)
1	melasa	5,0	0,74	0,88	84,0	86,1
2	melasa	10,0	0,68	0,71	85,5	89,7
3	wapno hydratyzowane	5,0	1,02	1,13	92,1	93,8
4	wapno hydratyzowane	8,0	1,89	1,99	95,0	96,5
5	wapno hydratyzowane + cement (1 : 1)	5,0	2,27	2,52	97,8	98,2
6	wapno hydratyzowane + cement (1 : 1)	8,0	2,58	2,70	98,6	99,8
7	wapno hydratyzowane + cement (1 : 1)	10,0	2,75	2,98	97,5	98,9

Uzyskane wartości wytrzymałości na ściskanie w teście osiowym oraz odporności na zrzut grawitacyjny dla brykietów z dodatkiem melasy były niższe od wymaganych wartości minimalnych. Spoiwo to okazało się nieodpowiednie do formowania prawidłowych brykietów.

Brykiety z dodatkiem wapna hydratyzowanego również nie uzyskały wystarczającej odporności mechanicznej w przeprowadzonych testach. Dopiero dodatek cementu jako drugiego składnika spoiwa (w równym udziale z wapnem hydratyzowanym) umożliwił uzyskanie dużych wartości nacisku jednostkowego stempla i dużej odporności na zrzut grawitacyjny brykietów.

Najlepsze brykiety popiołowe uzyskano dla mieszanki zawierającej spoiwo wapienno-cementowe o udziale masowym 10%. Po pięciu dniach sezonowania wartość nacisku jednostkowego stempla potrzebna do zniszczenia tych brykietów osiągała wartość 3 MPa (tab 25).

### 2.5.5. Wpływ czynników atmosferycznych na właściwości brykietów

W badaniach brykietów popiołowych uwzględniono wpływ czynników atmosferycznych, które mają istotne znaczenie przy składowaniu tych wyrobów na otwartym powietrzu w różnych warunkach pogodowych. Wyniki przeprowadzonych testów nasiąkliwości oraz mrozoodporności podano w tabeli 27.

Uzyskane wyniki porównano z wartościami dopuszczalnymi dla kruszyw mineralnych określone w normach PN-EN-1367-1:2001 (Kruszywa mineralne. Badania. Oznaczanie mrozoodporności metodą bezpośrednią) oraz PN-EN-1097-6:2002 (Kruszywa mineralne. Badania. Oznaczanie nasiąkliwości). Zarówno mrozoodporność, jak i nasiąkliwość brykietów popiołowych z powodzeniem spełnia podane wymogi (tab. 27).

**Tabela 27.** Wyniki testów nasiąkliwości i mrozoodporności brykietów popiołowych

Lp.	Parametr	Jednostka	Wyniki pomiarów	Wartości dopuszczalne dla kruszywa drogowego
1	Mrozoodporność	%	0,37	< 1,0
			0,42	
			0,41	
2	Nasiąkliwość	%	1,11	< 3,0
			1,32	
			1,07	

### 2.5.6. Wymywalność składników z brykietów

Badano wymywalność składników rozpuszczalnych w wodzie zawartych w sezonowanych brykietach popiołowych z dodatkiem spoiwa wapienno-cementowego. Wyniki porównano z wymywalnością składników rozpuszczalnych z popiołów ze spalania paliw występujących w stanie sypkim – popiołów nieprzetworzonych (tab. 28).

Stwierdzono o blisko 90% mniejszą wymywalność składników rozpuszczalnych z brykietów, w porównaniu do ich wymywalności z popiołu w stanie sypkim. Mała wymywalność substancji z brykietów popiołowych wskazuje na możliwość bezpiecznego ich składowania lub zagospodarowania.

**Tabela 28.** Wymywalność składników rozpuszczalnych w wodzie

Lp.	Wartość	Wymywalność [% mas.]	
		brykiety popiołowe	popiół w stanie sypkim
1	Minimalna	0,04	0,36
2	Maksymalna	0,30	2,78
3	Średnia	0,17	1,57

## 2.6. Brykietowanie i zeszkliwienie popiołów ze spalania osadów ściekowych

### 2.6.1. Charakterystyka osadów i popiołów

Popiół lotny ze spalania osadów ściekowych występował w postaci miałkiego mineralnego pyłu w kolorze od jasno- do ciemnoszarego. W popiołach tych mogą występować metale ciężkie o znacznej zawartości, zależnie od początkowej ich zawartości w osadach ściekowych. Stwierdzono, że stężenie metali ciężkich w popiele wzrasta średnio cztero-, pięciokrotnie w odniesieniu do stężenia metali w osadach na skutek zmniejszenia masy odpadu po spalaniu [Pająk 2005, 2009]. Łączna zawartość metali ciężkich w popiołach może wynosić wagowo do 2,5% suchej masy.

Metale ciężkie kondensują na powierzchni cząstek popiołu, gdzie także są absorbowane wielopierścieniowe węglowodory aromatyczne (WWA). Opady atmosferyczne wymywają te związki z powierzchni cząstek, które przenikają następnie do gleby i wód gruntowych [Pająk 2008]. Z tego powodu lokowanie analizowanych popiołów ze spalania na składowiskach jest kłopotliwe ze względu na konieczność izolowania wód gruntowych przed skażeniem oraz potrzebę zabezpieczenia przed pyleniem wtórnym.

Mając to na uwadze zaproponowano brykietowanie mieszanki popiołów lotnych ze spalania osadów ściekowych z dodatkiem rozdrobnionego szkła [Borowski 2011b]. Następnie brykiety te nagrzewano w piecach wysokotemperaturowych do momentu stopienia warstwy wierzchniej i zakończenia przemian fazowych. Po natychmiastowym schłodzeniu w wodzie nastąpiło wytworzenie się struktury amorficznej (szklistej) na powierzchni bryłek. Uzyskane wyroby skierowano do badań, m.in. właściwości mechanicznych, wpływu czynników atmosferycznych oraz wymywalności związków metali do środowiska wodnego.

Materiałem badawczym były popioły lotne ze spalania osadów ściekowych gromadzonych w komunalnej oczyszczalni ścieków „Hajdów” w Lublinie. Osady te były pobrane w stacji termicznego dosuszania, gdzie występują w postaci

kulistych granul (rys. 31). Granule te są wykorzystywane jako dodatkowe paliwo w piecach cementowych. Oznaczono zawartości substancji w dosuszonych osadach ściekowych i porównano z wartościami dopuszczalnymi dla zastosowania w rolnictwie [Rozp. Min. Środ. z dnia 13 lipca 2010 r. w sprawie komunalnych osadów ściekowych (Dz.U. 2010 Nr. 137, poz. 924)] (tab. 29).



**Rys. 31.** Granule osadów ściekowych ze stacji termicznego osuszania w oczyszczalni ścieków „Hajdów” w Lublinie

**Tabela 29.** Właściwości osadów ściekowych z oczyszczalni „Hajdów” w Lublinie

L.p.	Zawartość substancji lub cecha	Jednostka miary	Wartość wyznaczona	Wartość dopuszczalna
1	Azot amonowy	% s.m.	0,42	–
2	Azot Kjeldahla	% s.m.	5,60	–
3	Fosfor ogólny	% s.m.	3,14	–
4	pH	–	7,10	>5,6
5	Straty przy prażeniu subst. organ.	% s.m.	62,4	–
6	Sucha pozostałość osadu	%	91,3	–
7	Chrom	mg·kg <sup>-1</sup>	235	500
8	Cynk	mg·kg <sup>-1</sup>	2354	2500
9	Kadm	mg·kg <sup>-1</sup>	4,68	20
10	Magnez	mg·kg <sup>-1</sup>	0,67	–
11	Miedź	mg·kg <sup>-1</sup>	698	1000
12	Nikiel	mg·kg <sup>-1</sup>	75,0	300
13	Ołów	mg·kg <sup>-1</sup>	10,7	750
14	Rtęć	mg·kg <sup>-1</sup>	1,41	16
15	Wapień	% s.m.	4,38	–

**Objaśnienia:** „–” wartości nie określono.

Zaprezentowane w tabeli 29 wyniki badań chemicznych wskazują, że zawartość metali ciężkich w analizowanych osadach jest mniejsza niż dopuszczalna przy stosowaniu komunalnych osadów ściekowych do rekultywacji gruntów i na cele rolne. Z informacji uzyskanych od Głównego Technologa oczyszczalni „Hajdów” wynika, że okresowo występują jednak przekroczenia zawartości niektórych metali ciężkich, zwłaszcza kadmu i niklu.

Podstawowe parametry fizyczne pobranych próbek granulatu osadu ściekowego ze stacji termicznego dosuszania przedstawiono w tabeli 30.

**Tabela 30.** Parametry fizyczne osadów ściekowych

Parametr	Jednostka	Wartość
Zawartość wilgoci	%	10,0
Gęstość usypowa	kg·m <sup>-3</sup>	420,0
Rozmiar granul	mm	5,0–10,0
Wartość opałowa	kJ·kg <sup>-1</sup>	19 700
Substancje palne	%	74,0

Spalanie zgranulowanych osadów ściekowych prowadzono w piecu fluidalnym FP1000-4 w temperaturze 850 °C. Gazy spalinowe, powietrze, woda odparowana z osadu oraz pył mineralny unosiły się do górnej części komory spalania, skąd zostały skierowane do przewodu spalinowego. Piec wyposażono w układ oczyszczania spalin, składający się z elektrofiltru, płuczki gazu, skrubera, filtrów workowych i wentylatora odprowadzającego resztę spalin do komina. Spaliny zawierały zanieczyszczony pył mineralny o wielkości cząstek ok. 50 μm. Cząstki pyłu spalinowego znajdujące się w elektrofiltrze są naładowane ładunkiem elektrycznym, dlatego mogą być usunięte polem elektrycznym do elektrod. Wraz z pyłem usuwane są metale ciężkie, adsorbujące na powierzchni cząstek pyłu. Przechwycone w elektrofiltrze pyły trafiały do lejów znajdujących się w dolnej części układu. Następnie zostały pneumatycznie odprowadzone do silosa, skąd pobrano je do badań.

Określono właściwości fizyko-chemiczne popiołów lotnych, a wyniki pomiarów przedstawiono w tabeli 31. Na ich podstawie stwierdzono, że głównym składnikiem chemicznym badanego popiołu ze spalania osadów są krzemiany (SiO<sub>2</sub>) oraz tlenki metali (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) i wapnia (CaO). Właściwości fizyczne wykazywały duże zróżnicowanie – średnia z pomiarów gęstości usypowej wynosiła 960 kg·m<sup>-3</sup>, natomiast zawartość substancji palnych 22%.

Należy mieć na uwadze, że właściwości popiołów lotnych mogą być odmienne, w zależności od jakości dostarczonego paliwa oraz od pory roku.

**Tabela 31.** Właściwości popiołów lotnych ze spalania osadów ściekowych

Parametr	Jednostka	Wartość
Gęstość usypowa	kg·m <sup>-3</sup>	960,0
Zawartość wilgoci	%	1,0
Zawartość substancji palnych	%	22,0
Uziarnienie:		
d = 100 µm		21,7
d = 75 µm	%	41,5
d = 50 µm		24,2
d = 25 µm		8,1
Zawartość składników:		
SiO <sub>2</sub>	%	34,57
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	%	18,34
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	%	2,04
CaO	%	17,95
K <sub>2</sub> O	%	0,99
SO <sub>3</sub>	%	3,20

### 2.6.2. Przygotowanie mieszanki

Mieszanki przeznaczone do formowania kształtek w prasie hydraulicznej zawierały oprócz popiołów lotnych dodatki w postaci pyłów krzemionkowych i rozdrobnionego odpadu szklanego (tab. 32).

**Tabela 32.** Skład mieszanek do brykietowania

Nr partii	Rodzaj mieszanki	Udział popiołu [%]	Udział dodatków [%]	Masa mieszanki [kg]
1	Popioły z pyłem krzemionkowym (40%) i szklanym (10%)	50	50	21,5
2	Popioły z pyłem szklanym	40	60	22,1
3	Popioły z pyłem szklanym (50%) i cementem (5%)	45	55	24,3

Dodatek rozdrobnionego odpadu szklanego (lampy oświetleniowe, szkło gospodarcze) w postaci pyłu o wymiarze do 0,2 mm, pełnił funkcję topnika wpływającego na obniżenie temperatury reakcji syntezy termicznej. Nagrzewanie w obniżonej temperaturze umożliwiło zmniejszenie wydatku energetycznego.

Kolejne partie mieszanek popiołowych ujednorodniono w elektrycznej mieszarce łopatkowej stosując nawilżanie wodą, aż do uzyskania konsystencji o zawartości wody 10–15%. Do próby nr 3 (tabela 32) dodano wagowo 5% cementu. Czas mieszania składników wynosił około 3 minut.



### 2.6.3. Parametry brykietowania

Utworzone mieszanki skierowano do brykietowania w hydraulicznej prasie stemplowej PH-300, wyposażonej w układ formujący własnej konstrukcji. Otrzymano brykiety w kształcie walcowym o wymiarach  $\phi 3,0 \times 2,0$  cm, których średnia objętość wynosiła  $12,8 \text{ cm}^3$ . Siła nacisku prasy dla uzyskania prawidłowych kształtek z analizowanych odpadów wynosiła 30 kN, a nacisk jednostkowy wynosił 4,25 MPa (tab. 33).

