

**WYKORZYSTANIE BRYKIETOWANIA
DO ZAGOSPODAROWANIA ODPADÓW**

Gabriel Borowski

**WYKORZYSTANIE BRYKIETOWANIA
DO ZAGOSPODAROWANIA ODPADÓW**

MONOGRAFIA

Lublin 2011

Wydanie publikacji dofinansował Minister Nauki i Szkolnictwa Wyższego

Recenzenci:

prof. dr hab. inż. Wiesław Weroński
dr hab inż. Zdzisław Małecki

Opracowanie edytorskie:
Marta Radwan-Röhrenscheff

© Copyright by Lubelskie Towarzystwo Naukowe, 2011

ISBN 978-83-62025-17-6

Wydanie I

WYDAWCA

Lubelskie Towarzystwo Naukowe
20-080 Lublin, Plac Litewski 2

SPIS TREŚCI

1. WPROWADZENIE	9
2. CHARAKTERYSTYKA MATERIAŁÓW STOSOWANYCH DO BRYKIETOWANIA	11
2.1. Produkty i odpady	11
2.2. Rodzaje i źródła odpadów drobnoziarnistych	13
2.3. Struktura materiałów drobnoziarnistych	16
2.4. Postępowanie z drobnoziarnistymi zawiesinami	17
2.5. Wybrane właściwości fizyczno-mechaniczne materiałów sypkich	19
3. URZĄDZENIA PRODUKCYJNE I LINIE TECHNOLOGICZNE DO BRYKIETOWANIA	23
3.1. Maszyny do brykietowania	23
3.1.1. Rodzaje i zastosowanie	23
3.1.2. Brykieciarka tłokowa (mimośrodowa)	23
3.1.3. Brykieciarka ślimakowa	24
3.1.4. Brykieciarki stemplowe	25
3.1.5. Brykieciarki walcowe	27
3.2. Przykładowe koncepcje przemysłowych linii technologicznych	33
3.2.1. Brykietowanie surowców energetycznych	33
3.2.2. Brykietowanie popiołów paleniskowych	34
3.2.3. Brykietowanie pyłów ze spalania osadów ściekowych	35
4. KOMPUTEROWE MODELOWANIE PROCESU BRYKIETOWANIA .	37
4.1. Zastosowanie metody elementów skończonych	37
4.2. Model matematyczny scalania materiałów drobnoziarnistych w prasach stemplowych	38
4.3. Modele scalania materiałów sypkich w prasach walcowych	39
4.4. Modelowanie metodą elementów skończonych	42
4.4.1. Modele procesu scalania materiałów drobnoziarnistych	42
4.4.2. Symulacja naprężeń wewnętrznych w matrycy otwartej	44
4.4.3. Symulacja rozkładu stopnia zagęszczenia materiału w matrycy zamkniętej	47

5. PROBLEMATYKA WYTWARZANIA BRYKIETÓW	53
5.1. Metody scalania materiałów drobnoziarnistych	53
5.1.1. Problematyka scalania	53
5.1.2. Zestalenie	53
5.1.3. Kompaktowanie	54
5.1.4. Granulowanie	55
5.1.5. Brykietowanie	57
5.2. Przygotowanie materiałów do brykietowania	59
5.2.1. Rola i zakres przygotowania materiału	59
5.2.2. Skład ziarnowy	59
5.2.3. Zanieczyszczenia	60
5.2.4. Dosuszanie i mieszanie materiałów	61
5.2.5. Lepiszczą	64
5.3. Parametry pracy brykieciarki	65
5.4. Kształt i wymiary matryc formujących	68
6. BADANIA WŁAŚCIWOŚCI BRYKIETÓW	71
6.1. Określenie składu chemicznego	71
6.2. Właściwości fizyczne brykietów	72
6.2.1. Zakres określanych właściwości	72
6.2.2. Masa i wymiary gabarytowe	72
6.2.3. Stopień zagęszczenia	73
6.2.4. Wilgotność	74
6.2.5. Struktura brykietu	74
6.2.6. Wodoodporność i mrozoodporność	78
6.2.7. Wymywalność jonów z brykietów	79
6.3. Właściwości mechaniczne brykietów	80
6.4. Kryteria wykorzystania brykietów w przemyśle	82
7. WYBRANE ANALIZY BADAWCZE GOSPODARCZEGO WYKORZYSTANIA BRYKIETÓW	85
7.1. Zakres prac badawczych	85
7.2. Wykorzystanie brykietów jako zamiennika kruszywa na podbudowy drogowe	85
7.2.1. Możliwości wykorzystania brykietów	85
7.2.2. Właściwości popiołów	87
7.2.3. Metodyka badań wytrzymałościowych	90
7.2.4. Analiza wyników badań	91

7.3. Wykorzystanie brykietów jako źródła energii cieplnej	92
7.3.1. Zagospodarowanie odpadów energetycznych	92
7.3.2. Charakterystyka materiału badawczego	93
7.3.3. Problematyka wykorzystania biomasy z węglem	95
7.3.4. Metodyka badań	96
7.3.5. Analiza wyników badań	97
7.4. Wykorzystanie brykietów zawierających substancje niebezpieczne dla środowiska	100
7.4.1. Termiczna utylizacja osadów ściekowych	100
7.4.2. Materiał badawczy	101
7.4.3. Metodyka wytwarzania	103
7.4.4. Wyniki badań	104
8. WNIOSKI	106
BIBLIOGRAFIA	107
SŁOWNIK TERMINÓW	117
WYKAZ WAŻNIEJSZYCH OZNACZEŃ	127
WYKAZ ILUSTRACJI	129
WYKAZ TABEL	131
STESZCZENIE	132
SUMMARY	133
ZAŁĄCZNIKI	135

1. WPROWADZENIE

W wielu sferach działalności przemysłowej występuje problem efektywnego zagospodarowania materiałów drobnoziarnistych, takich jak: zawiesiny, szlamy, proszki, pyły, popioły i żużle. Materiały te są często odpadami w procesach produkcyjnych. Niektóre z nich są utylizowane w sposób bezpośredni, stanowiąc surowce wtórne, inne zaś wymagają przeprowadzenia dodatkowych zabiegów technologicznych nadających im wartość użytkową.

Substancje określane jako „odpady” podlegają ścisłym uregulowaniom prawnym, których celem jest ochrona zdrowia ludzkiego i środowiska. W Dyrektywie Parlamentu Europejskiego i Rady 2008/98/WE (dyrektywa ramowa w sprawie odpadów) z dnia 19 listopada 2008 r. zamieszczono następującą definicję odpadów: „odpady oznaczają każdą substancję lub przedmiot, których posiadacz pozbywa się, zamierza się pozbyć lub do których pozbycia został zobowiązany”.

Organy administracyjne oraz producenci często stają przed problemem w rozróżnieniu, co jest, a co nie jest odpadem. O konsumpcyjnym przeznaczeniu produktów i materiałów rozstrzyga fakt podjęcia ich celowej produkcji. Materiał można uznać za odpad dopiero wtedy, gdy nie był celem produkcji, nie nadaje się do wykorzystania lub nie istnieją technologie konieczne do jego wykorzystania, oraz nie ma na dany materiał zapotrzebowania. Jeżeli zaistnieje możliwość sprzedaży danego materiału z zyskiem przez producenta, może to wskazywać, że materiał ten zostanie wykorzystany, a więc przestanie być odpadem.

Odzysk surowców z odpadów to podstawowy warunek ochrony zasobów naturalnych. Głównym celem odzysku jest ponowne użycie surowców do produkcji. W celu wykorzystania materiału odpadowego uzdatnia się go w różny sposób, przez mycie, suszenie, rafinowanie, homogenizowanie, neutralizację, termiczną transformację itp. Odpady zawierające substancje niebezpieczne należy natomiast poddać procesom unieszkodliwiania.

Największą w kraju grupą odpadów zawierającą frakcje drobnoziarniste są popioły i żużle energetyczne z procesów spalania w elektrowniach i elektrociepłowniach oraz frakcje węglowe z procesów wydobywania, wzbogacania i wykorzystania węgla kamiennego i brunatnego. Do drobnoziarnistych frakcji węglowych należą: muły węglowe, odpady poflotacyjne, ściery, pyły koksownicze, koksik z procesów zgazowania i wysoko zawęglone stałe produkty spalania paliw. Odpady pokopalniane nie są wykorzystywane w należyтым stopniu. Duża ilość i rozdrobnienie frakcji węglowych uzasadniają potrzebę zmiany dotychczasowych zastosowań i zwiększenia ich zagospodarowania jako paliwa podstawowego i uzupełniającego dla określonych obiektów energetycznych, w tym do produkcji wysokojakościowych paliw alternatywnych, tzw. biopaliw.

Użytkowanie odpadów drobnoziarnistych w formie nieprzetworzonej jest nieefektywne ze względu na transport i składowanie, a także niejednorodność właściwości fizykochemicznych. Przetworzenie i nadanie im określonych właściwości umożliwia zwiększenie użytecznych walorów odpadów. W tym celu wykorzystywane są między innymi procesy ujednorodnienia oraz scalania materiału odpadowego do postaci kawałkowej. Często podejmowanym w kraju sposobem scalania jest brykietowanie. Brykiety z odpadów są wykorzystywane w wielu dziedzinach gospodarki, m.in.:

- w energetyce, jako paliwo do spalania w kotłach grzewczych;
- w budownictwie, jako dodatek na podbudowy drogowe;
- w metalurgii, jako dodatek do wsadu w piecach stalowniczych;
- w górnictwie, jako wypełniacz wyrobisk kopalnianych.

Celem niniejszej monografii jest przedstawienie efektywnych sposobów wykorzystania drobnoziarnistych odpadów produkcyjnych, w tym niebezpiecznych dla środowiska. Przyjęto założenie, że istnieje możliwość skutecznej utylizacji tych odpadów po przetworzeniu metodą brykietowania.

Zakres monografii obejmuje zagadnienia przygotowania brykietów stanowiących produkty do wykorzystania w przemyśle lub gospodarstwie domowym. Omówiono metody i urządzenia przetwórcze, przedstawiono sposoby przygotowania mieszanki do brykietowania, określono parametry procesu, zarówno doświadczalnie, jak i z zastosowaniem metody elementów skończonych. Opisano procedury badawcze pilotażowych partii brykietów, zapewniające osiągnięcie odpowiedniej jakości oraz spełnienie określonych przez odbiorców wymogów. Przedstawiono także sposoby wykorzystania brykietów z odpadów oraz potencjalne efekty użytkowe.

Zaprezentowane w monografii zagadnienie wykorzystania brykietowania do zagospodarowania odpadów poszerza dotychczasową wiedzę w zakresie inżynierii wytwarzania wyrobów przemysłowych. Stanowi przykład rozwiązania modelowego, które zainspiruje inżynierów i naukowców do dalszych poszukiwań sposobów utylizacji wielu rodzajów odpadów z krajowych procesów technologicznych.

2. CHARAKTERYSTYKA MATERIAŁÓW STOSOWANYCH DO BRYKIETOWANIA

2.1. Produkty i odpady

Różnorodne procesy wytwórcze prowadzą do wytworzenia określonych substancji i przedmiotów. Często jednak trudno jednoznacznie określić, czy dana substancja jest produktem, czy odpadem. Pomocny w rozróżnialności substancji jest komunikat Komisji Rady i Parlamentu Europejskiego, dotyczący klasyfikacji danego materiału jako odpadu [Komunikat Komisji, Rady i Parlamentu Europejskiego... 2007].

Materiały wytwarzane w procesach produkcji przemysłowej mogą być określane mianem produktów (półproduktów), jeśli były celem danego procesu produkcyjnego, i zwykle stanowią one produkty końcowe. W przeciwnym wypadku materiały można uznać za pozostałości procesu produkcyjnego. Pozostałości procesu produkcyjnego niekoniecznie muszą być odpadami, ponieważ mogą posiadać określone cechy, decydujące o przydatności do dalszego wykorzystania w gospodarce. Jeżeli materiał faktycznie nie nadaje się do wykorzystania, nie spełnia kryteriów technicznych koniecznych do jego wykorzystania i nie istnieje rynek na ten materiał, można uznawać go za odpad.

W niektórych przypadkach możliwe jest wykorzystanie pewnej części materiału, jego pozostałość zaś musi zostać unieszkodliwiona. Jeżeli nie można zagwarantować określonego wykorzystania części danego materiału, wtedy można go kwalifikować jako odpad. Podobnie za odpad należy uznać materiał składowany przez dłuższy okres przed jego potencjalnym wykorzystaniem.

Często w ramach dalszego wykorzystania materiału następuje jego przeróbka, w ramach której może być myty, suszony, rafinowany lub homogenizowany oraz uzupełniany o pewne właściwości lub inne materiały. Materiał przygotowany do dalszego wykorzystania, który jednak nie był celem procesu produkcyjnego, stanowi produkt uboczny. W niektórych przypadkach dalsze wykorzystanie materiału jest zabronione lub materiał podlega obowiązkowej procedurze usunięcia, ze względu na bezpieczeństwo i zdrowie człowieka [Dyrektywa Parlamentu Europejskiego i Rady 2008].

Oto przykłady materiałów, które można zaklasyfikować zarówno jako produkty, jak i jako odpady.

1. **Żużel – uboczny produkt wytapiania żelaza w wielkim piecu.** Proces produkcji żelaza zaadaptowano tak, by zapewnić wymagane właściwości techniczne żużla. Uzyskanie określonego rodzaju żużla zapewnia jego wykorzystanie

na różne sposoby, a popyt kształtuje się na wysokim poziomie. Żużel można wykorzystać bezpośrednio w końcowym etapie procesu produkcyjnego, bez konieczności dalszej jego obróbki. Materiał ten można zatem uznać za produkt. Z drugiej strony, żużel pochodzący z procesów odsiarczania powstaje w wyniku konieczności usunięcia siarki przed przetworzeniem żelaza w stal. Powstały w ten sposób żużel cechuje duża zawartość siarki i nie da się go wykorzystać ani poddać recyklingowi w obiegu metalurgicznym, a więc zazwyczaj jest usuwany na składowisko odpadów.

- Gips z odsiarczania gazów spalinowych.** W elektrowniach w instalacjach odsiarczania gazów spalinowych usuwa się siarkę z gazów powstających w procesie spalania, co zapobiega emisjom gazów zanieczyszczających atmosferę. Otrzymany w wyniku tego procesu materiał – gips – jest wykorzystywany w szczególności w produkcji okładziny tynkowej, gdzie stosowany jest także gips naturalny. Materiał ten nie wymaga dalszego przetwarzania przed ponownym wykorzystaniem, więc kwalifikuje się go jako produkt.
- Produkty spalania węgla.** Produkty te mają różne zastosowanie bez konieczności dalszego przetwarzania lub przy bardzo niewielkiej obróbce. Niektóre jednak są regularnie składowane jako odpady, na przykład popioły z łupków naftowych. W niektórych sytuacjach mogą istnieć możliwości ich zastosowania i tym samym przestaną być odpadami.
- Trociny, drobiny drewna i ścinki z drewna.** Produkty te powstają podczas cięcia w tartakach lub w przy produkcji mebli, palet czy opakowań. Wykorzystywane są one jako surowiec do produkcji płyt drewnopochodnych, takich jak płyty wiórowe, lub w produkcji papieru. Nie wymagają dalszego przetwarzania poza adaptacją do odpowiednich rozmiarów w celu zintegrowania z produktem końcowym. Materiały te mogą być zatem uznane za produkty uboczne.
- Pozostałości skalne z procesów wydobywania węgla i kamienia.** Są to odpady powstające podczas składowania przed potencjalnym wykorzystaniem w przyszłości. Mogą jednak być wykorzystane do wypełnienia podziemnych korytarzy ze względów stabilizacyjnych, czego wymaga podstawowa działalność kopalni. Należy je wtedy uznać za produkty.

Zbędne materiały z pierwotnego procesu produkcyjnego lub materiały wymagające tylko kosmetycznych zmian, które są zasadniczo podobne do produktu pierwotnego, ale nadające się do bezpośredniego ponownego wykorzystania, nie są odpadami. Materiały wymagające operacji przetworzenia w celu zmiany ich właściwości albo zawierające substancje niebezpieczne wymagające usunięcia są natomiast odpadami do momentu zakończenia procesu przetwórczego. Katalog odpadów wraz z listą odpadów niebezpiecznych przedstawiono w załączniku 1, a składowiki odpadów, które kwalifikują je jako odpady niebezpieczne w załączniku 2.

2.2. Rodzaje i źródła odpadów drobnoziarnistych

Odpady drobnoziarniste powstają w wielu gałęziach przemysłu w efekcie stosowania procesów produkcyjnych, m.in.:

- w procesach wydobywania i wzbogacania rud oraz innych surowców mineralnych;
- w rolnictwie, sadownictwie, hodowli, rybołówstwie, leśnictwie oraz w przetwórstwie żywności;
- w przetwórstwie drewna oraz podczas produkcji papieru, tektury, masy celulozowej, płyt i mebli;
- w przemyśle skórzanym i tekstylnym;
- w produkcji, przygotowania, obrotu i stosowania związków nieorganicznych;
- podczas produkcji, przygotowania, obrotu i stosowania podstawowych produktów przemysłu syntezy organicznej;
- podczas produkcji, przygotowania, obrotu i stosowania powłok ochronnych (farb, lakierów emalii ceramicznych) kitu, klejów, szczeliw i farb drukarskich;
- w nieorganicznych procesach termicznych;
- przy kształtowaniu i powierzchniowej obróbce metali i tworzyw sztucznych;
- podczas budowy, remontów i demontażu obiektów budowlanych oraz drogowych.

Około 75% powstających w sektorach gospodarczych odpadów jest poddawana procesom odzysku lub unieszkodliwiania. Pozostałe są z reguły składowane na składowiskach. W załączniku 4 przedstawiono procesy odzysku, a w załączniku 5 procesy unieszkodliwiania odpadów.

Przykładowe rodzaje materiałów odpadowych występujących w postaci drobnoziarnistej to:

- muły węglowe,
- odpady poflotacyjne,
- pyły cynkowo-ołowiowe,
- pyły i zgary miedzionośne,
- wióry brązów łóżyskowych,
- poregeneracyjny tlenek żelaza,
- zendra,
- mułki zgorzelinowe,
- żużle,
- osady szlamów z oczyszczalni gazów wielkopieczowych,
- osady szlamów konwertorowych,
- osady szlamów poszlifierskich,
- żelazomangan,
- żelazokrzem,
- tlenek cynku,

- gąbka kadmowa,
- zgary aluminiowe,
- fluorek wapnia,
- wapno palone,
- karbid,
- gips z procesu odsiarczania spalin,
- odpady z produkcji wełny mineralnej,
- mączka dolomitowa.

Zgromadzone na składowiskach znaczne ilości niektórych rodzajów odpadów stanowią zagrożenie dla środowiska naturalnego. Dotyczy to m.in. fosfogipsów, dla których brak obecnie innego sposobu unieszkodliwiania [Hycnar J. i in. 2005]. Podobnie trudności sprawiają odpady z procesów flotacyjnych, prowadzone są jednak intensywne prace badawcze w kierunku ich zagospodarowania [Plewa, Mysłək 2001]. Właściwości odpadów, które powodują, że odpady są niebezpieczne przedstawiono w załączniku 3.

Poniżej wymieniono często spotykane typy odpadów droбноziarnistych, wraz ze źródłem ich pochodzenia:

1. **Pyły i szlamy z hutnictwa żelaza i stali.** Tego typu odpady powstają podczas przetopu surowki i produkcji stali. Rozróżnia się następujące ich rodzaje: 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 [Plewa, Mysłək 2001]. 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 jest drobną frakcją materiałów wsadowych, wychwyconą w odpylniku statycznym podczas procesu suchego oczyszczania gazu wielkopiecowego.
2. **Droбноziarniste frakcje węglowe.** Powstają w procesach wydobywania, wzbogacania i wykorzystania węgla kamiennego i brunatnego. Do odpadów tych należą: muły węglowe, odpady poflotacyjne, ściery, pyły koksownicze, koksik z procesów zgazowania i w wysokim stopniu zawęglone stałe produkty spalania paliw. W zależności od własności energetycznych muły węglowe, ściery,

pył koksowniczy i koksik są często zagospodarowywane jako paliwa samodzielne oraz jako jeden ze składników wytwarzanych mieszanek paliwowych. Drobnoziałne frakcje mogą być wzbogacane metodami fizycznymi i fizykochemicznymi, co pozwala uzyskać wysokoenergetyczne koncentraty węglowe [Hycnar i in. 2005].

3. **Odpady z przemysłu energetycznego.** Do tego typu odpadów zalicza się żużle ze spalania węgla kamiennego, żużle ze spalania węgla brunatnego, popioły lotne z węgla kamiennego, popioły lotne z węgla brunatnego, mieszanki popiołowo-żużlowe 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.
4. **Odpady z 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 procesu zalewania formy ciekłym metalem następuje znaczna redukcja szkodliwych substancji i powstają odpady przepalone, w postaci tzw. zużytych mas formierskich i rdzeniowych.
5. **Odpady z hutnictwa cynku.** Tworzą je zgary, pyły z oczyszczania gazów odlotowych, żużle z pieców szybowych oraz żużle z pieców obrotowych, a także szlamy z oczyszczania gazów odlotowych.
6. **Odpady z odsiarczania spalin metodami wapniowymi.** Są to odpady termiczne. Wyróżniono następujące rodzaje tych odpadów:
 - 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 z przemysłu chemicznego.** Między innymi są to odpady z przeróbki ropy naftowej, oczyszczania gazu ziemnego oraz wysokotemperaturowej przeróbki węgla. 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. Łącznie na obszarze kraju powstaje ok. 3054 tys. Mg odpadów z przemysłu

chemii nieorganicznej, z czego ponad 1898 tys. Mg (62,1 %) przypada na fosfogipsy.

8. **Odpady z przemysłu drzewnego i papierniczego.** Są to odpady z przetwórstwa drewna oraz produkcji papieru, tektury, masy celulozowej, płyt i mebli. Rocznie wytwarza się łącznie ok. 2 mln Mg odpadów z tej grupy. Coraz częściej wykorzystuje się je do celów energetycznych, produkując paliwa alternatywne jako zamiennik tradycyjnych kopalnianych surowców energetycznych.

Większość wymienionych rodzajów odpadów drobnoziarnistych jest scalana do postaci kawałkowej metodą brykietowania. W procesie tym bardzo istotne jest zarówno określenie, jak i modyfikacja właściwości poszczególnych składników w celu uzyskania jednorodnej, łatwo brykietującej się mieszaniny [Drzymała 1993].

2.3. Struktura materiałów drobnoziarnistych

Do materiałów drobnoziarnistych zalicza się surowce w postaci sypkiej lub zawiesiny, składające się z ziaren, których wymiary wynoszą najczęściej od 0,05 mm do 2,0 mm. Surowce te często występują z różnymi zanieczyszczeniami, które powinno się odseparować. Ze względu na zależności wielkościowe ziaren można wyodrębnić struktury [Lutyński 2005]:

- równoziarniste – jeżeli ziarna są w przybliżeniu jednakowej wielkości,
- nierównoziarniste – jeżeli ziarna różnią się wielkością.

Ze względu na kształt ziaren rozróżnia się następujące struktury ziarniste:

- o ostrych krawędziach,
- o krawędziach wygładzonych,
- mieszane.

Materiał drobnoziarnisty w postaci sypkiej posiada charakterystyczne właściwości i cechy. Jedną z najważniejszych jest skład granulometryczny, czyli ilościowy rozkład ziaren materiału pod względem ich wielkości. Wielkość ziaren jest określona wymiarami liniowymi: długością, szerokością i grubością, mierzonymi w dwóch wzajemnie prostopadłych do siebie płaszczyznach [Borowski 2009d].

Rozkład granulometryczny cząstek w mieszaninie ziarnistej wyznacza się dość często w celu zorientowania się, z jakich frakcji i klas wymiarowych składa się mieszanina. Oznaczenie wykonuje się za pomocą klasyfikatora wielositowego, dobierając zestaw sit odpowiedni do zakresu wymiarowego cząstek. Stosuje się zwykle od kilku do kilkunastu sit, zależnie od wymaganej dokładności analizy. Po przesianiu próbki mieszaniny waży się pozostałość na każdym sicie i wyraża w procentach (w stosunku do wyjściowej masy próbki).

Stopień rozdrobnienia cząstek jest często nazywany modułem rozdrabniania lub średnim wymiarem cząstek (m). Wielkość tę, po określeniu rozkładu granulometrycznego materiału, oblicza się za pomocą wzoru:

$$M = \frac{\sum d_i P_i}{100} = \frac{d_1 P_1 + d_2 P_2 + \dots + d_n P_n}{100}, mm \quad (1.1)$$

gdzie: d_i – średni wymiar otworów dwóch sąsiednich sit, p_i – liczba cząstek zatrzymanych na danym sicie w procentach.

Sposób wykonania analizy sitowej jest w Polsce określony normą PN-71/C-04501.

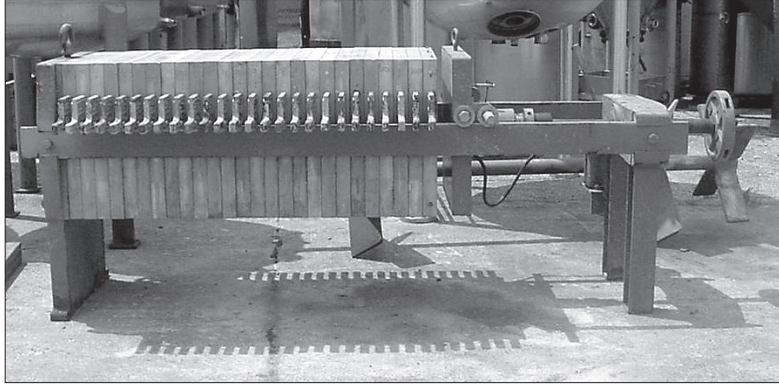
2.4. Postępowanie z droбноziarnistymi zawiesinami

Materiały droбноziarniste występujące w postaci ciekłej określa się jako zawiesiny, emulsje lub szlamy. Często są one zanieczyszczone głównie olejami, smarami, minerałami oraz metalami i ich związkami. Szlamy te zawierają znaczne ilości wody, są bardzo uciążliwe do zagospodarowania w naturalnej postaci i wymagają przetworzenia. Zwykle gromadzone są w kontenerach, zbiornikach i na poletkach składowych. Podczas takiego składowania zachodzi proces stopniowego ubytku wilgoci. Jednakże w celu dalszego wykorzystania odpadów należy ze szlamów usunąć wodę niemal całkowicie, stosując odpowiednie metody i procesy techniczne [Borowski, Kuczmaszewski 2005b].

Do przetwarzania szlamów droбноziarnistych stosuje się procesy fizyczne oraz chemiczne. Podstawowe procesy fizyczne to: filtracja, ultrafiltracja, flotacja, flokulacja, elektrokoagulacja, osmoza, ekstrakcja, mieszanie, zagęszczanie, sedymentacja, rozdrabnianie, odwirowanie, adsorpcja, desorpcja, stapianie, wymrażanie, suszenie i destylacja. Najczęściej stosowane procesy chemiczne to: wymiana jonowa, neutralizacja, utlenianie, hydroliza, strącanie, przemiana katalityczna, elektroliza, absorpcja i cementacja [Borowski 2005].

Proces filtracji za pomocą płytowej prasy filtracyjnej w sposób prosty i skuteczny umożliwia zmniejszenie uwodnienia szlamów o ok. 30–40%. Powszechnie stosowany jest do odwadniania osadów w oczyszczalniach ścieków, galwanizacjach, garbarniach oraz zakładach przemysłu spożywczego. Prasa filtracyjna, pokazana na rysunku 1, składa się z następujących podzespołów:

- zespół filtracyjny z płytami i tkaninami filtracyjnymi,
- głowice dociskowe z siłownikiem,
- zespół podający filtrat z pompą tłoczącą,
- zespół odprowadzający wodę,
- zespół sterujący pracą urządzenia.



Rys. 1. Płytowa prasa filtracyjna (fot. G. Borowski)

Płyty filtracyjne połączone ze sobą tworzą komory, w których zbiera się osad. Pomiędzy płytami zakłada się polipropylenowe tkaniny filtracyjne. Dobór tkaniny jest uzależniony od rodzaju i właściwości filtrowanego osadu.

Utrzymanie odpowiedniego ciśnienia w komorze filtracyjnej zależy od prędkości obrotowej pompy, która jest regulowana za pomocą zespołu sterującego. W razie zastosowania pompy ze ślimakowym zespołem podającym należy rozróżnić dwie fazy jej pracy:

- fazę ciągłej pracy – podczas napełniania komór filtracyjnych osadem,
- fazę pulsacyjnej (przerwanej) pracy – podczas odfiltrowania wody i okresowego dopełniania komór osadem.

Podczas odfiltrowania wody stosuje się ciśnienia od 0,3 MPa do 1,5 MPa, przeciętnie 0,5 – 0,6 MPa. W czasie okresowego dopełniania komór osadem cykle pulsacyjne w trakcie trwania tego procesu są coraz krótsze. Na proces filtracji wpływają następujące czynniki:

- ciśnienie filtrowania,
- czas filtrowania,
- rodzaj tkaniny filtrującej,
- początkowy stopień uwodnienia,
- dodatek tzw. środków wspomagających.

Stosując zagęszczanie osadów w płytowej prasie filtracyjnej, możliwe jest uzyskanie filtratów o końcowym uwodnieniu 20 – 25%. Filtraty te należy dosuszać dalej, zarówno w warunkach naturalnych na poletku składowym, jak i termicznie w suszarkach elektrycznych. Po dosuszeniu i ujednorodnieniu stanowią one materiał drobnoziarnisty o konsystencji sypkiej [Borowski 2009d].

2.5. Wybrane właściwości fizyczno-mechaniczne materiałów sypkich

Wilgotność. Wilgotnością w , wyrażoną w procentach, nazywa się stosunek masy wody zawartej w ciele M_w do masy ciała M :

$$w = \frac{M_w}{M} \cdot 100\% \quad (1.2)$$

Jeżeli uwzględnimy, że $M = M_s + M_w$, to:

$$w = \frac{M_w}{M_s + M_w} \cdot 100\% \quad (1.3)$$

gdzie: M_s – masa całkowicie suchego ciała.

Wilgotność wpływa w istotny sposób na pozostałe cechy fizyczno-mechaniczne ciał sypkich, a w szczególności na współczynnik tarcia zewnętrznego i wewnętrznego, wytrzymałość, właściwości sprężyste itp.

Miarą wilgotności, czyli nawilgocenia ciała stałego, jest ilość zawartej w nim wody. Z punktu widzenia ruchu wody w wilgotnym materiale sypkim istotne znaczenie ma sposób wiązania wody przez ciało stałe. Rozróżnia się następujące sposoby wiązania wody:

- wiązanie chemiczne,
- wiązanie fizykochemiczne,
- wiązanie mechaniczne.

Woda związana chemicznie wchodzi w skład związku chemicznego, z którego zbudowany jest dany materiał. Woda ta nie uchodzi z ciała przy podgrzaniu powyżej punktu wrzenia. Ciało zawierające tylko wodę związaną chemicznie nazywa się suchym.

Wiązanie fizykochemiczne wody z ciałem stałym może być wiązaniem adsorbcyjnym, osmotycznym lub strukturalnym. W wyniku fizykochemicznego wiązania wody ciało stałe zmienia swoje właściwości. Wodę tę można usunąć z ciała w procesie suszenia, przy czym może temu towarzyszyć zmiana dotychczasowej struktury i właściwości ciała.

Woda związana mechanicznie może tworzyć cienką warstwę na powierzchni cząstek lub wypełniać wolne przestrzenie między cząstkami. Ciała zawierające wodę związaną mechanicznie nazywa się wilgotnymi. W wyniku naturalnego lub sztucznego suszenia można odparować wodę związaną mechanicznie.

Zawartość wody U . Mianem tym określa się stosunek masy wody M_w zawartej w ciele do masy całkowicie suchego ciała M_s , wyrażony w kilogramach wody na kilogram suchej masy:

$$U = \frac{M_w}{M_s}, \frac{\text{kg wody}}{\text{kg s.m.}} \quad (1.4)$$

Gęstość w stanie zsypanym. Określenie gęstość w stanie zsypanym (masa usypowa) ρ_s materiału sypkiego należy rozumieć jako masę jednostkowej objętości tego materiału (1 m^3) w stanie swobodnie usypanym. Masę usypową wyraża się najczęściej w kg/m^3 .

Do wyznaczania masy usypowej stosuje się przyrząd zwany gęstościomierzem. Składa się on z naczynia pomiarowego z przymocowanym do niego prętem i pierścienia, który może obracać się wokół pręta. Chcąc wyznaczyć masę usypową materiału sypie się badany materiał do naczynia pomiarowego przez ustawiony nad nim pierścień, aż do napełnienia naczynia. Po napełnieniu naczynia pomiarowego obraca się pierścień dookoła pręta do takiego położenia, aby nadmiar nasypanego materiału został zgarnięty równo z powierzchnią górnej krawędzi i spadł na podstawkę przyrządu. Po zdjęciu pierścienia waży się naczynie pomiarowe z nasypowanym do niego materiałem.

Masę usypową oblicza się ze wzoru:

$$\rho_s = \frac{M_1 - M_0}{V_l} \quad (1.5)$$

gdzie: M_1 – masa napełnionego naczynia pomiarowego, M_0 – masa pustego naczynia pomiarowego, V_l – objętość naczynia pomiarowego.

Na podstawie masy usypowej rozróżnia się materiały:

- lekkie, $\rho_s = 600 \text{ kg/m}^3$ (torf, drobne trociny),
- średnio ciężkie, $\rho_s = 600 - 1100 \text{ kg/m}^3$ (pyły, popioły),
- ciężkie, $\rho_s = 1100 - 2000 \text{ kg/m}^3$ (kruszywa mineralne).

Gęstość materiału sypkiego. Oprócz masy usypowej przy projektowaniu maszyn i urządzeń do przeróbki i transportu materiałów sypkich konieczna jest znajomość gęstości – masy właściwej. Przez gęstość materiału sypkiego należy rozumieć średnią gęstość cząstek, z jakich materiał się składa.

Znajomość masy usypowej jest np. niezbędna do:

- obliczenia wydajności środków transportowych,
- wyboru typu i rodzaju transportu,
- obliczania sił występujących w urządzeniach transportowych,
- określenia parcia na ściany i otwory wylotowe zbiorników,
- właściwego napełnienia skrzyń ładunkowych pojazdów.

Masa utrzęsona. Innym wskaźnikiem oceny właściwości materiałów sypkich jest masa utrzęsona, zwana także gęstością pozorną (ρ_w). W zależności od cech granulometrycznych i wilgotności wykazuje ona zmniejszenie objętości materiału w określonych warunkach drgań:

$$\rho_u = \frac{M_1 - M_0}{V_2 - V_1} \quad (1.6)$$

gdzie: M_1 – masa napełnionego naczynia pomiarowego, M_0 – masa pustego naczynia pomiarowego, V_2 – objętość naczynia pomiarowego po utrzęsieniu, V_1 – objętość naczynia pomiarowego przed utrzęsieniem.

Masa utrzęsiona wyznaczana jest dla surowców pylistych za pomocą aparatu Engelsmanna. Materiał wsypuje się do wyskalowanego cylindra o pojemności 0,5 dm³ przy amplitudzie 10 mm i częstotliwości 150 wstrząsów na minutę. Po zakończeniu utrzęsania odczytuje się objętość próbki oraz waży się ją. Wartość masy utrzęsionej podawana jest w kg/m³.

Niektóre materiały sypkie przy długotrwałym przechowywaniu zbrylają się, tj. tworzą większe, nierozsypujące się samorzutnie aglomeraty. Skłonność do zbrylania zwiększa się wraz z wysokością warstwy składowanego materiału i największe bryły tworzą się przede wszystkim w dolnej części warstwy. Wilgotne materiały sypkie (tj. materiały zawierające wodę związaną mechanicznie) zamarzają przy temperaturze otoczenia poniżej 0 °C, tworząc zbite i twarde bryły.

Przyczepność. Kolejną cechą charakteryzującą materiał sypki jest jego przyczepność (adhezja). Dużą przyczepność wykazują zwłaszcza materiały wilgotne. Przylepianie się, tj. powierzchniowe łączenie się warstw dwóch różnych materiałów, można wyjaśnić wzajemnym oddziaływaniem cząsteczek materiału, ścianek ograniczających materiał sypki i błonki wodnej, tworzącej się na powierzchni cząstek wilgotnego materiału sypkiego, i rodzaju materiału oraz stanu powierzchni ścianek ograniczających. Przez odpowiedni dobór materiału ścianek i gładkość ich powierzchni można znacznie ograniczyć przylepianie się materiału sypkiego.

Przy wysypywaniu się niektórych materiałów sypkich przez otwory wylotowe ze zbiorników tworzą się nad tymi otworami nieruchome sklepienia, ograniczające lub nawet całkowicie uniemożliwiające dalsze wysypywanie się materiału ze zbiornika. Jest to zjawisko niepożądane.

Tworzeniu się sklepień sprzyjają takie właściwości materiału, jak: skłonność do zbrylania się i do zamarzania materiałów wilgotnych, spójność (kohezja) cząstek i przyczepność (adhezja). Na tworzenie się sklepień w materiałach o grubym uziarnieniu wpływa wielkość cząsteczki i stosunek wielkości cząstek do wielkości otworu wylotowego. Z materiałów drobnoziarnistych największą tendencją do tworzenia sklepień wykazują materiały łatwo zbrylające się.