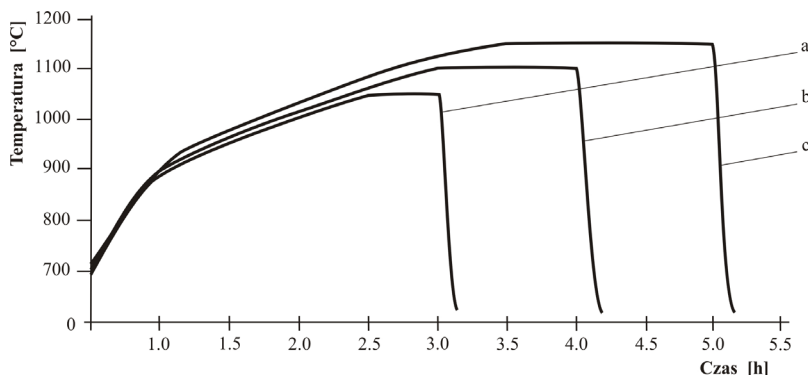
**Tabela 33.** Cechy fizyczne brykietów zawierających popioły lotne

Lp.	Rodzaj mieszanki	Siła ściskania [kN]	Nacisk jednostkowy stempla [MPa]	Masa [g]	Objętość [ $\text{mm}^3$ ]	Gęstość [ $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ ]
1	Popioły z pyłem krzemionkowym i szklanym	30	4,25	26,34	134,66	1956,1
2	Popioły z pyłem szklanym	30	4,25	25,10	125,32	2002,8
3	Popioły z pyłem szklanym i cementem	30	4,25	24,22	121,51	1993,2

Brykiety charakteryzowała masa wynosząca średnio 25,0 g, objętość wynosząca średnio  $125,6 \text{ mm}^3$ , oraz gęstość właściwa wynosząca średnio  $1984 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ .

### 2.6.4. Parametry zeszkliwienia

Poszczególne partie brykietów popiołowych umieszczano w laboratoryjnym piecu komorowym o mocy 1400 W, nagrzewając je do temperatur 1050 °C, 1100 °C, 1150 °C i 1200 °C. Czas nagrzewania wynosił 30, 60 i 90 minut. Krzywe nagrzewania w przedstawionych temperaturach pokazano na rysunku 32.



**Rys. 32.** Wpływ czasu i temperatury nagrzewania na roztopienie brykietu:  
a – brak roztopienia, b – jednorodna roztopiona powierzchnia,  
c – całkowite przetopienie i dezintegracja brykietu

Na podstawie krzywych nagrzewania określono optymalną temperaturę i czas nagrzewania w piecu oraz energochłonność procesu. Energochłonność nagrzewania brykietów popiołowych określono za pomocą układu pomiarowego składającego się z woltomierza, amperomierza oraz zegara mierzącego czas nagrzewania. Zapotrzebowanie energii na stopienie brykietów wyliczono ze wzoru:

$$E = U \cdot I \cdot t \text{ [J]}, \quad (14)$$

gdzie:  $U$  – napięcie prądu, V,  
 $I$  – natężenie prądu, A,  
 $t$  – czas grzania, s.

Po podstawieniu danych pomiarowych uzyskano:

$$E = 230 \cdot 5 \cdot 3600 = 4\,140\,000 \text{ [J]} \approx 4,1 \text{ [MJ]}.$$

Obliczona z powyższego wzoru energochłonność procesu daje wynik przybliżony, obejmujący energię niezbędną do stopienia jednego wsadu o masie 1 kg (20 szt. próbek) oraz energię potrzebną na pokrycie strat cieplnych laboratoryjnego pieca komorowego.

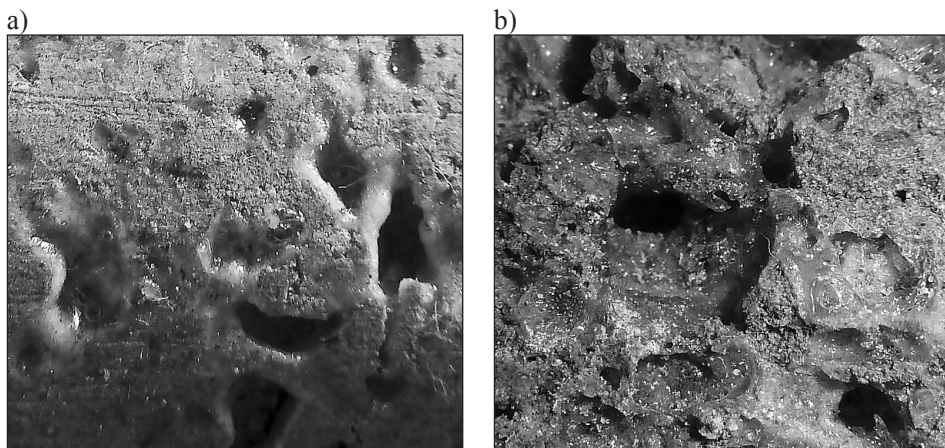
Nagrzewanie w temperaturze 1050 °C oraz w czasie 30 min nie zapewniło utworzenia jednolitej fazy ciekłej na powierzchni brykietu (rys. 32a i rys. 33). Zwiększenie temperatury przy zachowaniu czasu nagrzewania również nie rozwiązało problemu tworzenia fazy ciekłej. Wydłużenie czasu nagrzewania do 90 min i stosowanie temperatury 1200 °C (rys. 32c) powodowało z kolei prawie całkowite roztopienie brykietu i dezintegrację pierwotnego kształtu. Jednorodną amorficzną warstwę wierzchnią próbki uzyskano w temperaturze 1100 °C oraz stosując czas nagrzewania 60 min (rys. 32b i rys. 34).

Najlepsze rezultaty uzyskano dla partii próbek zawierających pył szklany z dodatkiem cementu. Po intensywnym schłodzeniu wodą stwierdzono, że na powierzchni tych próbek tworzy się równomierna warstwa szkła, przy czym kształt brykietu zostaje zachowany.

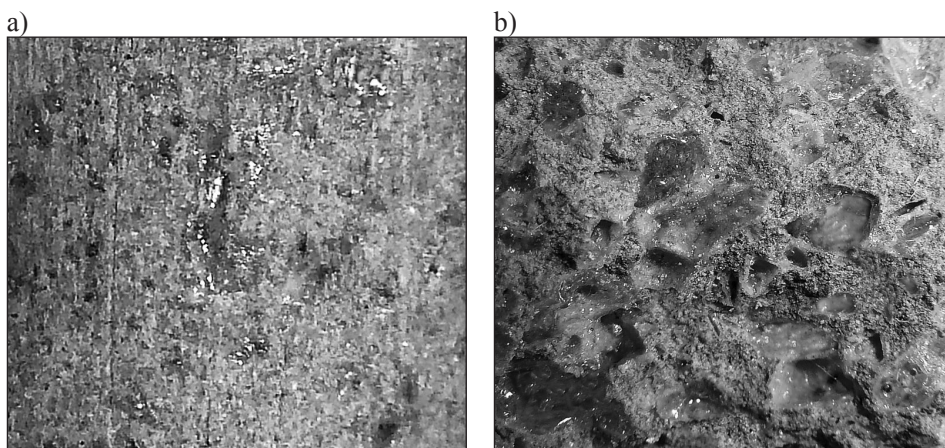
### 2.6.5. Struktura zeszkłonych brykietów

Wykorzystując stanowisko komputerowe do analizy obrazu oceniono jakość powierzchni oraz wady strukturalne w przekroju wzdłuż głównej osi brykietów popiołowych po procesach nagrzewania i zeszkliwienia.

Na rysunku 33 pokazano obraz nieprawidłowo ukształtowanej struktury w wyniku źle dobranej czasu i temperatury nagrzewania. Widoczne są liczne pory powstałe w wyniku gwałtownego ulatniania się gazów z wnętrza brykietu. Po dobraniu odpowiednich parametrów nagrzewania dla próbki z dodatkiem cementu uzyskano jednorodną szklistą warstwę na powierzchni oraz brak widocznych porów i pęknięć w przekroju brykietu (rys. 34).



**Rys. 33.** Struktura zeszlonego brykietu nagrzewanego w temperaturze 1050 °C oraz w czasie 30 min: a – powierzchnia, b – przekrój



**Rys. 34.** Struktura zeszlonego brykietu nagrzewanego w temperaturze 1100 °C oraz w czasie 60 min: a – powierzchnia, b – przekrój

### 2.6.6. Wytrzymałość mechaniczna brykietów

Zeszlone brykiety były przedmiotem dalszych badań podstawowych właściwości fizycznych i mechanicznych, mających na celu określenie użytkowej przydatności tego produktu. Zmierzono gęstość usypową (wg PN-EN 1097-3), powierzchnię właściwą (wg PN-EN 196-6), wytrzymałość na ściskanie oraz odporność na zrzut grawitacyjny (tab. 34). Wartości zmierzone porównano z wartościami dopuszczalnymi dla kruszywa mineralnego i sztucznego stosowanego w budownictwie drogowym.

**Tabela 34.** Właściwości fizyko-mechaniczne zeszkonych brykietów

Lp.	Parametr	Jednostka	Wartości mierzone	Wartości dopuszczalne w budownictwie drogowym
1	Gęstość usypowa	kg·m <sup>-3</sup>	620,0	500,0 – 900,0
2	Powierzchnia właściwa	m <sup>3</sup> ·kg <sup>-1</sup>	279,0	120,0 – 400,0
3	Wytrzymałość na ściskanie	MPa	3,9	> 2,5
4	Odporność na zrzut grawitacyjny	%	94,1	> 90,0

Wyniki pomiarów wskazują, że uzyskane wyroby mają dużą wytrzymałość na ściskanie (średnio 3,9 MPa) oraz odporność na zrzut grawitacyjny (średnio 94,1%). Wartości te spełniają minimalne wymagania stawiane kruszywom budowlanym.

### 2.6.7. Wpływ czynników atmosferycznych na właściwości brykietów

W przypadku lokowania uzyskanych produktów w glebie, wodzie lub długoterminowego składowania na wolnym powietrzu należy uwzględnić wpływ zmienności warunków atmosferycznych. Wyniki pomiarów mrozoodporności i nasiąkliwości zeszkonych brykietów w porównaniu z wartościami dopuszczalnymi dla kruszyw mineralnych i sztucznych przedstawiono w tabeli 35.

**Tabela 35.** Wyniki pomiarów nasiąkliwości i mrozoodporności zeszkonych brykietów

Lp.	Parametr	Jednostka	Wyniki pomiarów	Wartości dopuszczalne dla kruszywa drogowego
1	Mrozoodporność	%	0,17	< 1,0
			0,20	
			0,12	
2	Nasiąkliwość	%	0,12	< 3,0
			0,21	
			0,19	

Uzyskano bardzo małe wartości mrozoodporność (średnio 0,16) oraz nasiąkliwości (średnio 0,17) analizowanych produktów w porównaniu do wartości wymaganych dla kruszyw budowlanych. Są one także dużo mniejsze od wartości uzyskanych dla brykietów popiołowych pokazanych w tabeli 27.

## 2.6.8. Wymywalność składników z brykietów

W przypadku stosowania zeszklnych brykietów jako zamiennika surowców budowlanych istotne jest, aby nie występowało wymywanie szkodliwych związków do środowiska. Wyniki pomiarów wymywalności metali w wyciągach wodnych z brykietów po zeszkliwieniu (tab. 36) wskazują na znacznie mniejsze stężenia jonów w odciekach, w porównaniu do wartości dopuszczalnych wymywania dla odpadów po przetworzeniu przeznaczonych do składowania na składowisku [Rozporządzenie Ministra Gospodarki z dnia 8 stycznia 2013 r. w sprawie kryteriów oraz procedur dopuszczania odpadów do składowania na składowisku odpadów danego typu (Dz.U. z 2013 r., nr 0, poz. 38)].

**Tabela 36.** Wymywalność jonów metali ciężkich w wyciągach wodnych

Pierwiastek	Wartości mierzone [mg·dm <sup>-3</sup> ]	Dopuszczalne wartości wymywania [mg·dm <sup>-3</sup> ]
Kadm	0,002	<1,0
Rtęć	0,003	<0,2
Chrom	0,006	<10,0
Ołów	0,022	<10,0
Miedź	0,055	<50,0
Cynk	0,071	<50,0
Nikiel	0,092	<10,0

Stwierdzono, że związki metali ciężkich zawarte w popiołach praktycznie biorąc nie ulegały wypłukaniu po zeszkliwieniu brykietów. Oznacza to, że zastosowany sposób przetwarzania odpadów umożliwił otrzymanie bezpiecznych dla środowiska produktów.

## 2.7. Dyskusja wyników badań

Wyniki badań symulacyjnych z zastosowaniem metody elementów skończonych wskazują, że przyjęty model matematyczny Drucker-Prager Cap dobrze opisuje zagęszczanie drobnych frakcji węgla w matrycy zamkniętej. Dopasowanie stosowanego modelu matematycznego potwierdzono eksperymentalnie. Stwierdzono, że podczas zagęszczania miału węglowego wartość nacisku jednostkowego prasy zależy od wielkości oporów tarcia zewnętrznego [Sinka 2003].

Wykazano, że brykiety formowane przy mniejszych oporach tarcia wymagają mniejszych nacisków prasy i charakteryzuje je bardziej jednorodna struktura wewnętrzna. Zwiększenie nacisku prasy skutkowało większą niejednorodnością struktury wewnętrznej brykiety [Kortas i in. 2001]. Zwiększanie nacisków prasy



nie przynosiło większego zagęszczenia brykietów (tab. 12, rys. 13). Stwierdzono ponadto występowanie anizotropowości w pomiarach mikrotwardości na powierzchni przekroju poprzecznego i wzdłużnego brykietu, co wynika z nierównomiernego rozkładu gęstości brykietu.

Zavaliangos i inni [2003, 2007] analizując formowanie brykietów w prasie walcowej przedstawili zbliżone wyniki modelowania metodą elementów skończonych. Materiałem roboczym był zmielony miał węglowy o zawartości wody 9% i gęstości nasypowej  $0,69 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ . Wartości naprężeń wzdłużnych i poprzecznych określono eksperymentalnie, a wyniki aproksymowano w celu najlepszego zestawu stałych parametrów modelu matematycznego.

Wartości współczynnika tarcia  $m$  wyznaczono eksperymentalnie i zmniejszały się one od wartości 0,4 do 0,2 w zakresie nacisków jednostkowych od 40 do 120 MPa. Wykazano, że stopień zagęszczenia materiału zwiększa się wraz ze wzrostem siły docisku walców i ich momentu obrotowego oraz ze zwiększeniem współczynnika tarcia pomiędzy materiałem a powierzchnią walców [Yehia 2007]. Stwierdzono ponadto, że wartości naprężeń wewnętrznych w brykietach są anizotropowe, co jest przyczyną lokalnych pęknięć.

Wyniki symulacji komputerowych dostarczyły wiele bardzo ważnych informacji o czynnikach wpływających na poprawę jakości brykietów paliwowych wytwarzanych w prasie stemplowej oraz w prasie walcowej. Zauważono, że rodzaj stosowanej prasy do brykietowania nie ma większego znaczenia, jej wybór jest podyktowany względami ekonomicznymi i możliwościami producenta. W przemysłowych liniach technologicznych częściej spotyka się prasy walcowe. Problematyka doboru pras oraz zespołów formujących rozwijana jest przez badaczy w Akademii Górniczo-Hutniczej w Krakowie [Hryniewicz 1997; Hryniewicz i in. 2004; Kosturkiewicz, Janewicz 2002].

Wyniki badań laboratoryjnych wskazują, że na proces formowania brykietów wpływają rodzaj surowca, zawartość wody oraz rodzaj substancji wiążących. Wyniki badań brykietów paliwowych wskazują, że istotnymi czynnikami technologicznymi są: udział lepiszcza, czas mieszania dla uzyskania jednorodnej struktury, uwodnienie, stopień zagęszczenia i rodzaj układu zagęszczającego, a także czas suszenia i sezonowania.

Inni autorzy także wykazali, że na jakość brykietu duży wpływ ma dobór właściwego lepiszcza oraz zapewnienie odpowiedniej wilgotności materiału [Broeckmann i in. 2008, Dzik 2008]. Oprócz przygotowania materiału na właściwości brykietów mają również wpływ parametry scalania [Guigon, Simon 2003]. Właściwości wytrzymałościowe brykietów zależą od ich rozmiarów i kształtu wynikających z geometrii układu zagęszczania [Rahman 1989]. W niektórych jednak przypadkach stwierdzono, że na uzyskanie prawidłowych wyrobów większy wpływ ma rodzaj materiału i sposób jego przygotowania, niż konfiguracja i parametry układu zagęszczania [Bacher 2007].

Uzyskanie odpowiednich brykietów z droбноziarnistego węgla kamiennego przy zastosowaniu prasy stemplowej wymagało dodania lepiszcza (np. skrobi, wapna, melasy) w ilości stanowiącej ok. 8% masy mieszanki oraz dosuszenia do wilgotności 7–9%. (tab. 15, rys. 17). Brykietowanie tego samego węgla w prasie walcowej również wymagało dodania skrobi ziemniaczanej lub wapna hydratyzowanego, ale należało zwiększyć zawartości wody mieszaniny do 24% (tab. 18). Dodatek melasy okazał się niewłaściwy w tym procesie. Brykiety o dużym uwodnieniu dosuszano w suszarce, a następnie sezonowano w pojemnikach lub workach, dzięki czemu nabywały wysokiej odporności mechanicznej (tab. 19 i 20).

Wyniki badań laboratoryjnych brykietów węglowych ze skrobią umożliwiły określenie następujących parametrów paliwa:

- gęstość właściwa – 1200 kg·m<sup>-3</sup>,
- wytrzymałość na ściskanie – 2,2–6,4 MPa,
- odporność na zrzut grawitacyjny – 91,2–98,4%,
- wodoodporność – 12 min,
- wartość opałowa – 23 675 kJ·kg<sup>-1</sup>,
- ciepło spalania – 25 095 kJ·kg<sup>-1</sup>,
- zawartość wody – 3,8%,
- zawartość części lotnych – 26,6%,
- zawartość popiołu – 12,2%,
- zawartość siarki – 0,9%,
- emisja pyłów do atmosfery podczas spalania – NO<sub>x</sub>: 420 mg·m<sup>-3</sup>,  
SO<sub>2</sub>: 1320 mg·m<sup>-3</sup>, CO: 12 mg·m<sup>-3</sup>, CO<sub>2</sub>: 5,1%, H<sub>2</sub>S: 13,1 mg·m<sup>-3</sup>.

Zmieszanie rozdrobnionego drewna z miałem węgla kamiennego, a następnie brykietowanie zarówno w prasie stemplowej, jak i walcowej pozwoliło uzyskać prawidłowe wyroby. Zawartość biomasy nie powinna być większa niż 20% udziału masowego, co jest równoważne około 50% udziału objętościowego.

Wielu badaczy stwierdziło, że dodatek biomasy do miału węglowego umożliwia zmniejszenie emisji pyłów do atmosfery, a także zmniejszenie zawartości części lotnych, popiołu i siarki podczas spalania brykietów w porównaniu do spalania samego węgla [Purohit i in. 2006; Boruk, Winkler 2009; Hyncar, Górski 2003; Kubica i in. 2003; Ściążko i in. 2006]. Ze względów ekologicznych spalanie brykietów węglowych z biomasą jest zatem korzystniejsze niż spalanie samego węgla [Temmerman i in. 2006].

Dodatek biomasy pełni rolę spoiwa dla ziaren węgla w brykiecie. Wykazano, że dodanie innego spoiwa nie zwiększało znacząco odporności mechanicznej brykietów (tab. 14, tab. 19). Brykiety węglowe z biomasą mają wystarczającą wartość opałową, aby zastosować je jako alternatywne paliwo kotłów grzewczych małej mocy.

Niektórzy badacze wskazują także na celowość brykietowania drobnoziarnistych odpadów węglowych z dodatkiem bioskładników jako paliwa stosowanego w obiektach energetycznych o dużej mocy grzewczej [Hycnar i in. 2005]. Do brykietowania wymienionych mas stosowano prasy walcowe. Badano wytrzymałość uzyskanych brykietów z uwzględnieniem rodzaju i zawartości spoiwa oraz czasu sezonowania. Inne wyniki badań [Giemza i in. 2007] wskazują na możliwość uruchomienia produkcji brykietów węglowo-biomasowych o wartości energetycznej w zakresie 19–24 MJ·kg<sup>-1</sup> i zawartości popiołu 15–28% oraz wody 4–8%. Brykiety te mogą być użyte do spalania w kotłach rusztowych oraz w piecach małej i średniej mocy.

Brykiety węgla z biomasą uzyskane w testach laboratoryjnych mają podobne właściwości, jak w podanych wyżej źródłach literaturowych. Przeprowadzono zatem dodatkowe testy wykorzystując istniejącą przemysłową linię produkcyjną brykietów.

Na podstawie danych wyników badań seryjnej produkcji brykietów węglowych w prasie walcowej (tab. 18–21) stwierdzono, że uzyskanie dobrych wyrobów wymaga dodania ok. 8% skrobi, dokładnego mieszania materiału z nawodnieniem do zawartości 24–25% wody oraz dosuszania i sezonowania przez co najmniej 4–5 dni. Korzystne wyniki uzyskano również w badaniach brykietów węglowych z 20-procentowym dodatkiem biomasy. Brykiety te charakteryzowały następujące parametry:

- gęstość właściwa – 1120 kg·m<sup>-3</sup>,
- wytrzymałość na ściskanie – 2,14–2,81 MPa,
- odporność na zrzut grawitacyjny – 94,1–97,5%,
- wodoodporność – 13 min,
- wartość opałowa – 18 520 kJ·kg<sup>-1</sup>,
- ciepło spalania – 20 372 kJ·kg<sup>-1</sup>,
- zawartość wody – 4,3%,
- zawartość części lotnych – 42,5%,
- zawartość popiołu – 2,1%,
- zawartość siarki – 0,05%,
- emisja pyłów do atmosfery podczas spalania – NO<sub>x</sub>: 400 mg·m<sup>-3</sup>,  
SO<sub>2</sub>: 1224 mg·m<sup>-3</sup>, CO: 19,2 mg·m<sup>-3</sup>, CO<sub>2</sub>: 4,6%, H<sub>2</sub>S: 18,3 mg·m<sup>-3</sup>.

Testowana wytrzymałość mechaniczna brykietów jest wystarczająca do przeprowadzenia operacji mechanicznego załadunku, transportu oraz rozładunku bez obawy o ich rozkruszenie. W przemysłowej produkcji brykietów węgla kamiennego z biomasą nie stosowano dodatkowego spoiwa, co jest korzystne także ze względów ekonomicznych. Producenci zainteresowani są wytworzeniem brykietów możliwie najtańszych i jednocześnie spełniających wysokie wymagania odbiorców.



Stosowanie skrobi ziemniaczanej dało dobre rezultaty w produkcji, jednak znacząco wzrasta koszt wytworzenia paliwa. Próby zastąpienia skrobi melasą nie powiodły się w istniejącej linii technologicznej. Stwierdzono, że melasa jest niewłaściwym dodatkiem w procesach brykietowania węgla na zimno.

Zaproponowano modernizację istniejącej linii produkcyjnej, którą można przeprowadzić w trzech wariantach:

1. Wprowadzenie dogęszczania w mechanizmie podającym (leju zasypowym) przez zastosowanie zasilania wymuszonego zamiast grawitacyjnego. Wymaga to zmiany konstrukcji leja zasilającego i zainstalowanie ślimaka napędzanego silnikiem elektrycznym. Zagęszczanie masy podawanej do brykietowania zwiększa jej gęstość w strefie formującej. Rozwiązanie to znalazło już powszechne zastosowanie do brykietowania węgla [Drzymała, Hryniewicz 1994; Kosturkiewicz 2001].
2. Wymiana jednego walca roboczego na walec gładki, bez wgłębień formujących. Sposób ten został wdrożony i przyniósł pozytywne efekty [Hryniewicz i in 2004]. Uzyskano brykiety o kształcie niesymetrycznym, zbliżonym do kształtu „siodła”. Udowodniono, że rozkład naprężeń w tych brykietach korzystnie wpływa na zwiększenie ich wytrzymałości [Hryniewicz 1997].
3. Zastosowanie walców o wgłębieniach umożliwiających uzyskanie brykietów o mniejszej objętości. Wykazano, że mniejsze rozmiary brykietów umożliwiają większy stopień zagęszczenia przy takich samych warunkach produkcji jak poprzednio [Simon, Guigon 2003].

Brykietowanie odpadów węgla kamiennego z dodatkiem biomasy jest coraz częściej stosowane w praktyce. Zawistowski i wsp. [2003] stosowali muły węglowe do produkcji paliw alternatywnych w kompozycji z biomasą. Dodatek biomasy poprawił właściwości energetyczne paliwa, szczególnie w zakresie obniżenia zawartości siarki i popiołu. Stosowano również miął węglowy, który koryguje konsystencję i zwiększa kaloryczność paliwa. Takie brykiety stanowiły pełnowartościowy produkt handlowy chętnie przyjmowany zarówno przez zakłady energetyczne, jak i przez odbiorców małych ilości.

Sołtys [2005] przedstawił wdrożoną technologię produkcji brykietów węglowych zawierających ok. 20% biomasy. Jako wsad węglowy stosowano mieszankę miąłów i mułów węglowych. Do mieszanki dodawano skrobię. Wartość opałowa brykietów wynosiła od 19 do 26 MJ·kg<sup>-1</sup>. Odpowiednie wymieszanie w brykiecie biomasy z węglem powodowało, że biomasa pozostawiała porowate przestrzenie ułatwiające penetrację powietrza. Dzięki temu istniały dobre warunki spalania węgla i uzyskano niską emisję gazów.

Stwierdzono zatem, że w krajowej energetyce coraz częściej jest stosowane współspalanie biomasy z węglem zarówno w postaci sypkiej, jak też zbrykietowanej [Kubica 2003]. Produkty spalania traktowane są jako odpady przemysłowe.

Znaczne ilości popiołów energetycznych można jednak wykorzystać, m.in. do budowy dróg i nasypów komunikacyjnych [Borowski, Miłczak 2010]. Popioły mają wysoką aktywność pucolanową, czyli zdolność do wiązania ze związkami wapniowymi w połączeniu z wodą [Hycnar 2006], co umożliwia ich wykorzystanie do produkcji mieszanek cementowych [Mäkelä i in. 2011].

Skład chemiczny popiołów jest jednak zmienny i zależy od rodzaju użytego paliwa oraz sposobu jego spalania i typu kotła energetycznego [Werther, Ogada 1999].