Kąt zsypu naturalnego. Jedną z ważniejszych właściwości fizyczno-mechanicznych określających materiał sypki jest kąt zsypu naturalnego. Jego wartość zależy od stopnia wzajemnej ruchliwości cząsteczek, przy czym im ruchliwość ta jest większa, tym kąt zsypu naturalnego jest mniejszy.

Naturalny kąt zsypania wyznaczany jest podczas zsypania ładunku ziarnistego na płaszczyznę poziomą, przy niewielkiej prędkości strumienia jego cząstek. Cząstki te tocząc się w dół tworzą stok nachylony pod pewnym kątem do poziomu, który najczęściej waha się w granicach 30 – 40°. Dla ładunku suchego kąt odpowiada w przybliżeniu kątowi tarcia wewnętrzznego i z tego powodu często jest stosowany jako charakterystyczny parametr badanego materiału ze względu na łatwość jego pomiaru.

Z kątem zsypania związana jest ruchliwość wzajemna cząstek, która zależy od sił spójności pomiędzy poszczególnymi cząstkami, jak również od oporów tarcia powstających przy wzajemnym przemieszczaniu się cząstek. Nawet dla tego samego materiału ruchliwość nie jest wielkością stałą, ale jest uwarunkowana wilgotnością, składem frakcyjnym, kształtem i wymiarami cząstek, stopniem zagęszczenia, a dla materiałów skłonnych do zbrylania również czasem przechowywania.

Pod względem ruchliwości poszczególnych cząstek rozróżniamy materiały sypkie samozsypanie i niezsypanie samoczynnie. Kąt zsypania naturalnego przeważającej większości materiałów zależy od wilgotności i zwiększa się z jej wzrostem.

Kąt zsypania naturalnego ma duże znaczenie przy transporcie, a w szczególności wpływa na wydajność przenośników taśmowych i innych. Niektóre materiały mają tak duży kąt zsypania naturalnego, że konieczne jest stosowanie specjalnych urządzeń mechanicznych do umożliwienia ich ruchu po nachylonych powierzchniach.

Zwięzłość. Istotną cechą charakteryzującą materiał sypki jest jego zwięzłość. Do materiałów zwięzłych zalicza się także materiały, które wykazują duży opór na ścinanie przy bardzo małych obciążeniach normalnych. Zwięzłość materiału sypkiego można wyjaśnić spójnością jego cząstek. Spójność niektórych materiałów może mieć charakter mechaniczny. Spójność materiałów jednorodnych jest wynikiem wzajemnego oddziaływania międzycząsteczkowego, czyli tzw. sił spójności, przeciwstawiających się rozdzieleniu cząstek materiału.

Higroskopijność. Niektóre materiały, jak sól, saletra amonowa, kreda, cukier i inne, cechuje higroskopijność, czyli zdolność łatwego pochłaniania pary wodnej i wody z otoczenia. Materiały te należy składować w odpowiednich warunkach niedopuszczających do wchłaniania wody (wentylacja pomieszczeń składowych, szczelne zbiorniki i worki) [Borowski 2009d].

3. URZĄDZENIA PRODUKCYJNE I LINIE TECHNOLOGICZNE DO BRYKIETOWANIA

3.1. Maszyny do brykietowania

3.1.1. Rodzaje i zastosowanie

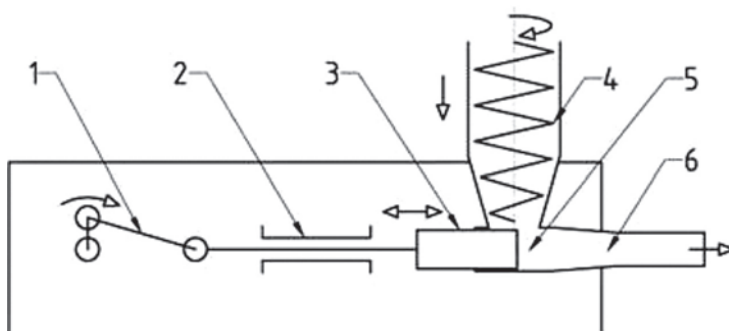
Do brykietowania materiałów sypkich można stosować brykieciarki tłokowe, ślimakowe, stemplowe i walcowe.

Brykieciarki walcowe są znacznie wydajniejsze od pozostałych i mają szersze zastosowanie tam, gdzie powinna być zachowana ciągłość produkcji.

Brykieciarki (prasy) stemplowe natomiast mogą być wykorzystywane do określenia właściwości brykietów w warunkach laboratoryjnych, a także w produkcji jednostkowej i małoseryjnej.

3.1.2. Brykieciarka tłokowa (mimośrodowa)

Brykieciarki tłokowe wytwarzają brykiet cylindryczny o ciągłej strukturze. Schemat ideowy brykieciarki tłokowej przedstawiono na rysunku 2. Prasy te działają w wyniku pulsacyjnego oddziaływania tłoczyska na surowiec. Duża częstotliwość obrotów koła zamachowego wymaga solidnego umocowania urządzenia w celu eliminacji skutków wibracji. Korpus maszyny charakteryzuje znaczna wielkość i masa. Wydajność brykieciarek tłokowych mieści się w zakresie od 150 do 2500 kg/h. Powstające brykiety mają kształt cylindryczny, najczęściej o średnicy od 40 do



Rys. 2. Schemat ideowy brykieciarki tłokowej: 1 – mechanizm korbowodowy lub mimośrodowy, 2 – prowadzenie suwaka, 3 – stempel prasujący, 4 – mechanizm podający, 5 – komora wstępnego zagęszczenia, 6 – komora prasująca [www.agro-energetyka.pl]

120 mm i długości do 300 mm, która może być regulowana dodatkowymi elementami tnącymi [www.agroenergetyka.pl].

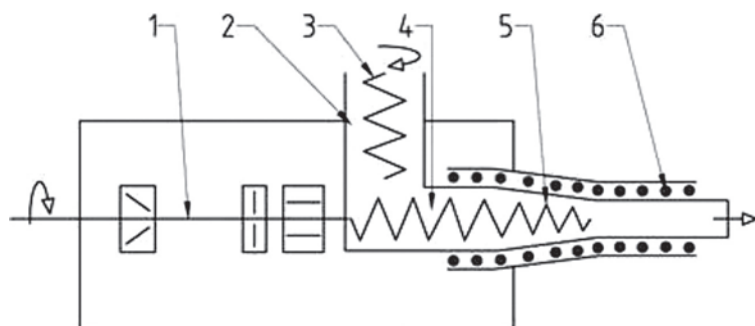
Ze względu na sposób wytwarzania powstały brykiet posiada warstwową strukturę, która powoduje, że brykiety dość łatwo ulegają rozwarstwianiu i kruszeniu w transporcie. Grubość poszczególnych warstw uzależniona jest od rodzaju prasowanego materiału i wynosi od kilku do kilkunastu milimetrów.

Prasowany materiał jest podawany ruchem ciągłym do komory zasypowej. W wyniku cyklicznych uderzeń tłoka połączonego z mechanizmem mimośrodowym (korbowodowym) materiał jest przesuwany w kierunku komory prasującej. Komora ta ma kształt stożkowej tulei, w której następuje właściwa aglomeracja pod wpływem skokowych uderzeń, dochodzących do 200 MPa.

W wyniku działania wysokich tarć międzycząsteczkowych oraz na ściankach tulei następuje znaczny wzrost temperatury. Powstały brykiet oddaje nadmiar energii cieplnej w walcowej tulei, która połączona jest z kilku lub kilkunastometrową przewodnicą. Przewodnice stanowią miejsce ostatecznego ustabilizowania parametrów, takich jak wilgotność i temperatura oraz uzyskania pożądanych cech mechanicznych i fizycznych, a oprócz tego spełniają funkcję regulatora siły oporu.

3.1.3. Brykieciarka ślimakowa

Brykieciarki ślimakowe prasują rozdrobniony materiał w sposób ciągły, pod ciśnieniem przekraczającym 100 MPa i w temperaturach nierzadko przekraczających 200 °C [www.agroenergetyka.pl]. Schemat ideowy brykieciarki ślimakowej przedstawiono na rysunku 3. Duże siły tarcia i temperatury pracy wymuszają zastosowanie na narzędzia bardzo wytrzymałych i odpornych na ścieranie i temperaturę materiałów. W brykieciarkach (prasach) tych powstają brykiety o najróżniejszych przekrojach, najczęściej okrągłych, ale także sześciokątnych i ośmiokątnych,



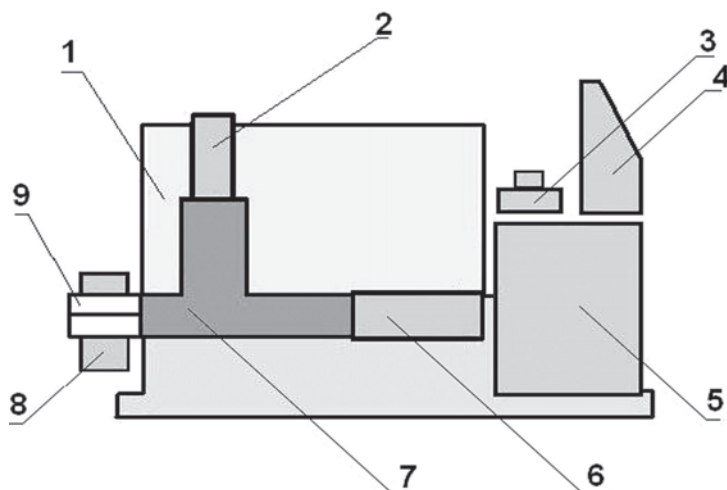
Rys. 3. Schemat ideowy brykieciarki ślimakowej: 1 – układ łożyskowy, 2 – komora podająca, 3 – ślimak podający, 4 – komora zagęszczająca, 5 – ślimak prasujący, 6 – grzałka [www.agroenergetyka.pl]

z otworem w środku. Ich średnica oscyluje wokół 60 mm, a długość jest regulowana przez cięcie bądź łamanie.

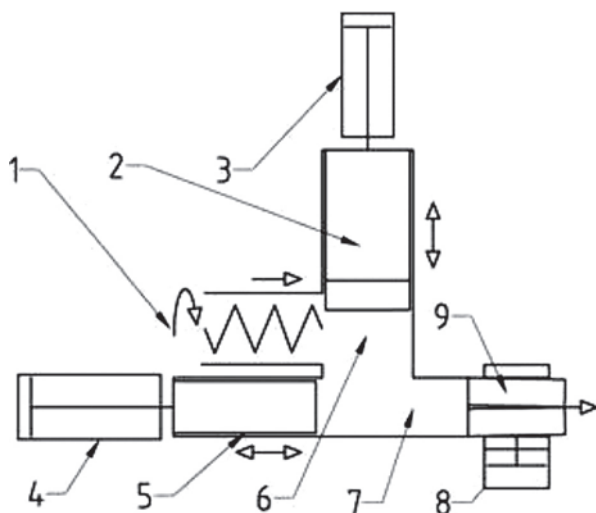
Ślimak wykonując ruch obrotowy wymusza ruch surowca wzdłuż swoich wrębów, przez wszystkie swoje strefy w stronę otwartej komory prasującej. Na skutek napotkanych oporów rośnie ciśnienie i temperatura (często wspomagana ciepłem płynącym od grzałek) w wyniku czego zachodzi proces brykietowania. Praca ślimaka, przy dużych ciśnieniach, powoduje powstawanie bardzo dużych sił tarcia zarówno wewnątrz materiału, jak i na powierzchniach narzędzi. Tarcie powoduje powstawanie dużych ilości ciepła, które często wzmacniane jest przez dodatkowe doprowadzenie go z zewnątrz (przez ścianki tulei bądź podgrzanie samego materiału przed prasowaniem).

3.1.4. Brykietciarki stemplowe

Brykietciarki stemplowe są to najczęściej prasy hydrauliczne z zamkniętą komorą prasowania. Wydajność urządzenia uzależniona jest zarówno od konstrukcji, jak i od właściwości prasowanego materiału (wilgotność, rozdrobnienie, gęstość) i rzadko przekracza 300 kg/h wytworzonych brykietów [www.agroenergetyka.pl]. Brykietciarki te charakteryzują się względnie małą masą. Wytwarzają brykiety cylindryczne o warstwowej, łamliwej budowie. Ich średnica waha się od 50 do 100 mm, a długość rzadko osiąga dwukrotność średnicy. Na rysunku 4 pokazano budowę brykietciarki stemplowej, a na rysunku 5 przedstawiono jej schemat ideowy.



Rys. 4. Budowa brykietciarki stemplowej: 1 – zbiornik surowca, 2 – siłownik wstępnego zgniotu, 3 – elektrozawory, 4 – szafa sterownicza, 5 – zasilacz hydrauliczny, 6 – siłownik głównego prasowania, 7 – komora zagęszczająca (wstępna i właściwa), 8 – siłownik krótkiego skoku, 9 – element zacisku brykietu [www.agroenergetyka.pl]

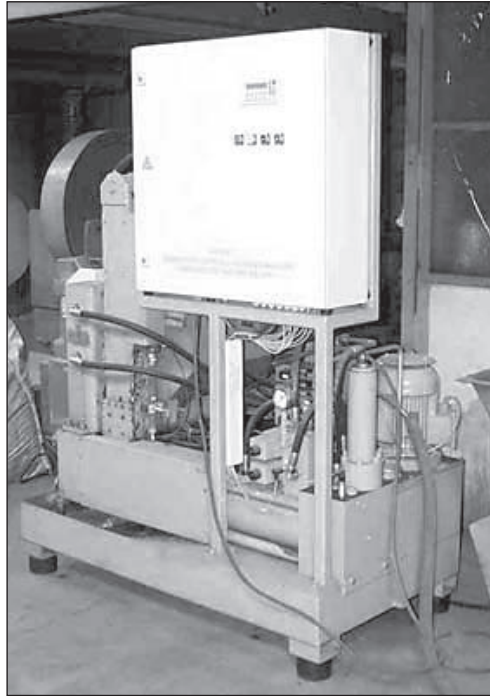


Rys. 5. Schemat ideowy brykietarki stempłowej: 1 – mechanizm podający, 2 – stempel zagęszczający, 3; 4; 8 – siłowniki hydrauliczne, 5 – stempel prasujący, 6 – komora zagęszczająca, 7 – komora prasująca, 9 – mechanizm regulacji oporu prasowania [www.agroenergetyka.pl]

Cykl pracy brykietarki stempłowej przedstawia się następująco:

- mechanizm podający (1) napełnia komorę zagęszczającą (6) i prasującą (7) materiałem,
- siłownik hydrauliczny (3) przesuwa stempel (2) w dolne położenie, powodując zamknięcie komory prasującej (7) i wstępne zagęszczenie brykietowanego materiału,
- siłownik hydrauliczny przesuwa stempel prasujący (5), który z kolei scala materiał znajdujący się w tulei w kierunku poprzednio sprasowanego materiału,
- po osiągnięciu zakładanego ciśnienia brykietowania (najczęściej do 100 MPa) siłownik mechanizmu regulacji oporu prasowania (9) przepycha brykietowany materiał w kierunku wylotu urządzenia.

Zalety stosowania brykietarek stempłowych to niskie koszty zakupu i eksploatacji, łatwość obsługi, wysoka trwałość oraz łatwość uzyskania brykietów o jednorodnej strukturze. Wadami tego urządzenia są: niska wydajność, duży koszt wytworzenia brykietu, duża energochłonność oraz wytwarzanie brykietów o ostrych krawędziach. Brykietarki stempłowe mają zastosowanie w małych zakładach produkcyjnych, gdzie nie występuje konieczność ciągłego przetwarzania odpadów w brykiety. Przykładem tego typu urządzenia jest laboratoryjna brykietarka stempłowa RUF 2,2/2500/60, wykorzystywana do brykietowania metalowych odpadów drobnoziarnistych (rys. 6).



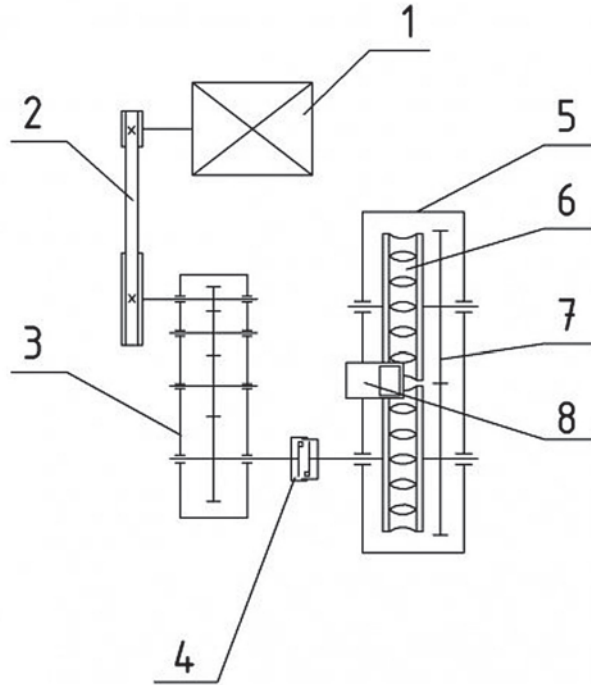
Rys. 6. Laboratoryjna brykietarka stemplowa RUF 2,2/2500/60 (fot. Instytut Metalurgii Żelaza w Gliwicach)

Maksymalne ciśnienie prasowania w tej brykietarce wynosi 2500 kg/cm^2 , średnica brykiety wynosi 60 mm, wysokość brykiety wynosi 30 – 80 mm, wydajność – 2 brykiety/min. Istnieje możliwość usuwania nadmiaru wilgoci z materiału podczas formowania brykietów [www.imz.pl].

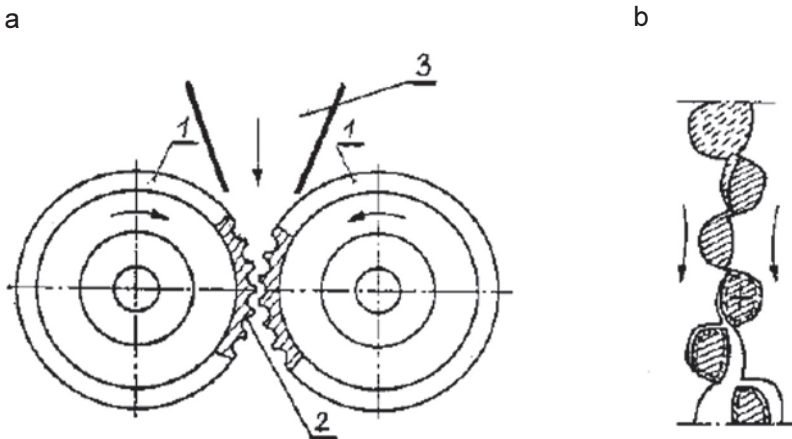
3.1.5. Brykietarki walcowe

Często stosowaną maszyną do brykietowania jest prasa walcowa (rys. 7). W brykietarkach walcowych materiał jest zagęszczany w sposób ciągły między dwoma synchronicznie i przeciwbieżnie obracającymi się walcami.

Zasadę pracy brykietarki walcowej przedstawiono na rysunku 8. Powierzchnie walców posiadają wgłębienia, w których zachodzi formowanie materiału ziarnistego (rys. 8b). Tuż po zakończeniu ściskania materiału, gdy objętość przestrzeni utworzonej przez wgłębienia formujące zaczyna zwiększać, następuje częściowe rozprężenie struktury brykiety. Dozowanie materiału między walce odbywa się najczęściej za pomocą urządzenia ślimakowego, gdzie następuje także wstępne zagęszczenie materiału [Heim 2005].



Rys. 7. Schemat brykieciarki walcowej: 1 – silnik, 2 – przekładnia pasowa, 3 – reduktor, 4 – sprzęgło zębate, 5 – klatka walców roboczych, 6 – walce robocze, 7 – przekładnia zębata otwarta, 8 – zasilacz [www.agroenergetyka.pl]



Rys. 8. Zasada pracy brykieciarki walcowej: a – kształt walców, b – etapy prasowania, 1 – walec, 2 – wgłębienia, 3 – zasyp surowca [Heim 2005]

Brykietowalarki walcowe charakteryzuje wysokie ciśnienie prasowania, duża wydajność (liczona w MPa) i sprawność, a także odporność na zużycie narzędzi formujących. Znalazły one zastosowanie przy masowym brykietowaniu materiałów drobnoziarnistych, czy też materiałów pylistych, co umożliwia ekonomiczny transport i składowanie ze względu na zmniejszenie objętości tych materiałów.

Początkowo brykietowalarki walcowe projektowano i wykonywano dla ściśle określonych materiałów drobnoziarnistych. Obecnie powstaje wiele uniwersalnych rozwiązań konstrukcyjnych tych urządzeń [Babanin i in. 2007]. Powszechnie stosuje się prasy dwuwalcowe. Znane są także brykietowalarki z jednym walcem lub czterema walcami.

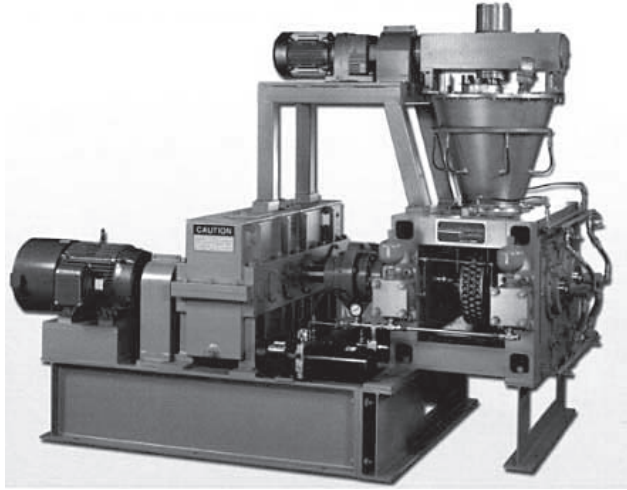
Powierzchnie robocze walców mogą być gładkie, mieć wypusty zewnętrzne lub wgłębienia. Część roboczą walców wykonuje się w postaci pierścieni lub segmentów. Elementy formujące umieszcza się wewnątrz lub na zewnątrz ramy. Prasy są w zależności od potrzeb wyposażone w zasilacze grawitacyjne lub wymuszające przepływ nadawy. Poniżej podano zakresy niektórych parametrów charakteryzujących oferowane w świecie prasy walcowe [Hryniewicz 2002]:

- średnica walców 130 – 1600 mm,
- szerokość walców 100 – 1500 mm,
- maksymalna wartość siły docisku walca przesuwne 100 – 25 000 kN,
- wartość prędkości obwodowej walców 0,1 – 1,0 m/s,
- moc silnika napędu głównego 4 – 650 kW,
- masa prasy walcowej 50 – 13 500 kg,
- wydajność prasy walcowej 50 – 12 000 kg/h.

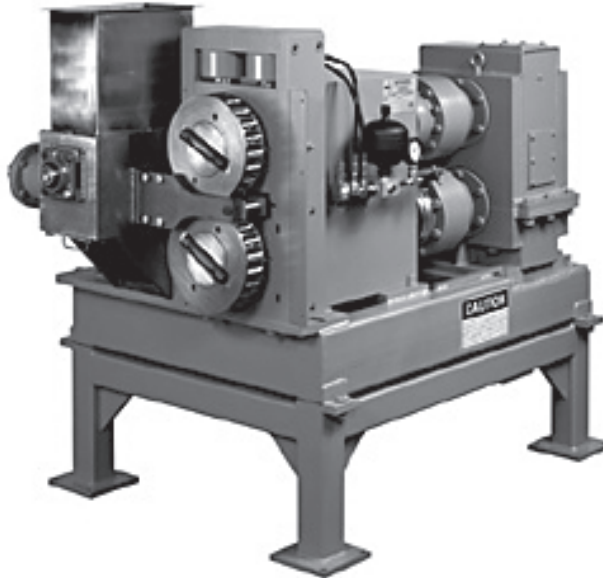
Brykietowalarki walcowe wyróżnia ciągły charakter pracy, możliwość uzyskania dużej wydajności oraz niewielkie koszty eksploatacji. Istotną zaletą pras walcowych jest możliwość stosowania układów formujących umożliwiających uzyskanie brykietów o zaokrąglonym kształcie i pozbawionych ostrych krawędzi. W porównaniu do brykietowalarek stemplowych brykietowalarki te charakteryzuje wyższa cena zakupu oraz szybsze zużywanie elementów formujących.

Brykietowalarki produkowane przez firmę „Komarek” (USA) posiadają walce umieszczone zarówno poziomo – obok siebie, jak i pionowo – jeden nad drugim (rys. 9). Dane techniczne przedstawionych brykietowalarek podano w tabeli 1 [www.komarek.com]. Pierścienie formujące mogą być wymienne, ale stosuje się też pierścienie zintegrowane na stałe z walcami, co pozwala na zastosowanie dogrzewania bądź chłodzenia wodą powierzchni formujących. Brykietowalarki te posiadają różnego typu zasobniki do podawania materiału. W przypadku materiałów trudnych do brykietowania wykorzystuje się zasobniki dogęszczające z mechanizmami śrubowymi, często zaopatrzone w system grzejny umożliwiający dosuszenie mieszanki. Stosuje się ponadto zasobniki z urządzeniem mechanicznie rozdrabniającym ziarna mieszanki.

a



b



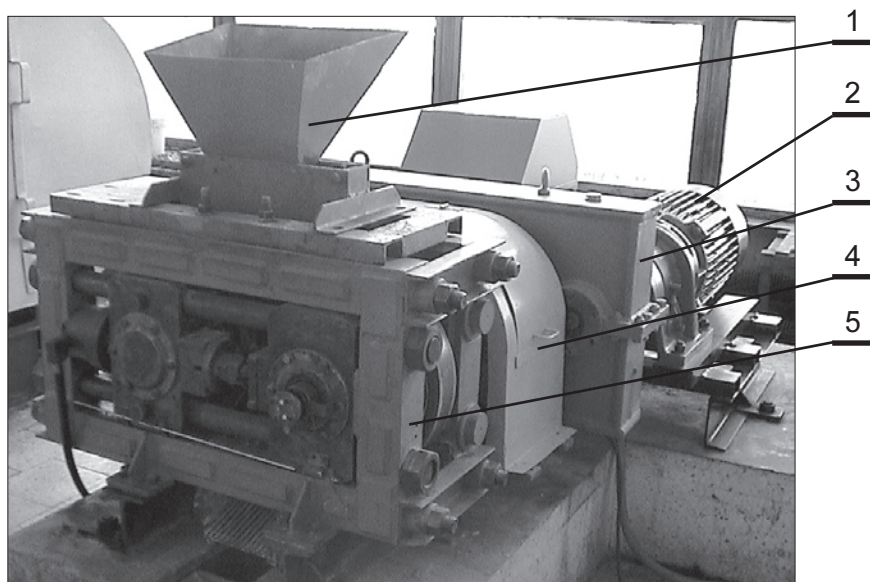
Rys. 9. Brykociarki z walcami roboczymi umieszczonymi: a – poziomo, b – pionowo (fot. K.R. Komarek, Inc.)

Tabela 1. Dane techniczne dwóch różnych typów brykociarek

Parametr	Jednostki	Brykociarka pozioma DH300 (rys. 9a)	Brykociarka pionowa B220B (rys. 9b)
Średnica walców	mm	330 – 520	304
Szerokość walców	mm	102 – 330	75
Maksymalny nacisk	kN	745	311
Moc napędu głównego	kW	56	15
Moc podajnika	kW	11	3,7
Wydajność	kg/h	2000 – 10 000	115 – 450

Przykładem krajowej brykietarki walcowej jest opracowana przez AGH w Krakowie laboratoryjna prasa walcowa LPW 450 (rys. 10). Składa się z następujących zespołów:

- napędu głównego prasy,
- elektronicznego układu regulacji prędkości obrotowej silnika,
- klatki walców formujących wraz z zasilaczem,
- układu hydraulicznego docisku walca przesuwnego,
- układu pomiarowego.

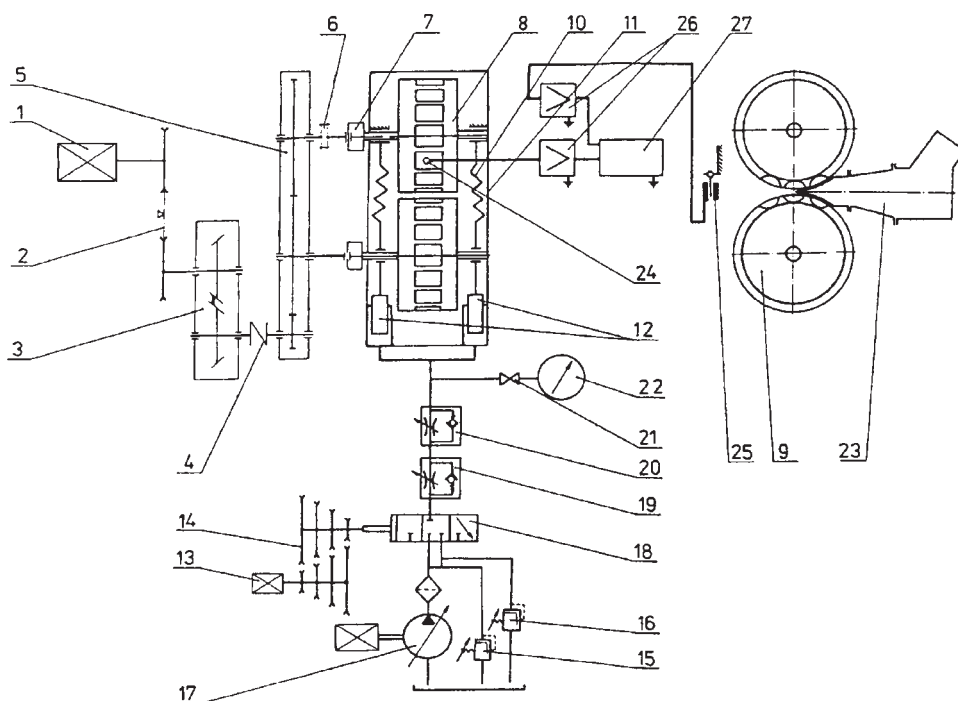


Rys. 10. Widok ogólny laboratoryjnej prasy walcowej LPW 450: 1 – zasilacz grawitacyjny, 2 – silnik elektryczny, 3 – klatka walców zębatych, 4 – osłona sprzęgieł, 5 – klatka walców formujących (fot. G. Borowski)

Układ napędowy zapewnia płynną regulację wartości prędkości obwodowej walców w zakresie 0,1 – 0,5 m/s. W klatce walców formujących znajdują się dwa walce o średnicy 450 mm – nieprzesuwany oraz przesuwany. Maksymalna wartość siły docisku walca przesuwnego wynosi 220 kN.

Prasa walcowa LPW 450 posiada konstrukcję o osi walców ułożonych w płaszczyźnie poziomej. Jej zadaniem jest utworzenie z materiału sypanego wyrobu zespolonego (brykietu) w wyniku działania sił nacisku obracających się walców i o postaci utworzonej przez wykrój tych walców (pierścieni). Przygotowany do brykietowania materiał może być podawany w strefę zagęszczania prasy walcowej przy pomocy zasilacza grawitacyjnego, zbieżnokanałowego lub ślimakowego. Wybór sposobu podawania materiału zależy od jego właściwości.

Schemat funkcjonalny laboratoryjnej prasy walcowej LPW 450 przedstawiono na rysunku 11 [Hryniewicz 1997]. Napęd główny prasy składa się z asynchronicznego silnika elektrycznego (1) napędzającego, przez przekładnię pasową (2), przekładnię bezstopniową (3), która zapewnia płynną regulację wartości prędkości obwodowej walców formujących (8) i (9), w zakresie 0,1 – 0,5 m/s. Przekładnia bezstopniowa jest sprzęgnięta za pośrednictwem sprzęgła podatnego (4) z klatką walców zębatach (5). Spełnia ona rolę reduktora oraz umożliwia synchronizację obrotów walców formujących. W skład klatki walców formujących wchodzi m.in. rama (11), w której są ułożyskowane tocznie dwa walce o średnicy 450 mm, nieprzesuwne (8) oraz przesuwne (9). Walec przesuwny jest podparty dwoma siłow-



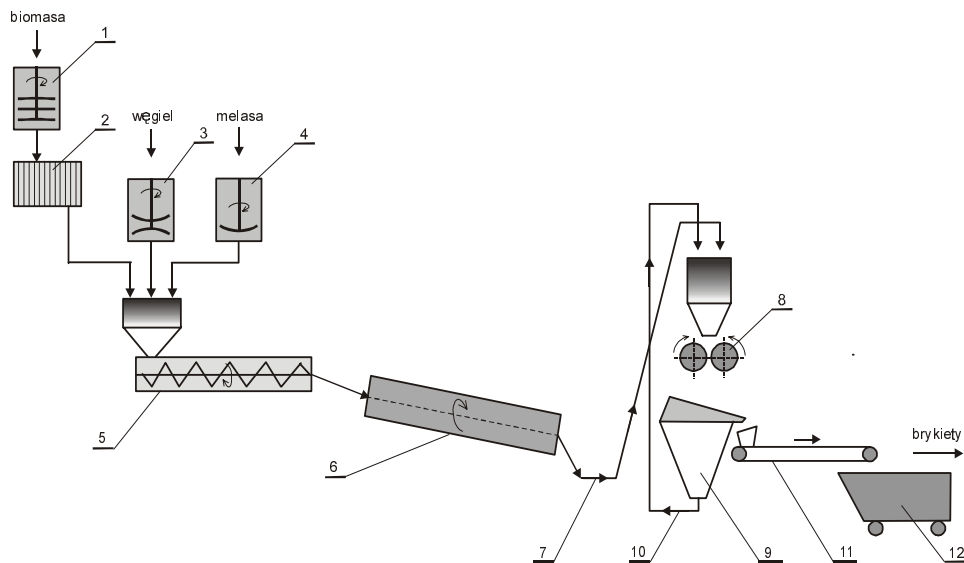
Rys. 11. Schemat funkcjonalny laboratoryjnej prasy walcowej LPW 450: 1 – silnik asynchroniczny napędu głównego, 2 – przekładnia pasowa, 3 – przekładnia bezstopniowa, 4 – sprzęgło podatne, 5 – klatka walców zębatach, 6 – sprzęgło cierne, 7 – sprzęgło Oldhama, 8 – nieprzesuwne walec formujący, 9 – przesuwne walec formujący, 10 – element sprężysty, 11 – rama, 12 – siłownik numeryczny, 13 – silnik asynchroniczny, 14 – przekładnia pasowa, 15, 16 – zawory przelewowe, 17 – pompa hydrauliczna, 18 – pulsator hydrauliczny, 19, 20 – zawory dławiczące jednostronnego działania, 21 – zawór odcinający, 22 – manometr, 23 – zasobnik grawitacyjny, 24 – tensometryczne przetworniki siły nacisku, 25 – transformatorowy przetwornik przemieszczenia walca przesuwne, 26 – wzmacniacze pomiarowe, 27 – rejestrator [Hryniewicz 1997]

nikami nurnikowymi (12). Służą one do wywierania założonego nacisku podczas brykietowania. Skomplikowany charakter układu hydraulicznego wiąże się z możliwością stosowania pulsującej siły docisku walca przesuwanego.

3.2. Przykładowe koncepcje przemysłowych linii technologicznych

3.2.1. Brykietowanie surowców energetycznych

Przedstawiona na rysunku 12 linia technologiczna służy do otrzymywania zbrykietowanego paliwa energetycznego z takich surowców jak miął węglowy oraz biomasa. Wstępnie rozdrobniona w młynku nożowym (1) biomasa jest podawana jest do prasy filtracyjnej (2), a następnie do kosza zasypowego mieszarki ślimakowej (5). Do mieszarki jest również podawany rozdrobniony w młynku udarowym (3) węgiel kamienny oraz roztwór lepiszcza ze zbiornika z mieszadłem (4). Uśredniona mieszanka jest transportowana następnie do suszarki bębnowej (6) skąd po podsuszeniu przenośnikiem kbelkowym (7) jest dostarczana do prasy walcowej (8). Brykiety po odsianiu na ruszcie separatora (9) są transportowane przenośni-



Rys. 12. Koncepcja przemysłowej linii technologicznej do brykietowania surowców energetycznych: 1 – młynek nożowy, 2 – prasa filtracyjna, 3 – młynek udarowy, 4 – zbiornik melasy, 5 – mieszalnik ślimakowy, 6 – suszarka bębnowa, 7 – przenośnik kbelkowy, 8 – brykieciarka walcowa, 9 – separator, 10 – przenośnik kbelkowy do zawrotu odsiewu, 11 – przenośnik taśmowy do odbioru brykietów, 12 – kontener na brykiety

kiem taśmowym (11) do kontenera składowego (12). Podziarno oddzielone od brykietów jest zwracane przenośnikiem kbelkowym (10) do kosza zasypowego brykietciarki walcowej.