Głównym składnikiem popiołów ze spalania brykietów węglowo-biomasowych są krzemiany. W pobranych próbkach popiołów nie zanotowano obecności substancji niebezpiecznych. Prowadzone w Niemczech badania popiołów ze spalania węgla kamiennego również potwierdziły nietoksyczność tego odpadu [Huth, Kubisa 1996].

Aglomeracja popiołów jest właściwym sposobem uzdatniania tych odpadów [Ramamurrthy, Harikrishnan 2006; Rahman i in. 2012]. Często stosowaną metodą aglomeracji jest granulowanie, jednak w przypadku popiołów fluidalnych nie zawsze uzyskiwano dobre rezultaty. Popioły lotne z paleniska fluidalnego nie tworzyły trwałych bryłek, mimo, że spełniały teoretyczne wymogi materiału do granulowania [Hycnar 2006]. Podobnie popioły krzemianowe nie tworzyły wytrzymałych granul. Do popiołów dodawano zmielonego żużla z paleniska fluidalnego (od 5 do 30%). Ze wzrostem udziału żużla uzyskano granule o coraz większej wytrzymałości uderzeniowej i na ściskanie.

Metoda brykietowania, ze względu na stosowanie nacisku w prasach, umożliwiła uzyskanie wytrzymałych kształtek z popiołów dennych i lotnych. Uzyskano wytrzymałe brykiety, w szczególności ze spoiwem dwuskładnikowym (wapno hydratyzowane z cementem) w łącznym udziale od 8 do 10% oraz stosując nawadnianie mieszanki do 6% wilgotności. Określono również optymalny nacisk jednostkowy prasy stemplowej wynoszący 4,25 MPa. Uzyskane brykiety nabywały wysokiej odporności mechanicznej już po pięciu dniach sezonowania, natomiast maksymalną wytrzymałość osiągały po 28 dniach sezonowania.

Brykiety z popiołów charakteryzowała dobra odporność na czynniki atmosferyczne, określona przez mrozoodporność i nasiąkliwość. Parametry te spełniały wymogi określone dla budowlanych kruszyw mineralnych i sztucznych. Brykietowanie analizowanych popiołów przyniosło także znaczne zmniejszenie wymywalności substancji rozpuszczalnych w wodzie porównano z wymywalnością składników z popiołów sypekich.

Popioły lotne ze spalania osadów ściekowych zawierają znaczne ilości metali ciężkich zależnie od jakości ścieków [Chiang i in. 2009]. Brykietowanie samych popiołów nie zapewnia unieszkodliwienia metali niebezpiecznych. Zaproponowano zastosowanie zeszkliwienia brykietów [Borowski 2012b, 2012c]. Metodyka przetwarzania polegała na wytworzeniu brykietów z mie-

szanki zawierającej od 40 do 50% popiołów lotnych z dodatkiem pyłu szkła lub pyłu krzemionkowego, a także z domieszką cementu. Brykiety nagrzewano w temperaturze 1100 °C oraz w czasie 60 min, a następnie schładzano w wodzie uzyskując jednorodną amorficzną warstwę powierzchniową.

Zastosowany w procesie przetwórczym pył krzemionkowy (odpad z produkcji kruszyw krzemionkowych) lub pył szklany (rozdrobiona stłuczka szklana) w procesie syntezy termicznej tworzy strukturę krzemianową, w którą wbudowują się związki metali ciężkich znajdujące się w popiołach. Związki te tworząc krzemiany „są uwięzione” w brykiecie w sposób trwały. Nie istnieje zatem niebezpieczeństwo ich wymywania i migracji do otoczenia nawet podczas rozkruszenia brykietu [Kęps 2010]. Pył szkła i krzemionkowy mają podobną strukturę i pełnią funkcję topnika.

Inni badacze stosowali zeszkliwienie osadów ściekowych aglomerowanych metodą granulacji [Bernardo, Dal Maschio 2011; Lin i in. 2009; Żygadło, Latosińska 2008]. Uzyskane produkty miały właściwości porównywalne do powszechnie stosowanych kruszyw mineralnych, np. keramzytu.

Jako istotną wadę zeszkliwienia popiołów ze spalania osadów ściekowych stwierdzono konieczność poniesienia znacznych nakładów energetycznych. Przeprowadzone przez Kordylewskiego i wsp. [2003] testy energochłonności zeszkliwienia popiołów ze spalania węgla wykazały wydatek energii wynoszący 4,5 MJ w przeliczeniu na kilogram masy wyrobu. Wyniki obliczeń własnych wskazują na możliwość uzyskania energochłonności mniejszej o 0,4 MJ na 1 kg masy. Na zmniejszenie zużycia energii wpływa stosowanie niższej o ok. 200 °C temperatury nagrzewania brykietów popiołowych z dodatkiem topnika.

Na podstawie wyników badań podstawowych właściwości fizycznych, chemicznych i mechanicznych zeszkłonych brykietów stwierdzono, że istnieje możliwość spełnienia wymogów określonych dla kruszywa mineralnego i sztucznego stosowanego w budownictwie.

Badane produkty charakteryzowała ponadto duża mrozoodporność i mała nasiąkliwość oraz bardzo małe stężenie jonów metali ciężkich w wyciągach wodnych. Wymywalność składników zmniejszyła się kilkadziesiąt razy w testach zeszkłonych brykietów popiołowych.

Wielokrotnie stwierdzono, że zeszkliwienie jest najbardziej skutecznym sposobem unieszkodliwiania odpadów niebezpiecznych [Haugsten, Gustavson 2000; Kavouras i in. 2003; Lin i in. 2009]. Wyniki badań własnych potwierdziły zasadność tej opinii. Zeszkłone masy odpadów mogą być wykorzystane jako dodatek do produkcji materiałów budowlanych, a także do stabilizacji gruntów i drenaży wodnych w geotechnice.

# CZEŚĆ III

## PODSUMOWANIE I WNIOSKI

### 3.1. Podsumowanie

W opracowaniu przedstawiono metody przetwarzania odpadów drobnopielastych dla otrzymania produktów użytecznych. Głównymi elementami procesu przetwórczego było:

- 1) przygotowanie materiału – obejmowało homogenizację odpadów przez rozdrabnianie i przesiewanie, dodanie lepiszcza organicznego lub mineralnego, mieszanie wraz z korektą uwodnienia materiału;
- 2) brykietowanie – obejmowało dobór prasy oraz urządzeń do formowania brykietów, dobór układu podawania materiału, określenie nacisku jednostkowego oraz oporów tarcia zewnętrznego;
- 3) ocena brykietów – uwzględniała kryteria jakościowe, użytkowe oraz ochrony środowiska; wymagała wykonania, między innymi, testów wytrzymałościowych, oceny jednorodności struktury wewnętrznej, analizy wodoodporności i wymywalności substancji niebezpiecznych; uwzględniała wymogi potencjalnych odbiorców dotyczące przydatności brykietów jako wartościowych produktów.

Badania dotyczyły:

- przetwarzania odpadów węgla kamiennego zmieszanych z biomasą w celu wytworzenia alternatywnego paliwa do spalania w kotłach energetycznych;
- przetwarzania popiołów ze spalania brykietów węglowo-biomasowych do wytworzenia zamiennika kruszywa budowlanego na podbudowy drogowe;
- przetwarzania popiołów lotnych ze spalania osadów ściekowych w celu neutralizacji substancji niebezpiecznych oraz wykorzystania uzyskanych wyrobów w budownictwie, geotechnice i ogrodnictwie.

Efektami podjętych prac badawczych było:

- odzysk surowców energetycznych,
- odzysk surowców mineralnych stosowanych w budownictwie,
- możliwość bezpiecznego zagospodarowania odpadów zawierających metale ciężkie.

Z przeglądu literatury wynika, że do przetwarzania wielu rodzajów drobnoziarnistych odpadów wskazane jest ich brykietowanie. Ważnym elementem tego procesu jest ujednorodnienie mieszanki, doprowadzenie jej do właściwej wilgotności oraz dodatek lepiszcza lub spoiwa. Brykiety mogą być substytutem surowców naturalnych oraz nadają się do wykorzystania jako pełnowartościowe produkty, które mogą być bezpieczne dla środowiska.

Nie opracowano dotąd wystarczająco skutecznych metod przetwarzania odpadów drobnoziarnistych na produkty użyteczne, w szczególności odpadów zawierających substancje niebezpieczne, np. metale ciężkie i ich związki. W tym celu coraz szerzej wykorzystuje się zeszkliwienie. Istniejące instalacje do zeszkliwienia umożliwiają wytworzenie szczelnej i wytrzymałej struktury amorficznej uniemożliwiającej migrację szkodliwych związków do środowiska. Dotychczas zeszkliwienie stosowano w odniesieniu do odpadów w postaci sypkiej lub ciastowatej pasty, a także granulatu. Nie testowano natomiast zeszkliwienia odpadów formowanych w brykiety.

W badaniach symulacyjnych z zastosowaniem metody elementów skończonych wykazano przydatność przyjętego modelu matematycznego Drucker-Prager Cap do procesu scalania drobnoziarnistych węgli w matrycy zamkniętej. Dopasowanie zastosowanego modelu potwierdzono eksperymentalnie. W procesie zagęszczania miału węglowego stwierdzono zależność nacisku jednostkowego prasy od oporów tarcia zewnętrznego. Wykazano, że brykiety formowane przy niższych oporach tarcia charakteryzuje bardziej jednorodna struktura wewnętrzna oraz, że przy stosunkowo małych naciskach prasy uzyskuje się duży stopień zagęszczenia brykietów. Stwierdzono ponadto występowanie anizotropowości naprężeń wewnętrznych, która wpływa na nierównomierny rozkład gęstości brykietu.

Wyniki symulacji komputerowej wykorzystano do doboru parametrów wytwarzania brykietów paliwowych w prasie stemplowej oraz walcowej. Zauważono, że rodzaj stosowanej prasy do wytwarzania brykietów nie ma większego znaczenia, jej wybór podyktowany jest względami ekonomicznymi i możliwościami producenta. W przemysłowych liniach technologicznych korzystne jest stosowanie pras walcowych.

W przeprowadzonych badaniach laboratoryjnych wykazano, że na jakość brykietów wpływa zawartość wody mieszanki, nacisk jednostkowy i dodatek substancji wiążących. W trakcie przygotowania odpadów do formowania istotne jest dokładne ich mieszanie. Badając brykiety z węgla i biomasy stwierdzono ponadto wpływ następujących czynników: stopnia zagęszczenia, udziału lepiszcza, zawartości wody, czasu sezonowania, jednorodności struktury wewnętrznej, wartości energetycznej oraz emisji pyłów do atmosfery podczas spalania.

W przypadku drobnoziarnistego węgla kamiennego scalanego w prasie stemplowej uzyskanie odpowiednich brykietów wymagało dodania lepiszcza

w postaci melasy, skrobi, lub wapna hydratyzowanego w ilości wagowo ok. 8% masy mieszanki oraz dosuszenia do wilgotności 7–9%. Stosowanie lepiszcza zwiększało wytrzymałość mechaniczną wyrobów formowanych w prasach. Korzystne było również sezonowanie brykietów.

W badaniach pilotowo-wdrożeniowych brykietowania węgla w prasie walcowej stosowanym dodatkiem do mieszanki była skrobia ziemniaczana lub biomasa. Zawartość wody w masie odpadowej powinna wynosić do 24–25%. Brykiety wymagały dosuszania termicznego, a następnie sezonowania w pojemnikach lub workach. Po 4–5 dniach sezonowania nabywały wysokiej odporności mechanicznej.

Przetwarzając mieszankę odpadów węgla z dodatkiem ok. 20% wagowo biomasy drzewnej uzyskano wytrzymałe brykiety paliwowe o wartości opałowej w zakresie 18–19 MJ·kg<sup>-1</sup>. Dodatek masy drzewnej do miazgi węgla kamiennego korzystnie wpływał na właściwości mechaniczne brykietów, wytwarzanych zarówno w prasie stemplowej, jak i walcowej. Zauważono, że pełniła ona rolę spoiwa. Niektóre lepiszcza, np. melasa, są nieodpowiednimi dodatkami do brykietowania węgla w typowych warunkach. Stwierdzono, że wyprodukowane w skali przemysłowej brykiety paliwowe mogą być zastosowane jako alternatywne paliwo do spalania w kotłach grzewczych o małej mocy stosowanych w gospodarstwach indywidualnych.

Powstałe w wyniku spalania tych brykietów popioły były przedmiotem dalszych badań dotyczących przetwarzania. Wykazano, że brykiety popiołowe mogą być powszechnie wykorzystane jako substytut kruszywa mineralnego na podbudowy drogowe. Stwierdzono brak negatywnego wpływu tych produktów na środowisko wodne i gruntowe, przy zapewnieniu szczelności podłoża pod warstwą kruszywa z brykietami popiołowymi. Należy jednak uwzględnić, że obserwacje prowadzono w stosunkowo krótkim czasie składowania. W dłuższej perspektywie można się spodziewać erozyjnego uszkodzenia brykietów i ewentualnego przedostawania się związków chemicznych do gruntu. Należy zatem zapewnić szczelność podłoża pod warstwą kruszywa z brykietami popiołowymi.

Do zagospodarowania popiołów lotnych ze spalania osadów ściekowych, zawierających metale ciężkie i ich związki, zaproponowano dwuetapowy proces przetwórczy. W pierwszym etapie brykietowano mieszankę popiołów i proszku szkła z domieszką cementu, a w następnym nagrzewano w piecu oraz intensywnie schładzano uzyskując zeszklenie brykietu. Badania struktury wykazały, że uzyskana warstwa powierzchniowa szkła była równomierna i szczelna, zaś kompozycja wewnętrzna składała się z licznych porów obudowanych krzemianami. Szkodliwe nierozpuszczalne związki zostały zamknięte wewnątrz porów, natomiast substancje rozpuszczalne tworzyły szkielet krzemianowej struktury krystalicznej.



Wyniki badań zeszkłonych brykietów popiołowych pokazały możliwość uzyskania dużej trwałości i odporności zarówno na czynniki atmosferyczne, jak i środowiskowe. Zeszkliwienie zapewniło bardzo małą wymywalność substancji niebezpiecznych do środowiska. Stworzono możliwość bezpiecznego składowania lub zagospodarowania tych wyrobów. Nadają się do szerokiego stosowania w budownictwie do produkcji lekkich betonów i zapraw ciepłochronnych, do wyrobu pustaków ściennych i stropowych, a także do stabilizacji gruntów i drenaży wodnych w geotechnice.

### **3.2. Wnioski**

Na podstawie wyników badań sformułowano następujące wnioski:

1. Wyniki eksperymentów symulacyjnych według metody elementów skończonych informują o wpływie tarcia zewnętrznego na rozkład zagęszczenia materiału ziarnistego oraz umożliwiają dobór właściwych parametrów prasy formującej.
2. Przygotowanie odpadów do brykietowania wymaga doboru określonych proporcji składników, dodania spoiwa oraz dokładnego mieszania i doprowadzenia mieszanki do odpowiedniej zawartości wody.
3. Stosując prasy stemplowe i walcowe uzyskuje się brykiety węglowo-biomasowe, stanowiące paliwo alternatywne o dobrych właściwościach mechanicznych i energetycznych.
4. Spalanie brykietów węglowo-biomasowych wydziela mniejsze ilości szkodliwych substancji oraz popiołu niż spalanie samego węgla. Wraz ze wzrostem udziału biomasy zmniejsza się jednak wartość energetyczna brykietów.
5. Brykietowanie popiołów umożliwia wykorzystanie go w budownictwie. Brykiety popiołowe ze spalania węgla i biomasy mogą być też deponowane na składowiskach.
6. Brykiety zawierające substancje toksyczne powinny być zeszkliwione. Mają one wtedy dużą trwałość mechaniczną, odporność na warunki atmosferyczne i bardzo małą wymywalność składników niebezpiecznych.
7. Brykietowanie odpadów węgla w prasach stemplowych wymaga dodania ok. 8% lepiszcza skrobiowego, mieszania w czasie ok. 3 minut, uwodnienia 7–9%, następnie brykietowania z naciskiem jednostkowym 4,25 MPa. Brykiety należy sezonować przez co najmniej 4–5 dni.

8. Brykietowanie odpadów węgla w prasach walcowych wymaga dodania 20% biomasy, mieszania z dodatkiem wody do zawartości 24–25%, oraz nacisku jednostkowego 110 MPa. Brykiety należy dosuszać w suszarce termicznej co najmniej 2 godziny i sezonować.
9. Brykietowanie popiołów ze spalania brykietów wymaga dodania 8–10% spoiwa dwuskładnikowego (wapna hydratyzowanego oraz cementu w równych udziałach), mieszania z korekcją zawartości wody do ok. 6%, oraz sezonowania brykietów.
10. Brykietowanie popiołu lotnego ze spalania osadów ściekowych wymaga dodania 50–60% pyłu szklanego, mieszania i kontroli zawartości wody w zakresie 10–15%. Brykiety należy nagrzewać w temperaturze 1100 °C i w czasie 60 minut oraz intensywnie schładzać w wodzie w celu zeszkliwienia.



## BIBLIOGRAFIA

1. ALTUN N.E., HICYILMAZ C., KÖK M.V. 2001. Effect of Different Binders on the Combustion Properties of Lignite: Part I. Effect on thermal properties. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, Springer Publishers, 65(3): 787–795.
2. BABANIN V.I., EREMIN A.Y. 2006. Briquetting fine-grained materials in ferroalloys production: practical experience and future prospects. *Metallurgist*, 50(5–6): 241–247.
3. BABANIN V.I., EREMIN A.Y., BEZDEZHSKII G.N. 2007. Development and introduction of a new technology for briquetting finely divided materials with sodium silicate. *Metallurgist*, 51(1–2): 131–135.
4. BACHER C., OLSEN P.M., BERTELSEN P., KRISTENSEN J., SONNERGAARD J.M. 2007. Improving the compaction properties of roller compacted calcium carbonate. *International Journal of Pharmaceutics*, 342: 115–123.
5. BAYKAL G., DOVEN A.G. 2000. Utilization of fly ash by pelletization process; theory, application areas and research results. *Resources Conservation and Recycling*, 30(1): 59–77.
6. BERNARDO E., DAL MASCHIO R. 2011. Glass-ceramics from vitrified sewage sludge pyrolysis residues and recycled glasses. *Waste Management*, 31(11): 2245–2252.
7. BIAŁOWIEC A., JANCZUKOWICZ W. 2009. Wykorzystanie popiołów. *Przegląd Komunalny*, 219.
8. BIELIŃSKA E.J., MOCEK-PŁÓCINIĄK A. 2009. Impact of uncontrolled waste dumping on soil chemical and biochemical properties. *Archives of Environmental Protection*, 35(3): 101–107.
9. BIEŃ J.B. 2007. Osady ściekowe. Teoria i praktyka. Wydawnictwo Politechniki Częstochowskiej.
10. BIEŃ J.B., WYSTALSKA K. 2009. Przekształcanie osadów ściekowych w procesach termicznych. Wydawnictwo Seidel-Przywecki Sp. z o.o., Warszawa.
11. BIEŃKO W. 2004. Lubelski Węgiel „Bogdanka” S.A. – technologia zakładu przeróbki mechanicznej węgla. *Inżynieria Mineralna*, 2(13): 45–49.
12. BINGHAM P.A., HAND R.J. 2006. Vitrification of toxic wastes: A brief review. *Advances in Applied Ceramics*, 105(1): 21–31.
13. BOROWSKI G. (red.) 2005. Gospodarka odpadami. Wydawnictwo Ekoinżynieria, Lublin: 1–278.
14. BOROWSKI G. 2006a. Metoda odzysku surowca z odpadów przemysłu łożyskowego. W: Gworek B. (red.) „Obieg pierwiastków w przyrodzie”. Tom III. Instytut Ochrony Środowiska – Państwowy Instytut Badawczy, Warszawa: 702–706.

15. BOROWSKI G. 2006b. Możliwości wykorzystania brykietów węgla z biomasą. W: Materiały IV Konferencji Naukowo-Technicznej „Postępy w inżynierii środowiska”. Wydawnictwo Politechniki Rzeszowskiej: 357–366.
16. BOROWSKI G. 2007a. Możliwości modelowania procesów scalania materiałów drobnoziarnistych w prasach walcowych. W: Józwik J. (red.) „Techniki wytwarzania w budowie maszyn – aktualne zagadnienia badawcze”. Lubelskie Towarzystwo Naukowe, Lublin: 205–212.
17. BOROWSKI G. 2007b. The possibility of utilizing coal briquettes with a biomass. *Environment Protection Engineering*, 33(2): 79–86.
18. BOROWSKI G. 2007c. Zastosowanie komputerowej analizy obrazu do badań struktury brykietów z materiałów drobnoziarnistych. *Postępy Nauki i Techniki*, 1: 17–24.
19. BOROWSKI G. 2008a. Badania właściwości mechanicznych brykietów węgla z biomasą. *Postępy Nauki i Techniki*, 2: 81–89.
20. BOROWSKI G. 2008b. Metoda utylizacji materiałów drobnoziarnistych. W: Wiatr I. (red.) „Uwarunkowania ekorozwoju turystyki i rekreacji”. Polskie Towarzystwo Inżynierii Ekologicznej, Lublin: 288–294.
21. BOROWSKI G. 2009a. Badania brykietów węglowo-biomasowych wykorzystywanych do celów energetycznych. W: Kotowicz J. (red.) „Rynek ciepła 2009”, Wydawnictwo Kaprint, Lublin: 299–308.
22. BOROWSKI G. 2009b. Possibilities of utilization of energy briquettes. In: Schwarz H., Leonowicz Z. (eds.) „Proceedings of the 8<sup>th</sup> International Conference on Environment and Electrical Engineering”. Published by Technical University of Cottbus, Germany: 110–113.
23. BOROWSKI G. 2009c. Technologiczne aspekty brykietowania surowców energetycznych. W: Biegańska J., Landrat M. (red.) „Paliwa z odpadów 2009”, Politechnika Śląska w Gliwicach: 209–216.
24. BOROWSKI G. 2009d. Określenie właściwości fizyczno-mechanicznych materiałów drobnoziarnistych w celu ich zagospodarowania. *Postępy Nauki i Techniki*, 3: 67–82.
25. BOROWSKI G. 2009e. Produkty odpadowe jako surowce wtórne. *Inżynieria Ekologiczna*, 21: 85–96.
26. BOROWSKI G. 2010. Możliwości wykorzystania odpadów z energetyki do budowy dróg. *Inżynieria Ekologiczna*, 22: 52–62.
27. BOROWSKI G. 2011a. Effect of friction for density distribution in die compaction of powders. *Postępy Nauki i Techniki*, 10: 159–168.
28. BOROWSKI G. 2011b. Przetwarzanie popiołu ze spalania osadów ściekowych na materiał budowlany. *Inżynieria Ekologiczna*, 25: 251–258.
29. BOROWSKI G. 2011c. Symulacja rozkładu stopnia zagęszczenia w procesie scalania materiałów drobnoziarnistych z użyciem metody elementów skończonych. *Zeszyty Naukowe Politechniki Rzeszowskiej, Budownictwo i Inżynieria Środowiska*, 276: 27–36.

30. BOROWSKI G. 2011d. Wykorzystanie brykietowania do zagospodarowania odpadów. Monografia. Lubelskie Towarzystwo Naukowe, Lublin: 1–176.
31. BOROWSKI G. 2011e. Possibilities of utilization of energy briquettes. *Electrical Engineering Research Report*, 1(27): 48–51.
32. BOROWSKI G. 2012a. Porównanie dwóch sposobów określenia wytrzymałości brykietów z materiałów drobnziarnistych. *Postępy Nauki i Techniki*, 12: 115–121.
33. BOROWSKI G. 2012b. Ocena przydatności zeszkliwienia osadów ściekowych do ich zagospodarowania. *Ochrona Środowiska i Zasobów Naturalnych*, 51: 78–84.
34. BOROWSKI G. 2012c. Suitability tests of fly ashes vitrification from sewage sludge incineration. *Archives of Environmental Protection*, 38(2): 81–87.
35. BOROWSKI G., KUCZMASZEWSKI J. 2005a. Investigation on briquetting of metal wastes from bearing industry. *Waste Management & Research*, Sage Publications Ltd, Copenhagen, 5(23): 473–478.
36. BOROWSKI G., KUCZMASZEWSKI J. 2005b. Utylizacja drobnziarnistych odpadów metalowych. Monografia. Wydawnictwo Politechniki Lubelskiej, 1–168.
37. BOROWSKI G., KUCZMASZEWSKI J., HRYNIEWICZ M. 2005. Sposób wytwarzania brykietów z drobnziarnistych materiałów metalowych. Patent RP nr PL 201554. *Biuletyn Urzędu Patentowego*, 33(10), 819, s. 58.
38. BOROWSKI G., LENIK K. 2008. Wykorzystanie odpadów szlifierskich jako substytutu złomu stalowego. *Ochrona Środowiska i Zasobów Naturalnych*, 34: 173–181.
39. BOROWSKI G., MIŁCZAK M. 2010. Badania przydatności brykietów z popiołów paleniskowych jako podbudowy drogowej. *Postępy Nauki i Techniki*, 4: 136–143.
40. BOROWSKI G., WOŚKO M. 2013. Ecological and technical requirements of radioactive waste utilisation. *Journal of Ecological Engineering*, 14(1): 40–47.
41. BORUK S., WINKLERI. 2009. Ecologically friendly utilization of coal processing waste as a secondary energy source. In: *Energy and Environmental Challenges to Security*. Springer Publishers: 251–259.
42. BROECKMANN C., HOFTER A., PACKEISEN A. 2008. Cladding of briquetting tools by hot isostatic pressing for wear resistance. *International Journal of Powder Metallurgy*, 44(5): 49–56.
43. BULTMANN J.M. 2002. Multiple compaction of microcrystalline cellulose in a roller compactor. *European Journal of Pharmaceutics and Biopharmaceutics*, 54: 59–64.
44. CHIANG K.Y., TSAI C.C., WANG K.S. 2009. Comparison of leaching characteristics of heavy metals in APC residue from an MSW incinerator using various extraction methods. *Waste Management*, 29(1): 277–284.
45. COCIC M., LOGAR M., MATOVIC B., POHARC-LOGAR V. 2010. Glass-ceramics obtained by the crystallization of basalt. *Science of Sintering*, 42(3): 383–388.
46. COLOMBO P., BRUSATIN G., BERNARDO E., SCARINCI G. 2003. Inertization and reuse of waste materials by vitrification and fabrication of glass-based products. *Current Opinion in Solid State and Materials Science*, 7(3): 225–239.