W opisywanej linii technologicznej proponuje się zastosowanie następujących urządzeń [Borowski 2009c]:

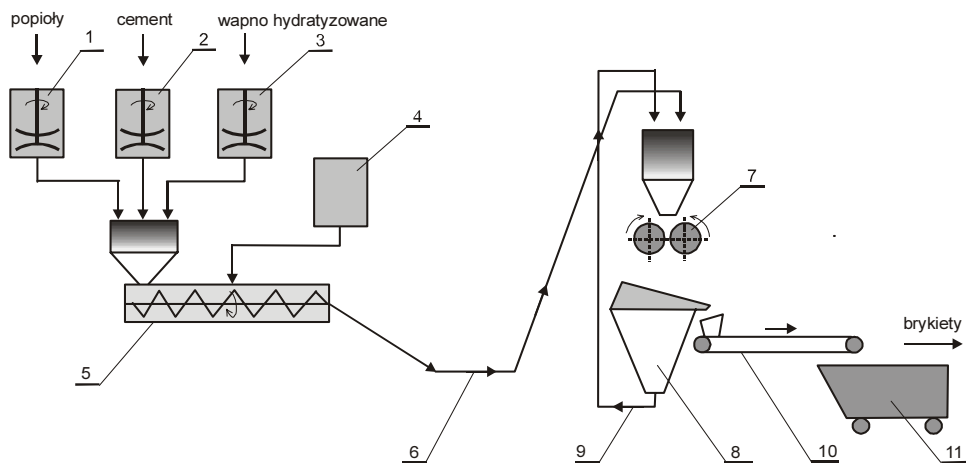
- brykietciarka walcowa PW 500 wyposażona w zasilacz grawitacyjny; średnica walców wynosi 500 mm, liczba wgłębień formujących w jednym rzędzie – od 40 do 50, moc silnika napędowego – 55 kW, wydajność objętościowa – 3,0 m³/h;
- prasa filtracyjna PFK-630 zaopatrzona w 30 płyt filtracyjnych o pojemności 0,2 m³; ilość osadu po filtracji wynosi 0,6 m³, wydajność prasy – 1,8 m³/h;
- mieszalnik odpadów MD-3 zaopatrzony w dwuślimakowy zespół mieszający, o wydajności 2 m³/h i mocy silnika 2 kW;
- podajnik śrubowy PS-1 o mocy silnika 1,5 kW;
- wózek samowyladowczy Owc-30, stosowany do odbierania odpadów i transportu i pojemności 0,5 m³;
- kontener Ojs-76, stosowany do składowania i sezonowania brykietów.

Opisana linia zapewnia możliwość uzyskania tzw. biobrykietów o dużej wartości energetycznej. Stanowią one alternatywne paliwo stosowane do spalania w przydomowych kotłach energetycznych.

3.2.2. Brykietowanie popiołów paleniskowych

Popioły powstające w palenisku po spaleniu paliw w produkcji energii cieplnej i elektrycznej nie wymagają dosuszania oraz rozdrabniania. Przygotowanie mieszanki do brykietowania obejmuje w tym wypadku dodanie do popiołów lepiszcza dwuskładnikowego, składającego się z wapna hydratyzowanego i cementu, oraz dodawanie porcjami wody w celu uzyskania odpowiedniej wilgotności. Koncepcję linii technologicznej brykietowania popiołów paleniskowych przedstawiono na rysunku 13.

Popioły (1) podawane są do kosza zasypowego mieszarki ślimakowej (5). Podawane są również z zasobników cement (2) oraz wapno hydratyzowane (3). Ze zbiornika (4) jest dodawana porcjami woda w celu doprowadzenia mieszanki do korzystnej wilgotności. Uśredniona mieszanka jest następnie transportowana przenośnikiem kbelkowym (6) do prasy walcowej (7). Brykiety po odsianiu na ruszcie separatora (8) są transportowane przenośnikiem taśmowym (10) do kontenera składowego (11). Podziarno oddzielone od brykietów jest zwracane przenośnikiem kbelkowym (9) do kosza zasypowego brykietciarki walcowej. Brykiety należy sezonować w kontenerach składowych przez 14 dni.



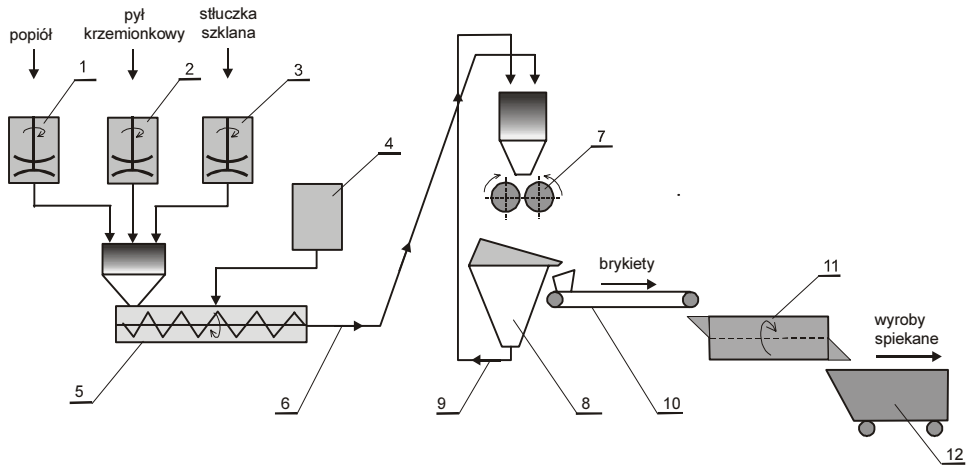
Rys. 13. Koncepcja przemysłowej linii technologicznej do brykietowania popiołów: 1 – zasobnik popiołów, 2 – zasobnik cementu, 3 – zasobnik wapna hydratyzowanego, 4 – zbiornik wody, 5 – mieszalnik ślimakowy, 6 – przenośnik kbelkowy, 7 – brykietarka walcowa, 8 – separator, 9 – przenośnik kbelkowy do zawrotu odsiewu, 10 – przenośnik taśmowy do odbioru brykietów, 11 – kontener do sezonowania brykietów

Uzyskane brykiety wykorzystuje się jako dodatek (lub zamiennik) do naturalnego kruszywa mineralnego stosowanego na podbudowy drogowe.

3.2.3. Brykietowanie pyłów ze spalania osadów ściekowych

Pozostałości ze spalania osadów ściekowych (pyły z instalacji odpylania kotła fluidalnego) są zaliczane do odpadów niebezpiecznych dla środowiska. Mogą być utylizowane po dodatkowej obróbce termicznej w piecu obrotowym. W procesie spiekania wytworzonych z odpadów brykietów następuje utworzenie szczelnej otuliny, uniemożliwiającej wydostanie się niebezpiecznych pierwiastków.

Koncepcję linii technologicznej do brykietowania oraz spiekania popiołów ze spalania osadów ściekowych przedstawiono na rysunku 14. Popiół (1) jest podawany do kosza zasypowego mieszarki ślimakowej (5). Do mieszarki są podawane również pyły krzemionkowe (2), rozdrobniona stłuczka szklana (3) oraz woda ze zbiornika (4). Uśredniona mieszanka jest następnie transportowana przenośnikiem kbelkowym (6) do prasy walcowej (7). Brykiety po odsianiu na ruszcie separatora (8) są transportowane przenośnikiem taśmowym (9) do zbiornika zasypowego piecu obrotowego (11), gdzie są spiekane w temperaturze 1000 – 1100 °C. Gotowe wyroby są gromadzone w kontenerze składowym (12).



Rys. 14. Koncepcja przemysłowej linii technologicznej do brykietowania popiołów ze spalania osadów ściekowych: 1 – zasobnik popiołów, 2 – zasobnik pyłów krzemionkowych, 3 – zasobnik rozdrobnionej stłuczki szklanej, 4 – zbiornik wody, 5 – mieszalnik ślimakowy, 6 – przenośnik kulekowy, 7 – brykietciarka walcowa, 8 – separator, 9 – przenośnik kulekowy do zawrotu odsiewu, 10 – przenośnik taśmowy do transportu brykietów, 11 – piec obrotowy, 12 – kontener na wyroby

Produkty uzyskane z wykorzystaniem przedstawionej linii technologicznej stanowią zamiennik lekkich kruszyw mineralnych, które mogą być wykorzystane w budownictwie, a także w rolnictwie i ogrodnictwie.

4. KOMPUTEROWE MODELOWANIE PROCESU BRYKIETOWANIA

4.1. Zastosowanie metody elementów skończonych

W procesie scalania materiałów drobnoziarnistych istotne jest uzyskanie brykietów o ściśle określonych właściwościach, akceptowanych przez danego odbiorcę. W tym celu przeprowadza się próby laboratoryjne oraz opracowuje się modele matematyczne, umożliwiające symulację procesu scalania materiałów drobnoziarnistych.

Opracowane modele procesów zagęszczania materiałów drobnoziarnistych z dostateczną dokładnością odzwierciedlają rzeczywistą sytuację fizyczną, co umożliwia uproszczenie i zmniejszenie liczby przeprowadzanych prób eksperymentalnych.

Początkowo prace badawcze dotyczące procesów scalania zmierzały do określenia tzw. **charakterystyki zagęszczania**, która odnosiła się do ściśle określonego materiału i sposobu jego zagęszczania. Podstawę opracowania modelu stanowiła formuła empiryczna zwana **równaniem zagęszczania**, dotycząca brykietowania w prasie stemplowej materiałów drobnoziarnistych w matrycy zamkniętej. W procesie zagęszczania w prasie walcowej wgłębienia formujące stanowią matrycę otwartą [Hryniewicz 2000].

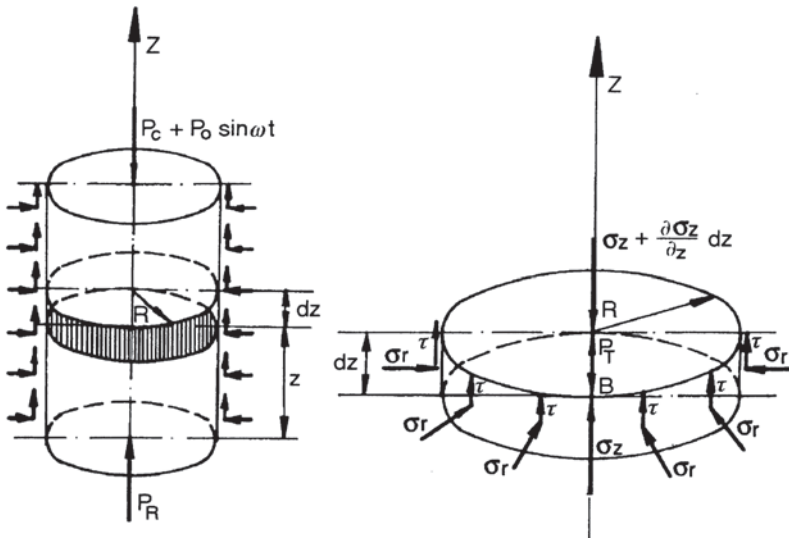
Do modelowania procesów scalania w prasach walcowych najbardziej odpowiednie jest zastosowanie **metody elementów skończonych**, ponieważ metoda ta operuje dokładniejszymi danymi geometrycznymi, z uwzględnieniem warunków oporu tarcia.

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 moment obrotowy walców roboczych brykietarki. 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 1991, Drzymała 2000].

Odpowiednie modele matematyczne, będące podstawą symulacji komputerowej, są nowoczesnym narzędziem umożliwiającym racjonalne rozwiązywanie podjętych problemów.

4.2. Model matematyczny scalania materiałów drobnoziarnistych w prasach stemplowych

Szczególnie trudne do zagęszczania materiały drobnoziarniste brykietuje się w prasach stemplowych z zastosowaniem matrycy zamkniętej. Model tego procesu w odniesieniu do wiórów z metali nieżelaznych opracował Z. Drzymała [1993, 2000]. Przyjęty schemat obciążeń wywieranych na brykiet oraz wydzielony element jego objętości przedstawiono na rysunku 15.



Rys. 15. Schemat obciążeń wywieranych na brykiet oraz wydzielony element jego objętości [Hryniewicz 1997]

Model matematyczny procesu wibracyjnego zagęszczania wiórów z metali nieżelaznych ma postać:

$$\frac{\partial^2 u}{\partial z^2} - 2a_n \frac{\partial u}{\partial z} - p_n = b_n^2 \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} \quad (3.1)$$

gdzie: u – przemieszczenie elementu objętości brykieta w kierunku osi z w pojedynczym cyklu drgań, t – czas zagęszczania, a_n – parametr uwzględniający kształt matrycy, b_n – parametr uwzględniający gęstość brykieta w n -tym cyklu drgań, p_n – parametr uwzględniający opory tarcia w zagęszczanym materiale.

Przedstawiony model matematyczny poddano badaniom weryfikacyjnym w skali laboratoryjnej oraz przemysłowej [Drzymała, Hryniewicz 1994]. Wykazały one jego zadowalającą zgodność z rzeczywistą sytuacją fizyczną. Można go zatem stosować w celu doboru optymalnych parametrów procesu zagęszczania, określenia stanu naprężenia w dowolnym przekroju poprzecznym brykietu, a także jego gęstości w różnych fazach brykietowania. Model stosowano m.in. w analizie i syntezie komputerowej prototypowej prasy wibracyjnej do brykietowania wiórów z metali nieżelaznych.

W procesie brykietowania materiału drobnoziarnistego w matrycy zamkniętej pod naciskiem statycznym uwzględniono wyniki badań wskazujące na paraboliczny charakter rozkładu nacisku jednostkowego oraz naprężeń normalnych w brykiecie. Zaproponowano podaną poniżej postać modelu matematycznego [Hryniewicz 2000]:

$$\rho(r, z) = \rho_n + T\sigma^{1/3}(r, z) \quad (3.2)$$

gdzie: ρ – gęstość w dowolnej strefie brykietu, r – odległość strefy od osi brykietu, z – wysokość brykietu, T_s – siła styczna, σ – naprężenie normalne w osi brykietu.

Przedstawiony model umożliwia określenie teoretycznego rozkładu gęstości materiału w brykiecie w zależności od naprężeń normalnych oraz stycznych w dowolnej strefie zagęszczania.

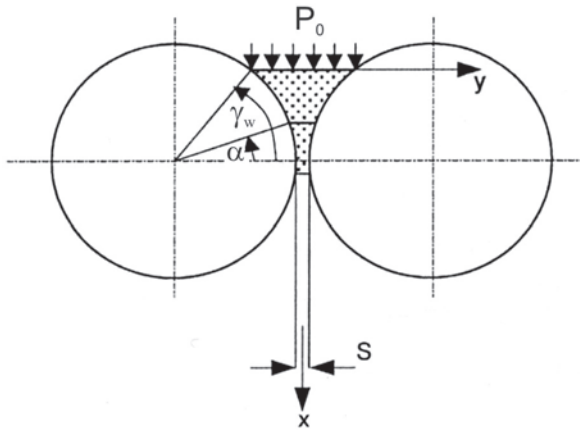
4.3. Modele scalania materiałów sypkich w prasach walcowych

Prasy walcowe coraz częściej stosuje się do brykietowania w nowoczesnych liniach technologicznych. W cytowanej literaturze omówiono szczegółowo problematykę określania konfiguracji układu zagęszczania prasy walcowej oraz doboru geometrycznych cech konstrukcyjnych w celu brykietowania drobnoziarnistych odpadów przemysłowych [Guigon, Simon 2003; Hryniewicz 1997; Loginov i in. 2001].

Dotychczas opracowano wiele modeli umożliwiających analizę procesów scalania w prasach walcowych. Jednym z pierwszych był model J.R. Johansona, przedstawiony w latach 60. ubiegłego wieku. W modelu tym założono, że zagęszczany w prasie walcowej materiał jest izotropowy, spójny, jednorodny oraz podlega takim samym regułom jak materiały plastycznie odkształcalne. W przyjętym uproszczonym schemacie procesu scalania założono, że nie występują poślizgi pomiędzy ziarnami materiału a powierzchnią walców roboczych oraz że cała objętość materiału trafiającego ze strefy zasypu do strefy zagęszczania

powinna być scalona do wielkości wynikającej z rozmiaru szerokości szczeliny walcowniczej (rys. 16) [Dec i in. 2003].

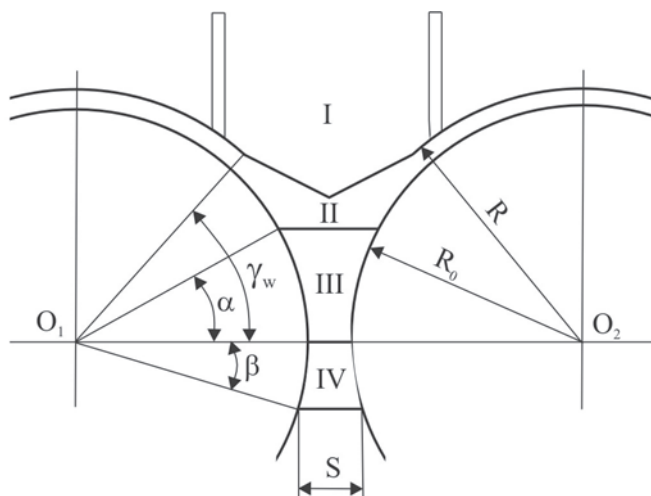
Model Johansona jest nadal przydatny do wyznaczenia niektórych parametrów zagęszczania przy stosowaniu pras walcowych z zasypem grawitacyjnym. W szczególności model ten ma zastosowanie przy stosowaniu pras z gładkimi walcami o dużych średnicach – powyżej 500 mm. Jednakże przy stosowaniu materiałów o dobrej podatności na zagęszczanie oraz stosowania większych nacisków jednostkowych (powyżej 100 MPa) występują ponad 50-procentowe rozbieżności pomiędzy wynikami obliczeń teoretycznych a wynikami uzyskanymi z pomiarów eksperymentalnych. W celu zmniejszenia tych rozbieżności opracowano kolejne metody modelowania, określane jako metody „cienkich przekrojów”. Metody te znalazły zastosowanie do określania rozkładu naprężeń oraz sił nacisku w procesach scalania metalowych materiałów drobnoziarnistych [Kortas i in. 2001].



Rys. 16. Uproszczony schemat procesu scalania w prasach walcowych: α – kąt chwytu, γ_w – kąt zagęszczania, P_0 – nacisk wzdłużny, S – szerokość szczeliny walcowniczej [Dec i in. 2003]

Pierwszy model uzyskany metodą „cienkich przekrojów” przedstawił V.P. Katashinskii w latach 80. ubiegłego wieku. Istotą tej metody jest podział obszaru zagęszczania na płaskie przekroje o trapezowym kształcie. W każdym przekroju są określone warunki równowagi sił z uwzględnieniem zależności występujących w procesie walcowania ośrodków ciągłych. W metodzie tej nie uwzględniono jednak istotnych różnic występujących pomiędzy walcowaniem ośrodków ciągłych a brykietowaniem materiałów drobnoziarnistych w prasie walcowej.

Modyfikację przedstawionego modelu zaproponował M. Hryniewicz [1997, 2000]. Brykietowanie ośrodka sypkiego zastąpiono walcowaniem, wprowadzając tzw. „zastępczy układ walców”. W układzie zagęszczania prasy walcowej wyróżniono cztery strefy: I – zasypu, II – podawania, III – zagęszczania, IV – ekspansji zwrotnej (rys. 17).



Rys. 17. Schemat układu zagęszczania prasy walcowej: R_0 – promień walców w układzie zastępczym, R – rzeczywisty promień walców, α – kąt chwytu, γ_w – kąt zagęszczania, β – kąt ekspansji zwrotnej, S – szerokość pasma [Hryniewicz 2000]

Porównując sumaryczną objętość wgłębień formujących na powierzchniach roboczych walców brykociarki z objętością płaskiego pasma walcowanego w układzie zastępczym, otrzymano zależność wyrażającą związek między promieniami walców w układzie rzeczywistym oraz zastępczym:

$$R_0 = \sqrt{R^2 - \frac{kV_b}{2\pi B}} \quad (3.3)$$

gdzie: R_0 – promień walców w układzie zastępczym, R – rzeczywisty promień walców, k – ilość wgłębień formujących walca, V_b – objętość brykietu, B – szerokość czynna walców w układzie rzeczywistym oraz zastępczym.

Otrzymano następującą postać modelu matematycznego:

$$\frac{dp_y}{dh_y} + p_y \frac{\mu \operatorname{ctg}(a_0/2)}{h_y} = \frac{\nu}{h_y} + \frac{d\nu}{dh_y} \quad (3.4)$$

gdzie: α_0 – kąt chwytu, ν – jednostkowy opór zagęszczania, μ – współczynnik tarcia zewnętrzny, h_y – odległość między walcami, p_y – nacisk jednostkowy.

Opierając się na wynikach badań eksperymentalnych stwierdzono, że wartości jednostkowego oporu zagęszczania w poszczególnych fazach procesu brykietowania są znacznie zróżnicowane. Dlatego jest niemożliwe przedstawienie z dostateczną dokładnością zależności tego oporu od stopnia zagęszczenia oraz wilgotności materiału za pomocą jednej formuły empirycznej. Jeżeli znana jest wilgotność

przygotowanego materiału, w pierwszej fazie brykietowania można założyć liniowy charakter zmienności jednostkowego oporu zagęszczania. Będzie on wtedy funkcją stopnia zagęszczenia. Znajomość przebiegu nacisku jednostkowego zarówno w strefie zagęszczania, jak i rozprężania brykietów, pozwala na określenie obciążeń prasy [Hryniewicz 1997].

Dalsze modyfikacje modeli matematycznych uzyskanych metodą „cienkich przekrojów” nie przyniosły znacznych efektów, ponieważ uzyskiwano jedynie fragmentaryczne informacje o rozkładzie ciśnień i odkształceń w procesie brykietowania w prasach walcowych. Należy zwrócić uwagę, że w przyjmowanych układach zastępczych w postaci płaskiego pasma walcowanego nie uwzględnia się faktu odcinania brykietów na krańcach wgłębień formujących na powierzchniach roboczych walców. Obecne wymagania przemysłu zobowiązują do większej dokładności przewidywania i kontroli właściwości scalanych wyrobów [Zavaliangos 2002]. Zapewniają to modele implementowane w programach symulacji komputerowej, umożliwiające uzyskanie informacji np. o naciskach i przepływach materiału podczas procesu zagęszczania. Schemat blokowy programu symulacji komputerowej brykietowania przedstawiono w załączniku 6 .

4.4. Modelowanie metodą elementów skończonych

4.4.1. Modele procesu scalania materiałów droбноziarnistych

Metoda elementów skończonych (MES) jest obecnie powszechnie stosowanym narzędziem obliczeń inżynierskich. W metodzie tej wykorzystuje się możliwie dokładnie opisujące rzeczywistość modele matematyczne wraz z warunkami brzegowymi i początkowymi. Dokładność rozwiązania przybliżonego metodą elementów skończonych może być regulowana przez dobór stopni swobody, korzystne jest więc użycie w obliczeniach siatek o dużej liczbie węzłów.

Pierwsze modele procesu scalania materiałów droбноziarnistych metodą elementów skończonych powstały w drugiej połowie lat 90. ubiegłego wieku. Zmodyfikowany model Druckera-Pragera zastosowano do analizy procesu kompaktowania (patrz rozdział 5.1.3). Dwuwymiarową analizę przeprowadzono za pomocą programu ABAQUS [Dec i in. 2003]. Modelowano scalanie materiału w prasie z gładkimi walcami, o średnicy 100 mm. Wielkość szczeliny walcowniczej wynosiła 2 mm, kąt styku materiału z powierzchnią walców w strefie wejściowej wynosił ok. 18°. Obszar wzajemnego oddziaływania walec – materiał podzielono na dwie strefy:

- wejściową, podlegającą działaniu prawom przepływu,
- oraz
- scalania materiału, niepodlegającą prawom przepływu.

Założono występowanie stałego współczynnika tarcia pomiędzy materiałem a walcami (o wartościach $\mu = 0,35$ i $0,5$) oraz stałej wartości nacisku zasypowego masy materiału w urządzeniu zasilającym brykociarkę. Określono zależności pomiędzy wspomnianymi wielkościami stałymi a podstawowymi wielkościami zmiennymi, takimi jak:

- siła docisku i moment obrotowy walców,
- kąt chwytu materiału,
- kąt rozprężania (zmiany kierunku działania naprężeń stycznych).

Zależności te przedstawiono w tabeli 2.

Tabela 2. Wyniki zastosowania modelu Druckera-Pragera do symulacji procesu kompaktowania

Dane wejściowe		Wyniki analizy				
nacisk zasypowy [MPa]	współczynnik tarcia zewnętrznego [-]	siła docisku walców [kN]	moment obrotowy walców [kN·mm]	gęstość scalonego materiału [kg/m ³]	kąt chwytu [°]	kąt rozprężania [°]
0,21	0,35	0,46	0,96	0,854	8,5	1,06
0,42	0,35	0,76	1,40	0,916	8,6	0,90
0,05	0,50	0,36	0,96	0,820	11,8	0,88
0,10	0,50	0,58	1,40	0,889	11,8	0,89
0,21	0,50	0,97	2,00	0,934	11,8	0,62
0,42	0,50	1,70	2,80	0,982	12,5	0,47

Stosowanie wstępnego zagęszczania materiału w zasilaczu, np. podajnikiem ślimakowym, bardzo korzystnie wpływa na uzyskanie wysokiego stopnia zagęszczenia wypraski. Maksymalny stopień zagęszczenia uzyskano tuż przed osiągnięciem osi symetrii walców, dla kątów $0,5 - 1,1^\circ$. Stopień zagęszczenia materiału zwiększa się wraz ze zwiększeniem siły docisku walców, momentu obrotowego oraz współczynnika tarcia pomiędzy materiałem a powierzchnią walców.

Wyniki modelowania procesu brykietowania metodą elementów skończonych przedstawili A. Zavalianos 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:

$$\Phi = \left(\frac{\sigma}{\sigma_y} \right)^2 + 2q_1 f \cosh \left(\frac{3q_2 p}{\sigma_y} \right) - (1 + q_3 f^2) = 0 \quad (3.5)$$

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

4.4.2. Symulacja naprężeń wewnętrznych w matrycy otwartej

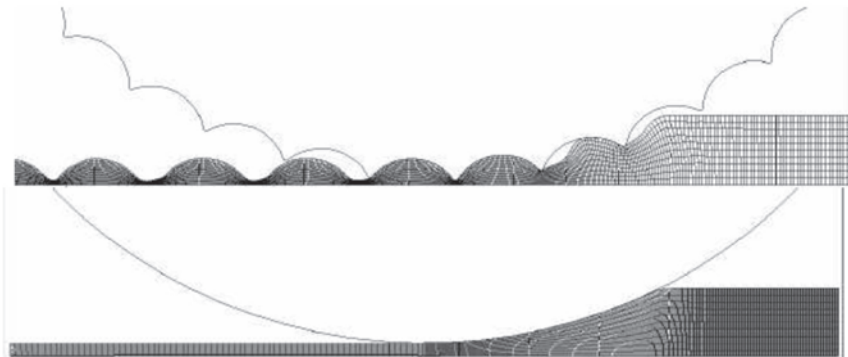
Wykorzystując model Gursona przeprowadzono symulację dwóch systemów prasujących:

- z walcami brykietującymi o średnicy 500 mm, gdzie na obwodzie znajdowało się 38 wgłębień o promieniu 25 mm i głębokości 10 mm.
- z gładkimi walcami zastępczymi (ekwiwalentnymi), gdzie wymiary walców i wielkość szczeliny walcowniczej obliczono dla założonego przepływu porównywalnej objętości zagęszczanego materiału, średnica walców wynosiła 490 mm, szczelina walcownicza 14 mm.

Materiałem roboczym był drobno zmielony miał węglowy o wilgotności 9% i gęstości nasypowej 690 kg/cm^3 . Wartości naprężeń wzdłużnych i poprzecznych określono eksperymentalnie, a uzyskane wyniki aproksymowano w celu uzyskania najlepszego zestawu stałych parametrów modelu, które wynosiły: $q_1 = 3$, $q_2 = 1,5$, $q_3 = 9,03$. Prognozowane właściwości materiałowe brykietów opuszczających wgłębienia formujące charakteryzują współczynnik Poissona $\nu = 0,38$ oraz moduł Younga $E = 2,1 \text{ GPa}$. Wartości współczynnika tarcia również wyznaczono eksperymentalnie. Zmniejszyły się one od wartości $\mu = 0,4$ do wartości 0,2 w zakresie nacisków jednostkowych od 40 do 120 MPa [Borowski 2007a].

Do modelowania wykorzystano wersję Explicit programu ABAQUS (ver. 6.2), umożliwiającą symulację zjawisk o charakterze dynamicznym. Wyniki symulacji wykazały, że podczas brykietowania w walcach z wgłębieniami proces zagęszczania rozpoczyna się wcześniej oraz występują większe siły docisku, niż przy brykietowaniu w gładkich walcach ekwiwalentnych (rys. 18).

Stwierdzono 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 ukła-



Rys. 18. Porównanie symulacji procesu brykietowania i kompaktowania [Zavaliangos i in. 2003]

dów zastępczych jest niewłaściwe do analiz procesu brykietowania. Wykazano, że proces zagęszczania materiału zaczyna się już w momencie dostania się materiału do wgłębień formujących, pomiędzy walce robocze. Uzyskane wartości stopnia zagęszczenia są znacznie większe w razie brykietowania w walcach z wgłębieniami niż w walcach gładkich (rys. 19). Wyniki symulacji pokazały ponadto, że zastosowana metoda pozwoli uzyskać brykiety pozbawione wewnętrznych porów i pęcherzy.

Na rysunku 20 przedstawiono symulację rozkładu naprężeń poprzecznych w obu metodach zagęszczania materiału drobnoziarnistego. Stwierdzono znaczne



Rys. 19. Rozkład stopnia zagęszczenia materiału w procesach brykietowania i kompaktowania [Zavaliangos i in. 2003]



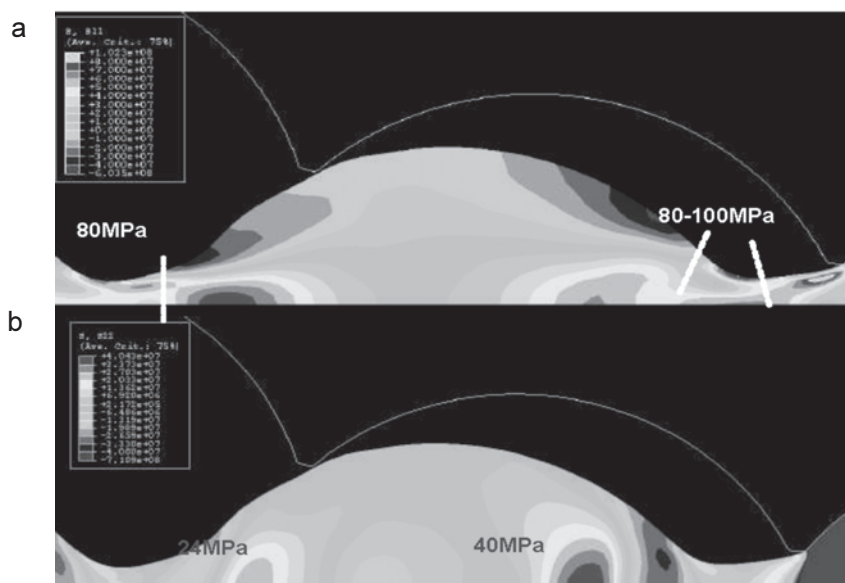
Rys. 20. Rozkład naprężeń poprzecznych w procesach brykietowania i kompaktowania [Zavaliangos i in. 2003]

różnice. W początkowym etapie compactowania obserwowano duże wartości naprężeń, w dalszym etapie dość równomierny ich rozkład w strefie zagęszczania, zaś w pobliżu wyjścia ze strefy zagęszczania obserwowano ponowny skokowy wzrost naprężeń.

W procesie brykietowania wzrost naprężeń poprzecznych okazał się bardziej równomierny ze względu na zmienny kształt wgłębień formujących, gdzie występują względnie małe opory w chwili rozpoczynania procesu. W trakcie formowania brykietów naprężenia wzrastają stopniowo, osiągając wartości maksymalne tuż przed opuszczeniem wgłębień formujących. W miejscu największego zbliżenia walców stwierdzono zjawisko spiętrzenia naprężeń na skutek przeciskania się materiału, co w efekcie daje niepożądaną niejednorodność struktury brykietów.

Symulowano także rozkład naprężeń wewnętrznych w brykietach tuż po opuszczeniu wgłębień formujących. Na rysunku 21a pokazano reszkowe naprężenia wzdłużne, a na rysunku 21b reszkowe naprężenia poprzeczne. Stwierdzono wysokie wartości naprężeń reszkowych w zagłębieniach pomiędzy brykietami. Zaznaczono przewidywane miejsca pęknięć odrywających poszczególne brykiety od siebie. Naprężenia wzdłużne wynoszące 80 – 100 MPa są wystarczające do oddzielenia brykietów.

Maksymalne wartości naprężeń poprzecznych, wynoszące ok. 40 MPa, są znacznie mniejsze niż wartości naprężeń wzdłużnych. Wynika stąd, że wartości naprężeń w brykietach są anizotropowe, co umożliwiłoby poprzeczny rozdział brykie-



Rys. 21. Reszkowe naprężenia w brykietach opuszczających wgłębienia formujące: a – wzdłużne, b – poprzeczne [Zavaliangos i in. 2003]

tów. Symulacja pokazuje możliwość lokalnych pęknięć ze względu na istniejące nierównomierności rozkładu resztkowych naprężeń wewnętrznych. Należy zaznaczyć, że naprężenia resztkowe ulegają samoczynnie likwidacji w wyniku sezonowania brykietów.

4.4.3. Symulacja rozkładu stopnia zagęszczenia materiału w matrycy zamkniętej

Stopień zagęszczenia jest jednym z ważniejszych czynników prawidłowego brykietowania materiałów sypkich [Sinka i in. 2003]. W przeprowadzonej symulacji analizowano zależność rozkładu stopnia zagęszczenia od oporów tarcia materiału na powierzchniach wewnętrznych matrycy i narzędzi formujących. Symulację formowania w matrycy zamkniętej metodą elementów skończonych poprzedzono dobraniem właściwego modelu matematycznego, umożliwiającego odwzorowanie rzeczywistego ośrodka ziarnistego.

Do opracowania modeli scalania materiałów sypkich wykorzystuje się 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].

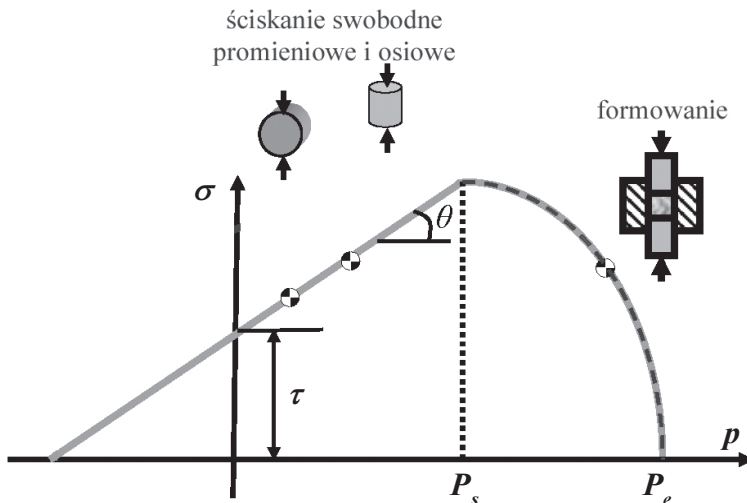
Dla opisu scalania materiałów ziarnistych stosowany jest też model Gursona [Galen, Zavaliangos 2005]. Założeniem w tym modelu jest istnienie w materiale porowatości, wyrażonej udziałem objętościowym porów, oraz inicjacja nowych porów w trakcie procesu odkształcenia. Model ten często jest stosowany do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

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 odwrotną zależność. W obu przypadkach naprężenia były funkcją stopnia zagęszczenia, przy czym w materiale podatnym na brykietowanie anizotropowość zwiększała się ze wzrostem zagęszczenia, w materiałach niepodatnych zaś zwiększała się z kolei ich izotropowość. Zatem w procesie scalania rozkład naprężeń wewnętrznych szczególnie zależy od rodzaju i właściwości materiału, a nie tylko od kształtu i ułożenia ziaren.

W opracowanej metodzie modelowania z wykorzystaniem struktur wieloelementowych (Multi-Particle Finite Element Method) brane są pod uwagę tylko istotne właściwości materiałów sypkich, np. tarcie wewnętrzne między ziarnami [Zavaliangos 2003]. Metoda polega na utworzeniu 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.

Obecnie często jest stosowany model Druckera-Pragera 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. 22). Model ten wykorzystano do symulacji scalania w matrycy zamkniętej tlenków wolframu oraz innych materiałów drobnoziarnistych z obróbki metali [Zavaliangos 2003].



Rys. 22. Obszar zastosowań modelu matematycznego Druckera-Pragera Cap: p – nacisk jednostkowy stempla, σ – naprężenia normalne, τ – naprężenia styczne, P_s – granica sprężystości, P_e – granica plastyczności, θ – 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 eliptyczna w drugiej fazie dla warunków ściskania w matrycy zamkniętej. Druga część przedstawionego wykresu reprezentuje zatem przebieg odkształceń plastycznych materiałów syplik skalanych w prasach do brykietowania z zastosowaniem matrycy zamkniętej. Matematyczny opis modelu DPC przedstawia następująca zależność:

$$F_c = \sqrt{(p - P_a)^2 + (Rq)^2} - R(d + P_a \tan(\theta)) = 0 \quad (3.6)$$

gdzie: r – współczynnik rozbieżności ($0,0 < r < 1,0$), pozostałe oznaczenia jak na rys. 22.

Do symulacji metodą elementów skończonych wykorzystano program ABAQUS ver. 6.6. W programie zaimplementowano powszechnie stosowane modele matematyczne wykorzystywane w różnych procesach inżynierskich, w tym model Druckera-Pragera Cap.

Parametry modelu DPC dobrano opierając się na wynikach badań doświadczalnych scalania w walcowej matrycy zamkniętej próbek materiałów, którymi były odpady z obróbki szlifierskiej stali [Borowski, Kuczmaszewski 2005b]. Wykorzystano prasę stemplową wraz z matrycą formującą umożliwiającą uzyskanie walcowych brykietów o średnicy 30 mm. Ujednorodniony materiał poddawano do komory matrycy i ścisłano 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 inne właściwości materiałowe niezbędne do skalibrowania modelu (tab. 3).