47. CONNELLY A.J., HAND R.J., BINGHAM P.A., HYATT N.C. 2011. Mechanical properties of nuclear waste glasses. *Journal of Nuclear Materials*, 408(2): 188–193.
48. COUBE O., BREWIN P. 2002. Modelling and numerical simulation of powder compaction. *Powder Metallurgy*, 45(1): 18–19.
49. CUNNINGHAM J.C., SINKA I.C., ZAVALIANGOS A. 2004. Analysis of tablet compaction. Part I. Characterization of mechanical behaviour of powder and powder/tooling friction. *Journal of Pharmaceutical Science*, 93: 2022–2039.
50. DEC R.T. 1999. Study of compaction process in roll press. *Proceedings of the Institute for Briquetting and Agglomeration*, 22: 207–218.
51. DEC R.T. 2002. Optimizing and controlling roll press operating parameters. *Powder Handling & Processing*, 14: 222–225.
52. DEC R.T., ZAVALIANGOS A., CUNNINGHAM J.C. 2003. Comparison of various modeling methods for analysis of powder compaction in roller press. *Powder Technology*, 130: 265–271.
53. DRZYMAŁA Z. 1993. *Industrial Briquetting – Fundamentals and Methods*. Studies in Mechanical Engineering. Elsevier Science Publishers, Amsterdam.
54. DRZYMAŁA Z. 2000. Rozwój metod modelowania matematycznego procesu zagęszczania wybranych odpadów przemysłowych w prasach stemplowych. *Materiały III Forum Inżynierii Ekologicznej, Nałęczów*: 258–268.
55. DRZYMAŁA Z., HRYNIEWICZ M. 1994. A new approach to brown coal binderless briquetting. *Proceedings of the 12<sup>th</sup> International Coal Preparation Congress, Kraków*: 377–383.
56. DRZYMAŁA Z., HRYNIEWICZ M. 1999. O doskonaleniu konstrukcji układu zagęszczania pras walcowych do brykietowania drobnoziarnistych odpadów żelazonośnych. *Przegląd Mechaniczny*, 58(14): 8–13.
57. DRZYMAŁA Z., HRYNIEWICZ M., JANEWICZ A. 2000. Badania nad sposobem utylizacji odpadowego tlenku cynku. *Zeszyty Naukowe Politechniki Łódzkiej, Inżynieria Chemiczna i Procesowa*, 27: 60–70.
58. DZIK T. 2008. Teoretyczna i eksperymentalna analiza procesu scalania odpadów pochodzenia roślinnego. *Chemik: Nauka - Technika - Rynek*, 61(9): 450–452.
59. EREMIN A.Y., BABANIN V.I., KOZLOVA S.Y. 2003. Requirement to indices of mechanical strength of briquettes with binder. *Metallurgist*, 11: 32–38.
60. EROL M, KUCUKBAYRAK S, ERSOY-MERICBOYU A. 2008. Comparison of the properties of glass, glass-ceramic and ceramic materials produced from coal fly ash. *Journal of Hazardous Materials*, 153(1-2): 418–425.
61. FLORE K., SCHOENHERR M., FEISE H. 2009. Aspects of granulation in the chemical industry. *Powder Technology*, vol. 189: 327–331.
62. FYTILI D., ZABANIOTOU A. 2008. Utilization of sewage sludge in UE application of old and new methods – a review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 12: 116–140.

63. GALEN S., ZAVALIANGOS A. 2005. Strength anisotropy in cold compacted ductile and brittle powders. *Acta Materialia*, 53: 4801–4815.
64. GAWLICKI M., ROSZCZYNIALSKI W. 1995. Wykorzystanie odpadów energetycznych jako składnika namiarów surowcowych do produkcji klinkieru portlandzkiego. W: *Materiały Konferencji Naukowo-Technicznej „Zagospodarowanie pyłów i popiołów z energetyki i ciepłownictwa – technologia, organizacja, ekonomika”*, Sopot.
65. GIEMZA H., GRUSZKA G, HYCINAR J., JÓZEFIAK T., KIEMASZEK K. 2007. Optymalizacja zagospodarowania sedymentu węglowego – technologia brykietowania sedymentu. *Polityka Energetyczna*, 10(2): 417–429.
66. GNUTEK M., MOROŃ W., RYBAK W. 2002. Problematyka zapłonu i współzapłonu węgla i biomasy. *Czysta Energia*, 9.
67. GÓRALCZYK S., MAZELA A., UZUNOW E., NAZIEMIEC Z. 2009. Kruszywa lekkie z osadów ściekowych i odpadów mineralnych. W: *Materiały Konferencji Kruszywa Mineralne, Szklarska Poręba*.
68. GRANOPS T. 1994. Wyniki badań i prognozy wykorzystania popiołów z Dolnej Odry w drogownictwie. W: *Materiały Międzynarodowej Konferencji „Zagospodarowanie odpadów paleniskowych i odpadów z odsiarczania spalin”*, Świnoujście.
69. GUIGON P., SIMON O. 2003. Roll press design – influence of force feed systems on compaction. *Powder Technology*, 130: 41–48.
70. HAUGSTEN K.E., GUSTAVSON B. 2000. Environmental properties of vitrified fly ash from hazardous and municipal waste incineration. *Waste Management*, 20: 167–176.
71. HEIM A. 2005. Zagadnienia procesowo-aparaturowe aglomeracji. W: *Materiały IX Ogólnopolskiej Konferencji „Kompleksowe i szczegółowe problemy inżynierii środowiska”*, Politechnika Koszalińska.
72. HEJFT R. 2002. Ciśnieniowa aglomeracja materiałów roślinnych. Wydawnictwo Instytutu Technologii Eksploatacji w Radomiu.
73. HEJFT R. 2008. Peletowanie i brykietowanie w urządzeniach o niewielkiej wydajności. *Czysta Energia*, 80.
74. HEJFT R., OBIDZIŃSKI S. 2006. Produkcja granulatów i brykietów w aspekcie cech jakościowych. *Czysta Energia*, 55.
75. HERTING M.G., KLEINEBUDDE P. 2007. Roll compaction/dry granulation: Effect of raw material particle size on granule and tablet properties. *International Journal of Pharmaceutics*, 338: 110–118.
76. HRYNIEWICZ M. 2000. Model matematyczny procesu brykietowania drobnopozarnistych odpadów przemysłowych w prasie walcowej. W: *Materiały III Forum Inżynierii Ekologicznej*, Nałęczów: 269–276.
77. HRYNIEWICZ M. 1997. Metoda doboru pras walcowych oraz opracowania założeń do ich modernizacji lub konstrukcji. *Zeszyty Naukowe AGH – Rozprawy i Monografie nr 58*, Kraków.

78. HRYNIEWICZ M. 2002. Badania procesów przygotowania drobnoziarnistych odpadów żelazonośnych do recyklingu. W: Materiały IV Forum Inżynierii Ekologicznej, Nałęczów: 75–83.
79. HRYNIEWICZ M. 2004. Możliwości zagospodarowania drobnoziarnistych odpadów metalonośnych. Monografie Wydziału Inżynierii Mechanicznej i Robotyki AGH nr 23: 63–70.
80. HRYNIEWICZ M., BOROWSKI G., KUCZMASZEWSKI J. 2003. Badania nad sposobem utylizacji odpadów poszlifierskich przemysłu łożyskowego. W: Materiały VII Międzynarodowej Konferencji „Recyklacja Odpadu”, VŠB–TU Ostrawa: 95–102.
81. HRYNIEWICZ M., GARAP., BEMBENEK M. 2008. Improvement of the calcium hydroxide sorbent production method. Polish Journal of Environmental Studies, vol. 17: 240–244.
82. HRYNIEWICZ M., JANEWICZ A. 2008. Badania i rozwój konstrukcji prasy walcowej. Problemy Eksploatacji, 3: 143–151.
83. HRYNIEWICZ M., JANEWICZ A., BOROWSKI G., KUCZMASZEWSKI J. 2004. Praktyczne aspekty utylizacji odpadów poszlifierskich przemysłu łożyskowego. Monografie Wydziału Inżynierii Mechanicznej i Robotyki AGH nr 23: 79–85.
84. HRYNIEWICZ M., JANEWICZ A., KOSTURKIEWICZ B. 2004. Brykietowanie osadów ściekowych w prasie walcowej. Monografie Wydziału Inżynierii Mechanicznej i Robotyki AGH nr 23: 87–93.
85. HRYNIEWICZ M., JANEWICZ A., KOSTURKIEWICZ B. 2006. Doskonalenie konstrukcji elementów formujących pras walcowych. Czasopismo Techniczne. Mechanika, 103(1): 131–137.
86. HRYNIEWICZ M., JANEWICZ A., KOSTURKIEWICZ B., GARAP. 2003. Badania procesów scalania osadów szlamów konwertorowych. Inżynieria i Aparatura Chemiczna, 42(3): 73–74.
87. HRYNIEWICZ M., KOSTURKIEWICZ B., JANEWICZ A. 2004. Wybrane zagadnienia doskonalenia konstrukcji i eksploatacji pras walcowych. Problemy Eksploatacji, 4: 63–70.
88. HRYNIEWICZ M., KOSTURKIEWICZ B., JANEWICZ A. 2006. Scalanie drobnoziarnistych odpadów. Zeszyty Naukowe – Inżynieria Chemiczna i Procesowa. Politechnika Łódzka, 29: 89–98.
89. HUANG S.-C., CHANG F.-C., LO S.-L., LEE M.-Y., WANG C.-F., LIN J.-D. 2007. Production of lightweight aggregates from mining residues, heavy metal sludge, and incinerator fly ash. Journal of Hazardous Materials, 144(1-2): 52–58.
90. HUTH H., KUBISA R. 1996. Wykorzystanie odpadów z elektrowni na bazie energetyki niemieckiej. W: Materiały Konferencji Naukowo-Technicznej „Produkty uboczne spalania węgla w energetyce jako pełnowartościowy surowiec”, Świnoujście.
91. HYCNAR J. 2006. Czynniki wpływające na właściwości fizykochemiczne i użytkowe stałych produktów spalania paliw w paleniskach fluidalnych. Wydawnictwo Górnicze, Katowice.



92. HYCENAR J., FOLTYN R., OLKUSKI R., BLASCHKE S.A. 2005. Kierunki energetycznego wykorzystania drobnopopielastych odpadów z wydobycia i wzbogacania węgla kamiennego. W: Materiały IX Ogólnopolskiej Konferencji „Kompleksowe i szczegółowe problemy inżynierii środowiska”, Politechnika Koszalińska.
93. HYCENAR J., GÓRSKI M. 2003. Uwarunkowania współspalania węgla i biomasy. *Polityka Energetyczna*, tom 6, z. spec. Wydawnictwo Instytutu Gospodarki Surowcami Mineralnymi i Energią PAN, Kraków: 309–320.
94. INGUNZA M.P.D., DUARTE A.C.L., NASCIMENTO R.M. 2011. Use of sewage sludge as raw material in the manufacture of soft-mud bricks. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 23(6): 852–856.
95. INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY (IAEA) 2006. Application of thermal technologies for processing of radioactive wastes. IAEA Vienna, Austria: 59–61.
96. ISOBE Y., WANG Q., SAKAMOTO K. 2004. Utilization of coal-biomass briquette combustion ash for soil improvement. *Environmental Science*, 17(6): 431–438.
97. JABŁOŃSKI J. 1996. Wykorzystanie gospodarcze popiołów w procesie produkcji cementu na przykładzie cementowni Kujawy-Lafarge. W: Materiały Seminarium Nauk.-Szkol. „Popioły a środowisko”, Prędocim k/Bydgoszczy.
98. JACKSON M.J., MILLS B., HITCHINER M.P. 2003. Controlled wear of vitrified abrasive materials for precision grinding applications. *Sadhana*, 28(5): 897–914.
99. JORDÁN M.M., ALMENDRO-CANDEL M.B., ROMERO M., RINCÓN J.M. 2005. Application of sewage sludge in the manufacturing of ceramic tile bodies. *Applied Clay Science*, 30: 219–224.
100. JURASZKA B., PIECUCH T. 2007. Spalanie osadów pokoagulacyjnych zawierających kleje organiczne oraz utylizacja powstałych popiołów. *Polityka Energetyczna*, 10(2): 85–101.
101. KACZMARCZYK M., KRÓL E.E. 2007. Sposób zagospodarowania odpadów przemysłowych. Patent PL 196075.
102. KALEMBASA S., KALEMBASA D., GODLEWSKA A., KUZIEMSKA B. 2007. Sposób utylizacji odpadów energetycznych i osadów ściekowych. Patent PL 196106.
103. KARAMANOV A., ALOISI M., PELINO M. 2007. Vitrification of copper flotation waste. *Journal of Hazardous Material*, 140: 333–339.
104. KARBOWNICZEK M., SADOWSKI A., HRYNIEWICZ M. 2005. Możliwości zastosowania odpadów poszlifierskich z produkcji łożysk jako wsadu w piecu łukowym. *Hutnik Wiadomości Hutnicze*, 72(7-8): 371–377.
105. KASZYŃSKA M. 1994. Wpływ popiołów lotnych z Dolnej Odry na własności betonów. W: Materiały Międzynarodowej Konferencji „Zagospodarowanie odpadów paleniskowych i odpadów z odsiarczania spalin”, Świnoujście.