Obliczono ponadto stopień zagęszczenia w zależności od warunków tarcia zewnętrznej – bez smarowania oraz ze smarowaniem powierzchni wewnętrznych narzędzi formujących (tab. 4). Wykorzystano też wyniki badań podane przez

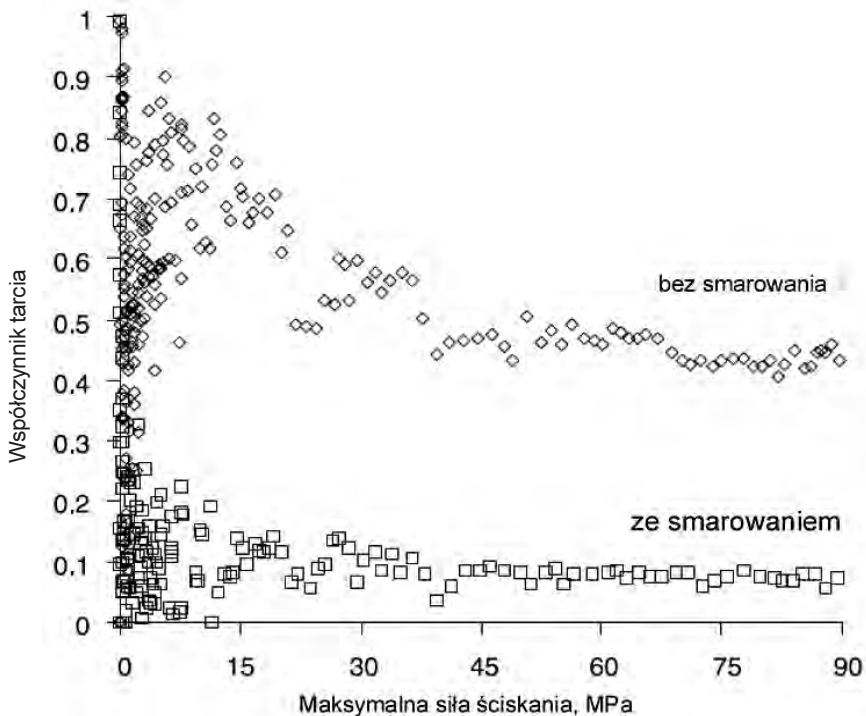
Tabela 3. Określenie współczynników modelu Drucker-Prager Cap

Stopień zagęszczenia	Moduł Younga E [Pa]	Współczynnik Poissona ν [-]	Napężenia styczne τ [Pa]	Kąt tarcia θ [°]	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

Tabela 4. Pomiary doświadczalne dla wybranej partii próbek

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

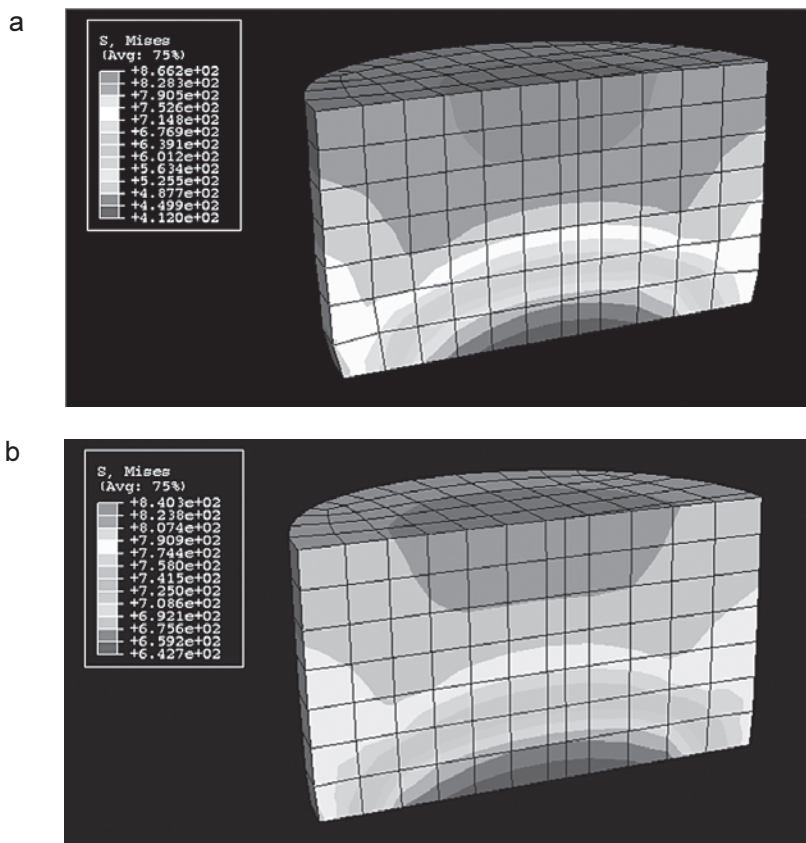
innych autorów [Cunningham i in. 2004], dotyczące wpływu oporów tarcia na maksymalną siłę ściskania w prasie stemplowej, przedstawione na rysunku 23. Stwierdzono, że wartość nacisków jednostkowych prasy istotnie zależy od warunków tarcia w procesie brykietowania.



Rys. 23. Wpływ oporów tarcia na maksymalną siłę ściskania w prasie stemplowej [Cunningham i in. 2004]

Do przeprowadzenia symulacji komputerowej wybrano siatkę typu C3D8R zastosowaną dla połówki 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 mm/s, zaś dolny był nieruchomy. Gęstość właściwa materiału wynosiła 1000 kg/m³.

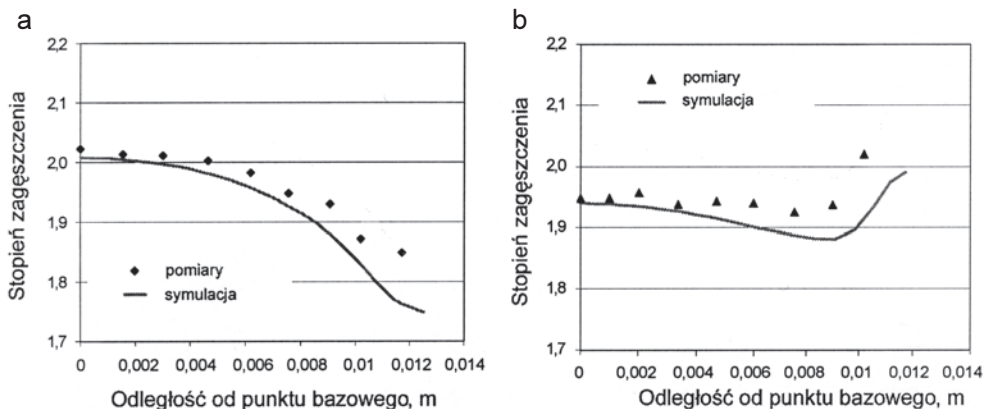
Wyniki symulacji rozkładu stopnia zagęszczenia w zależności od warunków tarcia na powierzchniach narzędzi formujących przedstawiono na rysunku 24. Stwierdzono, że brykiety formowane przy niższych oporach tarcia charakteryzuje bardziej jednorodna struktura wewnętrzna. Zagęszczenie struktury wewnętrznej brykietów przebiega warstwowo – większe jest przy powierzchni stempla górnego i w środku przekroju, mniejsze natomiast na brzegach i przy powierzchni stempla dolnego. Stwierdzono, że zmniejszenie oporów tarcia w naczyniu formującym umożliwia zastosowanie mniejszych nacisków prasy podczas wytwarzania brykietów o określo-



Rys. 24. Symulacja stopnia zagęszczenia brykietu: a – w naczyniu formującym bez smarowania, b – w naczyniu formującym z zastosowaniem smarowania

nym stopniu zagęszczenia. Znaczne przemieszczanie się warstw materiału drobnopowierzchniowego podczas brykietowania obserwowano zarówno dla małych, jak i dużych wartości tarcia zewnętrznego.

Uzyskane wyniki symulacji poddano weryfikacji doświadczalnej. W tym celu wykonano pomiary mikrotwardości powierzchni przekroju poprzecznego brykietu. Stwierdzono dużą zgodność wyników symulacji z uzyskanymi pomiarami. Na rysunku 25 porównano uzyskane rezultaty, potwierdzając tym samym dobre dopasowanie zastosowanego modelu matematycznego.



Rys. 25. Rozkład stopnia zagęszczenia w przekroju poprzecznym brykietu: a – bez smarowania ścianek naczynia formującego, b – z zastosowaniem smarowania ścianek naczynia formującego

Opierając się na przedstawionych wynikach badań symulacyjnych sformułowano następujące wnioski:

- opracowanie realistycznych modeli symulacji materiałów drobnopowierzchniowych wymaga kalibrowania parametrów modelu na podstawie danych eksperymentalnych,
- na rozkład stopnia zagęszczenia materiału w brykietach znaczny wpływ mają warunki tarcia zewnętrznego,
- zmniejszenie tarcia w naczyniu formującym pozwala zastosować niższe naciski prasy do wytworzenia brykietów o określonym stopniu zagęszczenia.

Przedstawiona symulacja umożliwiła zatem określenie korzystnych wartości nacisku jednostkowego prasy, przy których uzyskano brykiety o wysokiej wytrzymałości mechanicznej. W dalszych badaniach symulacyjnych procesu scalania materiałów drobnopowierzchniowych należy uwzględnić zarówno anizotropowość naprężeń wewnętrznych w brykietach, jak i wpływ innych zjawisk fizycznych, np. utwardzenia materiału, powstawania mikroporów oraz aglomeracji cząstek.

5. PROBLEMATYKA WYTWARZANIA BRYKIETÓW

5.1. Metody scalania materiałów drobnoziarnistych

5.1.1. Problematyka scalania

W najszerszym ujęciu proces łączenia drobnych cząstek materiału w większe skupiska określa się mianem **aglomeracja**, a wyroby zwane są aglomeratami. W określeniu tym mieszczą się m.in. takie procesy jak agregacja czy koagulacja, które dotyczą układów koloidalnych tzw. fazowych, a więc układów dyspersyjnych o bardzo dużym stopniu rozdrobnienia. Rozmiar cząstek koloidalnych przyjmuje się umownie w granicach od 1 nm do 500 nm. Aglomeracja zwykle jest utożsamiana jako zjawisko mogące wystąpić niezależnie lub nawet wbrew naszym zamiarom (zbrylanie).

Proces umyślnie realizowany w celu otrzymania aglomeratów często nazywany jest **granulacją**. W zasadzie pojęcie granulacja w technice jest rozumiane bardzo szeroko, jako wytwarzanie cząstek ciała stałego o odpowiednich wymiarach, czy nawet kształcie [Heim 2005]. Mieści się więc w tym określeniu również proces przeciwny do aglomeracji, a więc rozdrabnianie.

W przekonaniu Autora niniejszego opracowania proces łączenia drobnych cząstek materiału w sposób zamierzony i trwały, a więc niedopuszczający rozkruszenie aglomeratów nawet w dłuższym czasie ich składowania, powinien być określony jako **scalanie**. Najczęściej stosowane metody scalania materiałów drobnoziarnistych to:

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

5.1.2. Zestalanie

Jednym ze sposobów scalania materiału drobnoziarnistego jest zestalanie go spoiwami mineralnymi, a przede wszystkim cementem. Zestalanie jest pod względem technologicznym najprostszą metodą scalania i wymaga najmniejszego nakładu energii [Rosik-Dulewska 2008]. Sposób ten nie wymaga dużych nakładów inwestycyjnych i może być prowadzony np. w zakładzie produkującym betonowe elementy budowlane. W celu polepszenia związania cementu lub uzyskania lepszych właściwości betonów można stosować różnego typu dodatki i domieszki.

Proces zestalania można podzielić na następujące etapy:

- sporządzenie zaprawy,
- wymieszanie gotowej zaprawy z materiałem,
- wylanie zaprawy do form i wytrząsanie,
- sezonowanie wyrobów.

Proces zestalania można zastosować w miejscu powstawania oraz składowania drobnoziarnistych substancji odpadowych. Zaletą zestalania odpadu jest możliwość bezpiecznego i efektywnego transportu. Otrzymany w wyniku zestalania produkt charakteryzuje duża odporność mechaniczna oraz mała wrażliwość na czynniki atmosferyczne.

Zestalony odpad może być też stosowany jako kruszywo do niwelacji terenu w drogownictwie. Wykorzystanie odpadu w podbudowie dróg wymaga jednak przeprowadzenia wielu szczegółowych badań oddziaływania na środowisko. Technologia utylizacji odpadów przez zestalanie uniemożliwia ponowne wykorzystanie cennych surowców i substancji pierwotnych.

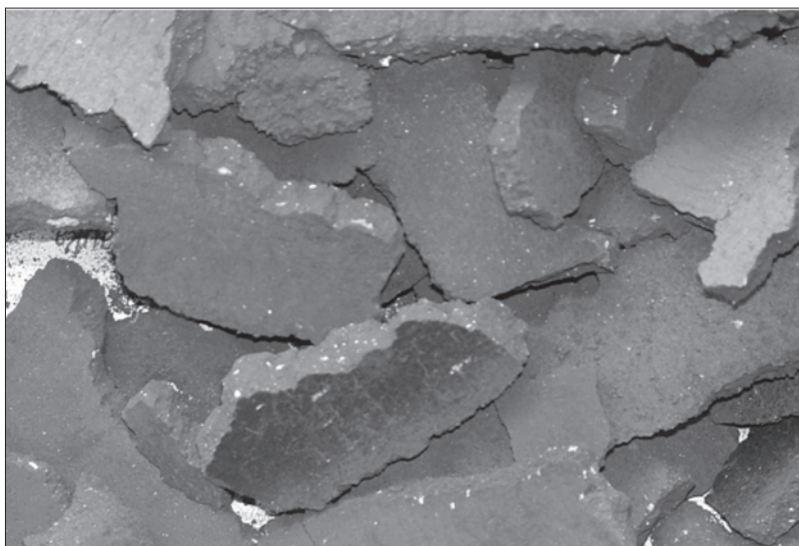
5.1.3. Kompaktowanie

Kompaktowanie stosuje się głównie w celu warstwowego zagęszczenia materiałów drobnoziarnistych. W zależności od rodzaju surowca możliwe jest prowadzenie procesu kompaktowania bez lepiszcza lub z użyciem lepiszcza. Proces kompaktowania jest procesem nieskomplikowanym technologicznie, a skompaktowane materiały uzyskują nowe, korzystne właściwości fizykochemiczne. Metoda ta pozwala na podniesienie wartości użytecznej materiałów drobnoziarnistych, głównie odpadów, przez zwiększenie gęstości nasypowej, zmniejszenie skłonności do segregacji i ograniczenia pylenia [Hryniewicz 2002].

Kompaktowanie odpadów drobnoziarnistych można przeprowadzić w miejscu ich składowania, co przynosi korzyści związane ze zmniejszeniem objętości tych odpadów. Jednym ze sposobów kompaktowania jest zastosowanie prasy walcowej o gładkiej powierzchni roboczej. Koszt wykonania walców o gładkiej powierzchni jest znacznie niższy w porównaniu z kosztem wykonania powszechnie używanych walców posiadających wgłębienia formujące.

Kompaktowanie odpowiednio przygotowanych materiałów na prasach walcowych umożliwia uzyskanie płaskich wyprasek (rys. 26), które posiadają jednak małą wytrzymałość mechaniczną. Zwiększenie nacisku jednostkowego w procesie kompaktowania poprzez wymuszone zasilanie ślimakowe powoduje wzrost gęstości i wytrzymałości mechanicznej wyprasek.

Metodę tę można stosować do utylizacji drobnoziarnistych odpadów żelazonośnych, stanowiących komponent wsadu pieców stalowniczych.



Rys. 26. Wypraski uzyskane w wyniku kompaktowania odpadów drobnoziarnistych (fot. M. Hryniewicz)

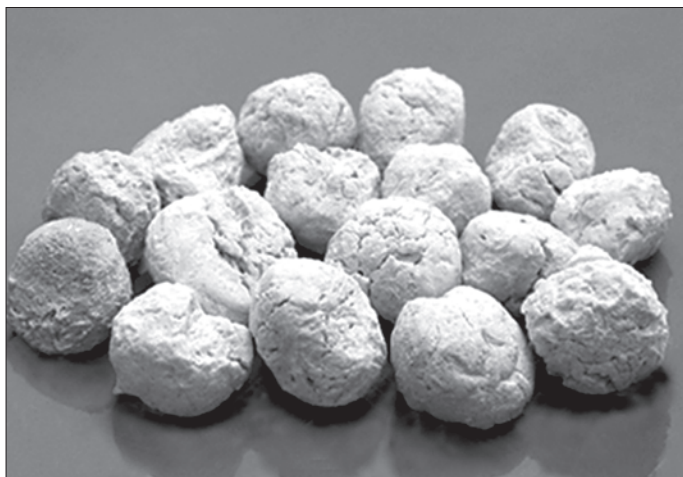
5.1.4. Granulowanie

Granulowanie jest metodą zagęszczania materiału w celu uzyskania produktu o zwiększonej wytrzymałości mechanicznej w stosunku do surowca. Proces prowadzi się bezlepiszczowo lub z udziałem spoiw, co poprawia właściwości wytrzymałościowe produktu.

Spoivo do granulacji powinny charakteryzować:

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

W wyniku granulacji otrzymuje się zwykle regularne granulki, o takich samych lub zbliżonych kształtach i wymiarach o wielkości w przedziale od 2 do 12 mm (rys. 27). Mają one znaczne większą gęstość nasypową niż materiał wyjściowy, nie pylą się i nie zbrylają. Nie występuje też segregacja składników, co zapewnia jednorodny skład poszczególnych wyrobów [Hejft, Obidziński 2006].



Rys. 27. Kształt granulek (fot. G. Borowski)

Granulacja może być realizowana w wyniku zastosowania zwiększonego ciśnienia (granulacja ciśnieniowa), w odpowiednio podwyższonej temperaturze (spiekanie) lub też bezciśnieniowo, w przesypującej się lub mieszanej warstwie materiału.

Najczęściej stosowana jest granulacja przesypowa. Pojedyncze ziarna tworzą trwały aglomerat tylko wtedy, gdy występują odpowiednio duże siły łączące te ziarna. Wymaga to dużego stopnia rozdrobnienia ośrodka sypkiego oraz utrzymania jego wilgotności na stałym poziomie. Granulki posiadają porowatą strukturę i stosunkowo niewielką średnicę. Często niezbędne jest także ich suszenie lub prażenie.

Proces granulowania mas drobnoziarnistych przy właściwym przygotowaniu materiału i doborze właściwych konstrukcji urządzeń zachodzi łatwo i nie wymaga dużych nakładów energii. Granulacja na talerzu granulacyjnym zapewnia wysoką jednorodność granulatu oraz uzyskiwanie stosunkowo dużych granulek (rys. 28).

Granulacja jest procesem ciągłym i jednorodność średnicy granulek zależy od nastawienia urządzenia: szybkości obrotów, nachylenia talerza, wydajności natrysku wodnego, a także od jednorodności i szybkości dozowania materiału. Granulki produkowane na talerzu granulacyjnym odznacza większa gęstość i wytrzymałość bezpośrednio po wytworzeniu. Proces granulacji – zarówno w granulacjach talerzowych, jak i bębnowych – wymaga jednostajnego zasilania granulatora w mieszanek surowcową i charakteryzuje go niewielkie zużycie energii. Typowa wilgotność granulatu wynosi od 11 do 20%, w zależności od rodzaju materiału, i jest większa w materiałach o porowatych ziarnach, np. popiołach lotnych. Granulki mogą mieć maksymalną średnicę ok. 20 mm, ale na-



Rys. 28. Granulowanie na talerzu granulacyjnym (fot. G. Borowski)

leży pamiętać, że wydajność urządzenia gwałtownie się zmniejsza wraz ze wzrostem ich rozmiaru.

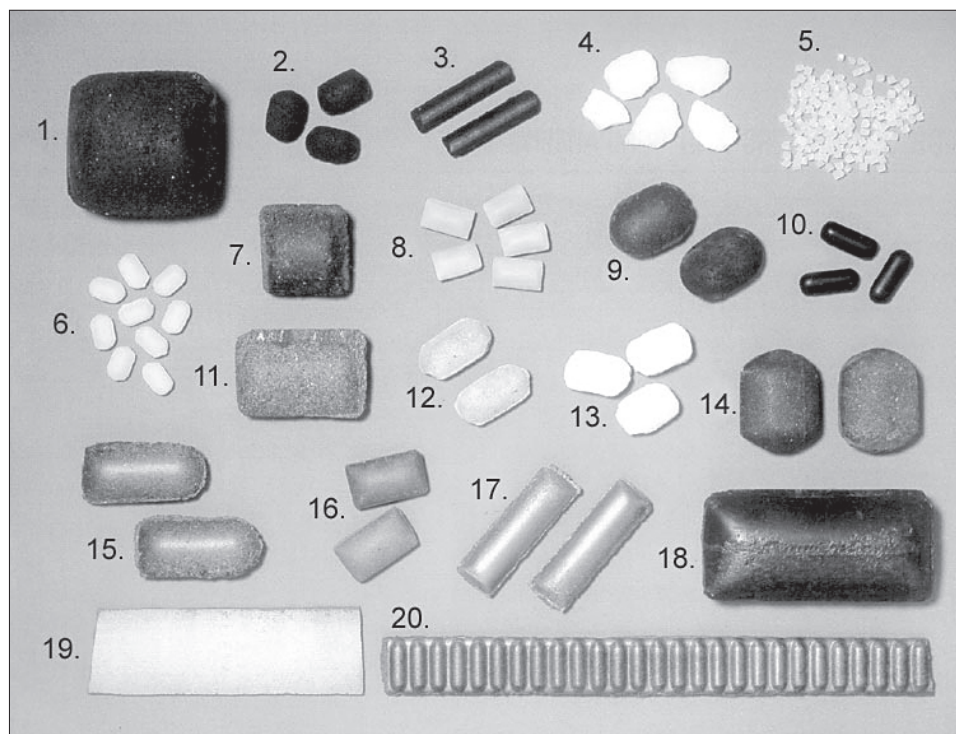
Granulowanie jest tańszą i wydajniejszą metodą niż brykietowanie, jednak właściwości wytrzymałościowe produktu są mniejsze. Homogeniczność masy poddawanej granulacji ma bardzo duży wpływ na sam przebieg formowania się granulek i na ich wytrzymałość mechaniczną. Jej wysoki stopień ujednorodnienia pozwala na znaczne ograniczenie ilości spoiw dodawanych do mieszaniny w celu zwiększenia wytrzymałości granulatu [Heim 2005].

5.1.5. Brykietowanie

Spośród wszystkich metod scalania, brykietowanie umożliwia największy stopień zagęszczenia materiału, co jednak wymaga dużego nakładu energetycznego na uzyskanie produktu o zadawalającej jakości. Brykietuje się zarówno surowce włókniste, jak i mineralne, przy czym mogą to być surowce w rozmaitych mieszankach. Jednym z podstawowych wymagań dotyczących surowca włóknistego przeznaczonego do brykietowania jest jego rozdrobnienie, aż do utraty cech sprężystych materiału. Brykietowanie materiału włóknistego prowadzi praktycznie do zaniku jego dotychczasowej struktury i co za tym idzie niektórych właściwości, np. termoizolacyjnych. Uzyskane brykiety można zastosować do recyklingu surowcowego.

Istotą brykietowania jest to, że w wyniku wywierania nacisku na materiał drobnoziarnisty następuje jego zagęszczanie, polegające m.in. na wzajemnym zbliżaniu ziaren. Dzięki temu mogą ulec wzmocnieniu lub powstać wiązania o różnym charakterze. W wyniku brykietowania otrzymuje się zagęszczony i jednocześnie

zbrylony materiał droбноziarnisty, o żądanym kształcie i wymiarach oraz określonej wytrzymałości mechanicznej. Na rysunku 29 pokazano różne warianty gabarytowe brykietów wytwarzanych z droбноziarnistych materiałów odpadowych.



Rys. 29. Porównanie kształtu i rozmiarów brykietów z odpadów: 1) chromitu (tlenki chromu), 2) rozdrobniony koks, 3) pyły węglowe, 4) chlorki sodu, 5) odpady polietylenu, 6) granulki chlorku sodu, 7) mieszanka rudy i koksu, 8) mieszanka fluorytu i wapna, 9) proszki hematytu ze spoiwem wapienno-melasowym, 10) miął węglowy, 11) rudy ołowiu ze spoiwem wapienno-melasowym, 12) rozdrobnione szkło, 13) tlenki magnezu, 14) rudy chromitu, 15) rudy żelaza ze spoiwem krzemianowo-wapiennym, 16) rudy niklu, 17) proszki mosiądzu, 18) proszki żelaza, 19) proszki niklu, 20) tlenki żelaza (fot. K.R. Komarek, Inc.)

Brykietowanie jest metodą dobrze znaną i często stosowaną do scalania materiałów droбноziarnistych w postaci szlamu oraz sypkich z różnymi dodatkami [Babanin, Eremin 2006; Hejft 2008; Robak, Matuszek 2008]. Produkowane obecnie brykiety zawierają miął węgla kamiennego, węgla brunatnego, koksu oraz biomasę w postaci trocin, torfu, słomy lub innych surowców. Stosowane dodatki materiałów wiążących wpływają na poprawę właściwości mechanicznych brykietów [Hryniewicz i in. 2006].

5.2. Przygotowanie materiałów do brykietowania

5.2.1. Rola i zakres przygotowania materiału

Przedstawione w literaturze wyniki wielu prac badawczych dotyczących brykietowania materiałów drobnoziarnistych wykazują, jak istotną rolę w tym procesie odgrywają czynniki związane z przygotowaniem materiału do brykietowania [Eremin i in. 2003; Mi J., Li X.-J. 2006; Oeters i in. 2000].

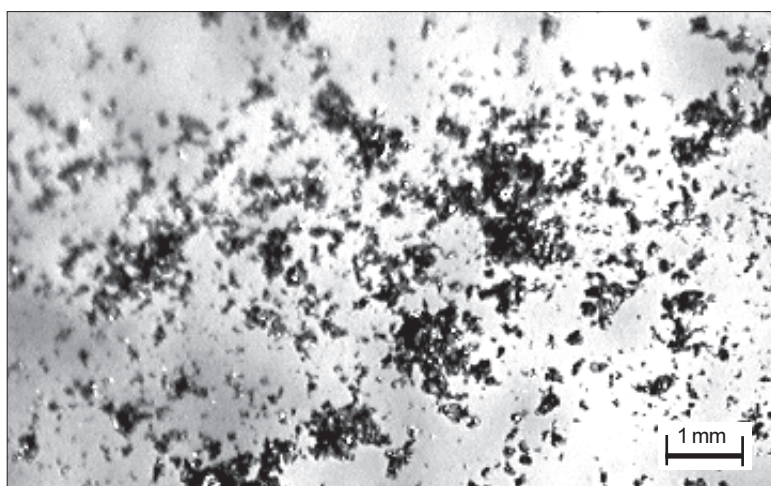
Przygotowanie materiału do brykietowania najczęściej wiąże się z modyfikowaniem postaci i składu mieszaniny, mającym na celu zwiększenie podatności na scalanie w prasach do brykietowania.

Podjęte działania powodują zmianę właściwości materiału i obejmują:

- dobór odpowiedniego składu ziarnowego,
- usunięcie niepożądanych domieszek i zanieczyszczeń,
- określenie najkorzystniejszego zakresu wilgotności mieszanki,
- dobór lepiszcza i jego zawartości,
- dobór parametrów pracy brykieciarki i oprzyrządowania.

5.2.2. Skład ziarnowy

Surowce do brykietowania występujące w postaci sypkiej lub jako zawiesiny składają się z ziaren o różnym kształcie i wymiarach, najczęściej od 0,05 mm do 2,0 mm (rys. 30). Zarówno materiały mineralne, jak i materiały włókniste, często wymagają ujednorodnienia składu ziarnowego przez rozdrabnianie oraz przesiewanie. Skład ziarnowy określany jest za pomocą analizy sitowej.



Rys. 30. Kształt i wymiary ziaren poszlifierskich (fot. G. Borowski)

Do rozdrabniania wykorzystuje się młynki elektryczne. Ze względu na istotne różnice w właściwościach fizycznych materiałów stosuje się różne typy młynków. Na przykład do rozdrabniania odpadowych mialów węglowych przydatne są młynki udarowe, za pomocą których uzyskuje się ziarna o wielkości poniżej 0,4 mm. Do rozdrabniania biomasy natomiast stosuje się młynki nożowe (tnące), pozwalające uzyskać frakcje o wielkości mniejszej niż 2 mm.

Rozdrobnione surowce posiadają dużą objętość oraz małą gęstość nasypową, zależnie od ich rodzaju. Gęstość nasypowa surowców roślinnych, np. trocin, wynosi przeciętnie 80 kg/m^3 , natomiast surowców mineralnych ok. 880 kg/m^3 .

5.2.3. Zanieczyszczenia

Surowce ziarniste zawierają oprócz materiału właściwego także różnego pochodzenia zanieczyszczenia, takie jak:

- materiały mineralne,
- spoiwa,
- ciecze technologiczne.

Materiały te bardzo różnią się między sobą właściwościami fizykochemicznymi. Warto także dodać, że mogą być szkodliwe dla środowiska, zwłaszcza ze względu na zawartość metali ciężkich i innych pierwiastków znajdujących się na urzędowej liście substancji niebezpiecznych.

Zanieczyszczenia mineralne ze względu na pochodzenie można podzielić na materiały pochodzenia naturalnego oraz tzw. materiały sztuczne. Do materiałów naturalnych zalicza się materiały ściernie, takie jak: krzemień, granat, szmergiel, korund i diament, pumeks, kredę oraz talk. Materiały sztuczne to przede wszystkim: elektrokorund zwykły, półszlachetny i szlachetny, elektrokorundy modyfikowane, węgiel krzemu zielony i czarny, węgiel boru, regularny azotek boru i diament syntetyczny.

Spoiwa można podzielić na dwie grupy:

- nieorganiczne, do których należą przede wszystkim spoiwa ceramiczne, magnezytowe, krzemianowe oraz metaliczne,
- organiczne, takie jak żywiczne, gumowe i klejowe.

Ciecze technologiczne mogą zawierać wodę oraz substancje rozpuszczalne w wodzie lub mogą zawierać oleje. Zawartość oleju zwykle zawiera się w przedziale 1 – 2%. Zanieczyszczenia olejowe można usunąć przez separację mechaniczną lub stosowanie preparatów chemicznych oraz biologicznych [Borowski 2005].

Technologia biologicznego usuwania olejów polega na zastosowaniu aktywnych mikroorganizmów, tzw. biopreparatów (bakterii i drożdży) rozkładających substancje ropopochodne. Wprowadzenie biopreparatu odbywa się przez wielokrotne

zraszanie powierzchniowe lub bezpośrednio do wewnątrz pryzmy składowej w ilości 1 dm³ na 1 m³ materiału. Biopreparaty powodują rozkład zarówno związków prostych, np. składników ropy naftowej, jak i silnie toksycznych związków aromatycznych oraz organicznych pochodnych węglowodorów.

5.2.4. Dosuszanie i mieszanie materiałów

Wilgotność. Korzystne cechy mieszanki przeznaczonej do brykietowania uzyskuje się przez doprowadzenie jej do określonej wilgotności. Właściwą wilgotność uzyskuje się dosuszając komponenty lub przeciwnie – dodając porcję wody.

Dosuszanie prowadzi do zmniejszenia nadmiaru wilgoci zawartej w materiałach. W pierwszym etapie można stosować dosuszanie w warunkach naturalnych na poletkach składowych, przy czym korzystne jest zadaszenie tych poletek i wyposażenie ich w przegarniacz rewersyjny. Podosuszanie takie wykonuje się w miejscu powstawania surowców drobnoziarnistych w postaci szlamów i zawiesin. Sposób ten nie wymaga dużych nakładów inwestycyjnych, lecz jego wydajność jest mała.

Efektywne suszenie przeprowadza się w specjalnie konstruowanych do tego celu suszarkach. Najczęściej stosowane są suszarki:

- komorowe,
- zbiornikowe,
- próżniowe,
- fluidalne,
- mikrofalowe,
- bębnowe.

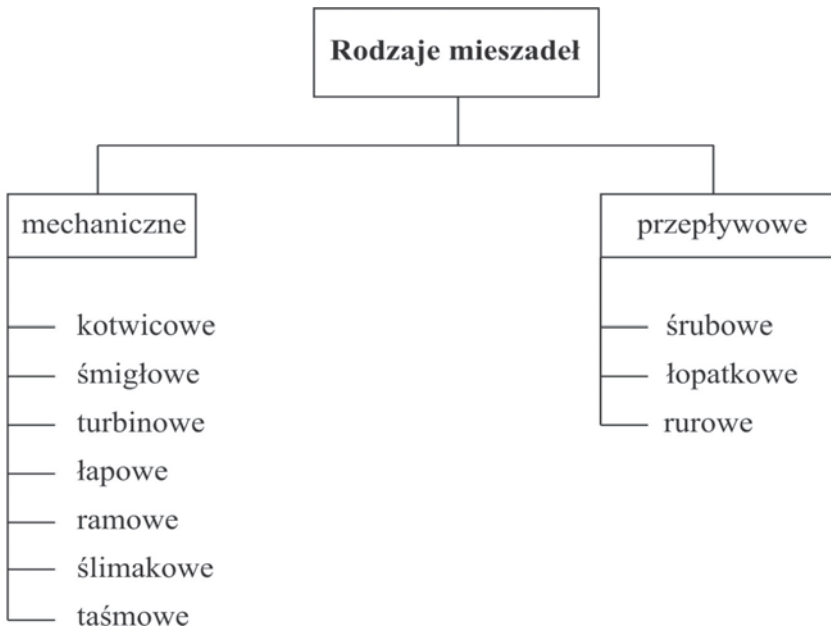
Suszarki komorowe mają prostą budowę, niską ceną i cechuje je prostota konstrukcji. Ich głównym mankamentem są trudności z mieszaniem podczas suszenia. Wady tej nie mają suszarki zbiornikowe, wyposażone najczęściej w mieszadła. Suszarki próżniowe stosowane są zwłaszcza tam, gdzie zależy nam na uzyskaniu bardzo małej wilgotności, także w tych procesach, gdzie suszony materiał może reagować z powietrzem. Suszarki fluidalne są stosowane do suszenia materiałów drobnoziarnistych i włóknistych.

W liniach technologicznych do wydajnego brykietowania znacznych ilości materiałów często są stosowane obrotowe suszarki bębnowe z mieszadłem ślimakowym (rys. 31). W suszarce tej materiał ładuje się podajnikiem do bębna suszarki, gdzie następuje właściwy proces suszenia termicznego. Podczas ruchu obrotowego znajdujący się w bębnie ślimak przesuwa materiał w kierunku wylotu. Utrata wilgotności następuje przez bezpośredni styk suszonego surowca z gorącymi elementami grzejnymi albo ze strumieniem powietrza. Dosuszony do wilgotności 10 – 12% materiał spada na dno komory skąd transportowany jest do zasobnika prasy brykietującej.

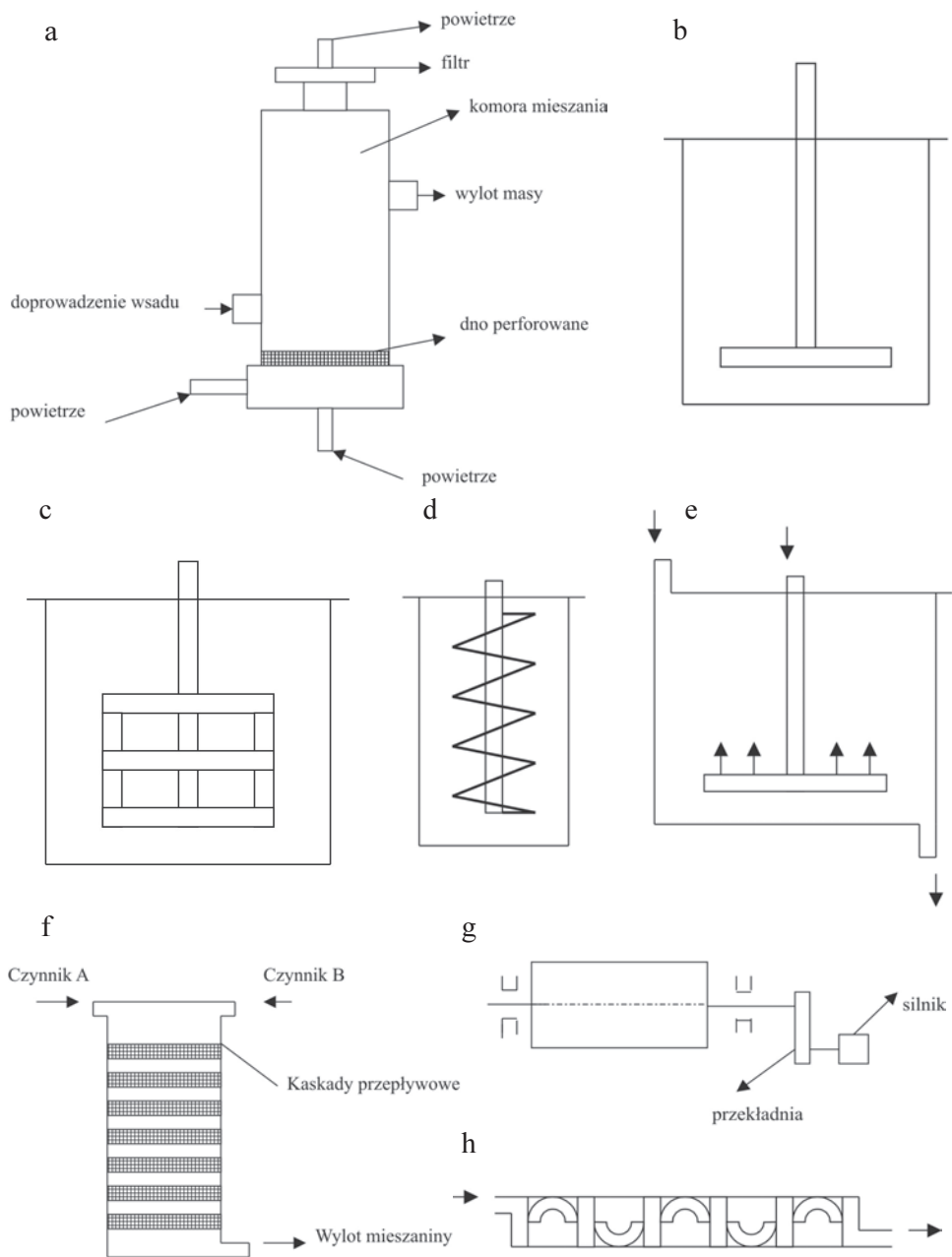


Rys. 31. Suszarka bębnowa (fot. Proeko)

Mieszanie materiałów. Ważnym elementem przygotowania drobnoziarnistych materiałów do brykietowania jest mieszanie. Efektywność mieszania zależy w dużej mierze od rodzaju stosowanego mieszadła. Rodzaj mieszadła dobiera się w zależności od lepkości komponentów. Klasyfikację mieszadeł przedstawiono na rysunku 32, zaś ważniejsze typy mieszarek na rysunku 33 [Borowski, Kuczmaszewski 2005b].



Rys. 32. Klasyfikacja mieszadeł



Rys. 33. Ważniejsze typy mieszarek: a – mieszarka fluidalna, b – mieszarka mechaniczna z mieszadłem łopowym, c – mieszarka mechaniczna z mieszadłem ramowym, d – mieszarka mechaniczna z mieszadłem ślimakowym, e – mieszarka komorowa powietrzna, f – mieszarka przepływowa, g – mieszarka bębnowa, h – mieszarka przepływowa z mieszadłem statycznym

Mieszarki bębnowe (rys. 33g) są proste i wygodne w stosowaniu. Ważne jest jednak, aby prędkość kątowna ω była mniejsza niż ω_{kr} , przy której proces mieszania nie następuje, a wsad obraca się wraz z bębniem rozrzucony siłą odśrodkową na ścianki bębna. Zwykle stopień napełnienia komory wynosi 0,7–0,8. Warto jednak zaznaczyć, że mieszarki bębnowe należą do najbardziej energochłonnych mieszarek.

Mieszanie ma na celu przygotowanie kompozycji w miarę jednorodnej, przy stosunkowo niewielkiej wilgotności, z komponentami, które są przydatne, a przynajmniej nieszkodliwe. Ze względu na specyfikę tego procesu najbardziej przydatne są w tym wypadku mieszarki mechaniczne, zwłaszcza ślimakowe.

5.2.5. Lepiszcza

Znaczną rolę w polepszeniu właściwości brykietów odgrywają środki wiążące, tzw. lepiszcza. Dotychczasowe wyniki badań wykazały skuteczność dodatków [Altun i in. 2001; Babanin i in 2007; Hryniewicz 2002]:

- **nieorganicznych** – bentonit, glina, gips, cement, wapno hydratyzowane, szkło wodne i żel krzemionkowy;
- **organicznych** – asfalty, paki, smoły, węgle spiekające, pochodne celulozy, dekstryny, skrobie, cukier, woski, parafiny, ług sodowy, ługi posulfitowe i żywice.

Zastosowanie niektórych lepiszczy stwarza problem wydzielania się szkodliwych dla środowiska dymów podczas spalania brykietów. Inne znane sposoby przewidują zastosowanie lepiszcza z dwu- i więcej składników, np. melasy ze skrobią w odpowiednich proporcjach [Kaczmarczyk, Król 2007; Kalembasa i in. 2007].

Zawartość lepiszcza stanowi najczęściej kilka procent składu masowego, zwykle w zakresie od 5 do 10%. Substancje stosowane w ilościach mniejszych niż 5% masy mieszanki określa się jako domieszki. Najczęściej są stosowane domieszki [Borowski 2010]:

- uplastyczniające,
- upłynniające,
- przyspieszające lub opóźniające proces wiązania,
- zmniejszające tarcie wewnętrzne,
- modyfikujące napięcie powierzchniowe,
- impregnujące,
- neutralizujące niektóre kwasy,
- poprawiające wodoodporność.

W tabeli 5 przedstawiono podstawowe rodzaje domieszek stosowane w mieszankach do formowania wyrobów wykorzystywanych w przemyśle budowlanym.

Tabela 5. Podstawowe rodzaje domieszek i efekty ich zastosowania

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

5.3. Parametry pracy brykietciarki

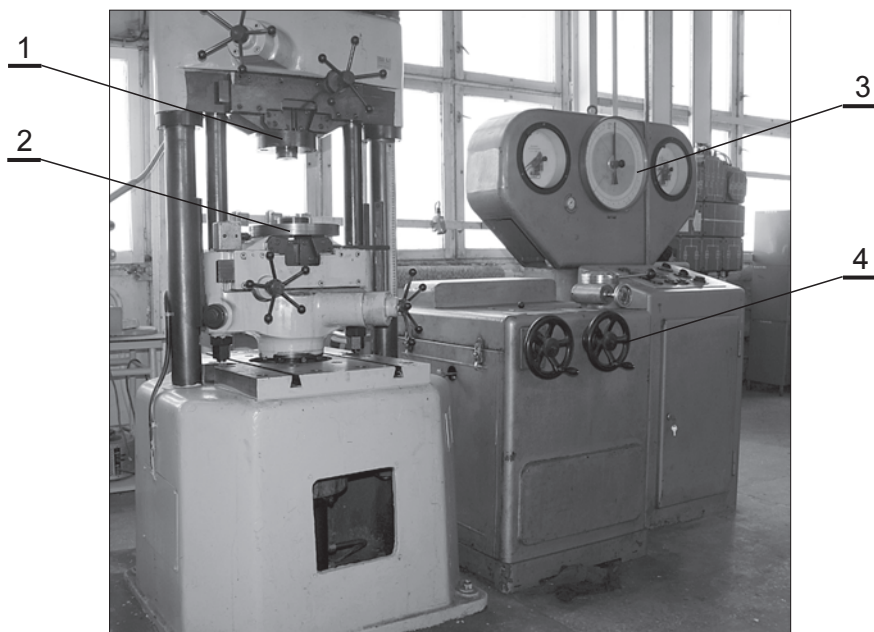
Do brykietowania ujednorodnionych mieszanek najczęściej używa się pras stemplowych oraz walcowych. Prasy stemplowe mogą być stosowane do wytwarzania próbnych partii brykietów w warunkach laboratoryjnych, a także w małoseryjnej przemysłowej produkcji wyrobów. Cechę charakterystyczną tych pras stanowi zastosowanie zamkniętych matryc formujących, umożliwiających uzyskanie, przy stosunkowo niewielkich naciskach, wyrobów osiowosymetrycznych o ostrych brzegach.

Przykładem brykietciarki stemplowej jest laboratoryjna prasa hydrauliczna PH-300. Maksymalna siła docisku stempla wynosi 300 kN, przemieszczenie stempla zaś 350 mm. Średnica trzpienia stempla z gniazdem mocującym wynosi 20 mm (rys. 34).

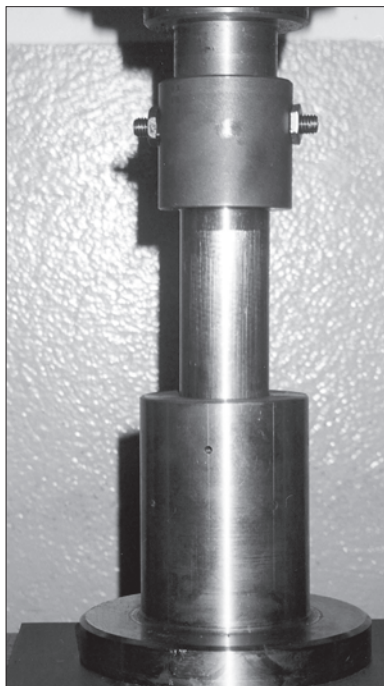
W Politechnice Lubelskiej opracowano i wykonano do prasy PH-300 specjalny zespół formujący do brykietowania materiałów drobnoziarnistych, składający się z matrycy i stempla (rys. 35). Matryca umożliwia uzyskanie brykietów o walcowym kształcie, istnieje jednak możliwość wymiany elementów formujących w celu uzyskania brykietów o różnych wymiarach i kształtach.

Siłę nacisku potrzebną do wytworzenia określonego brykietu określa się eksperymentalnie. Przy brykietowaniu odpadów szlifierskich scalając porcje materiału o masie 50 g wywierano taki nacisk, aby wysokość uzyskanego brykietu odpowiadała w przybliżeniu $\frac{2}{3}$ jego średnicy. Brykiety o średnicy 30 mm i wysokości 20 mm uzyskano przy sile nacisku stempla 30 kN.

W Akademii Górniczo-Hutniczej w Krakowie opracowano metodykę doboru parametrów pracy brykietciarki walcowej w zależności od rodzaju scalanych materiałów drobnoziarnistych [Hryniewicz 1997]. Przeprowadzono również szereg prób laboratoryjnych oraz w skali przemysłowej brykietowania surowców odpadowych. Poniżej scharakteryzowano trzy typowe urządzenia o różnej wydajności



Rys. 34. Laboratoryjna prasa hydrauliczna PH-300: 1 – głowica górna, 2 – głowica dolna, 3 – zespół pomiarowy, 4 – zespół sterujący (fot. G. Borowski)



Rys. 35. Zespół formujący w prasie PH-300 (fot. G. Borowski)

i przeznaczeniu: brykieciarki PW 1000, PW 500 oraz PW 360. Wybrane dane techniczne tych urządzeń przedstawiono w tabeli 6.

Brykieciarkę PW 1000 można zastosować do brykietowania węgla brunatnego. Głównym elementem tego urządzenia są dwa walce robocze o średnicy 1000 mm, umieszczone obok siebie w płaszczyźnie poziomej. Jeden wałek umieszczony jest na stałe, drugi zaś jest przesuwany, co umożliwia za pomocą siłownika hydraulicznego regulację szczeliny walcowniczej. Walce obracają się w przeciwnych kierunkach. Są zaopatrzone w pierścienie formujące nadające określony kształt brykietom. Układ napędowy zapewnia płynną regulację prędkości obwodowej walców do wartości maksymalnej, wynoszącej 6,5 obr/min. Maksymalna siła docisku walca przesuwanego wynosi 4500 kN. Szerokość walców wynosi 540 mm. Przygotowany do brykietowania materiał może być podawany do strefy zagęszczania prasy walcowej za pomocą zasilacza grawitacyjnego lub ślimakowego. Średnica zewnętrzna ślimaka zasilającego wynosi 190 mm, a jego prędkość obrotowa 70 – 130 obr/min. Brykieciarka PW 1000 jest przeznaczona do stosowania w dużych brykietowniach, produkujących co najmniej 1 mln Mg brykietów rocznie. Jej wydajność objętościowa wynosi 12,5 m³/h, a objętość jednego brykietu 85 cm³.

Brykieciarka PW 500 jest przeznaczona do mniejszych zakładów przetwórczych. Można ją zastosować do brykietowania drobnoziarnistych odpadów cynkowo-olowiowych, żelazonośnych lub wielkopiecowych. Charakteryzuje ją zwarta i prosta konstrukcja, typowe elementy układu napędowego, łatwość wykonania w zakładzie mechanicznym o przeciętnym wyposażeniu, prosta konstrukcja walców, łatwość wymiany zużytych pierścieni formujących oraz możliwość posadawienia bez skomplikowanego i kosztownego przygotowania podłoża. Brykieciarka może być z łatwością przemieszczana i instalowana w dowolnym miejscu.

Brykieciarka PW 360 jest przeznaczona dla małych zakładów produkcyjnych. Charakteryzuje ją mniejsza wydajność i objętość brykietu w porównaniu do wyżej wymienionych. Jest szczególnie zalecana do brykietowania produkcyjnych odpadów miedzionośnych lub poszlifierskich odpadów łożyskowych. Maksymalna siła docisku walca przesuwanego wynosi 390 kN, szerokość walców – 90 mm, wydajność objętościowa – 0,7 m³/h, a objętość jednego brykietu – 5 cm³. W prasie

Tabela 6. Podstawowe dane techniczne pras walcowych do brykietowania odpadów drobnoziarnistych [Hryniewicz 1997]

Symbol prasy walcowej	Średnica walców [mm]	Moc napędu [kW]	Masa [Mg]	Wydajność objętościowa [m ³ /h]	Wymiary gabarytowe [mm]
PW 1000	1000	200	90,5	12,5	8400 × 4200 × 3640
PW 500	500	55	10,4	3,0	4450 × 2650 × 2320
PW 360	360	30	4,2	0,7	3300 × 1650 × 1200

PW 360 walce robocze usytuowano, inaczej niż w opisanych wyżej brykieciarkach, na zewnątrz ramy. Ułatwia to w znacznym stopniu wymianę pierścieni formujących.

Jak wynika z przedstawionych rozważań zastosowanie odpowiedniej brykieciarki walcowej wymaga znajomości konfiguracji układu zagęszczania, jego geometrycznych cech konstrukcyjnych, wartości prędkości obwodowej walców, siły docisku walca przesuwnego oraz zapotrzebowania na moc.

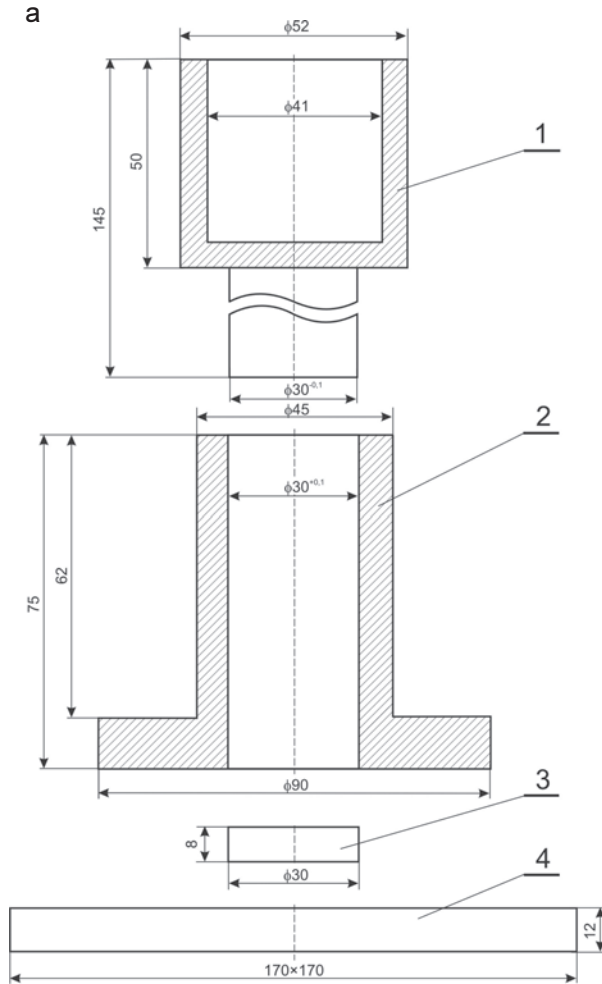
5.4. Kształt i wymiary matryc formujących

Matryce w prasach stemplowych umożliwiają uzyskanie brykietów o walcowym kształcie i kanciastych brzegach. Na rysunku 36a pokazano schemat konstrukcyjny zespołu formującego laboratoryjnej prasy stemplowej PH-300. Kształt i wymiary wyrobu pokazano natomiast na rysunku 36b. Sprasowany wyrób opuszcza matrycę w jej dolnej części, po usunięciu przeciwstempla i podstawy (4) oraz wypchnięciu za pomocą stempla (1). Stosowanie przeciwstempla (3) ma na celu uzyskanie bardziej równomiernego rozkładu naprężeń. W matrycy znajdują się otwory umożliwiające odprowadzenie nadmiaru pozostałej w materiale odpadowym wody.

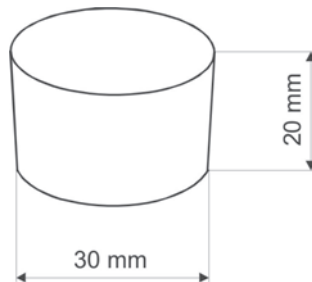
Matryce w prasach walcowych są produkowane jako pierścieniowe wgłębienia, umożliwiające uzyskanie brykietów o obłym kształcie. Zasadniczo stosuje się dwa rodzaje powierzchni roboczych pierścieni formujących. Pierwszy rodzaj powierzchni roboczej jest powszechnie używany i służy do wytwarzania brykietów z płaszczyzną podziału, jak pokazano w tabeli 7 [Borowski, Kuczmaszewski 2005b]. Drugi typ elementu formującego, pokazanego schematycznie w tabeli 7 w punkcie 2, umożliwia wytwarzanie brykietów bez płaszczyzny podziału, w kształcie „siodła”. Pokazano je na rysunku 37. Procedurę doboru elementów formujących prasy walcowej przedstawiono w załączniku 7.

Brykiety bez płaszczyzny podziału powstają w korzystniejszych warunkach, dzięki czemu mają większą wytrzymałość mechaniczną i łatwiej opuszczają gniazda formujące. Należy jednak zaznaczyć, że powierzchnia robocza pierścieni formujących brykiety bez płaszczyzny podziału zużywa się intensywniej, dlatego stosuje się je przede wszystkim do brykietowania materiałów niepodatnych na scalanie w prasie walcowej. Stosowanie wgłębienia w kształcie „siodła” sprzyja uzyskiwaniu wyższych wartości nacisków jednostkowych w porównaniu z innymi kształtami gniazd. Umożliwia także uproszczenie napędu prasy przez wyeliminowanie synchronizacji obrotów walców.

Wielkość brykietów, które zamierza się uzyskać, wpływa na dobór średnicy walców roboczych. Najczęściej na ich obwodzie umieszcza się w jednym rzędzie od 40 do 50 gniazd formujących. Zwiększenie liczby gniazd formujących przy

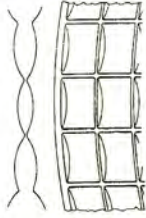
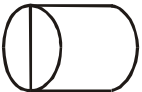
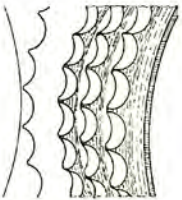



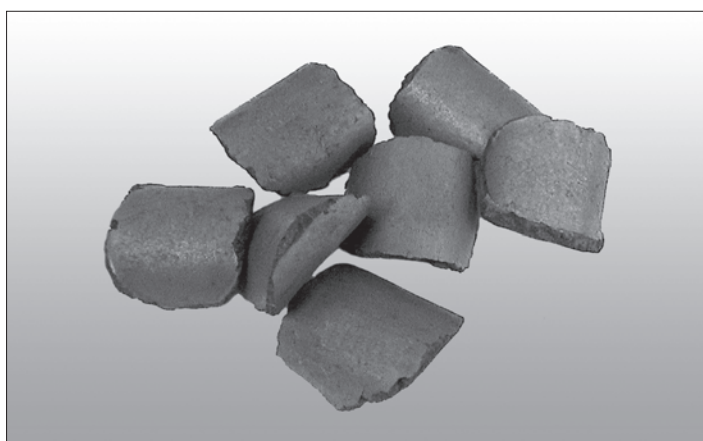
b



Rys. 36. Konstrukcja zespołu formującego laboratoryjnej prasy stemplowej PH-300: a – schemat zespołu formującego: 1 – stempel, 2 – matryca, 3 – przeciwstempel, 4 – podstawa; b – kształt i wymiary wyrobów

Tabela 7. Podstawowe rodzaje pierścieni formujących

Typ pierścieni	Kształt powierzchni formującej	Objętość brykiety [cm ³]	Kształt brykiety
1. Do wytwarzania brykietów z płaszczyzną podziału		13,0	
2. Do wytwarzania brykietów bez płaszczyzny podziału		8,5	



Rys. 37. Brykiety w kształcie „siodła” uzyskane z brykietarki walcowej (fot. G. Borowski)

zachowaniu średnicy walców prowadzi do zmniejszenia wydajności urządzenia. Szerokość czynna pierścieni formujących zależy od liczby rzędów wgłębień, którą dobiera się na podstawie wymaganej wydajności.

Na wydajność brykietowania wpływa także prędkość obrotowa walców. Zawiera się ona w granicach 0,1 – 1,0 m/s, przy czym najczęściej wynosi 0,3 m/s [Borowski, Kuczmaszewski 2005b].

6. BADANIA WŁAŚCIWOŚCI BRYKIETÓW

6.1. Określenie składu chemicznego

Badanie składu chemicznego brykietów poprzedza pobranie próbek oraz wysuszenie ich w celu całkowitego usunięcia wody. Następnie próbki uśrednia się za pomocą mieszaniny kwasów HCl, HNO₃ i HF oraz mineralizuje w piecu mikrofalowym. Po mineralizacji oznacza się zawartości pierwiastków za pomocą spektrometru.

Spektrometr jest urządzeniem służącym do określania składu chemicznego wszelkich materiałów. Wykonuje się analizę jakościową, pozwalającą określić jakie pierwiastki występują w próbce, oraz analizę ilościową, wskazującą w jakich ilościach pierwiastki te występują. Pomiar polega na wzbudzeniu świecenia pierwiastków występujących w próbce i analizie powstałego w ten sposób widma. Najczęściej stosuje się spektrometry:

- o wzbudzeniu iskrowym i łukowym,
- o wzbudzeniu plazmowym ICP (Inductively Coupled Plasma),
- o wzbudzeniu za pomocą fluorescencyjnego promieniowania rentgenowskiego.

Do analizy zawartości olejów, smarów, płynów hydraulicznych oraz paliw stosuje się następujące spektrometry:

- emisyjny z obrotową elektrodą RDE (Rotating Disk Emission),
- absorpcji atomowej AAS,
- z transformacją Fouriera w podczerwieni do analizy składników organicznych typu Spectro FT-IR Oil Analyzer.

Dodatkowo oznacza się zawartości takich pierwiastków, jak: węgiel, wodór i azot, stosując klasyczną analizę ilościową oraz analizę instrumentalną, np.:

- węgla i wodoru – metodą Sheffield,
- azotu – metodą Kjeldahla,
- za pomocą automatycznych analizatorów opartych na metodach chromatografii gazowej lub metodach fizykalnych.

Badanie chemicznych oraz fizycznych właściwości brykietów przeprowadza się bezpośrednio na terenie zakładu produkcyjnego bądź w wyspecjalizowanych laboratoriach. Do oznaczenia pojedynczej właściwości lub ustalenia liczby pojedynczych składników pobiera się próbkę analityczną. Próbki należy pobierać:

- z urządzeń transportowych – przenośników taśmowych, rynien, zsyków itp.,
- z samochodów, wagonów, barek i podobnych urządzeń transportowych,
- ze składowisk, pryzm, hałd itp.,
- z silosów i zasobników,
- z pojemników, kontenerów i worków.

6.2. Właściwości fizyczne brykietów

6.2.1. Zakres określanych właściwości

Zakres określanych właściwości fizycznych brykietów zależy od prognozowanego ich przeznaczenia (wykorzystania). Najczęściej określa się następujące cechy brykietów:

- masę i wymiary gabarytowe,
- stopień zagęszczenia,
- wilgotność,
- strukturę,
- wodoodporność, mrozoodporność i nasiąkliwość,
- wymywalność jonów z brykietów.

Sposób określania właściwości brykietów zależy od ich gabarytów oraz właściwości i cech fizycznych brykietowanych materiałów. Poniżej omówiono najważniejsze sposoby określania wymienionych cech. Przykładowe schematy instalacji doświadczalnych do badań procesu brykietowania oraz granulowania przedstawiono w załącznikach 8 i 9.

6.2.2. Masa i wymiary gabarytowe

Wymiary gabarytowe brykietów zależą od wielkości zastosowanych gniazd formujących, masa brykietów zaś zależy również od rodzaju brykietowanego materiału. Podczas brykietowania węgla na przykład, uzyskuje się brykiety o masie 0,2 – 0,4 kg i grubości ok. 50 mm, masa zaś brykietów z odpadów poszliflerskich wynosi ok. 15 g, a ich grubość ok. 20 mm.

Jeżeli uzyskano brykiety o różnych gabarytach, należy określić udział poszczególnych frakcji przez rozdzielenie za pomocą sit, a następnie ustalić procentowy udział mas poszczególnych frakcji.

Do analizy sitowej pobiera się próbki o masie określonej zależnie od grubości brykietów. I tak, najmniejsza masa próbki wynosi dla brykietów o grubości:

- do 8,0 mm – 1,6 kg,
- do 16,0 mm – 3,2 kg,
- do 31,5 mm – 6,3 kg,
- do 63,0 mm – 12,6 kg,
- ponad 63,0 mm – 20 kg.

Zależnie od masy próbki wykonuje się przesiew od razu w całej próbce lub kolejno w jej częściach, aż do przesiania całej próbki. Sita ustawia się jedno na drugim, kolejno od dołu sita o najmniejszych otworach, aż do sita o największych otworach na górze. Próbkę brykietów umieszcza się na górnym sicie, przykrywa

i wstrząsa kompletem sit ręcznie lub za pomocą wstrząsarki mechanicznej. Przesiewanie uważa się za zakończone, jeżeli po jednej minucie wstrząsania ubytek masy z każdego sita będzie mniejszy niż 0,1% masy próbki analitycznej.

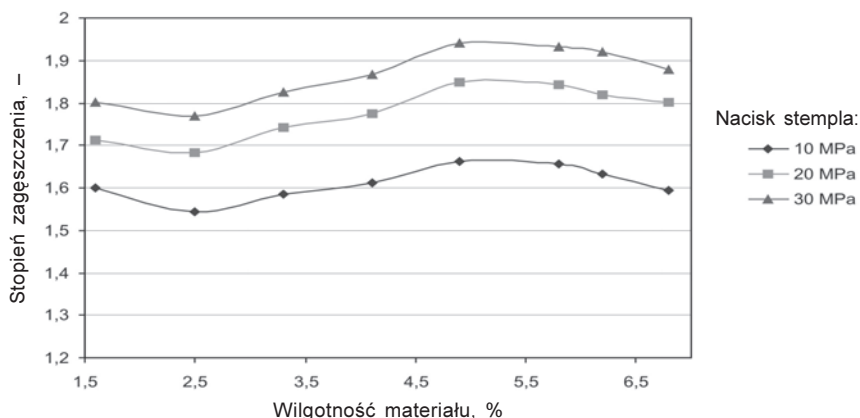
6.2.3. Stopień zagęszczenia

Wielkość stopnia zagęszczenia materiału drobnoziarnistego podczas brykietowania zależy od wielu czynników, w tym od: mikrotwardości materiału, wilgotności, nacisku jednostkowego prasy, tarcia zewnętrznego i wewnętrznego. Stopień zagęszczania oblicza się z zależności:

$$s = \frac{H_p}{H_p - l} \quad (5.1)$$

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

Z dotychczasowych badań procesu brykietowania (w prasach walcowych z zasilaniem grawitacyjnym) wynika, że stopień zagęszczenia brykietu ma duże znaczenie zarówno ze względu na jego właściwości, jak i dobór parametrów urządzenia formującego [Hryniewicz 2002]. Dobre jakościowo brykiety posiadają stopień zagęszczenia struktury ziarnistej w granicach od 1,6 do 2,0. Wartości stopnia zagęszczenia każdego wybranego materiału drobnoziarnistego należy zweryfikować doświadczalnie. Wyznaczenie zależności stopnia zagęszczenia od stosowanych nacisków jednostkowych prasy umożliwia określenie korzystnego zakresu wilgotności materiału do scalania [Borowski, Kuczmaszewski 2005b]. Przykład takiej zależności pokazano na rysunku 38.



Rys. 38. Zależność między stopniem zagęszczenia a wilgotnością przy stosowanych naciskach prasy w procesie brykietowania odpadów szlifierskich

6.2.4. Wilgotność

Wilgotność brykietów w momencie ich wytwarzania może dochodzić nawet do 12%, zwykle jednak mieści się w przedziale 4 – 6%. Podczas sezonowania (składowania) ich wilgotność spada do 1 – 2%. Próbki pobierane do oznaczenia wilgotności powinny być szczelnie opakowane.

Badania wilgotności w warunkach laboratoryjnych wykonuje się przy pomocy wilgotnościomierza, np. firmy KETT typu FD-620 (rys. 39). Urządzenie umożliwia pomiar z dokładnością $\pm 0,1\%$. Elementem grzejnym jest lampa o mocy 185 W pracująca w zakresie temperatur 50 – 195 °C, przy czym zadana temperatura suszenia wynosi zwykle 95 – 110 °C. Czas suszenia zależy od wilgotności początkowej, średnio wynosi ok. 20 min.



Rys. 39. Wilgotnościomierz laboratoryjny KETT FD-620 (fot. G. Borowski)

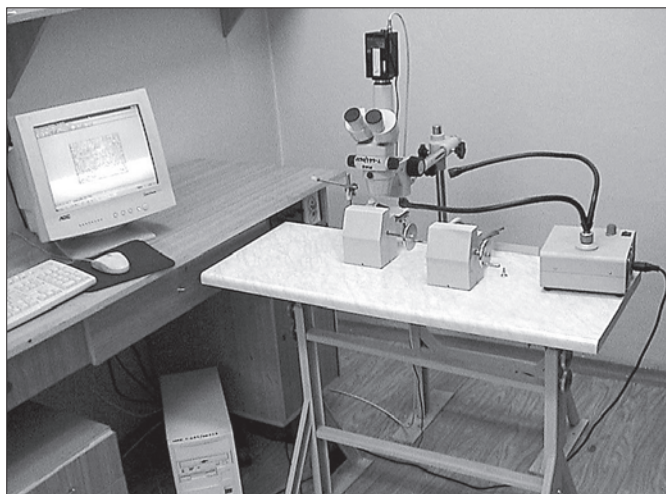
6.2.5. Struktura brykietu

Właściwości i cechy brykietu w dużym stopniu zależą od jego struktury wewnętrznej. Przeprowadzenie analizy struktury umożliwia stanowisko badawcze, którego głównym zadaniem jest komputerowa analiza obrazu rozpatrywanego przekroju lub powierzchni próbki (rys. 40). Zastosowanie tego stanowiska umożliwia uzyskanie informacji dotyczących kształtu i wymiarów składników struktury,

lokalizacji dodatków i wtrąceń oraz informacji o takich wadach strukturalnych, jak: pęcherze, pęknięcia i odpryski. Wyniki analiz obrazu obejmują takie dane, jak:

- wymiary liniowe elementów struktury,
- odległości od punktów charakterystycznych,
- pola powierzchni i obwody,
- liczby punktów charakterystycznych przypadających na jednostkę długości lub na badanym obszarze,
- łączna powierzchnia dodatków i wtrąceń na badanym obszarze.

Zbiory danych służą do opracowania statystycznego wyników badań, określenia równań charakterystyki, a także przedstawienia tych wyników w postaci graficznej i tabelarycznej. Na podstawie analiz statystycznych można sformułować wnioski dotyczące fizycznych aspektów stanu struktury oraz wpływu dodatków lub określonych procesów na zmianę właściwości brykietów.



Rys. 40. Stanowisko do analizy obrazu (fot. G. Borowski)

Stanowisko badawcze do analizy struktury materiałów, przedstawione na rysunku 40, składa się z następujących elementów [Borowski 2007c]:

- mikroskopu firmy Nikon, umożliwiającego powiększenie do 300 \times ,
- kamery firmy Panasonic,
- karty TV do przechwytywania obrazów cyfrowych przekazywanych przez kamerę,
- komputera PC z programem „MicroScan for Windows”, pozwalającym na pobieranie, przetwarzanie i analizę obrazu,
- oświetlacza światłowodowego,
- stolika pomiarowego.

Rozpatrywaną próbkę umieszcza się na stoliku pomiarowym oraz oświetla się odpowiednio za pomocą oświetlacza światłowodowego. Za pomocą mikroskopu dobiera się optymalne powiększenie fragmentu przekroju, tak aby uzyskać wyraźny obraz elementów struktury materiału. Przechwytywanie obrazu następuje w komputerze PC za pomocą karty TV poprzez kamerę cyfrową. Widoczny na monitorze komputera obraz mikroskopowy próbki można modyfikować za pomocą programu MicroScan, pracującego w środowisku Windows. 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 pozwala na wykonanie pomiarów wielkości geometrycznych i obliczeń wielkości średnich, a także pola powierzchni czy obwodu.

Przygotowanie materiału badawczego obejmuje usunięcie z próbki wszelkich zabrudzeń oraz dokładne dogładzenie powierzchni będącej przedmiotem obserwacji. Usunięcie zanieczyszczeń z powierzchni badanego elementu (odtłuszczenie) polega na przemyciu lub spryskaniu odpowiednim środkiem odtłuszczającym najczęściej acetonem lub benzyną ekstrakcyjną. Produkowane są również inne środki odtłuszczające, jak: Loctite, Omniclean, toluen, metyloetyloketon. Firmy produkujące wymienione środki najczęściej dostarczają je w opakowaniach ze spryskiwaczami, co ułatwia przeprowadzenie operacji odtłuszczenia.

Po odtłuszczeniu powierzchnię próbki należy osuszyć, a następnie przeprowadzić operację dogładzania za pomocą pilników oraz ściernych narzędzi nasypowych. W tym celu należy zastosować kilka rodzajów ściernych narzędzi nasypowych, o różnej ziarnistości, np. P120, P320, P500.

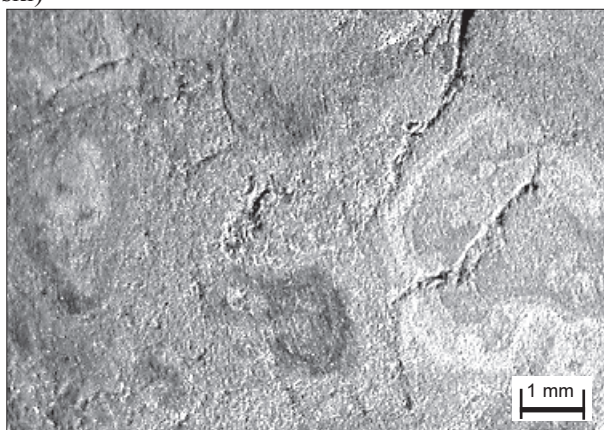
Przed umieszczeniem przygotowanej próbki na stoliku pomiarowym należy odpowiednio skalibrować mikroskop. W tym celu stosuje się specjalną płytkę wzorcową, znajdującą się w zestawie pomiarowym mikroskopu. Za pomocą płytki wzorcowej dobieramy powiększenie i odpowiadające mu jednostki pomiarowe na obrazie w monitorze komputera. Dzięki temu uzyskuje się komputerowy obraz w dokładnej skali, odpowiadającej wymiarom rzeczywistym próbki, co umożliwia późniejszy pomiar wielkości liniowych, powierzchni, obwodu itp.

Przykłady zastosowania stanowiska do badań struktury brykietów z materiałów droбноziarnistych pokazano na rysunkach 41–43. Porównano strukturę brykietów uzyskanych przez scalanie stalowych odpadów poszlifierskich z różnymi dodatkami wiążącymi. Badania miały na celu:

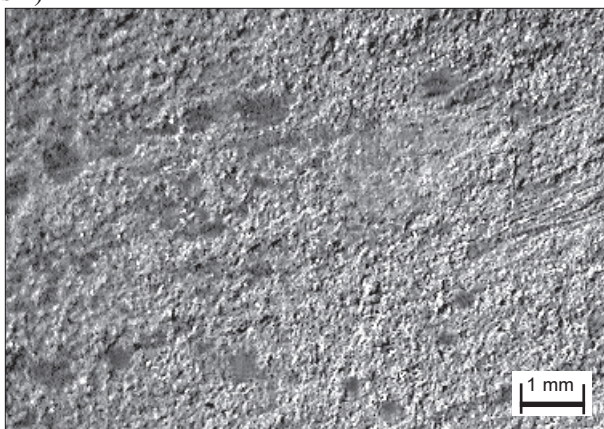
- porównanie ułożenia ziaren metali w brykietach po scaleniu w dwóch rodzajach pras – stemplowej i walcowej,
- porównanie rozmieszczenia lepiszcza w przekroju brykietu w zależności od jego rodzaju i udziału masowego,
- określenie liczby i rozmiarów pęcherzy oraz pęknięć wewnątrzstrukturalnych.



Rys. 41. Struktura brykietu wykonanego z materiału bez dodatków wiążących (fot. G. Borowski)



Rys. 42. Struktura brykietu wykonanego z dodatkiem 5% kwasu octowego (fot. G. Borowski)



Rys. 43. Struktura brykietu wykonanego z dodatkiem 8% melasy (fot. G. Borowski)

Struktura brykietów z lepiszczami, pokazana na rysunkach 42 i 43, wyraźnie różni się od brykietu bezlepiszczowego (rys. 41). Dobrze widoczne są ciemniejsze płaszczyzny – aglomeraty lepiszcza. Na rysunku 42 są widoczne nieregularne jaśniejsze płaszczyzny, stanowiące produkty reakcji utleniania żelaza. Zaobserwowano liczne pęcherze i pęknięcia, powodujące osłabienie struktury, co dyskwalifikuje brykiet do użytkowego wykorzystania. W brykietach z dodatkiem melasy (rys. 43) nie stwierdzono widocznych wad w postaci pęcherzy i pęknięć wewnętrznych, co uzasadnia stosowanie tego lepiszcza w praktyce przemysłowej. Stwierdzono ponadto duże znaczenie dokładnego mieszania składników przeznaczonych do brykietowania.