106. KAVOURAS P., KAIMAKAMIS G., IOANNIDIS T.A., et al. 2003. Vitrification of lead-rich solid ashes from incineration of hazardous industrial wastes. *Waste Management*, 23: 361–371.
107. KĘPYS W. 2008. Próba odzysku popiołów lotnych i żużli z instalacji termicznego przekształcania odpadów jako kruszywa sztucznego. *Gospodarka Surowcami Mineralnymi*, tom 24, 3/3: 149–156.
108. KĘPYS W. 2010. Kruszywo z drobnoziarnistych odpadów niebezpiecznych. *Inżynieria Ekologiczna*, 23: 70–76.
109. KLIMKIEWICZ P. 2004. Droga popiołowo-betonowa w Nowosolnej. *Magazyn Autostrady*, 5: 32–34.
110. KOMAROV V.I., MOLOKHOV M.N., SOROKIN A.A., et al. 2005. Microwave vitrification of radioactive wastes. *Atomic Energy*, 98(4).
111. KORDYLEWSKI W., ZACHARCZUK W., KASPRZYK K. 2003. Modyfikacja popiołu i żużla metodą wityfikacji. *Ochrona Powietrza i Problemy Odpadów*, 37: 84–88.
112. KORTAS G., FLORKOWSKA L., KANCIRUK A. 2001. Modelowanie metodą elementów skończonych rozkładu naprężeń i odkształceń w próbkach poddanych jedno- i trójosiowemu ścisnaniu. *Prace Instytutu Mechaniki Górotworu PAN*, 3(3–4): 317–330.
113. KOSIOR-KAZBERUK M., LELUSZ M. 2010. Ocena popiołu pochodzącego z jednoczesnego spalania biomasy i węgla jako składnika kompozytów cementowych. *Materiały Ceramiczne*, 62(2): 166–170.
114. KOSTURKIEWICZ B. 2001. Zagadnienie doboru geometrycznych cech konstrukcyjnych ślimaków w urządzeniach do scalania drobnoziarnistych materiałów odpadowych. *Zeszyty Naukowe Politechniki Białostockiej, Nauki Techniczne*, 139(8): 249–258.
115. KOSTURKIEWICZ B. 2005a. Problem przygotowania osadów ściekowych do utylizacji. *Odzysk odpadów – technologie i możliwości*. Wydawnictwo Instytutu Gospodarki Surowcami Mineralnymi i Energią PAN, Kraków: 94–101.
116. KOSTURKIEWICZ B. 2005b. Zagadnienie wykorzystania pras walcowych do zagospodarowania osadów ściekowych. *Ochrona Powietrza i Problemy Odpadów*, 39(4): 138–145.
117. KOSTURKIEWICZ B. 2006a. Metoda zagospodarowania osadów ściekowych w przemyśle energetycznym. *Monografie Wydziału Inżynierii Mechanicznej i Robotyki AGH nr 32*: 249–259.
118. KOSTURKIEWICZ B. 2006b. Zagadnienie wykorzystania osadów ściekowych jako substytutu paliwa w piecach rusztowych. *Inżynieria i Aparatura Chemiczna*, 45(4): 90–91.
119. KOSTURKIEWICZ B., HRYNIEWICZ M., JANEWICZ A., DRZYMAŁA Z. 2003. Badania nad przygotowaniem osadów ściekowych do utylizacji. *Inżynieria i Aparatura Chemiczna*, 42(3): 94–95.



120. KOSTURKIEWICZ B., JANEWICZ A. 2002. Problem doboru konfiguracji układu zagęszczania prasy walcowej. *Zeszyty Naukowe Politechniki Białostockiej, Budowa i Eksploatacja Maszyn*, 9: 243–252.
121. 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.
122. KUBICA K., ŚCIAŹKO M., RAIŃCZAK J. 2003. Współspalanie biomasy z węglem. *Polityka Energetyczna*, tom 6, z.spec. Wydawnictwo Instytutu Gospodarki Surowcami Mineralnymi i Energią PAN, Kraków: 297–308.
123. KUCZYŃSKA L. 2008. Grudkowanie – forma przygotowania odpadów do wykorzystania lub unieszkodliwiania. *Chemik: Nauka - Technika - Rynek*, 61(9): 434–438.
124. 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: 175–180.
125. LIEW A.G., IDRIS A., SAMAD A.A., NOOR M.J.M.M., BAKI A.M. 2004. Incorporation of sewage sludge in clay brick and its characterization. *Waste Management and Research*, 22: 226–233.
126. LIN K.L. 2006. Feasibility study of using brick made from municipal solid waste incinerator fly ash slag. *Journal of Hazardous Materials*, 137(3): 1810–1816.
127. LIN D.F., WENG C.H. 2001. Use of sewage sludge ash as brick material. *Journal of Environmental Engineering*, 127(10): 922–927.
128. LIN K.L., HUANG W.J., CHEN K.C., CHOW J.D., CHEN H.J. 2009. Behaviour of heavy metals immobilized by co-melting treatment of sewage sludge ash and municipal solid waste incinerator fly ash. *Waste Management & Research*, 27: 660–667.
129. LISZKA M., MAJCHRZAK H. 2005. Analiza efektów ekologicznych w procesie współspalania węgla i biomasy na przykładzie Elektrowni Opole. *Energetyka*, 3.
130. LOGINOV YU.N., BOURKINE S.P., BABAILOV N.A. 2001. Cinematics and volume deformations during roll-press briquetting. *Journal of Materials Processing Technology*, 118(1-3): 151–157.
131. 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: 97–112.
132. LUTYŃSKI A. 2005. Wydzielanie ziaren węglowych z odpadów drobnoziarnistych. W: *Materiały IX Ogólnopolskiej Konferencji pt. „Kompleksowe i szczegółowe problemy inżynierii środowiska”*, Politechnika Koszalińska.
133. MAJCHRZAK H., ŚCIAŹKO M., ZUWAŁA J. 2005. Produkcja energii odnawialnej w BOT Elektrownia Opole S.A. Stan obecny i perspektywy rozwoju. *Energetyka*, 5: 343–351.
134. MÄKELÄ M., PAANANEN T., KOKKONEN T., MAKKONEN H., HEINO J., DAHL O. 2011. Preliminary evaluation of fly ash and lime for use as supplement-

- tary cementing materials in cold-agglomerated blast furnace briquetting. *International Science and Investigation Journal*, 51(5): 776–781.
135. MI J., LI X.-J. 2006. Design and simulation analysis of industrial coal briquetting machine. *Science and Technology*, 37(5): 986–990.
  136. MOKRZYCKI E., ULIASZ-BOCHEŃCZYK A. 2006. Możliwości wykorzystania odpadów komunalnych jako paliw alternatywnych. Wydawnictwo Instytutu Gospodarki Surowcami Mineralnymi i Energią PAN, Kraków.
  137. NIEDZIÓŁKA I., ZUCHNIARZ A. 2006. Analiza energetyczna wybranych rodzajów biomasy pochodzenia roślinnego. *MOTROL – Motoryzacja i Energetyka Rolnictwa*, tom 8A: 232–237.
  138. NIEMIEC W., ZAMORSKA J. 2006. Zarys technologii zagospodarowania niebezpiecznych odpadów organicznych. *Ekologia i Technika*, 6(84), 14–19.
  139. NIESLER M. 2007. Laboratoryjne próby brykietowania pyłów odlewniczych. *Prace Instytutu Metalurgii Żelaza*, 59(2): 9–14.
  140. OETERS F., LIUYI Z., HAULER CH., LEITNER J. 2000. Laboratory experiments and process modelling of the melting and dissolution of low-density ferromolybdenum in steel melts. *Steel Research*, 71(10): 381–390.
  141. OJOVAN M.I., LEE W.E. 2011. Glassy wasteforms for nuclear waste immobilization. *Metallurgy and Materials Science*, 42A: 837–851.
  142. OREWczyk J., SADOWSKI A., HRYNIEWICZ M. 2001. Thermal analysis in examinations of metallurgical materials obtained from iron-bearing fines. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 65: 607–612.
  143. OSIECKA E. 2005. Materiały budowlane. Spoiwa mineralne – kruszywa. Wydawnictwo Politechniki Warszawskiej.
  144. PACHOWSKI J. 1976. Popioły lotne i ich zastosowanie w budownictwie drogowym. Wyd. Komunikacji i Łączności, Warszawa.
  145. PAJĄK T. 2005. Termiczne przekształcanie jako element systemu zagospodarowania odpadów komunalnych i osadów ściekowych. W: *Materiały VI Międzynarodowej Konferencji Naukowo-Technicznej „Zarządzanie środowiskiem na terenach uprzemysłowionych – nowoczesne systemy, techniki i technologie”*, Zakopane.
  146. PAJĄK T. 2008. Spalanie osadów w atmosferze wzbogaconej w tlen. *Wodociągi – Kanalizacja*, 10.
  147. PAJĄK T. 2009. Zagospodarowanie komunalnych osadów ściekowych w Polsce. *Wodociągi – Kanalizacja*, 67.
  148. PAWŁOWSKI L., PAWŁOWSKI A. 2011. Sposób otrzymywania paliwa z osadów ściekowych. *Biuletyn Urzędu Patentowego*, 39(8), 973, s. 14.
  149. PELINO M. 2000. Recycling of zinc-hydrometallurgy wastes in glass and glass ceramic materials. *Waste Management*, 20: 561–568.
  150. PIĄTEK P. 2008. Test punktowy, test brazylijski i test na jednoosiowe ściskanie – badania porównawcze. *Górnictwo i Geoinżynieria*, 1: 285–292.

151. PIECUCH T. 2006. Zarys metod termicznej utylizacji odpadów. Wydawnictwo Politechniki Koszalińskiej.
152. PIECUCH T., JURASZKA B., DĄBEK L. 2002. Spalanie i piroliza odpadów. Wydawnictwo Politechniki Koszalińskiej, Koszalin.
153. PIOTROWSKI Z., ULIASZ-BOCHEŃCZYK A. 2008. Możliwości gospodarczego wykorzystania odpadów z kotłów fluidalnych. *Gospodarka Surowcami Mineralnymi*, 24(2/1).
154. PISCIELLA P., CRISUCCI S., KARAMANOV A., PELINO M. 2001. Chemical durability of glasses obtained by vitrification of industrial wastes. *Waste Management*, 21: 1–9.
155. PLEWA F., MYSŁEK Z. 2001. Zagospodarowanie odpadów przemysłowych w podziemnych technologiach górniczych. Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice.
156. 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): 66–72.
157. PUROHIT P., TRIPATHI A.K., KANDPAL T.C. 2006. Energetics of coal substitution by briquettes of agricultural residues. *Energy*. Elsevier Science Publishers, 31: 1321–1331.
158. PYSSA J. 2005. Odpady z energetyki – przemysłowe zagospodarowanie odpadów z kotłów fluidalnych. *Gospodarka Surowcami Mineralnymi*, 21(3): 83–92.
159. RAMAMURTHY K., HARIKRISHNAN K.I. 2006. Influence of binders on properties of sintered fly ash aggregate. *Cement and Concrete Composites*, 28(1): 33–38.
160. RAHMAN A.N.E., MASOOD M.A., PRASAD C.S.N., VENKATESHAM M. 1989: Influence of size and shape on the strength of briquettes. *Fuel Processing Technology*, 23: 185–195.
161. RAHMAN M.M., NOR S.S.M., RAHMAN H.Y., SOPYAN I. 2012. Effects of forming parameters and sintering schedules to the mechanical properties and microstructures of final components. *Materials and Design*, 33: 153–157.
162. RIBEIRO A.S.M., MONTEIRO R.C.C., DAVIM E.J.R., FERNANDES M.H.V. 2010. Ash from a pulp mill boiler – characterisation and vitrification. *Journal of Hazardous Materials*, 179(1-3): 303–308.
163. ROBAK J., MATUSZEK K. 2008. Granulowanie paliwa z odpadów. *Chemicz*, 9: 418–424.
164. ROCZNIK STATYSTYCZNY PRZEMYSŁU. 2012. Główny Urząd Statystyczny, Warszawa.
165. ROCZNIK STATYSTYCZNY RZECZPOSPOLITEJ POLSKIEJ. 2012. Główny Urząd Statystyczny, Warszawa.
166. ROSIK-DULEWSKA Cz. 2008. Podstawy gospodarki odpadami. Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa.
167. ROZPORZĄDZENIE MINISTRA ŚRODOWISKA z dnia 13 lipca 2010 r. w sprawie komunalnych osadów ściekowych (Dz.U. 2010 Nr 137, poz. 924).