6.2.6. Wodoodporność i mrozoodporność

Brykiety powinny być odporne na wpływ czynników atmosferycznych ze względu na możliwość ich przechowywania i transportu w pojemnikach otwartych. W tym celu określa się najczęściej ich wodoodporność i mrozoodporność.

Badanie wodoodporności brykietów polega na całkowitym ich zanurzeniu w wodzie i obliczeniu procentowego ubytku masy w danym okresie nawadniania. Wodoodporność oblicza się ze wzoru:

$$W = \frac{M}{M_p} \cdot 100\% \quad (5.2)$$

gdzie: M_p – masa początkowa brykietów, M – masa brykietu w danym okresie nawadniania.

Brykiety wykazują dobrą wodoodporność, jeśli ich ubytek masy w czasie nawadniania nie przekracza 10%. Czas ten jest wskaźnikiem porównawczym – im jest dłuższy, tym większa odporność brykietów na oddziaływanie wody.

Mrozoodporność to odporność materiału na cykliczne zamrażanie i odmrażanie. Stopień mrozoodporności przyjmuje się na podstawie wskaźnika N , oznaczającego liczbę cykli zamrażania i rozmrażania. Jest on właściwy, jeśli po odpowiedniej liczbie cykli próbka nie wykazuje pęknięć, masa ubytków (zniszczone krawędzie, odpryski) nie przekracza 5%, a obniżenie wytrzymałości na ściskanie w stosunku do próbek niezamrażanych jest niewiększe niż 20%.

Rozróżnia się bezpośrednio oraz pośrednio metody określenia mrozoodporności. Aby ocenić mrozoodporność za pomocą metody bezpośredniej, należy cyklicznie zamrażać i odmrażać próbki oraz ocenić skutki destrukcyjnego działania mrozu za pomocą pomiarów odkształceń, częstotliwości rezonansowej, masy, wytrzymałości itp. Do najczęściej stosowanych metod bezpośrednich badania mrozoodporności należą:

- **metoda ASTM C 666** – stosuje się ją do określenia odporności poprzez wielokrotne zamrażanie i odmrażanie (300 cykli) w wodzie (procedura A) oraz w powietrzu (procedura B); jeden cykl trwa od 2 do 5 godzin, a po zakończeniu badania określa się współczynnik twardości; wadą tej metody jest długi czas trwania całego testu;
- **metoda CDF** – zapewnia szybkie i tanie określenie mrozoodporności; próbki są poddawane zamrażaniu i odmrażaniu w 28 cyklach; określa się ubytek masy próbki na skutek zmieniającej się temperatury od +20 do –20 stopni Celsjusza;
- **metoda Boraks** – polega na pomiarze ubytku masy w czasie 24-godzinnego cyklu zamrażania i odmrażania; wykonuje się 56 cykli w zakresie temperatur od + 20 do –20 stopni Celsjusza.

W metodach pośredniego badania mrozoodporności określa się zależność między mrozoodpornością brykietu, a parametrami charakteryzującymi składniki lub mieszankę składników. Do metod pośrednich należy metoda zwykła, określona przez normę PN-88/B-06250. Badanie polega na poddaniu cyklicznemu zamrażaniu w powietrzu i odmrażaniu w wodzie. Cykl trwa przeważnie 6 godzin, a liczba cykli jest uzależniona od stopnia mrozoodporności. Po tych czynnościach bada się wytrzymałość brykietu na ściskanie. Określenie stopnia mrozoodporności następuje na podstawie zależności pomiędzy wytrzymałością a ubytkiem masy.

6.2.7. Wymywalność jonów z brykietów

W razie stosowania brykietów z odpadów przemysłowych jako materiału do budowy dróg, głębokich fundamentów czy obudowy wysypisk komunalnych, istnieje możliwość wymywania się substancji niebezpiecznych do środowiska glebowego. Należy zatem zbadać wymywalność takich jonów, jak: SO_4^{-2} , Cl , K^+ , Na^+ i innych. W tym celu w przesączu wodnym określa się stężenie:

- jonów siarczanowych metodą wagową na podstawie normy PN-ISO 9280,
- jonów chlorkowych metodą miareczkową na podstawie normy PN-ISO 9297,
- jonów potasowych i sodowych metodą fotometrii promieniowej na podstawie normy PN-ISO 9964-3.

Dodatkowo wartość odczynu pH można określić metodą elektrometryczną na podstawie normy PN-91/C-04440.01. W niektórych wypadkach należy zbadać w przesączu stężenia zanieczyszczeń chemicznych: arsenu, chromu, kadmu, miedzi, ołowiu, niklu, cynku i rtęci, przez zastosowanie metody plazmowej spektrometrii emisyjnej. Wyniki pomiarów należy porównać z wartościami granicznymi ustalonymi dla danego środowiska, w którym umieszczono brykiety.

6.3. Właściwości mechaniczne brykietów

Właściwości mechaniczne brykietów decydują o ich odporności na uszkodzenie (rozkruszenie) podczas składowania, załadunku oraz transportu. Zadaniem technologa jest jednak nie tylko uzyskanie wysokiej odporności, ale także możliwość jej zachowania w dłuższym okresie, tzw. sezonowania wyrobu.

Właściwości mechaniczne brykietów określa się przez pomiar dwóch parametrów fizycznych:

- odporności na zrzut grawitacyjny
- oraz
- siły nacisku stempla niszczącej brykiet.

Odporność brykietu na zrzut grawitacyjny. Oceniana jest procentowym ubytkiem masy po co najmniej trzykrotnym zrzuconiu brykietów z wysokości 2,0 m na stalową płytę o grubości 0,2 m. Po każdym zrzucie należy przesiać próbki przez sito o rozmiarze oczek większym niż dopuszczalny minimalny wymiar brykietu. Odporność brykietu na zrzut oblicza się z następującego wzoru:

$$K = \frac{M_z}{M} \cdot 100\%, \quad (5.3)$$

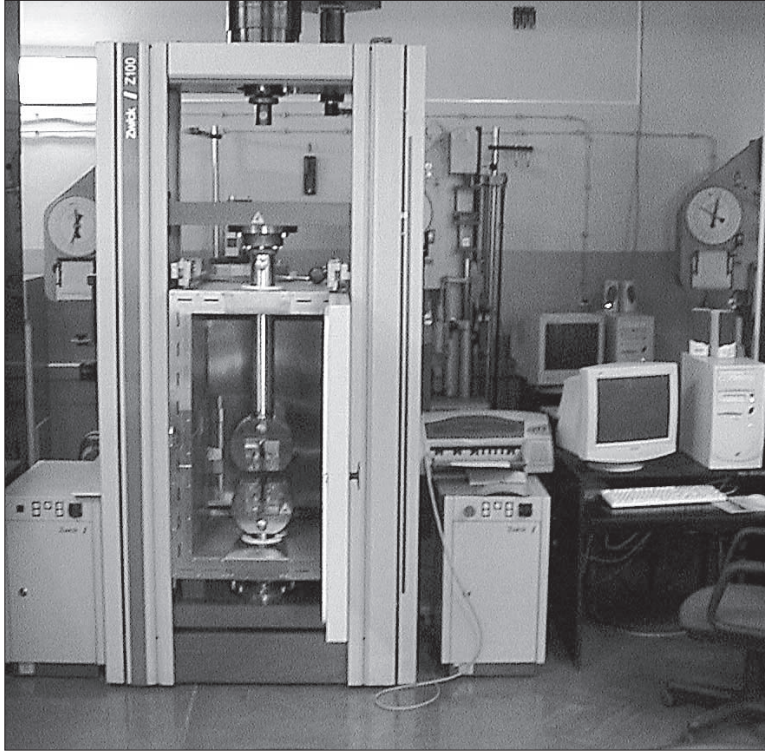
gdzie: M – masa brykietów przed zrzutem, M_z – masa pozostającego na sicie nadziarna.

Według danych literaturowych [Drzymała, Hryniewicz 1994; Hryniewicz i in. 2006] minimalna wymagana odporność brykietów na zrzut wynosi 90% (czyli 10-procentowego ubytku masy). Wymóg ten dotyczy wszystkich brykietów – niezależnie od kształtu i rozmiarów.

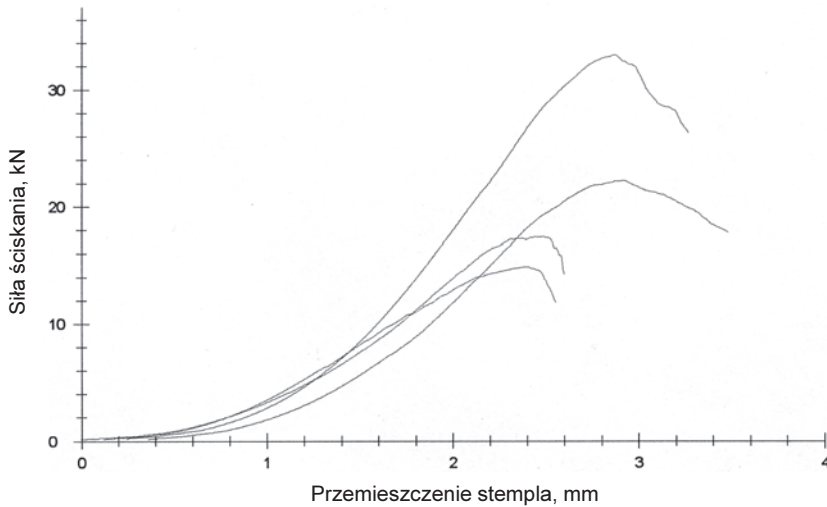
Siła nacisku stempla niszcząca brykiet. Wymagana wartość tej siły nacisku zależy od przewidywanego wykorzystania przemysłowego. Sposób jej pomiaru polega na ścisaniu brykietu umieszczonego między płaskimi powierzchniami urządzenia badawczego (maszyny wytrzymałościowej), aż do momentu zniszczenia jego struktury. Wartość siły nacisku niszczącej brykiet powinna wynosić co najmniej 700 N dla brykietów uzyskiwanych w prasie walcowej, przeznaczonych do utylizacji w elektrycznych piecach łukowych [Hryniewicz 2002].

Przykładem maszyny wytrzymałościowej do badań siły ścisania brykietów jest urządzenie ZWICK Z100 (rys. 44). Umożliwia ono ciągły pomiar nacisków i przemieszczeń stempla, rejestrując uzyskane dane w pamięci komputera. Maksymalny nacisk wynosi 100 kN. Istnieje ponadto możliwość zastosowania pieca oporowego do badań w podwyższonej temperaturze ($T_{\max} = 1200 \text{ }^\circ\text{C}$).

Dane na monitorze i wydruku są prezentowane w formie tabel oraz wykresu (rys. 45). Próbkę są ściskane przez przemieszczenie stempla górnego (zadając siłę wstępną 100 N) na powierzchni roboczej stempla dolnego, nieruchomego.



Rys. 44. Stanowisko badawcze z maszyną wytrzymałościową ZWICK Z100 (fot. G. Borowski)



Rys. 45. Przykład wyników badań ściskania brykietów w maszynie wytrzymałościowej ZWICK Z100 [Borowski 2008a]

Na podstawie zebranych danych przedstawione są podstawowe parametry statystyczne, takie jak: wartość średnia, wariancja, odchylenie standardowe i inne.

Przebieg krzywych, pokazanych na rysunku 45, wskazuje, że w początkowej fazie procesu ściskania niewielki przyrost nacisku powoduje znaczne przemieszczenie ruchomej szczęki głowicy, pomiędzy którymi znajduje się badana próbka. Spowodowane to jest znaczną porowatością brykietów. Występuje tutaj proces wzajemnego dociskania drobnoziarnistych składników brykietu. Następną fazę procesu ściskania charakteryzuje szybszy wzrost nacisku względem przemieszczenia głowicy maszyny, aż do wartości maksymalnej, przy której następuje zniszczenie próbki, po czym wartość siły nacisku zaczyna spadać.

6.4. Kryteria wykorzystania brykietów w przemyśle

Przydatność brykietów do określonego zastosowania wymaga dostosowania ich właściwości w aspekcie spełnienia wymogów konkretnego odbiorcy. Wymogi te są inne w odniesieniu do brykietów przeznaczonych do recyklingu surowcowego niż wymogi dotyczące wyrobów mających uzupełniać ofertę produktową.

Podstawowe wymogi technologiczne dotyczące brykietów są wspólne w odniesieniu do wielu zastosowań przemysłowych, a mianowicie:

- wymiary brykietu powinny się zawierać w przedziale od 8 do 200 mm,
- odporność na działanie czynników mechanicznych i atmosferycznych,
- zdolność zachowania dobrych właściwości mechanicznych przez dłuższy czas, z uwzględnieniem warunków magazynowania i transportu,
- brykiet nie może zawierać metali ciężkich i ich związków,
- zastosowane lepiszcza nie powinny zawierać substancji szkodliwych dla środowiska, wydzielających się podczas utylizacji,
- brykiet nie może zawierać zanieczyszczeń olejowych,
- wilgotność brykietu nie powinna przekraczać 2%.

Brykiety muszą ponadto spełniać takie kryteria, jak zawartość określonych substancji ze względu na specyfikę procesu utylizacji. Na przykład dodatek pyłów aluminiowych korzystnie wpływa na proces przetopu brykietów ze stalowych odpadów szlifierskich w hutniczych piecach elektrycznych. Powodują one upłynnienie fazy żuźlowej oraz zredukowanie zawartych w niej tlenków żelaza i w efekcie znaczne zmniejszenie intensywności pienienia żuźla [Borowski, Kuczmaszewski 2005b]. Dodatek pyłów węglowych z kolei, jest korzystny ze względu na przyspieszenia roztapiania złomu z brykietami w stalowniczych piecach łukowych. Węgiel utlenia się egzotermicznie z wydzielaniem gazowego dwutlenku węgla oraz jest reduktorem tlenków żelaza tworzących się przy intensywnym wdmuchiwanu tlenu do przestrzeni pieca.

Poniżej przedstawiono specyficzne wymogi dotyczące wykorzystania brykietów jako surowca w przemyśle budowlanym i energetycznym.

Budownictwo. Jednym z ciekawszych kierunków zastosowania brykietów wykonanych ze stałych produktów spalania jest budownictwo, zwłaszcza podbudowy drogowe. Podbudowy drogowe wykonuje się z kruszywa naturalnego, betonów lub mieszanek mineralnych.

Na podbudowy można wykorzystać również odpady przemysłowe, a w szczególności:

- żużle metalurgiczne z hutnictwa,
- łupki powęglowe przepalone i nieprzepalone z górnictwa,
- materiał z przekruszonych konstrukcji betonowych z przemysłu budowlanego,
- popioły lotne i żużle oraz mieszaniny popiołowo-żużłowe z przemysłu elektrociepłowniczego,
- odpady z recyklingu opon samochodowych i odpady porafineryjne z przemysłu chemicznego.

Spośród wymienionych odpadów dużym zainteresowaniem cieszy się wykorzystanie popiołów lotnych i żużli. Materiały te stosuje się, na przykład, do budowy dróg w Niemczech [Białowiec, Janczukowicz 2009]. Stosowane są one w postaci sypkiej, co jest uciążliwe ze względu na składowanie i transport, dlatego też coraz częściej są one przetwarzane do postaci kawałkowej metodą granulowania i brykietowania. Odpowiednio zbrylone odpady mogą być zamiennikiem kruszyw naturalnych.

Planując wykorzystanie brykietów należy uwzględnić spełnienie wymogów dotyczących:

- odporności mechanicznej na ściskanie,
- sprężystości,
- gęstości,
- odporności na rozdrabnianie i ścieranie,
- odporności na wpływ warunków atmosferycznych,
- nasiąkliwości i wodoprzepuszczalności.

W szczególności istotne jest uwzględnienie warunków atmosferycznych, takich jak oddziaływanie wysokich i niskich temperatur oraz związanych z tym cykli zamrażania i odmrażania. Mają one wpływ na odporność mechaniczną na ściskanie, która jest określana doświadczalnie. Minimalna wartość jednostkowego nacisku stempla powodująca zniszczenie brykietu przeznaczonego na podbudowę drogową powinna wynosić co najmniej 1,0 MPa.

Należy dodać, że w procesie przygotowania mieszanki popiołów do brykietowania nie jest wymagane wstępne dosuszanie oraz rozdrabnianie materiału. Konieczne jest natomiast dodanie niewielkiej ilości wody w celu uzyskania ok. 5%

wilgotności mieszanki, co wpływa korzystnie na proces brykietowania. Do mieszanki dodaje się też dodatki i domieszki polepszające jakość wyrobów.

Energetyka. Zastosowanie metody brykietowania jest uzasadnione do scalania surowców energetycznych, w tym węgla oraz mieszanek węgla z różnymi dodatkami [Hycnar i in. 2005; Szpadt R. 2007]. Produkowane obecnie brykiety zawierają miał węgla kamiennego, węgla brunatnego i koksu oraz biomasę w postaci trocin, torfu, słomy lub innych surowców.

Brykietowanie takich materiałów zapewnia nie tylko ograniczenie ich objętości, ale także uzyskanie dużej wartości energetycznej wyrobu. Tak zwane biobrykiety stanowią cenne paliwo, coraz powszechniej są wykorzystywane do spalania w kotłach energetycznych [<http://www.ekologika.pl>].

Materiały energetyczne charakteryzują następujące parametry:

- wilgotność (zawartość wody), %,
- gęstość usypowa, kg/m^3 ,
- objętość właściwa, m^3/kg ,
- współczynnik koncentracji energii, MWh/m^3 ,
- potencjał energetyczny, GJ/ha^3 ,
- wielkość rozdrobnienia struktury.

Surowce energetyczne w stanie sypkim posiadają znaczną objętość, ale różną gęstość usypową, na przykład gęstość biomasy wynosi przeciętnie 80 kg/m^3 , podczas gdy gęstość węgla wynosi ok. 880 kg/m^3 . Wartość opałowa z kolei ściśle zależy od wilgotności surowca. Drewno liściaste o wilgotności 3,8 – 14,1% ma wartość opałową 16,9 – 20,4 MJ/kg [Kubica 2003].

Najważniejsze czynniki wpływające na przydatność brykietów w energetyce to [Borowski 2007b]:

- duża wartość opałowa brykietów,
- dobre właściwości mechaniczne,
- wodoodporność,
- jednorodność struktury wewnętrznej,
- niska emisja pyłów do atmosfery podczas spalania brykietów.

Wartość opałowa uzyskana ze spalania biobrykietów o wilgotności w zakresie 6 – 9% waha się w przedziale 19 – 24 MJ/kg co wystarcza, aby stosować je jako źródło energii cieplnej w energetyce. Brykiety takie są zaliczane do tzw. paliw ekologicznych, spełniających wymogi ochrony środowiska, zwłaszcza dotyczące niskiej emisji SO_2 do atmosfery w procesie spalania. Dzięki temu nie jest wymagane odsiarczanie spalin [Hycnar, Górski 2003].

7. WYBRANE ANALIZY BADAWCZE GOSPODARCZEGO WYKORZYSTANIA BRYKIETÓW

7.1. Zakres prac badawczych

We wcześniejszym autorskim opracowaniu przedstawiono analizę badawczą utylizacji poszlifierskich odpadów stalowych [Borowski, Kuczmaszewski 2005b]. Odpady te po brykietowaniu kieruje się do przetopienia w łukowym piecu elektrycznym. Efektem tego procesu jest odzysk surowca i wykorzystywanie go do produkcji nowych wyrobów stalowych. Wyniki analizy badawczej w pełni potwierdziły przydatność tych brykietów w procesie wytapiania stali.

Poniżej przedstawiono kolejne przykłady prac badawczych gospodarczego wykorzystania brykietów stanowiące wkład w rozwoju technologii zagospodarowania odpadów produkcyjnych. Wybrano trzy najbardziej charakterystyczne sposoby wykorzystania brykietów:

- w budownictwie jako zamiennika kruszywa na podbudowy drogowe,
- w energetyce jako alternatywne źródło energii cieplnej,
- w inżynierii środowiska do utylizacji substancji niebezpiecznych.

W Polsce do produkcji energii elektrycznej wykorzystuje się głównie węgiel kamienny i brunatny. Zużycie węgla kamiennego w elektrowniach i elektrociepłowniach zawodowych wynosi obecnie ok. 50 mln Mg rocznie i systematycznie się zmniejsza na rzecz węgla brunatnego, którego zużycie wynosi obecnie ponad 60 mln Mg rocznie.

Energetyczne spalanie węgla powoduje powstanie bardzo dużych ilości żużli oraz popiołów, w tym popiołów lotnych. Każdego roku z krajowych elektrowni i elektrociepłowni węglowych uzyskuje się ok. 24 mln Mg popiołów i żużla. Większość tych odpadów gromadzi się na składowiskach, a tylko ok. 15% wyprodukowanej masy gospodarczo się wykorzystuje [Lorenz 2005].

7.2. Wykorzystanie brykietów jako zamiennika kruszywa na podbudowy drogowe

7.2.1. Możliwości wykorzystania brykietów

Jedną z możliwości zastosowania popiołów energetycznych jest budowa dróg. Wykorzystując brykietowanie do scalania popiołów można uzyskać wyroby konkurujące na rynku z kruszywami naturalnymi stosowanymi w drogownictwie [<http://www.zuter.pl/lista.html>].

Ważnym elementem nawierzchni drogowej jest wykonanie stabilnej podbudowy. Zasadniczą funkcją warstwy spodniej jest zmniejszenie naprężeń powstających od obciążeń eksploatacyjnych w górnych warstwach nawierzchni, które są przekazywane na podłoże. Na podbudowy drogowe działają ponadto czynniki klimatyczne, a mianowicie opady oraz temperatury.

Podbudowy drogowe wykonuje się z takich materiałów, jak:

- kruszywa naturalne,
- beton asfaltowy i piasek otoczony asfaltem,
- beton cementowy,
- grunt stabilizowany cementem,
- grunt stabilizowany wapnem,
- mieszanki mineralno-emulsyjne,
- mieszanki mineralno-cementowo-emulsyjne,
- mieszanki mineralne z asfaltem spienionym.

Na podbudowy można również wykorzystać odpady przemysłowy, a w szczególności popioły i żużle. Z tabeli 8 wynika, że obecnie popioły i żużle najszerszej wykorzystuje się do formowania korpusów dróg, stabilizacji gruntu oraz ulepszania warstwy spodniej i podbudowy [Borowski 2010]. Mogą być zastosowane w postaci sypkiej, nieprzetworzonej, jako zamiennik cementu przy stabilizacji podbudowy dróg lokalnych o małym natężeniu ruchu [Piotrowski, Uliasz-Bocheńczyk 2008]. Jednakże składowanie i transport materiałów sypkich jest uciążliwy ze względu na pylenie i znaczną objętość, dlatego też powinny być one scalane do postaci kawałkowej.

Tabela 8. Wykorzystanie popiołów lotnych i żużli do budowy dróg

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

Podstawowe uwarunkowania wykorzystania brykietów na podbudowy utwardzonych nawierzchni drogowych w celu stabilizacji podłoża oraz wykonania warstw konstrukcyjnych są następujące:

- należy określić wymagania stawiane grustom przeznaczonym pod budowę nawierzchni drogowej (wytrzymałość na obciążenie wynosi co najmniej 2,5 MPa) oraz określić strefy ochronne i chronione;
- należy określić skutki zmian stosunków hydrologicznych oraz wskazać sposób przywrócenia zakłóconej równowagi hydrologicznej poprzez zastosowanie odpowiednich zabiegów na terenie drogi, jak i w jej otoczeniu w myśl Ustawy z dnia 5 stycznia 2011 r. o zmianie Ustawy – Prawo wodne oraz niektórych innych Ustaw (Dz.U. 2011 nr 32, poz. 159);
- należy skutecznie odizolować brykiety od kontaktu z atmosferą (np. przez pokrycie dywanikiem asfaltowym) w następstwie destrukcyjnego użytkowania nawierzchni drogowej oraz oddziaływania czynników atmosferycznych.

W czasie eksploatacji nawierzchni drogowej z wbudowanymi brykietami w podbudowie wskazane jest pobieranie i badanie próbek wody gruntowej oraz gruntów (gleb) zgodnie z obowiązującą strategią pomiarów środowiskowych.

7.2.2. Właściwości popiołów

Właściwości popiołów elektrowniowych znacznie się różnią między sobą i zależą zarówno od rodzaju użytego węgla do spalania, jak i odmiany kotła energetycznego. Popiół lotny ma postać miążskiego pyłu mineralnego w kolorze od jasno- do ciemnoszarego lub jasnobrazowego. Składa się w przeważającej części z tlenków krzemu, glinu i żelaza. Poza tym zawiera – tak samo jak skały naturalne – różnego rodzaju pierwiastki śladowe oraz niewielką ilość niespalonego węgla. Składnikami popiołów są przede wszystkim tlenki: SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 , CaO , MgO , Na_2O , K_2O i TiO_2 . Popiół zawiera także śladowe ilości takich pierwiastków, jak: Ba, Cu, Sr, Ni, Cr, Zn, Cd, Mo, V, Se, Pb, As i inne. Można wydzielić cztery grupy składników w popiele:

- składniki podstawowe (SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 , CaO),
- składniki uboczne (MgO , SO_3 , Na_2O , K_2O),
- składniki śladowe (TiO_2 , P_2O_5 , Mn i inne),
- niespalony węgiel (straty żarowe).

Popiół lotny z kotłów konwencjonalnych jest pod względem składu chemicznego zbliżony do popiołu wulkanicznego [Piotrowski, Uliasz-Bocheńczyk 2008]. Szkliste, często kuliste cząstki mają średnicę 0,5 – 200 μm , a przeciętny ich rozmiar jest zawarty pomiędzy 5 a 20 μm . Skład fazowy popiołów lotnych to w 70 – 80% bezpostaciowa forma szklista. W tabeli 9 przedstawiono przykładowe składy chemiczne popiołów z kotłów konwencjonalnych i fluidalnych.

Tabela 9. Skład chemiczny popiołów lotnych z kotłów konwencjonalnych i fluidalnych [Piotrowski, Uliasz-Bocheńczyk 2008]

Rodzaj popiołu	Zawartość [%]:								
	straty prażenia	SiO ₂	FE ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	CaO	SO ₃	Na ₂ O	K ₂ O	CaO wolne
Popioły lotne ze spalania węgla kamiennego w kotłach konwencjonalnych z Elektrociepłowni Lublin-Wrotków	10,75	58,46	3,99	14,00	5,31	0,77	0,59	1,24	1,25
Popioły lotne ze spalania węgla kamiennego w kotłach konwencjonalnych z Elektrowni Jaworzno	2,91	47,86	7,65	28,75	4,94	0,58	1,28	2,33	0,00
Popioły lotne ze spalania węgla kamiennego w kotłach fluidalnych z Elektrociepłowni Tychy	13,79	31,39	3,35	14,70	19,75	4,68	0,74	2,08	6,67
Popioły lotne ze spalania węgla kamiennego w kotłach fluidalnych z Elektrowni Siersza	5,55	40,43	6,82	21,52	11,52	6,13	1,58	1,96	1,48

Popioły z kotłów fluidalnych w przeciwieństwie do popiołów z kotłów konwencjonalnych składają się głównie z ziaren minerałów ilastych. Charakteryzuje je też większa zawartość związków wapnia. W popiołach z kotłów fluidalnych nie stwierdzono zawartości szkła i mulitu. Odpady te mają wysoką aktywność pucolanową, czyli zdolność do wiązania ze związkami wapniowymi w połączeniu z wodą.

Z ekologicznego punktu widzenia korzystne jest też gospodarze wykorzystanie popiołów ze spalania biomasy. Biomasa zawiera około czterokrotnie więcej tlenu, dwukrotnie mniej węgla, a także mniej siarki i azotu w porównaniu do węgla. Podczas spalania biomasy powstaje dużo części lotnych, spalanie węgla natomiast wiąże się ze znacznie większym udziałem popiołu w palenisku. Zawartość węgla pierwiastkowego w węglu jest dwukrotnie większa niż w biomase. Biomasa posiada małą gęstość nasypową, a więc zajmuje większą objętość przy składowaniu w porównaniu z węglem. Charakterystyczną cechą biomasy w postaci świeżej jest duża zawartość wilgoci, co wymaga jej dosuszania do wartości mniejszej od 15%. Wartość opałowa biomasy drzewnej jest prawie dwukrotnie mniejsza niż węgla kamiennego, która jest niewystarczająca do stosowania jej jako główne źródło energii cieplnej w energetyce zawodowej. Chętnie natomiast jest stosowana w kotłach indywidualnych, głównie ze względu na małe pozostałości popiołów w palenisku oraz niską emisję związków siarki do atmosfery [<http://www.energia-odnawialna.net>].

W tabeli 10 porównano skład chemiczny popiołu ze spalania biomasy drzewnej, węgla kamiennego oraz mieszanki węgla i biomasy.

Tabela 10. Skład chemiczny popiołu ze spalania biomasy drzewnej w porównaniu do węgla oraz mieszanki węgla i biomasy

Rodzaj związku chemicznego	Zawartość związku w popiele ze spalania [%]:		
	drewna liściastego	węgla kamiennego	mieszanki węgla + 10% biomasy drzewnej
CaO	41,80	2,66	4,50
SiO ₂	23,50	50,82	48,97
K ₂ O	15,20	2,98	3,51
MgO	7,60	2,76	2,93
Al ₂ O ₃	6,70	28,64	27,52
P ₂ O ₅	2,80	0,89	1,90
Fe ₂ O ₃	1,70	6,16	6,09
Inne	0,70	5,09	4,58

Skład chemiczny popiołu ze spalania biomasy drewna liściastego jest znacząco różny w porównaniu do składu popiołu z węgla oraz mieszanki węgla i biomasy. Głównymi składnikami chemicznymi w popiele z biomasy są związki CaO, SiO₂ oraz K₂O. Z kolei w popiele ze spalania zarówno samego węgla, jak i mieszanki węgla i biomasy występują głównie związki SiO₂ oraz Al₂O₃. Należy mieć na uwadze, że podany skład chemiczny w dużym stopniu zależy od źródła i rodzaju biomasy oraz sposobu jej spalania i typu urządzenia. Zwiększenie stabilności składu popiołów wymaga stosowania procesów zagęszczania biomasy wraz z ujednorodnieniem jej struktury przed spalaniem [Borowski, Miłczak 2010].

Najważniejsze właściwości fizyczne popiołów paleniskowych ze spalania biomasy drzewnej przedstawiono w tabeli 11.

Tabela 11. Właściwości fizyczne popiołu ze spalania biomasy drzewnej

Parametr	Jednostka	Wartość
Zawartość wilgoci	%	2,00
Gęstość usypowa	kg/m ³	420,00
Rozmiar cząstek (uziarnienie)	mm	0,01–1,00

Popioły ze spalania biomasy drzewnej posiadają duży stopień rozdrobnienia. Wymiary ziaren wynoszą najczęściej od 0,01 do 1,0 mm. Materiał ten często występuje z gabarytowo większymi pojedynczymi zanieczyszczeniami, które powinno się oddzielać.

7.2.3. Metodyka badań wytrzymałościowych

Celem przetwarzania popiołów jest nadanie im postaci kawałkowej przez scalanie. Wspomniano wcześniej, że technologia scalania obejmuje zarówno sposób przygotowania mieszanki do scalania, jak i dobór parametrów oraz urządzeń do scalania.

Opracowane dotychczas technologie scalania materiałów drobnoziarnistych umożliwiają wytworzenie lekkich kruszyw do zapraw betonowych oraz materiałów budowlanych na bazie odpadów z płuczek węglowych i popiołów elektrownianych, w tym popiołów z elektrowni wyposażonych w instalacje odsiarczania spalin [Białowiec, Janczukowicz 2009; Kępsys 2008]. Wśród dostępnych technologii scalania często stosowano granulację w granulacjach talerzowych lub bębnowych.

Podjęto też próby brykietowania odpadów elektrownianych. Materiałem wyjściowym była mieszanina pyłów i popiołów z substancjami wiążącymi. Jako substancje wiążące stosowano pochodne celulozy (metylocelulozę, hydroetylocelulozę), a ponadto substancje przyspieszające proces twardnienia (tlenek wapnia i magnezu) oraz substancje grafitujące (grafit, aluminium). Do wytwarzania brykietów stosowano również mieszankę popiołu lotnego z dodatkiem surowców mineralnych, gliny oraz wapna hydratyzowanego. Brykiety takie przetwarzano w celu odzyskania włókien mineralnych [Stolarski i in. 2003].

Przygotowanie mieszanki popiołów do brykietowania obejmowało dokładne wymieszanie z odpowiednią porcją środka wiążącego oraz doprowadzenie do wilgotności ok. 5%. Jako środki wiążące stosowano melasę, wapno hydratyzowane oraz cement. Przygotowano też partię materiału bez dodatków wiążących.

Do mieszania składników zastosowano laboratoryjną elektryczną mieszarkę łopatkową, a następnie przeprowadzono pomiary wilgotności za pomocą wagosuszarki firmy KETT typu FD-620, zadając temperaturę suszenia $T = 105\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Przygotowaną mieszankę brykietowano za pomocą prasy hydraulicznej PH-300 o maksymalnej sile docisku stempla do 300 kN. Wykorzystano matrycę formującą własnej konstrukcji, umożliwiającą uzyskanie brykietów o średnicy 30 mm i wysokości ok. 20 mm. Cechy fizyczne brykietów oraz stosowane naciski jednostkowe stempla podano w tabeli 12.

Gotowe brykiety poddano badaniom wytrzymałościowym z uwzględnieniem wpływu sezonowania. W celu oceny wytrzymałości mechanicznej brykietów zbadano ich odporność na zrzut grawitacyjny oraz maksymalne wartości nacisku stempla powodujące zniszczenie brykietu. Opierając się na danych literaturowych i wynikach wcześniejszych doświadczeń określono wymaganą minimalną odporność grawitacyjną na zrzut wynoszącą 90% oraz minimalną wartość jednostkowego nacisku stempla powodującą zniszczenie brykietu wynoszącą 1,0 MPa.

Tabela 12. Cechy fizyczne przygotowanych do badań partii brykietów

Nr partii	Rodzaj lepiszcza	Udział lepiszcza [%]	Nacisk jednostkowy stempla [MPa]	Masa brykietu [g]	Objętość brykietu [mm ³]
1	bez lepiszcza	0,0	9,90	31,44	148,36
2	melasa	5,0	7,10	26,30	115,02
3	melasa	5,0	4,25	27,39	120,10
5	melasa	10,0	4,25	30,27	137,91
6	wapno hydratyzowane	5,0	4,25	21,35	115,87
7	wapno hydratyzowane	8,0	4,25	22,10	117,28
8	wapno hydratyzowane + cement	8,0	4,25	23,61	120,10
9	wapno hydratyzowane + cement	9,0	4,25	26,91	127,17
10	wapno hydratyzowane + cement	10,0	4,25	24,57	128,58

7.2.4. Analiza wyników badań

Wyniki badań wytrzymałościowych brykietów z odpadowych popiołów przedstawiono w tabeli 13. W większości wypadków odporność grawitacyjna na zrzut osiągała wartość powyżej 90%, oprócz próbek z dodatkiem melasy. Lepiszcze to nie polepszało właściwości mechanicznych brykietów popiołowych, należało zatem zastosować inne substancje wiążące.

Tabela 13. Właściwości mechaniczne brykietów z uwzględnieniem sezonowania

Nr próby	Rodzaj lepiszcza	Udział lepiszcza [%]	Wartość jednostkowego nacisku stempla niszczonego brykiet [MPa]		Odporność na zrzut grawitacyjny [%]	
			brykiet świeży	brykiet sezonowany	brykiet świeży	brykiet sezonowany
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	97,1	98,0
4	wapno hydratyzowane	8,0	0,89	0,99	95,0	96,5
5	wapno hydratyzowane + cement	5,0	1,27	1,42	98,8	99,2
6	wapno hydratyzowane + cement	8,0	1,58	1,70	97,6	98,8
7	wapno hydratyzowane + cement	10,0	1,75	1,98	97,5	98,9

Dodatek wapna hydratyzowanego umożliwił uzyskanie brykietów o właściwościach mechanicznych zbliżonych do minimalnych, jednak niektóre partie brykietów charakteryzowała mała odporność na nacisk stempla. Dopiero dodatek cementu umożliwił uzyskanie brykietów o dużej odporności mechanicznej.

Najkorzystniejsze cechy wytrzymałościowe stwierdzono w brykietach zawierających lepszczce dwuskładnikowe – wapno hydratyzowane oraz cement, w udziale masowym od 5 do 8%. Stwierdzono, że podwyższenie udziału któregośkolwiek ze składników lepszczca nie przynosi istotnego poprawienia odporności mechanicznej, a wręcz przeciwnie może ona ulec pogorszeniu.

Stwierdzono korzystny wpływ sezonowania na wzrost odporności mechanicznej brykietów (tab. 13). Optymalny okres sezonowania wynosi dwa tygodnie, jednak wystarczające właściwości posiadały również brykiety świeże, z dodatkiem wapna i cementu jako lepszczca.

Badania właściwości mechanicznych brykietów umożliwiły również dobór korzystnych nacisków prasy w relacji do wilgotności mieszanki w momencie brykietowania. Optymalna wartość nacisku jednostkowego stempla wynosiła 4,25 MPa. Najkorzystniejsza zawartość wilgoci w mieszance zawierała się w zakresie 5 – 8%. Zauważono, że dalsze zwiększanie nacisku formującego nie przynosi w efekcie istotnego zwiększenia odporności mechanicznej brykietów.

Wyniki badań potwierdziły, że brykiety z popiołów energetycznych mogą być wykorzystane jako substytut kruszywa mineralnego na podbudowy drogowe. Należy jednak zapewnić szczelność podłoża pod warstwą kruszywa ze względu na możliwość wymywalności zanieczyszczeń chemicznych z brykietów.

7.3. Wykorzystanie brykietów jako źródła energii cieplnej

7.3.1. Zagospodarowanie odpadów energetycznych

W krajowych przedsiębiorstwach elektroenergetycznych systematycznie wzrasta zainteresowanie spalaniem mieszanki węgla z biomasą. Zwiększa się również areal upraw produkujących biomasę na potrzeby energetyki. Technologie wykorzystania odnawialnych nośników energii są już dość dobrze znane, a niektóre zostały już w kraju przetestowane [Majchrzak i in. 2005; Ściażko i in. 2006; Zawistowski i in. 2003].

Wykorzystanie mieszanek powstałych z połączenia biomasy z miałem lub mulem węglowym w postaci nieprzetworzonej (sypkiej) jest mało efektywne. Wynika to m.in. z ograniczeń transportowych, spowodowanych dużą objętością przewożonych rozdrobnionych surowców oraz ich niewielką gęstością nasypową. Nośniki energii powinny być zatem dostarczone do obiektów energetycznych w formie brykietów (tzw. biobrykiety).

Produkowane obecnie brykiety zawierają miął węgla kamiennego, węgla brunatnego, koksu oraz biomasę w postaci trocin, torfu, słomy lub innych surowców [Lazaro i in. 2007]. Droбноziarniste frakcje węglowe z procesów wydobywania, wzbogacania i wykorzystania węgla kamiennego i węgla brunatnego stanowią znaczący udział w bilansach produkcji i zagospodarowania węgla. Do drobnoziarnistych frakcji węglowych należą muły węglowe, odpady poflotacyjne, ściery, pyły koksownicze, koksik z procesów zgazowania i wysoko zawęglone stałe produkty spalania paliw. W zależności od właściwości energetycznych muły węglowe, ściery, pył koksowniczy i koksik często są zagospodarowywane jako paliwa samodzielne oraz jako jeden ze składników wytwarzanych mieszanek paliwowych [Boruk, Winkler 2009]. Odpady poflotacyjne są w znacznie mniejszym stopniu energetycznie zagospodarowywane. W tych to warunkach znaczne ilości drobnoziarnistych frakcji węglowych stają się odpadem i są składowane w osadnikach lub w wyrobiskach górniczych.

Duża ilość i znaczne rozdrobnienie omawianych frakcji węglowych uzasadniają potrzebę zmiany dotychczasowych praktyk i zwiększenia ich zagospodarowania jako paliwa podstawowego oraz uzupełniającego do określonych obiektów energetycznych oraz opanowania produkcji wysokojakościowych koncentratów węglowych i mieszanek paliw alternatywnych. W wielu wypadkach drobnoziarniste frakcje mogą być wzbogacane metodami fizycznymi i fizykochemicznymi, uzyskując wysokoenergetyczne koncentraty węglowe. Proponowane rozwiązania pozwalają na pełne zagospodarowanie nawet niskoenergetycznych, drobnoziarnistych frakcji węglowych [Hycnar i in. 2005].

Węgiel drobnoziarnisty należy do materiałów wykazujących słabą podatność na scalanie w prasach do brykietowania. Pożądanę są więc działania mające na celu zmianę właściwości tego materiału. Badania procesu scalania materiałów roślinnych wykazały natomiast ich dobrą podatność na scalanie pod warunkiem odpowiedniego dosuszenia i rozdrobnienia [Plíštil i in. 2005].

7.3.2. Charakterystyka materiału badawczego

W energetyce jako biomasę traktuje się wszystkie rodzaje substancji organicznych pochodzenia roślinnego lub zwierzęcego nadające się do spalania. Biomasę pochodzenia naturalnego charakteryzuje dosyć wysoka wartość opałowa. Wartość opałowa biomasy (w stanie suchym) wynosi ok. 19 000 kJ/kg i jest o 17% niższa niż wartość opałowa węgla brunatnego (tab. 14). Podczas spalania czystej biomasy powstają małe ilości popiołu (0,5 – 12,5%), który nie zawiera szkodliwych substancji i może być wykorzystany jako nawóz mineralny [Isobe i in. 2004].

Podstawowe składniki chemiczne węgla kamiennego stosowanego w energetyce oraz biomasy są takie same. Poszczególne pierwiastki i związki chemiczne występują jednak w odmiennych udziałach. Biomasa zawiera średnio około czte-

Tabela 14. Właściwości węgla i biomasy drzewnej

Parametr	Jednostki	Węgiel kamienny	Biomasa z drewna liściastego
Gęstość nasypowa	kg/m ³	880	80
Wartość opałowa	kJ/kg	28 000	19 000
Zawartość wilgoci w próbce badanej	%	7,1	12,0
Zawartość części lotnych	%	26,6	66,5
Zawartość popiołu	%	12,2	2,0
Zawartość siarki	%	0,9	0,1
Tlen	%	7,0	30,2
Węgiel	%	81,0	42,0
Azot	%	1,1	0,5

rozkrotnie więcej tlenu, dwukrotnie mniej pierwiastka węgla, a także mniej siarki i azotu (tab. 14). Konsekwencją tych właściwości jest duża zawartość części lotnych i wysoka reaktywność biomasy [Liszka, Majchrzak 2005].

Niekorzystną cechą biomasy jest jej wysoka i zmienna (w zależności od rodzaju biomasy i okresu jej sezonowania) zawartość wilgoci. Biomasa posiada znacznie niższą gęstość nasypową, czego konsekwencją jest droższy transport oraz wymagania dotyczące większych powierzchni składowisk.

Biomasę charakteryzuje dużo większa, w porównaniu z węglem, zawartość związków alkalicznych (zwłaszcza potasu), wapnia i fosforu, a w słomie, liściach i korze drzew również większa zawartość chloru, co może prowadzić do wzmożonej korozji oraz narastania agresywnych osadów w kotle podczas jej bezpośredniego spalania. Korzystną cechą biomasy (zwłaszcza drzewnej) są znacznie mniejsze, w porównaniu z węglem, zawartości popiołu i siarki podczas spalania [Niedziółka, Zuchniarz 2006].

Wilgotność biomasy pochodzenia roślinnego wynosi ponad 50%. Przy takiej wilgotności spalanie jest możliwe jedynie w specjalistycznych kotłach, co jest opłacalne wyłącznie w ciepłowniach zawodowych średniej i dużej mocy. Spalanie biomasy w tradycyjnych kotłach c.o. wymaga zmniejszenia jej wilgotności do poniżej 15%. Duża zawartość wilgoci w biomacie ma również wpływ na koszty jej pozyskiwania. Kotły w polskich elektrowniach nie są przystosowane do spalania biomasy. Duża zawartość alkaliów oraz agresywnego chemicznie chloru w niektórych popiołach z biomas może powodować korozję oraz powstawanie osadów na powierzchniach grzewczych kotła [Gnutek i in. 2002].

Bardzo ważną cechą mieszanek węgla i biomasy jest pełna addytywność substancji organicznej obu paliw. W mieszance tej węgiel odgrywa rolę stabilizatora procesu spalania. Pod względem energetycznym 2 tony biomasy są równoważne od 1 do 1,5 tony węgla kamiennego [Kubica i in. 2003; Purohit i in. 2006].

Zgodnie z wymogami ochrony środowiska biobrykiety traktowane są jako paliwo ekologiczne. Ich zastosowanie ogranicza emisję do atmosfery SO_2 , dzięki czemu nie jest wymagane odsiarczanie spalin [<http://www.ekoportal.gov.pl>].

7.3.3. Problematyka wykorzystania biomasy z węglem

Zaawansowane próby wykorzystania mieszanek węgla z biomasą przeprowadzono 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 nowych 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 polega na brykietowaniu mieszanki węgla z koksikiem za pomocą lepiszcza ekologicznego, którym jest zhydrolizowana mąka i melasa. Do mieszanki dodawano rozcieńczonego kwasu fosforowego, który jest utwardzaczem lepiszcza. Przygotowaną mieszankę podawano na prasę dwuwalcową i otrzymano surowe brykiety. Brykiety kierowano następnie do suszenia i kondycjonowania, podczas którego nastąpiło utwardzenie lepiszcza i uzyskano gotowe paliwo ekologiczne.

Przeprowadzone dotychczas próby na terenie Polskiego Koncernu Energetycznego (obejmującego min. EC Katowice, Jaworzno III/II, Elektrownię Siersza i ZEC Bielsko-Biała) wskazały, że prowadzenie współspalania odpowiednio przygotowanej biomasy (w udziale do 5%) z miałem i mułem węglowym jest możliwe, praktycznie w sposób bezinwestycyjny [Ściażko, Zieliński 2003]. W razie 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 jest możliwe zwiększenie udziału 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 brykietowanie czy granulowanie mieszanki.

W przedsiębiorstwie „Ekokarbotech” opracowano 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 [<http://www.ekokarbotech.pl>].

7.3.4. Metodyka badań

Przygotowanie materiału do brykietowania obejmowało rozdrabnianie i mieszanie składników oraz dosuszanie do wilgotności mniejszej niż 12%. Do rozdrabniania – ze względu na istotne różnice w właściwościach fizycznych węgla i materiałów włóknistych – stosowano dwa typy młynków: młynek udarowy do węgla oraz młynek nożowy (tnący) do biomasy. Węgiel rozdrabniano do momentu uzyskania próbek analitycznych o wielkości ziarna mniejszej niż 0,4 mm, trociny natomiast do uzyskania próbek o wielkości ziarna mniejszej niż 2 mm [Borowski 2009a].

Do brykietowania przygotowano mieszanki biomasy w udziale masowym wynoszącym od 0% do 25% w stosunku do węgla. Lepiszczem dodawanym do mieszanki była melasa, będąca ubocznym produktem otrzymywanym podczas rafinacji cukru. Melasa występuje w postaci gęstej cieczy o ciemnobrązowym zabarwieniu i w naturalnej postaci trudno się miesza z materiałem sypkim, dlatego też zastosowano roztwór wody z melasą. Wybór tego lepiszcza spośród wielu innych jest uzasadniony wynikami autorskich badań brykietowania materiałów drobnoziarnistych, które potwierdziły korzystny wpływ melasy na właściwości mechaniczne brykietów. Istotne też było niestwierdzenie zwiększenia szkodliwych emisji w procesie spalania brykietów z melasą w porównaniu do emisji z próbek kontrolnych. Zawartość melasy określono na podstawie wcześniejszych badań innych surowców drobnoziarnistych w ilości ok. 8% [Borowski, Kuczmaszewski 2005b].

Do mieszania składników zastosowano łopatkową mieszarkę elektryczną, a następnie przeprowadzono dosuszenie termiczne. Pomiary wilgotności wykonano za pomocą laboratoryjnej wagosuszarki firmy KETT typu FD-620.

Przygotowaną mieszankę skierowano do brykietowania w prasie hydraulicznej. Scalano porcje materiału o masie 17 – 18 g przy nacisku jednostkowym stempla od 20 do 35 MPa. Uzyskano walcowe brykiety, których wysokość odpowiadała w przybliżeniu 2/3 średnicy.

Właściwości mechaniczne brykietów określono poprzez odporność na zrzut grawitacyjny oraz wartość jednostkowej siły ściskania niszczącej brykiet. Do pomiarów wykorzystano maszynę wytrzymałościową ZWICK Z100. Badano brykiety świeże oraz sezonowane.

7.3.5. Analiza wyników badań

W pierwszym etapie badań określono wpływ udziału biomasy w relacji do nacisku jednostkowego prasy stemplowej oraz do właściwości mechanicznych brykietów bezpośrednio po ich wytworzeniu. Przykładowe wyniki badań przedstawiono w tabeli 15.

Tabela. 15. Wyniki pomiarów wybranych parametrów brykietowania

Nr próby	Udział biomasy [%]	Nacisk jednostkowy stempla [MPa]	Właściwości mechaniczne	
			wartość nacisku niszcząca brykiet [MPa]	odporność na zrzut grawitacyjny [%]
1	0,0	35,0	1,19	82,6
2	20,0	30,0	1,08	80,0
3	20,0	30,0	4,81	89,0
4	20,0	35,0	4,42	97,5
5	20,0	30,0	4,84	93,7
6	25,0	35,0	5,30	95,6
7	25,0	30,0	6,03	94,8
8	25,0	35,0	7,45	97,1

Wysoką odporność brykietów uzyskano stosując nacisk jednostkowy prasy stemplowej wynoszący 30 oraz 35 MPa, przy czym przy większym nacisku większa jest także odporność. Ma to istotne znaczenie przy zwiększaniu udziału biomasy w brykietach. Przy 25-procentowym udziale biomasy uzyskuje się wyroby o zmniejszonej odporności (na granicy minimum), natomiast przez zwiększenie wartości siły nacisku stempla uzyskuje się wyroby o większej odporności na zrzut.

Stwierdzono, że brykiety z samego węgla mają znacznie mniejszą wytrzymałość na ściskanie niż brykiety z dodatkiem biomasy. Stosowanie biomasy wpływa więc na wzrost wytrzymałości mechanicznej brykietów. Analizując uzyskane dane

zauważono, że maksymalna wartość siły ściskania jest nieco większa dla brykietów z 20-procentowym udziałem biomasy, a mniejsza przy 25-procentowym udziale biomasy przy zastosowaniu tej samej siły nacisku prasy (wynoszącej 30 MPa). Uzasadnione jest zatem stosowanie większych nacisków prasy przy ściskaniu materiału zawierającego większy udział biomasy.

W drugim etapie badań określono korzystne zakresy wilgotności mieszanki z 25-procentowym udziałem biomasy oraz wpływ sezonowania brykietów na ich wytrzymałość mechaniczną (tab. 16).

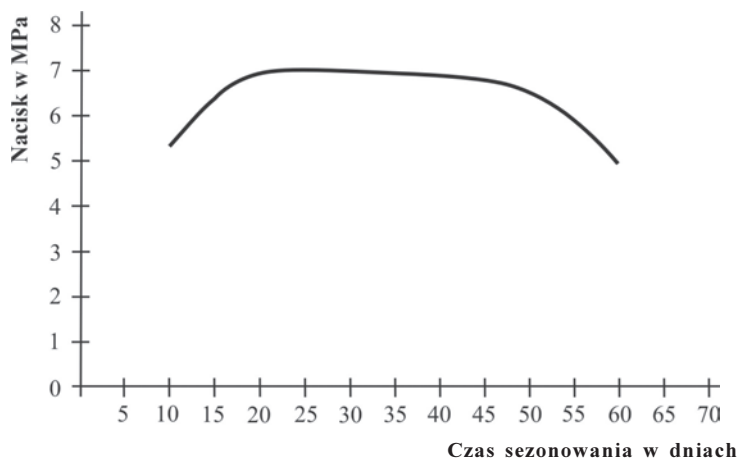
Tabela 16. Właściwości mechaniczne brykietów świeżych i sezonowanych w zależności od wilgotności mieszczanki

Nr próby	Wilgotność mieszanki [%]	Stopień zagęszczenia [-]	Wartość nacisku jednostkowego niszczącego brykiet [MPa]		Odporność na zrzut grawitacyjny [%]	
			brykiet świeży	brykiet sezonowany	brykiet świeży	brykiet sezonowany
1	11,3	1,88	2,19	2,89	83,5	86,1
2	9,8	1,92	4,79	7,28	88,9	91,3
3	8,5	1,94	4,84	7,44	97,1	98,2
4	7,8	1,98	5,81	8,42	95,2	96,1
5	7,4	2,01	6,62	9,41	95,8	96,4
6	6,8	2,03	7,55	10,28	97,2	99,1

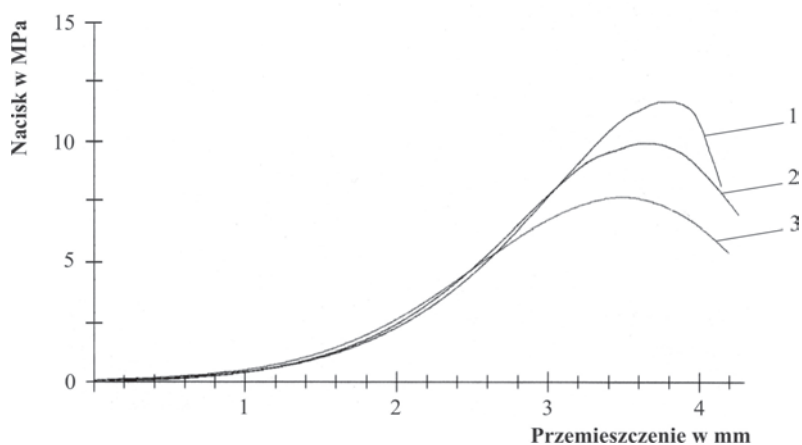
Dane przedstawione w tabeli 16 pokazują, że w większości przypadków odporność grawitacyjna na zrzut osiągała wymaganą wartość powyżej 90%. Odporność ta jest niewystarczająca przy scalaniu materiału o wilgotności większej niż 10%. Stwierdzono, że korzystna wilgotność mieszanki węgla z biomasą przeznaczoną do brykietowania powinna zawierać się w granicach od 6 do 9%.

Zaobserwowano ponadto, że brykiety sezonowane charakteryzowała większa wytrzymałość na ściskanie niż brykiety świeże. Istotne jest także określenie optymalnego czasu sezonowania przy zachowaniu wysokiej wytrzymałości mechanicznej. Wyniki pomiarów pokazane na rysunku 46 wskazują, że największą wytrzymałość osiągają brykiety po ok. 20 dniach od wytworzenia. Zbyt długi czas sezonowania natomiast jest niekorzystny – po ok. 50 dniach obserwuje się wyraźne zmniejszenie wytrzymałości brykietów.

Analizując przebieg krzywych pokazanych na rysunku 47, zaobserwowano nierównomierność procesu ściskania brykietów. W początkowej fazie procesu zaobserwowano, że niewielki przyrost nacisku powoduje znaczne przemieszczenie ruchomych szczęk głowicy, pomiędzy którymi znajduje się badana próbka. Spowodowane to jest znaczną porowatością biobrykietów. Występuje tutaj



Rys. 46. Zależność wytrzymałości na ściskanie od czasu sezonowania brykietów



Rys. 47. Przebieg krzywych ściskania w próbie powodującej zniszczenie brykieta: 1 – wytworzonego przy nacisku jednostkowym prasy 35 MPa, 2 – wytworzonego przy nacisku jednostkowym prasy 30 MPa, 3 – jak (2), lecz scalana mieszanka miała mniejszą wilgotność

proces wzajemnego dociskania drobnoziarnistych składników brykieta. Następną fazę procesu charakteryzuje szybszy przyrost nacisku względem przemieszczenia głowicy maszyny, aż do wartości maksymalnej, gdzie następuje zniszczenie próbki.

W razie składowania i transportu biobrykietów w odkrytych pojemnikach powinna je cechować dodatkowo wysoka wodoodporność. Badania wodoodporności brykietów polegały na całkowitym ich zanurzeniu w wodzie i określeniu

procentowego ubytku ich masy w trakcie procesu. Brykiety wykazały dobrą wodoodporność – dopuszczalny 10-procentowy ubytek masy brykietów nastąpił po przeszło 3 minutach całkowitego zanurzenia. W praktyce jednak brykiety rzadko będą całkowicie zanurzone w wodzie.

Określono również emisję gazów do atmosfery podczas spalania biobrykietów. Proces pirolizy przeprowadzono w warunkach zbliżonych do panujących podczas spalania w konwencjonalnym piecu centralnego ogrzewania. Po około dwóch minutach od rozpoczęcia procesu nagrzewania w piecu przy temperaturze 300 – 600 °C, obserwowano wydzielenie węglowodorów lekkich, ulegających spalaniu. W zakresie temperatur 600 – 800 °C następowało wydzielanie niewielkich ilości substancji smolistych (dym i sadza), w wyniku rozkładu pozostałych węglowodorów na związki proste. Ogólna emisja węglowodorów wynosiła ok. 0,05 m³/kg brykietów. Węglowodory obecne w biobrykietach ulegały zatem rozkładowi na węglowodory proste lub węgiel i wodór, a te z kolei były spalane. Nie stwierdzono w wydzielanych gazach węglowodorów ciężkich. W porównaniu do brykietów bez żadnych dodatków dodanie melasy do biobrykietów nie powodowało zwiększenia szkodliwych emisji w procesie spalania.

Wyniki badań potwierdziły, że biobrykiety mogą być alternatywnym, wartościowym nośnikiem energii, przeznaczonym do spalania w przydomowych kotłach centralnego ogrzewania.

7.4. Wykorzystanie brykietów zawierających substancje niebezpieczne dla środowiska

7.4.1. Termiczna utylizacja osadów ściekowych

Powszechnie stosowaną metodą pozbywania się odpadów zawierających substancje niebezpieczne dla środowiska jest ich termiczna utylizacja. Spalanie odpadów stwarza jednak problemy zagospodarowania takich pozostałości, jak: popioły z komór spalania, odfiltrowany lotny popiół, nasycone sorbenty i odprowadzane ścieki technologiczne [Mokrzycki, Uliasz-Bocheńczyk 2006]. Instalacje do termicznej utylizacji odpadów, oparte na najnowszym rozwiązaniach technologicznych, 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. Zarówno popioły, jak i zużyte sorbenty, należy traktować jako materiały potencjalnie toksyczne [Pająk 2005].

Osady ściekowe powstające w oczyszczalniach ścieków są odpadami, które są skutecznie unieszkodliwiane i zagospodarowywane w rekultywacji gleb, w rol-

nictwie bądź w produkcji kompostów [Siuta 2002, 2005]. Coraz częściej podawane są także procesowi termicznej utylizacji. W Polsce istnieje ponad 2200 oczyszczalni ścieków komunalnych oraz prawie 1700 oczyszczalni ścieków przemysłowych. Produkują one rocznie ok. 450 tys. Mg suchej masy (s.m.) osadów ściekowych, z czego aż 188 tys. Mg s.m. kierowane jest do składowania oraz do spalania. Produkty spalania także kieruje się do składowania [Pająk 2008].

Proces technologiczny zagospodarowania popiołów ze spalania osadów ściekowych polega na ich przetworzeniu i uzyskaniu nietoksycznego produktu albo na poddaniu ich zestaleniu w kompozycjach cementowych lub za pomocą żywic syntetycznych. Można też stosować powlekanie zestalonych produktów substancjami hydrofobowymi w celu zabezpieczenia przed pyleniem i wypłukiwania zanieczyszczeń wodą. Tak zabezpieczona ostateczna pozostałość po spalaniu odpadów może być bezpiecznie składowana na wysypiskach odpadów komunalnych [Kosturkiewicz 2006]. Kolejne metody zagospodarowania popiołów polegają na zastosowaniu ich jako składnika kompozycji nawierzchni dróg asfaltowych lub betonowych. Popioły mogą stanowić także składnik zbrylonego wyrobu poddanego procesowi spiekania [Góralczyk i in. 2009].

7.4.2. Materiał badawczy

Do badań przygotowano mieszkankę zawierającą popioły lotne ze spalania osadów ściekowych z przeznaczeniem do utylizacji z wykorzystaniem metody brykietowania. Popioły pobrano z kotła fluidalnego przeznaczonego do spalania podsuszonych osadów wyposażonego w system oczyszczania spalin.

Największym problemem utrudniającym unieszkodliwienie osadów ściekowych z oczyszczalni są zanieczyszczenia metalami ciężkimi. Okresowe przekroczenia zawartości kadmu i niklu uniemożliwiają rolnicze wykorzystanie osadów pochodzących z dużych oczyszczalni ścieków, jak np. „Hajdów” w Lublinie, zdarzają się również przekroczenia zawartości chromu, cynku oraz kadmu. Proces termicznej utylizacji pozwala na unieszkodliwienie organizmów chorobotwórczych obecnych w osadach, w produktach spalania pozostają natomiast metale ciężkie i ich związki.

Proces spalania osadu jest zapoczątkowany na złożu fluidalnym i dalej kontynuowany w komorze spalania. Osiągana temperatura powyżej 850 °C zapewnia dobre spalanie wsadu, a zawartość części organicznych w popiołach nie przekracza 3%. Gazy spalinowe, powietrze, woda odparowana z osadu i pył mineralny opuszczają piec przez kopułę w górnej części komory spalania, skąd zostają skierowane do przewodu spalinowego. Układ oczyszczania składa się z elektrofiltru, płuczki wieżowej gazu, skrubera, filtrów workowych i wentylatora odprowadzającego resztę spalin do komina. Spaliny w największym stopniu zanieczyszczone są pyłem o wiel-

kości cząstek ok. 50 mikronów. Cząstki pyłu zawieszony w gazie w elektrofiltrze są naładowane ładunkiem elektrycznym, zostają ściągnięte polem elektrycznym do elektrod. Wraz z pyłem są usuwane metale ciężkie adsorbujące na powierzchni cząstek pyłu. Cząstki pyłu przechwycone w elektrofiltrze trafiają do lejów znajdujących się na jego dnie. Następnie zostają pneumatycznie odprowadzone do silosa skąd zostają odebrane do utylizacji.

Zawartość metali ciężkich w popiołach zależy od ich początkowej zawartości w osadach i jest zależna od rodzaju i uciążliwości ścieku. W tabeli 17 zestawiono ekstremalne i najczęściej stwierdzane orientacyjne zawartości metali ciężkich w osadach ściekowych polskich oczyszczalni.

Tabela 17. Zawartość metali ciężkich w osadach ściekowych [Pająk 2009]

L.p.	Pierwiastek	Typowe zawartości [mg/kg s.m.]	Ekstremalne zawartości [mg/kg 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

Stężenie metali ciężkich w popiele wzrasta średnio cztero-, pięciokrotnie wskutek zmniejszenia masy odpadu. Łączna zawartość metali ciężkich w popiołach może wynosić wagowo do 2,5% suchej masy.

Popiół z elektrofiltru ma postać mialkiego mineralnego pyłu w kolorze od jasno- do ciemnoszarego oraz w kolorze jasnobrązowym. Składnikami popiołów są przede wszystkim tlenki: SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 , CaO , MgO , Na_2O , K_2O i TiO_2 . Na powierzchni cząstek popiołu kondensują metale ciężkie oraz są absorbowane wielopierścieniowe węglowodory aromatyczne (WWA). Opady atmosferyczne wymywają z powierzchni cząstek te związki, które przenikają następnie do gleby i wód gruntowych. Z tego powodu lokowanie popiołów ze spalania na składowiskach jest kłopotliwe ze względu na konieczność zabezpieczenia przed pyleniem wtórnym i izolowania wód gruntowych przed skażeniem.

Glinokrzemianowy skład chemiczny popiołów i amorficzna struktura fazowa czynią je atrakcyjnym materiałem w przemyśle cementowym, drogownictwie, budownictwie i rolnictwie, a także w zaawansowanych technologiach ceramicznych [<http://www.komunalny.pl>].

7.4.3. Metodyka wytwarzania

Najczęściej stosuje się dwa sposoby zagospodarowania pozostałości po spalaniu osadów ściekowych [Uzunow 2009]:

1. **Utwardzanie popiołów w kompozycjach cementowych (zestalenie) i składowaniu tych bloków na wysypiskach komunalnych.** Kompozycje cementowe można też wykorzystać do budowy dróg, głębokich fundamentów oraz obudowy wysypisk komunalnych. Ze względu na niebezpieczeństwo korozji konstrukcji betonowych i wymywanie się substancji toksycznych, w niektórych przypadkach kształtki cementowe pokrywa się warstwą hydrofobową, np. smołą lub asfaltami. Asfalty zabezpieczają zawarte w kompozycjach cząstki popiołów przed możliwością wymycia zanieczyszczeń. Stosuje się je do budowy spodnich warstw dróg.
2. **Witryfikacja (zeszkliwianie) popiołów.** Spiekanie powoduje powstawanie substancji szklistej na trwałe wiążącej niebezpieczne substancje w sposób całkowicie nierozpuszczalny dla roztworów wodnych. Sposób ten wymaga stosowania wysokich temperatur, w których część niebezpiecznych związków ulega uwolnieniu. Metoda ta ma zastosowanie do utylizacji popiołów zawierających większość metali ciężkich i ich związki (z wyjątkiem rtęci), lecz nie zawierających dioksyn. Najważniejszymi zaletami witryfikacji są rozkład substancji organicznej, „wbudowanie” w strukturę szkła składników nieorganicznych oraz odporność produktu na oddziaływanie czynników atmosferycznych.

Witryfikacja stosowana jest do przemysłowej produkcji keramzytu wykorzystwanego w produkcji elementów budowlanych, jako materiał izolacyjny (izolacje cieplne), do wykonywania drenaży oraz w ogrodnictwie. Keramzyt otrzymywany jest z naturalnej gliny przez formowanie granulatu i spiekanie w temperaturze ok. 1150 °C w piecach obrotowych.

Proces zeszkliwienia zastosowano również do neutralizacji substancji niebezpiecznych zawartych w brykietach. Opracowany sposób polega na brykietowaniu popiołów ze spalania osadów ściekowych łącznie z dodatkowymi składnikami, następnie brykietowaniu utworzonej mieszaniny oraz spiekaniu otrzymanych brykietów.

Składniki mieszaniny przeznaczonej do scalania w prasie walcowej zawierają ok. 50% popiołów oraz dodatki w postaci pyłów krzemionkowych oraz rozdrobnionego odpadu szklanego. Pył krzemionkowy o frakcji do 0,063 mm (odpad z produkcji kruszyw krzemionkowych) dodaje się wagowo w ilości ok. 40% mieszanki, rozdrobniony odpad szklany zaś w postaci pyłu o frakcji do 0,2 mm, w ilości ok. 10%.

Pył krzemionkowy w procesie syntezy termicznej tworzy strukturę krzemianową, w którą wbudowują się związki metali ciężkich znajdujące się w popiołach. Związki te tworząc odpowiednie krzemiany „są uwięzione” w brykiecie w sposób trwały. Nie istnieje zatem niebezpieczeństwo ich wymywania i migracji do otoczenia, nawet podczas rozkruszenia brykietu [Kępyś 2010].

Obecne w brykietach odpady szklane (zużyte kineskopy, lampy oświetleniowe, szkło gospodarcze) pełnią funkcję topnika i mają podobną do pyłów krzemionkowych strukturę materiałową. Zastosowanie topnika jest korzystne ze względu na obniżenie temperatury reakcji syntezy termicznej.

Proces ujednorodnienia mieszaniny polegał na mieszaniu składników w mieszarce łopatkowej oraz dodawaniu porcjami wody, aż do uzyskania konsystencji o wilgotności 5 – 6%.

Brykietowanie utworzonej mieszaniny wykonano w prasie walcowej z zasobnikiem ślimakowym. Określono następujące parametry pracy urządzenia:

- prędkość obwodowa walców, $v_w = 0,3$ m/s,
- prędkość obrotowa ślimaka, $v_s = 80$ obr/min,
- wartość nacisku jednostkowego, $p = 135$ MPa,
- moment obrotowy, $M_o = 28$ kNm,
- szczelina między walcami, $a = 1,5$ mm.

Uzyskano brykiety w kształcie baryłkowatym, których objętość wynosiła ok. 25 cm^3 . Brykiety te skierowano do laboratoryjnego pieca komorowego. Spiekanie prowadzono w temperaturze $1100 \text{ }^\circ\text{C}$, przez 1,5 godziny. Po zakończeniu wityfikacji otrzymane wyroby przeznaczono do badań, mających na celu określenie ich właściwości oraz przydatności użytkowej.

7.4.4. Wyniki badań

Wyniki badań właściwości wyrobów wytworzonych z popiołów ze spalania osadów ściekowych zestawiono w tabelach 18 i 19.

Wykonane pomiary dotyczyły, m.in.:

- wytrzymałości mechanicznej,
- wymywalności substancji niebezpiecznych,
- wpływu czynników atmosferycznych.

Tabela 18. Wymywalność substancji niebezpiecznych

Pierwiastek	Wynik pomiaru [mg/dm^3]	Wartość dopuszczalna [mg/dm^3]
Kadm	0,003	<0,02
Rtęć	0,02	<0,05
Chrom	0,06	<0,5
Mirdź	0,07	<0,5
Nikiel	0,11	<0,5
Ołów	0,22	<0,5
Cynk	0,07	<2,0

Tabela 19. Wybrane właściwości wyrobów spiekanych

Lp.	Parametr	Jednostka	Wynik pomiarów	Wartości dopuszczalne dla keramzytu
1	Nacisk jednostkowy niszczący brykiety	MPa	4,5	> 0,8
2	Odporność na zrzut grawitacyjny	%	92,1	> 90,0
3	Gęstość nasypowa	kg/m ³	520,0	400,0–550,0
4	Mrozoodporność	%	1,1	< 2,0
5	Nasiąkliwość	%	15,2	< 37,0

W badaniach poszczególnych partii próbek stwierdzono dużą powtarzalność wyników pomiarów dotyczących właściwości fizycznych i mechanicznych badanych wyrobów. Wyroby spiekane mają wystarczające właściwości mechaniczne oraz są odporne na niekorzystne warunki atmosferyczne.

Uzyskano mniejsze od dopuszczalnych zawartości jonów metali ciężkich w wyciągach wodnych. Oznacza to, że produkt spiekania jest bezpieczny dla środowiska. Potwierdzono więc, że związki metali ciężkich są wbudowane na stałe w strukturę krystaliczną krzemianu.

Na podstawie wyników badań (tab. 19) stwierdzono, że otrzymane w procesie spiekania wyroby, zawierające popioły ze spalania osadów ściekowych, nadają się do szerokiego stosowania jako zamiennik keramzytu. Mogą być wykorzystane w budownictwie do produkcji lekkich betonów i zapraw ciepłochronnych oraz do wyrobu pustaków ściennych i stropowych.

8. WNIOSKI

Analiza przedstawionych w niniejszym opracowaniu obserwacji i wyników badań pozwoliła na sformułowanie następujących wniosków:

1. Zagospodarowanie rozdrobnionych odpadów produkcyjnych prowadzi do zmniejszenia zużycia surowców pierwotnych oraz liczby składowisk zanieczyszczających środowisko. Odpowiednią metodą przetwarzania jest brykietowanie.
2. Brykiety muszą spełniać wymogi odbiorców planujących ich utylizację przez nadanie im specyficznych właściwości fizyczno-chemicznych i mechanicznych.
3. Brykiety o dobrych właściwościach mechanicznych uzyskuje się przez scalanie mieszanki z ok. 8-procentowym dodatkiem lepiszcza w udziale masowym o wilgotności 5 – 10%. Na polepszenie odporności brykietów korzystnie wpływa również sezonowanie.
4. Stosowanie pras walcowych, zaopatrzonych w zespół formujący z gniazdami w kształcie „siodła”, zapewnia dużą wydajność w linii technologicznej produkcji brykietów. Nie mają one płaszczyzny podziału i łatwo opuszczają gniazda.
5. Zastosowanie metody elementów skończonych do symulacji zjawisk w procesach brykietowania pozwala określić rozkład gęstości i nacisków jednostkowych w trakcie zagęszczania.
6. Modelowanie komputerowe przynosi korzyści szybszego doboru parametrów roboczych brykietarek oraz geometrii wgłębień formujących, z uwzględnieniem wpływu tarcia zewnętrznego.
7. Zastosowane modele matematyczne Gursona oraz Drucker-Prager Cap dobrze odwzorowują sytuację rzeczywistą, pod warunkiem wcześniejszego skalibrowania na podstawie wyników badań laboratoryjnych.
8. Brykiety z popiołów energetycznych spełniają wymogi odnoszące się do kruszywa mineralnego na podbudowy drogowe. Należy jednak zapewnić szczelność podłoża pod warstwą kruszywa ze względu na możliwość wymywalności z brykietów zanieczyszczeń chemicznych.
9. Biobrykiety wytworzone z węgla i biomasy z dodatkiem melasy stanowią alternatywne paliwo energetyczne do spalania w przydomowych kotłach centralnego ogrzewania.
10. Brykiety wytworzone z pyłów ze spalania osadów ściekowych, a następnie spiekane w piecach obrotowych – są produktami bezpiecznymi dla środowiska. Obecne w nich substancje niebezpieczne nie ulegają ani degradacji, ani wypłukaniu.
11. Celowa jest kontynuacja prac badawczych dotyczących sposobów zagospodarowania odpadów przemysłowych, w tym niebezpiecznych dla środowiska, z wykorzystaniem brykietowania.