168. ROZPORZĄDZENIE MINISTRA ŚRODOWISKA z dnia 5 kwietnia 2011 r. w sprawie procesu odzysku R10 (Dz.U. 2011 Nr 86, poz. 476).
169. ROZPORZĄDZENIE MINISTRA GOSPODARKI z dnia 8 stycznia 2013 r. w sprawie kryteriów oraz procedur dopuszczania odpadów do składowania na składowisku odpadów danego typu (Dz.U. 2013 Nr 0, poz. 38).
170. SCHNEIDER L.C.R., COCKS A.C.F. 2002. Experimental investigation of yield behaviour of metal powder compacts. *Powder Metallurgy*, 45(3): 237–245.
171. SIMON O., GUIGON P. 2003. Correlation between powder-packing properties and roll press compact heterogeneity. *Powder Technology*, 130: 257–264.
172. SINKA I.C., COCKS A.C.F., TWEED J.H. 2001. Constitutive data for powder compaction modelling. *Journal of Engineering Materials and Technology*, 123: 176–183.
173. SINKA I.C., CUNNINGHAM J.C., ZAVALIANGOS A. 2003. The effect of wall friction in the compaction of pharmaceutical tablets with curved faces: a validation study of the Drucker-Prager Cap model. *Powder Technology*, 133(1–3): 33–43.
174. SIUTA J. 2002. Przyrodnicze użytkowanie odpadów. Instytut Ochrony Środowiska, Warszawa.
175. SIUTA J. 2005. Rekultywacyjna efektywność osadów ściekowych na składowiskach odpadów przemysłowych. *Acta Agrophysica*, 5(2): 417–425.
176. ŚLADECZEK F., NIEMCZYK P. 2006. Ekologiczne i techniczne aspekty współspalania osadów ściekowych w przemyśle cementowym i w energetyce. *Archiwum Spalania*, 6(1–4): 86–96.
177. SOŁTYS J. 2005. Nowe paliwo – brykiety BC. *Czysta Energia*, 10, s. 32.
178. STOLARSKI M., SZCZUKOWSKI S., TWORKOWSKI J. 2003. Energetyczne wykorzystanie biomasy lignino-celulozowej pozyskiwanej z gruntów rolniczych. *Ekologia Praktyczna*, 5(14).
179. SZPADT R. 2007. Kryteria wyboru rozwiązań technologicznych przetwarzania odpadów. *Przegląd Komunalny*, 188.
180. ŚCIAŻKO M., ZIELIŃSKI H. 2003. Termochemiczne przetwórstwo węgla i biomasy. Wydawnictwo Instytutu Chemicznej Przeróbki Węgla i Instytutu Gospodarki Surowcami Mineralnymi i Energią PAN, Zabrze-Kraków.
181. ŚCIAŻKO M., ZUWAŁA J., PRNOBIS M. 2006. Zalety i wady współspalania biomasy w kotłach energetycznych na tle doświadczeń eksploatacyjnych pierwszego roku współspalania biomasy na skalę przemysłową. *Energetyka*, 3: 207–220.
182. 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: 964–972.
183. ULBRICHT R. (red.) 2005. Energetyczne wykorzystanie biomasy. Materiały pokonferencyjne. Wydawnictwo Politechniki Opolskiej.
184. USTAWA z dnia 14 grudnia 2012 r. o odpadach (Dz.U. 2013, tom 1, poz. 21).
185. UZUNOW E. 2009. Osady ściekowe w produkcji materiałów budowlanych. *Wodociągi – Kanalizacja*, 10(68): 7–12.

186. WERTHER J., OGADA T. 1999. Sewage sludge combustion. *Progress in Energy and Combustion Science*, 25(1): 55–116.
187. WEYENBERG W., VERMEIRE A., VANDERVOORT J., REMON J.P., LUDWIG A. 2005. Effects of roller compaction settings on the preparation of bioadhesive granules and ocular minitables. *European Journal of Pharmaceutics and Biopharmaceutics*, 59: 527–536.
188. WISZ J., MATWIEJEW A. 2005. Biomasa – badania w laboratorium w aspekcie przydatności do energetycznego spalania. *Energetyka*, 9.
189. XIAO Y., OORSPONG M., YANG Y., VONCKEN J.H.L. 2008. Vitrification of bottom ash from a municipal solid waste incinerator. *Waste Management*, 28: 1020–1026.
190. XU G.R., ZOU J.L., LI G.B. 2010. Stabilization of heavy metals in sludge ceramsite. *Water Research*, 44(9): 2930–2938.
191. YEHIA K.A. 2007. Estimation of roll press design parameters based on the assessment of a particular nip region. *Powder Technology*, 177: 148–153.
192. YUSOFA Y.A., SMITH A.C., BRISCOE B.J. 2005. Roll compaction of maize powder. *Chemical Engineering Science*, 60: 3919–3931.
193. ZAVALIANGOS A. 2002. Constitutive models for the simulation of P/M processes. *International Journal of Powder Metallurgy*, 38, 2: 27–39.
194. ZAVALIANGOS A. 2003. A numerical study of the development of tensile principal stresses during die compaction. *Particulate Science and Technology*, 21: 105–115.
195. ZAVALIANGOS A., DEC R.T. 2007. Powder processing in the roller press – theory and practice. *Powder Handling & Processing*, 1: 23–28.
196. ZAVALIANGOS A., DEC R.T., KOMAREK R.K. 2003. Analysis of powder processing in the roller press using finite element modeling. *Proceedings of XXII International Mineral Processing Congress*, Cape Town, South Africa.
197. ZAWISTOWSKI J., ŚCIAŻKO M., RAIŃCZAK J., ROBAK J. 2003. Współspalanie z węglem biomasy i paliw alternatywnych. *Wyd. Instytutu Chemicznej Przeróbki Węgla w Zabrze i Instytutu Gospodarki Surowcami Mineralnymi i Energią PAN. Zabrze-Kraków.*
198. ZHANG H.Y., ZHAO Y.C., QI J.Y. 2011. Utilization of municipal solid waste incineration (MSWI) fly ash in ceramic brick: Product characterization and environmental toxicity. *Waste Management*, 31(2): 331–341.
199. ZOU J.L., DAI Y., YU X.J., XU G.R. 2011. Structures and metal leachability of sintered sludge-clay ceramsite affected by raw material basicity. *Journal of Environmental Engineering*, 137(5): 398–405.
200. ŻYGADŁO M., LATOSIŃSKA J. 2008. Addition of sewage sludge to raw material used in LECA production. In: Pawłowska M., Pawłowski L. (eds.) *Management of pollutant emission from landfills and sludge*. Taylor & Francis Group, London: 231–238.

## WYKAZ ILUSTRACJI

<b>Rys. 1.</b> Jednostopniowa instalacja do zeszkliwienia odpadów [International Atomic Energy Agency 2006] .....	29
<b>Rys. 2.</b> Dwustopniowa instalacja do zeszkliwienia odpadów [International Atomic Energy Agency 2006] .....	30
<b>Rys. 3.</b> Schemat badań przetwarzania odpadów drobnoziarnistych .....	34
<b>Rys. 4.</b> Sposoby badania wytrzymałości na ściskanie brykietów o kształcie walcowym: a) test osiowy, b) test średnicowy .....	39
<b>Rys. 5.</b> Odpady węgla kamiennego .....	43
<b>Rys. 6.</b> Rozdrobniona biomasa .....	43
<b>Rys. 7.</b> Zależność między czasem mieszania a stopniem wymieszania -mieszanek węglowo-biomasowych.....	45
<b>Rys. 8.</b> Obszar zastosowań modelu matematycznego Drucker-Prager Cap [Zavaliangos 2003].....	49
<b>Rys. 9.</b> Wpływ oporów tarcia na maksymalną siłę nacisku w prasie stemplowej [Cunningham i in. 2004] .....	51
<b>Rys. 10.</b> Symulacja stopnia zagęszczenia brykietu formowanego bez smarowania .....	52
<b>Rys. 11.</b> Symulacja stopnia zagęszczenia brykietu formowanego z zastosowaniem smarowania.....	52
<b>Rys. 12.</b> Zależność siły nacisku od przemieszczenia stempla podczas zagęszczania.....	53
<b>Rys. 13.</b> Rozkład stopnia zagęszczenia w przekroju poprzecznym brykietu wytworzonego bez stosowania smarowania.....	54
<b>Rys. 14.</b> Rozkład stopnia zagęszczenia w przekroju poprzecznym brykietu wytworzonego z zastosowaniem smarowania .....	54
<b>Rys. 15.</b> Zależność wytrzymałości na ściskanie od czasu sezonowania brykietów .....	57
<b>Rys. 16.</b> Zależność między wilgotnością a stopniem zagęszczenia materiału..	58
<b>Rys. 17.</b> Wykresy ściskania brykietów w teście osiowym .....	59
<b>Rys. 18.</b> Struktura brykietu z węgla wykonanego w prasie stemplowej .....	60
<b>Rys. 19.</b> Struktura brykietu wykonanego w prasie stemplowej .....	60
<b>Rys. 20.</b> Struktura brykietu z węgla wykonanego w prasie walcowej .....	61
<b>Rys. 21.</b> Struktura brykietu z materiału mieszanego .....	61

<b>Rys. 22.</b> Zmiany zawartości tlenków azotu w zależności od procentowego udziału biomasy w brykietach .....	64
<b>Rys. 23.</b> Zmiany zawartości dwutlenku siarki w zależności od procentowego udziału biomasy w brykietach.....	64
<b>Rys. 24.</b> Zmiany zawartości tlenku węgla w zależności od procentowego udziału biomasy w brykietach .....	65
<b>Rys. 25.</b> Zmiany zawartości siarkowodoru w zależności od procentowego udziału biomasy w brykietach .....	65
<b>Rys. 26.</b> Zmiany zawartości dwutlenku węgla w zależności od procentowego udziału biomasy w brykietach.....	65
<b>Rys. 27.</b> Schemat linii produkcyjnej brykietów .....	66
<b>Rys. 28.</b> Prasa walcowa w linii produkcyjnej .....	67
<b>Rys. 29.</b> Suszarka tunelowa w linii produkcyjnej .....	67
<b>Rys. 30.</b> Brykiety węglowe z przemysłowej linii produkcyjnej .....	67
<b>Rys. 31.</b> Granule osadów ściekowych ze stacji termicznego osuszania w oczyszczalni ścieków „Hajdów” w Lublinie.....	77
<b>Rys. 32.</b> Wpływ czasu i temperatury nagrzewania na roztopienie brykietu ...	80
<b>Rys. 33.</b> Struktura zeszkłonego brykietu nagrzewanego w temperaturze 1050 °C oraz w czasie 30 min .....	82
<b>Rys. 34.</b> Struktura zeszkłonego brykietu nagrzewanego w temperaturze 1100 °C oraz w czasie 60 min .....	82



## WYKAZ TABEL

<b>Tabela 1.</b> Podstawowe rodzaje domieszek i efekty ich zastosowania [Osiecka 2005].....	17
<b>Tabela 2.</b> Wykorzystanie popiołów lotnych i żużli do budowy dróg [Huth, Kubisa 1996].....	26
<b>Tabela 3.</b> Zawartość metali ciężkich w osadach ściekowych [Pająk 2009] ..	28
<b>Tabela 4.</b> Odpady energetyczne pobrane do badań .....	42
<b>Tabela 5.</b> Parametry odpadu węglowego z kopalni Lubelski Węgiel „Bogdanka” .....	44
<b>Tabela 6.</b> Wyniki analizy sitowej węgla.....	44
<b>Tabela 7.</b> Wyniki analizy sitowej biomasy.....	45
<b>Tabela 8.</b> Podstawowe składniki chemiczne węgla kamiennego i biomasy	46
<b>Tabela 9.</b> Właściwości pobranych próbek węgla i biomasy .....	46
<b>Tabela 10.</b> Określenie współczynników modelu Drucker-Prager Cap .....	50
<b>Tabela 11.</b> Stopień zagęszczenia drobnziarnistych węgla w zależności od warunków tarcia zewnętrznego .....	51
<b>Tabela 12.</b> Wyniki symulacji zależności siły nacisku prasy od współczynników tarcia .....	53
<b>Tabela 13.</b> Wytrzymałość brykietów w zależności od nacisku prasy i udziału biomasy.....	55
<b>Tabela 14.</b> Wytrzymałość brykietów w zależności od procentowego udziału lepiszcza.....	56
<b>Tabela 15.</b> Właściwości mechaniczne brykietów świeżych i sezonowanych w zależności od zawartości wody mieszczanki i stopnia zagęszczenia .....	58
<b>Tabela 16.</b> Wyniki testów wodoodporności brykietów .....	62
<b>Tabela 17.</b> Wartość opałowia brykietów .....	63
<b>Tabela 18.</b> Materiały testowane w próbach przemysłowych brykietowania...	68
<b>Tabela 19.</b> Właściwości wytrzymałościowe brykietów z prasy walcowej w zależności od udziału lepiszcza .....	69
<b>Tabela 20.</b> Właściwości wytrzymałościowe brykietów z prasy walcowej w zależności od czasu sezonowania .....	69
<b>Tabela 21.</b> Porównanie właściwości dwóch rodzajów przemysłowych brykietów paliwowych .....	70



<b>Tabela 22.</b> Skład chemiczny popiołu ze spalania brykietów paliwowych .....	71
<b>Tabela 23.</b> Właściwości fizyczne popiołu ze spalania brykietów paliwowych.....	72
<b>Tabela 24.</b> Parametry mieszanek do brykietowania.....	72
<b>Tabela 25.</b> Cechy fizyczne brykietów popiołowych w zależności od nacisku prasy .....	73
<b>Tabela 26.</b> Wytrzymałość mechaniczna brykietów popiołowych .....	74
<b>Tabela 27.</b> Wyniki testów nasiąkliwości i mrozoodporności brykietów popiołowych .....	75
<b>Tabela 28.</b> Wymywalność składników rozpuszczalnych w wodzie .....	76
<b>Tabela 29.</b> Właściwości osadów ściekowych z oczyszczalni „Hajdów” w Lublinie.....	77
<b>Tabela 30.</b> Parametry fizyczne osadów ściekowych .....	78
<b>Tabela 31.</b> Właściwości popiołów lotnych ze spalania osadów ściekowych..	79
<b>Tabela 32.</b> Skład mieszanek do brykietowania .....	79
<b>Tabela 33.</b> Cechy fizyczne brykietów zawierających popioły lotne .....	80
<b>Tabela 34.</b> Właściwości fizyko-mechaniczne zeszkłonych brykietów.....	83
<b>Tabela 35.</b> Wyniki pomiarów nasiąkliwości i mrozoodporności zeszkłonych brykietów .....	83
<b>Tabela 36.</b> Wymywalność jonów metali ciężkich w wyciągach wodnych .....	84