BIBLIOGRAFIA

- 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, vol. 65, 3: 787–795.
- BABANIN V.I., EREMIN A.Y. 2006. Briquetting fine-grained materials in ferroalloys production: practical experience and future prospects. *Metallurgist*, vol. 50, 5–6: 241–247.
- 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*, vol. 51, 1–2: 131–135.
- BASEGIO T, LEO A.P.B., BERNARDES A.M., BERGMANN C.P. 2009. Vitrification: An alternative to minimize environmental impact caused by leather industry wastes. *Journal of Hazardous Materials*, 165(1-3): 604–611.
- BEMBENEK M, GARA P., MACHNIK R. 2006. Kompaktowanie popiołów pochodzących z elektrofiltru w celu ograniczenia ich pylenia wtórnego. *Monografie Wydziału Inżynierii Mechanicznej i Robotyki AGH*, 32: 205–209.
- BIAŁOWIEC A., JANCZUKOWICZ W. 2009. Wykorzystanie popiołów. *Przegląd Komunalny*, 219.
- BOROWSKI G. (red.) 2005. *Gospodarka odpadami*. Wydawnictwo Ekoinżynieria, Lublin, 278 s.
- 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.
- BOROWSKI G., KUCZMASZEWSKI J. 2005b. Utylizacja drobnoziarnistych odpadów metalowych. *Monografia*. Wydawnictwo Politechniki Lubelskiej, 168 s.
- 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.
- BOROWSKI G. 2007b. The possibility of utilizing coal briquettes with a biomass. *Environment Protection Engineering*, vol. 33, 2: 79–86.
- BOROWSKI G. 2007c. Zastosowanie komputerowej analizy obrazu do badań struktury brykietów z materiałów drobnoziarnistych. *Postępy Nauki i Techniki*, 1: 17–24.
- BOROWSKI G. 2008. Badania właściwości mechanicznych brykietów węgla z biomasą. *Postępy Nauki i Techniki*, 2: 81–89.

- BOROWSKI G. 2009a. Badania brykietów węglowo-biomasowych wykorzystywanych do celów energetycznych. W: Kotowicz J. (red.) „Rynek ciepła 2009”, Wydawnictwo Kaprint, Lublin: 299–308.
- BOROWSKI G. 2009b. Possibilities of utilization of energy briquettes. In: Schwarz H., Leonowicz Z. (ed.) „Proceedings of the 8th International Conference on Environment and Electrical Engineering”. Published by Technical University of Cottbus, Germany: 110–113.
- BOROWSKI G. 2009c. Technologiczne aspekty brykietowania surowców energetycznych. W: Biegańska J., Landrat M. (red.) „Paliwa z odpadów 2009”, Politechnika Śląska w Gliwicach: 209–216.
- BOROWSKI G. 2009d. Określenie właściwości fizyczno-mechanicznych materiałów drobnoziarnistych w celu ich zagospodarowania. *Postępy Nauki i Techniki*, 3: 67–82.
- BOROWSKI G. 2010. Możliwości wykorzystania odpadów z energetyki do budowy dróg. *Inżynieria Ekologiczna*, 22: 52–62.
- BOROWSKI G., MIŁCZAK M. 2010. Badania przydatności brykietów z popiołów paleniskowych jako podbudowy drogowe. *Postępy Nauki i Techniki*, 4: 136–143.
- BOROWSKI G. 2011a. Analysis of density distribution in powder compaction. *Advances in Science and Technology*, 10: 159–168.
- BOROWSKI G. 2011b. Przetwarzanie popiołu ze spalania osadów ściekowych na materiał budowlany. *Inżynieria Ekologiczna*, 25: 251–258.
- 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.
- BORUK S., WINKLER I. 2009. Ecologically friendly utilization of coal processing waste as a secondary energy source. In: *Energy and Environmental Challenges to Security*. Springer Publishers: 251–259.
- BROECKMANN C., HOFTER A., PACKEISEN A. 2008. Cladding of briquetting tools by hot isostatic pressing for wear resistance. *International Journal of Powder Metallurgy*, vol. 44/5: 49–56.
- BULTMANN J.M. 2002. Multiple compaction of microcrystalline cellulose in a roller compactor. *European Journal of Pharmaceutics and Biopharmaceutics*, vol. 54: 59–64.
- 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.
- 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.
- COUBE O., BREWIN P. 2002. Modelling and numerical simulation of powder compaction. *Powder Metallurgy*, 45 (1): 18–19.

- 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.
- DEC R.T. 1999. Study of compaction process in roll press. *Proceedings of the Institute for Briquetting and Agglomeration*, 22: 207–218.
- DEC R.T. 2002. Optimizing and controlling roll press operating parameters. *Powder Handling & Processing*, vol. 14: 222–225.
- 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.
- DRZYMAŁA Z. 1993. *Industrial Briquetting – Fundamentals and Methods*. Studies in Mechanical Engineering. Elsevier Science Publishers, Amsterdam.
- DRZYMAŁA Z. 2000. Rozwój metod modelowania matematycznego procesu zagęszczania wybranych odpadów przemysłowych w prasach stempłowych. *Materiały III Forum Inżynierii Ekologicznej, Nałęczów*: 258–268.
- DRZYMAŁA Z., HRYNIEWICZ M. 1994. A new approach to brown coal binderless briquetting. *Proceedings of the 12th International Coal Preparation Congress*, Kraków: 377–383.
- DRZYMAŁA Z., HRYNIEWICZ M. 1999. O doskonaleniu konstrukcji układu zagęszczania pras walcowych do brykietowania drobnoziarnistych odpadów żelazonośnych. *Przegląd Mechaniczny*, 58(14): 8–13.
- 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.
- DZIK T. 2008. Teoretyczna i eksperymentalna analiza procesu scalania odpadów pochodzenia roślinnego. *Chemik: Nauka - Technika - Rynek*, 61(9): 450–452.
- EREMIN A.Y., BABANIN V.I., KOZLOVA S.Y. 2003. Requirement to indices of mechanical strength of briquets with binder. *Metallurgist*, 11: 32–38.
- 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.
- FLORE K., SCHOENHERR M., FEISE H. 2009. Aspects of granulation in the chemical industry. *Powder Technology*, vol. 189: 327–331.
- GALEN S., ZAVALIANGOS A. 2005. Strength anisotropy in cold compacted ductile and brittle powders. *Acta Materialia*, 53: 4801–4815.
- GNUTEK M., MOROŃ W., RYBAK W. 2002. Problematyka zapłonu i współzapłonu węgla i biomasy. *Czysta Energia*, 09.
- GUIGON P., SIMON O. 2003. Roll press design – influence of force feed systems on compaction. *Powder Technology*, 130: 41–48.

- GÓRALCZYK S., MAZELAA., UZUNOWE., NAZIEMIEC Z. 2009. Kruszywa lekkie z osadów ściekowych i odpadów mineralnych. Materiały Konferencji Kruszywa Mineralne. Szklarska Poręba.
- HAUGSTEN K.E., GUSTAVSON B. 2000. Environmental properties of vitrified fly ash from hazardous and municipal waste incineration. *Waste Management*, 20: 167–176.
- HEIMA. 2005. Zagadnienia procesowo-aparaturowe aglomeracji. Materiały IX Ogólnopolskiej Konferencji pt. „Kompleksowe i szczegółowe problemy inżynierii środowiska”. Politechnika Koszalińska.
- HEJFT R. 2002. Ciśnieniowa aglomeracja materiałów roślinnych. Wydawnictwo Instytutu Technologii Eksploatacji w Radomiu.
- HEJFT R. 2008. Peletowanie i brykietowanie w urządzeniach o niewielkiej wydajności. *Czysta Energia*, 80.
- HEJFT R., OBIDZIŃSKI S. 2006. Produkcja granulatów i brykietów w aspekcie cech jakościowych. *Czysta Energia*, 55.
- 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*, vol. 338: 110–118.
- HRYNIEWICZ M. 1997. Metoda doboru pras walcowych oraz opracowania założeń do ich modernizacji lub konstrukcji. *Zeszyty Naukowe AGH – Rozprawy i Monografie*, 58, Kraków.
- HRYNIEWICZ M. 2000. Model matematyczny procesu brykietowania drobnoziarnistych odpadów przemysłowych w prasie walcowej. Materiały III Forum Inżynierii Ekologicznej, Nałęczów: 269–276.
- HRYNIEWICZ M. 2002. Badania procesów przygotowania drobnoziarnistych odpadów żelazonośnych do recyklingu. Materiały IV Forum Inżynierii Ekologicznej, Nałęczów: 75–83.
- HRYNIEWICZ M. 2004. Możliwości zagospodarowania drobnoziarnistych odpadów metalonośnych. *Monografie Wydziału Inżynierii Mechanicznej i Robotyki AGH*, 23: 63–70.
- HRYNIEWICZ M., BEMBENEK M., GARA P. 2008. Dobór układu zagęszczania prasy walcowej do scalania materiału w dwustopniowej granulacji. *Chemik: Nauka - Technika - Rynek*, 61(9): 425–428.
- HRYNIEWICZ M., BOROWSKI G., KUCZMASZEWSKI J. 2003. Badania nad sposobem utylizacji odpadów poszlifierskich przemysłu łozyskowego. Materiały VII Międzynarodowej Konferencji „Recyklace Odpadu”, VŠB–TU Ostrawa: 95–102.
- HRYNIEWICZ M., GARA P., BEMBENEK M. 2008. Improvement of the calcium hydroxide sorbent production method. *Polish Journal of Environmental Studies*, vol. 17: 240–244.
- HRYNIEWICZ M., JANEWICZ A. 2008. Badania i rozwój konstrukcji prasy walcowej. *Problemy Eksploatacji*, 3: 143–151.

- HRYNIEWICZ M., JANEWICZ A., BOROWSKI G., KUCZMASZEWSKI J. 2004. Praktyczne aspekty utylizacji odpadów poszlifierskich przemysłu łożyskowego. Monografie Wydziału Inżynierii Mechanicznej i Robotyki AGH, 23: 79–85.
- HRYNIEWICZ M., JANEWICZ A., KOSTURKIEWICZ B. 2004. Brykietowanie osadów ściekowych w prasie walcowej. Monografie Wydziału Inżynierii Mechanicznej i Robotyki AGH, 23: 87–93.
- HRYNIEWICZ M., JANEWICZ A., KOSTURKIEWICZ B. 2006. Doskonalenie konstrukcji elementów formujących pras walcowych. Czasopismo Techniczne. Mechanika, 103(1): 131–137.
- HRYNIEWICZ M., JANEWICZ A., KOSTURKIEWICZ B., GARA P. 2003. Badania procesów scalania osadów szlamów konwertorowych. Inżynieria i Aparatura Chemiczna, 42(3): 73–74.
- HRYNIEWICZ M., KOSTURKIEWICZ B., JANEWICZ A. 2004. Wybrane zagadnienia doskonalenia konstrukcji i eksploatacji pras walcowych. Problemy Eksploatacji, 4: 63–70.
- HRYNIEWICZ M., KOSTURKIEWICZ B., JANEWICZ A. 2006. Scalanie drobnoziarnistych odpadów. Zeszyty Naukowe – Inżynieria Chemiczna i Procesowa. Politechnika Łódzka, 29: 89–98.
- HYCNAR J., FOLTYN R., OLKUSKI R., BLASCHKE S.A. 2005. Kierunki energetycznego wykorzystania drobnoziarnistych odpadów z wydobycia i wzbogacania węgla kamiennego. Materiały IX Ogólnopolskiej Konferencji pt. „Kompleksowe i szczegółowe problemy inżynierii środowiska”. Politechnika Koszalińska.
- HYCNAR 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.
- ISOBE Y., WANG Q., SAKAMOTO K. 2004. Utilization of coal-biomass briquette combustion ash for soil improvement. Environmental Science, vol. 17, 6: 431–438.
- KACZMARCZYK M., KRÓL E.E. 2007. Sposób zagospodarowywania odpadów przemysłowych. Patent PL 196075.
- KALEMBASA S., KALEMBASA D., GODLEWSKA A., KUZIEMSKA B. 2007. Sposób utylizacji odpadów energetycznych i osadów ściekowych. Patent PL 196106.
- KARBOWNICZEK M., SADOWSKIA., HRYNIEWICZ M. 2005. Możliwości zastosowania odpadów poszlifierskich z produkcji łożysk jako wsadu w piecu łukowym. Hutnik Wiadomości Hutnicze, 72(7-8): 371–377.
- 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.
- 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.

- KĘPYS W. 2010. Kruszywo z drobnoziarnistych odpadów niebezpiecznych. *Inżynieria Ekologiczna*, 23: 70–76.
- 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.
- 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.
- KOSTURKIEWICZ B. 2005b. Zagadnienie wykorzystania pras walcowych do zagospodarowania osadów ściekowych. *Ochrona Powietrza i Problemy Odpadów*, 39(4): 138–145.
- KOSTURKIEWICZ B. 2006a. Metoda zagospodarowania osadów ściekowych w przemyśle energetycznym. *Monografie Wydziału Inżynierii Mechanicznej i Robotyki AGH*, 32: 249–259.
- KOSTURKIEWICZ B. 2006b. Zagadnienie wykorzystania osadów ściekowych jako substytutu paliwa w piecach rusztowych. *Inżynieria i Aparatura Chemiczna*, 45(4): 90–91.
- KOSTURKIEWICZ B., HRYNIEWICZ M., JANEWICZ A., DRZYMAŁA Z. 2003. Badania nad przygotowaniem osadów ściekowych do utylizacji. *Inżynieria i Aparatura Chemiczna*, 42(3): 94–95.
- KOSTURKIEWICZ B., JANEWICZ A. 2002. Problem doboru konfiguracji układu zagęszczania prasy walcowej. *Zeszyty Naukowe Politechniki Białostockiej, Budowa i Eksploatacja Maszyn*, 9: 243–252.
- 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 Górniczej PAN*, vol. 3, 3–4: 317–330.
- KUBICA K. 2003. Spalanie biomasy i jej współspalanie z węglem – techniki, korzyści i bariery. *Materiały II Seminarium „Czysta i zielona energia – czyste powietrze w woj. śląskim”*, Katowice.
- KUBICA K., ŚCIAŻKO 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.
- KUCZYŃSKA L. 2008. Grudkowanie – forma przygotowania odpadów do wykorzystania lub unieszkodliwiania. *Chemik: Nauka - Technika - Rynek*, 61(9): 434–438.
- 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.
- LISZKA M., MAJCHRZAK H. 2005. Analiza efektów ekologicznych w procesie współspalania węgla i biomasy na przykładzie Elektrowni Opole. *Energetyka*, 3.

- LOGINOV YU.N., BOURKINE S.P., BABAILOV N.A. 2001. Cinematics and volume deformations during roll-press briquetting. *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 118, 1-3: 151–157.
- LORENZ U. 2005. Skutki spalania węgla kamiennego dla środowiska przyrodniczego i możliwości ich ograniczania. *Materiały Szkoły Eksploatacji Podziemnej. Sympozja i Konferencje nr 64*. Wyd. Instytutu Gospodarki Surowcami Mineralnymi i Energią PAN, Kraków: 97–112.
- LUTYŃSKI A. 2005. Wydzielanie ziaren węglowych z odpadów drobnoziarnistych. *Materiały IX Ogólnopolskiej Konferencji pt. „Kompleksowe i szczegółowe problemy inżynierii środowiska”*. Politechnika Koszalińska.
- MAJCHRZAK H., ŚCIAŻKO M., ZUWAŁA J. 2005. Produkcja energii odnawialnej w BOT Elektrownia Opole S.A. Stan obecny i perspektywy rozwoju. *Energetyka*, 5: 343–351.
- MI J., LI X.-J. 2006. Design and simulation analysis of industrial coal briquetting machine. *Science and Technology*, vol. 37, 5: 986–990.
- MOKRZYCKI E., ULIASZ-BOCHEŃCZYK A. 2006. Możliwości wykorzystania odpadów komunalnych jako paliw alternatywnych. *Wydawnictwo Instytutu Gospodarki Surowcami Mineralnymi i Energią PAN, Kraków*.
- NIEDZIÓŁKA I., ZUCHNIARZ A. 2006. Analiza energetyczna wybranych rodzajów biomasy pochodzenia roślinnego. *MOTROL – Motoryzacja i Energetyka Rolnictwa*, tom 8A: 232–237.
- NIESLER M. 2007. Laboratoryjne próby brykietowania pyłów odlewniczych. *Prace Instytutu Metalurgii Żelaza*, 59(2): 9–14.
- OETERS F., LIUYI Z., HAULER CH., LEITNER J. 2000. Laboratory experiments and process modelling of the melting and dissolution of low-density ferro-molybdenum in steel melts. *Steel Research*, vol. 71, 10: 381–390.
- 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*, vol. 65: 607–612.
- PAJAŁ T. 2005. Termiczne przekształcanie jako element systemu zagospodarowania odpadów komunalnych i osadów ściekowych. *Materiały VI Międzynarodowej Konferencji Naukowo-Technicznej nt. „Zarządzanie środowiskiem na terenach przemysłowych – nowoczesne systemy, techniki i technologie”*. Zakopane.
- PAJAŁ T. 2008. Spalanie osadów w atmosferze wzbogaconej w tlen. *Wodociągi – Kanalizacja*, 10.
- PAJAŁ T. 2009. Zagospodarowanie komunalnych osadów ściekowych w Polsce. *Wodociągi – Kanalizacja*, 67.
- PIOTROWSKI Z., ULIASZ-BOCHEŃCZYK A. 2008. Możliwości gospodarczego wykorzystania odpadów z kotłów fluidalnych. *Gospodarka Surowcami Mineralnymi*, tom 24, zeszyt 2/1.

- PISCIELLA P., CRISUCCI S., KARAMANOV A., PELINO M. 2001. Chemical durability of glasses obtained by vitrification of industrial wastes. *Waste Management*, 21: 1–9.
- PLEWAF., MYSŁEK Z. 2001. Zagospodarowanie odpadów przemysłowych w podziemnych technologiach górniczych. Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice.
- 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.
- 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.
- 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.
- ROBAK J., MATUSZEK K. 2008. Granulowanie paliwa z odpadów. *Chemik*, 9: 418–424.
- ROSIK-DULEWSKA Cz. 2008. Podstawy gospodarki odpadami. Wydawnictwo Naukowe PWN Warszawa.
- SCHNEIDER L.C.R., COCKS A.C.F. 2002. Experimental investigation of yield behaviour of metal powder compacts. *Powder Metallurgy*, 45(3): 237–245.
- SIMON O., GUIGON P. 2003. Correlation between powder-packing properties and roll press compact heterogeneity. *Powder Technology*, 130: 257–264.
- 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.
- 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.
- SIUTA J. 2002. Przyrodnicze użytkowanie odpadów. Instytut Ochrony Środowiska, Warszawa.
- SIUTA J. 2005. Rekultywacyjna efektywność osadów ściekowych na składowiskach odpadów przemysłowych. *Acta Agrophysica*, 5(2): 417–425.
- STOLARSKI M., SZCZUKOWSKI S., TWORKOWSKI J. 2003. Energetyczne wykorzystanie biomasy lignino-celulozowej pozyskiwanej z gruntów rolniczych. *Ekologia Praktyczna*, 5(14).
- SZPADT R. 2007. Kryteria wyboru rozwiązań technologicznych przetwarzania odpadów. *Przegląd Komunalny*, 188.
- 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.
- 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.

- ULBRICHT R. (red.) 2005. Energetyczne wykorzystanie biomasy. Materiały pokonferencyjne. Wydawnictwo Politechniki Opolskiej.
- UZUNOW E. 2009. Osady ściekowe w produkcji materiałów budowlanych. *Wodociągi – Kanalizacja*, 10(68).
- 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*, vol. 59: 527–536.
- 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.
- XU G.R., ZOU J.L., LI G.B. 2010. Stabilization of heavy metals in sludge ceramsite. *Water Research*, 44(9): 2930–2938.
- YEHIA K.A. 2007. Estimation of roll press design parameters based on the assessment of a particular nip region. *Powder Technology*, vol. 177: 148–153.
- ZAVALIANGOS A. 2002. Constitutive models for the simulation of P/M processes. *International Journal of Powder Metallurgy*, vol. 38, 2: 27–39.
- ZAVALIANGOS A. 2003. A numerical study of the development of tensile principal stresses during die compaction. *Particulate Science and Technology*, 21: 105–115.
- ZAVALIANGOS A., DEC R.T. 2007. Powder processing in the roller press – theory and practice. *Powder Handling & Processing*, vol. 1: 23–28.
- 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*.
- ZAWISTOWSKI J., ŚCIAŻKO M., RAIŃCZAK J., ROBAK J. 2003. Współspalanie z węglem biomasy i paliw alternatywnych. *Wyd. Instytutu Chemicznej Przeróbki Węgla w Zabrzu i Instytutu Gospodarki Surowcami Mineralnymi i Energią PAN. Zabrze-Kraków*.

Akty prawne:

Dyrektywa Parlamentu Europejskiego i Rady 2008/98/WE z dnia 19 listopada 2008 r. *Dziennik Urzędowy Unii Europejskiej* L 312/3.

Komunikat Komisji, Rady i Parlamentu Europejskiego w sprawie odpadów i produktów ubocznych. Komisja Wspólnot Europejskich. Bruksela, KOM(2007) 59 z dnia 21 lutego 2007 r.

Rozporządzenie Ministra Środowiska w sprawie katalogu odpadów z dnia 27 września 2001 r. *Dziennik Ustaw* nr 112, poz. 1206.

Ustawa o odpadach z dnia 27 kwietnia 2001 r., tekst ujednolicony w 2010 r. *Dziennik Ustaw* nr 185, poz. 1243.

Strony internetowe:

- <http://www.agroenergetyka.pl> – portal energetyki odnawialnej,
- <http://www.bg.agh.edu.pl> – Biblioteka Główna Akademii Górniczo-Hutniczej w Krakowie,
- <http://www.ekokarbotech.pl> – strona producenta biobrykietów,
- <http://www.ekologia.pl> – serwis informacyjny pozyskania energii,
- <http://www.ekoportal.gov.pl> – Centrum Informacji o Środowisku – jednostka Ministra Środowiska,
- <http://www.energia-odnawialna.net> – odnawialne źródła energii i ich zastosowanie,
- <http://www.imz.pl> – Instytut Metalurgii Żelaza w Gliwicach,
- <http://www.komarek.com> – strona producenta brykietciarek,
- <http://www.komunalny.pl> – serwis informacyjny zagospodarowania odpadów,
- <http://www.prawo.legeo.pl> – teksty ujednolicone ustaw, kodeksów i rozporządzeń,
- <http://www.proeko.biz> – strona producenta urządzeń do produkcji brykietów,
- <http://www.wipos.p.lodz.pl> – Wydział Inżynierii Procesowej i Ochrony Środowiska, Katedra Aparatury Procesowej, Politechnika Łódzka,
- <http://www.zuter.pl/lista.html> – Zakład Usług Technicznych i Recyklingu S.A. w Radomiu.

SŁOWNIK TERMINÓW

Adhezja (przyczepność) – przyklepanie się, tj. powierzchniowe łączenie się warstw dwóch różnych materiałów. Zależy od wzajemnego oddziaływania cząstek materiału, ścianek ograniczających materiał sypki i błonki wodnej, tworzącej się na powierzchni cząstek wilgotnego materiału sypkiego, rodzaju materiału oraz stanu powierzchni ścianek ograniczających. Dużą przyczepność wykazują zwłaszcza materiały wilgotne.

Aglomeracja – 1) proces łączenia drobnych cząstek materiału w większe skupiska; 2) operacja technologiczna mająca charakter wstępny przeprowadzana metodą spiekania, np. w hutnictwie rud żelaza.

Analiza sitowa – umożliwia określenie procentowego udziału mas poszczególnych frakcji ziaren materiału sypkiego przez rozdzielenie za pomocą sit. Zależy od masy próbki wykonuje się przesiew od razu w całej próbce lub kolejno w jej częściach, aż do przesiania całej próbki. Sita ustawia się jedno na drugim, kolejno od dołu sita o najmniejszych otworach, aż do sita o największych otworach na górze. Próbkę materiału umieszcza się na górnym sicie, przykrywa i wstrząsa kompletem sit ręcznie lub za pomocą wstrząsarki mechanicznej. Przesiewanie uważa się za zakończone, jeżeli po jednej minucie wstrząsania ubytek masy z każdego sita będzie mniejszy niż 0,1% masy próbki analitycznej.

Anizotropowość materiału – wykazywanie odmiennych właściwości fizycznych materiału (np. rozszerzalność termiczna, przewodnictwo elektryczne, naprężenia wewnętrzne) w zależności od kierunku oddziaływania czynnika zewnętrznego. Materiały anizotropowe wykazują różne właściwości w zależności od kierunku, w którym dana właściwość jest rozpatrywana.

Biobrykiet – brykiet powstały ze scalania mieszanki drobnych cząstek biomasy z węglem stanowiący paliwo ekologiczne przeznaczone do spalania w kotłach energetycznych. Zastosowanie biobrykietu ogranicza emisję SO_2 do atmosfery.

Biomasa – 1) masa organizmów żywych (roślin, zwierząt, mikroorganizmów) wyrażona w jednostkach wagowych; 2) ilość materii organicznej wytworzonej przez populację danego środowiska w jednostce czasu. Biomasa stanowi miarę produktywności biologicznej. Pozostawiona na powierzchni gleby w postaci mulczy (resztki poźniwne, zielony nawóz, chwasty) poprawia jej sprawność, a po przeoraniu i humifikacji stanowi próchnicę. Biomasa może być źródłem odnawialnych nośników energii. Racjonalne spalanie biomasy (np. w paleniskach fluidalnych) nie powoduje zwiększenia CO_2 w atmosferze i tylko w ograniczonym zakresie zwiększa stężenie SO_2 . Materiały i paliwa odpadowe

z biomasy (odpadki drewniane, trociny, kora, słoma, siano, darni, łęty, strąki fasoli, pestki, zepsute ziarno) mogą być spalane w sposób ekologicznie bezpieczny i efektywny energetycznie.

Biopaliwo – źródło energii otrzymywane z produktów roślinnych. W praktyce możliwe jest otrzymanie dwóch podstawowych rodzajów biopaliwa – alkoholi (ze zbóż, buraków cukrowych, ziemniaków) oraz olejów roślinnych (z rzepaku). Zaletą biopaliwa jest odnawialność jego zasobów.

Biopreparaty – aktywne mikroorganizmy (bakterie i drożdże) rozkładające substancje ropopochodne w technologii biologicznego usuwania olejów. Wprowadzenie biopreparatu odbywa się przez wielokrotne zraszanie powierzchniowe lub bezpośrednio do wewnątrz przyzmy składowej w ilości 1 dm³ na 1 m³ materiału. Biopreparaty powodują rozkład zarówno związków prostych, np. składników ropy naftowej, jak i silnie toksycznych związków aromatycznych oraz organicznych pochodnych węglowodorów.

Brykieciarka – urządzenie (prasa) do wytwarzania brykietów z materiałów sypkich. Stosowane są brykieciarki tłokowe, ślimakowe, stempłowe i walcowe.

Brykiet – regularna bryła materiału w kształcie obłym lub prostopadłościennym, otrzymana w procesie brykietowania materiału droбноziarnowego.

Brykiet jajowy – brykiet w kształcie obłym, zbliżonym do jaja, wytwarzany najczęściej w prasach walcowych.

Brykiet kostkowy – brykiet w kształcie zbliżonym do graniastosłupa z zaokrąglonymi narożnikami i krawędziami, wytwarzany najczęściej w prasach stempłowych (tłokowych).

Brykiet opałowy – brykiet energetyczny, którego kształt, własności i wielkości dostosowane są do celów ogrzewczych. Brykiet opałowy ma od 50 do 75 mm średnicy, czasami wykonany jest w postaci kostki. Brykiet spalany jest w tradycyjnych kotłach węglowych, piecach kaflowych i kominkach. Jego wartość opałowa jest zbliżona do pellets i mieści się w zakresie od 18-20 MJ/kg.

Brykiet węglowy – brykiet z miazła węglowego spojonego lepiszczem palnym (np. pakiem lub smołą) albo niepalnym (np. cementem, wapnem, gipsem, gliną). Może być też sprasowany bez lepiszcza.

Brykietowność – naturalna zdolność łączenia się drobnych ziaren materiału w większe skupienia w procesie brykietowania.

Brykietowanie – metoda scalania drobnych ziaren materiału w kawałki o wymaganym kształcie, wielkości i własnościach w wyniku wywierania nacisku przez urządzenie formujące. Uzyskane wyroby charakteryzuje duże zagęszczenie

materiału oraz odporność mechaniczna. Stosuje się brykietowanie bezlepiszczowe lub z lepiszczem.

Brykietowanie bezlepiszczowe – brykietowanie, na ogół wysokociśnieniowe, z wykorzystaniem międzycząsteczkowych sił wiążących, działających między zewnętrznymi warstwami łączonych ziaren (stosowane głównie do bardzo miękkiego węgla brunatnego).

Brykietowanie z lepiszczem – brykietowanie z wykorzystaniem sił przyczepności wytworzonych przez cienkie warstwy lepiszcza palnego (np. smoła, melasa) lub niepalnego (np. glina, gips), którym powleczono powierzchnię łączonych ziaren materiału. Lepiszczka wpływają na zwiększenie odporności mechanicznej brykietów.

Ekotechnologia – technologia przyjazna dla środowiska. Obejmuje technologie oczyszczania i neutralizacji odpadów przemysłowych gazowych, ciekłych i stałych oraz gospodarkę wodno-ściekową.

Emisja – proces wydzielania się zanieczyszczeń z ich źródeł powstawania.

Filtracja – zmniejszenie uwodnienia szlamów. Stosowana jest do odwadniania osadów w oczyszczalniach ścieków, galwanizerniach, garbarniach oraz zakładach przemysłu spożywczego.

Gospodarka odpadami – system zagospodarowania odpadów wytworzonych w procesach produkcyjnych lub składowanych w odpowiednio przygotowanych składowiskach. Obejmuje odzysk, unieszkodliwianie, zbieranie oraz transport odpadów. Podejmuje również kontrolę i przestrzeganie odpowiednich norm emisji szkodliwych związków chemicznych do atmosfery.

Granulowanie (granulacja) – proces wytwarzania z drobnych cząstek ciała stałego aglomeratów o zwiększonej wytrzymałości mechanicznej w stosunku do surowca. W wyniku granulacji otrzymuje się zwykle regularne granulki, o takich samych lub zbliżonych kształtach i wymiarach, najczęściej w przedziale od 2 do 12 mm. Granulacja może być realizowana w wyniku zastosowania zwiększonego ciśnienia (granulacja ciśnieniowa), w odpowiednio podwyższonej temperaturze (spiekanie) lub też bezciśnieniowo, w przesypującej się lub mieszanej warstwie materiału.

Grudkowanie – formowanie kulistych ziaren materiałów drobnoziarnistych w bębnoch obrotowych, zazwyczaj z równoczesnym ich spiekaniem.

Homogenizacja – wytwarzanie jednolitej mieszaniny z niemieszających się ze sobą w warunkach normalnych składników. Przeprowadza się w specjalnie przeznaczonych do tego celu urządzeniach zwanych homogenizatorami. Najczę-

ściej spotykane są homogenizatory wirnikowe oraz ciśnieniowe, w których produkt jest przeciskany przez wąskie szczeliny pod zwiększonym ciśnieniem.

Inżynieria środowiska – teoretyczna i stosowana wiedza techniczna w zakresie ochrony środowiska przyrodniczego przed degradacją. Obejmuje dostosowywanie środowiska do potrzeb człowieka, oczyszczanie poszczególnych zanieczyszczonych elementów środowiska, unieszkodliwianie odpadów (stałych, ciekłych, gazowych) oraz odzyskiwanie surowców.

Keramzyt – kruszywo otrzymywane z naturalnej gliny przez formowanie granulatów i spiekane w temperaturze ok. 1150 °C w piecach obrotowych. Wykorzystywane w produkcji elementów budowlanych, jako materiał izolacyjny (izolacje cieplne), do wykonywania drenaży oraz w ogrodnictwie.

Kohezja (spójność) – wzajemne przyciąganie się cząsteczek danej substancji wskutek sił międzycząsteczkowych.

Kompaktowanie – proces warstwowego zagęszczenia materiałów drobnoziarnistych, często przy użyciu pras walcowych z walcami o gładkiej powierzchni. Możliwe jest kompaktowanie bez lepiszcza lub z użyciem lepiszcza. Uzyskuje się płaskie wypraski o stosunkowo małej gęstości i wytrzymałości mechanicznej. Metodę tę stosuje się m.in. do utylizacji drobnoziarnistych odpadów żelazonośnych, stanowiących komponent wsadu pieców stalowniczych.

Kotły fluidalne – urządzenia technologiczne do wytwarzania energii elektrycznej i ciepłej, pozwalające na spalanie bardzo zapopielonego i zasiarczonego paliwa w sposób bezpieczny dla środowiska (skuteczność odsiarczania ok. 90%, odpopielania ok. 98%, odazotowania ok. 85%). Zachodzi w nich zjawisko fluidyzacji – mieszania cząstek węgla (o określonych wymiarach) z powietrzem (wprowadzanym do kotła z odpowiednią prędkością), aby uzyskać ruch turbulencyjny, zapewniający osiągnięcie maksymalnego styku powierzchni cząstek z powietrzem dla zwiększenia intensywności spalania.

Kruszywo mineralne – wydobyta ze złoża i rozdrobniona na frakcje kopalina użyteczna, mająca zastosowanie w gospodarce. Kruszywo mineralne stanowią najczęściej surowce skalne używane w budownictwie: granity, sjenity, bazalty, piaskowce, wapienie, gliny, żwiry oraz piaski.

Lepiszczce – środek wiążący dodawany celem polepszenia właściwości formowanych wyrobów. Zawartość lepiszcza stanowi najczęściej w zakresie od 5 do 10% składu masowego. Jako lepiszcza stosuje się dodatki nieorganiczne (bentonit, glina, gips, cement, wapno hydratyzowane, szkło wodne i żel krzemionkowy) oraz organiczne (asfalty, paki, smoły, węgle spiekające, pochodne celulozy, dekstryny, skrobie, cukier, woski, parafiny, ług sodowy, ługi posulfitowe i żywice).

Materiał drobnoziarnisty – surowce w postaci sypkiej lub zawiesiny, składające się z ziaren, których wymiary wynoszą najczęściej od 0,05 mm do 2,0 mm.

Matryca – wgłębna forma z wykrojem umożliwiającym uzyskanie wyrobu o zamierzonym kształcie i wymiarach, dla materiałów drobnoziarnistych przez zastosowanie nacisku.

Metale ciężkie – metale nieżelazne o ciężarze właściwym $> 4,5 \text{ g/cm}^3$, takie jak nikiel, rtęć, kadm, ołów, miedź, cyna, cynk i inne. W środowisku występują często ich związki, które w większych stężeniach są toksyczne. Uważa się, że największe potencjalne zagrożenie dla zdrowia ludzi stanowią ołów i kadm. Rośliny zawierają podwyższone ilości jednego lub kilku metali z powodu nadmiernego pobrania z gleby, bądź osadzania pyłów na ich częściach nadziemnych. Nagromadzenie metali ciężkich w pokarmie dla ludzi może być przyczyną wielu schorzeń i zatruć.

Metoda elementów skończonych (MES) – zaawansowana metoda rozwiązywania układów równań różniczkowych, opierająca się na podziale rozpatrywanego obszaru na skończone elementy (tzw. dyskretyzacja). Rozwiązanie jest przybliżane przez konkretne funkcje, a obliczenia prowadzone tylko dla węzłów tego podziału. Umożliwia przygotowanie realistycznej symulacji komputerowej projektowanego systemu.

Modelowanie matematyczne – opisanie zachowania jakiegoś układu (np. elektrycznego, mechanicznego, termodynamicznego) za pomocą równań matematycznych. Model matematyczny opisuje dany układ za pomocą zmiennych reprezentujących pewne właściwości układu. Właściwy model to grupa funkcji wiążących ze sobą różne zmienne opisujących powiązania między wielkościami w układzie.

Moduł rozdrabniania – średni wymiar cząstek lub stopień rozdrobnienia cząstek.

Mul – nies cementowany osad tworzący się w zbiornikach wodnych, zbudowany z mieszaniny pyłu o różnym składzie mineralnym (ziarna o średnicy od 0,01 do 0,1 mm), często z dodatkiem substancji organicznych.

Neutralizacja odpadów niebezpiecznych – zubojeżdanie szkodliwych właściwości odpadów stosując odpowiednie zabiegi techniczne np. rozdrabnianie, mieszanie, spiekanie, spalanie, przetapianie, składowanie itp., zob. unieszkodliwienie odpadów.

Niekonwencjonalne źródła energii (odnawialne nośniki energii) – nośniki energii, z których można otrzymać energię w sposób ciągły. Źródłem energii są wiatr (elektrownie wiatrowe, pompownie, kompresownie), woda (elektrownie wodne), słońce (kolektory płaskie, ogniwa fotowoltaiczne), źródła geoter-

malne (energia wnętrza ziemi) oraz biogaz, biomasa i biopaliwo. Są to ogromne zasoby, stale odnawiające się, w dużym stopniu oparte na oddziaływaniu energii słonecznej. Ich użytkowanie nie powoduje zakłóceń w środowisku naturalnym, ponieważ nie pozostawiają popiołów i nie emitują szkodliwych substancji. Mogą uzupełniać, a nawet zastępować, potrzeby energetyczne ze źródeł tradycyjnych (węgiel, ropa, gaz). Istnieje znaczne zapotrzebowanie na ten rodzaj energii w celu wykorzystania m.in. do ogrzewania, nawadniania oraz produkcji energii elektrycznej.

Odpad – każda substancja lub przedmiot, których posiadacz pozbywa się, zamierza się pozbyć lub do których pozbycia został zobowiązany. Materiały wymagające operacji przetworzenia w celu zmiany ich właściwości albo zawierające substancje niebezpieczne wymagające usunięcia są odpadami do momentu zakończenia procesu przetwórczego.

Odpady górnicze – należą do odpadów masowych, tzn. występują w szczególnie dużych ilościach. Dzielią się na odpady górnicze powstające w trakcie eksploatacji złoża oraz odpady przeróbcze, powstające w trakcie przeróbki kopaliny w zakładzie przeróbczym kopalni. Część odpadów górniczych jest gospodarczo wykorzystywana jako dodatek do podsadзки, podkład do rekultywacji terenów oraz w drogownictwie. Znaczna część jest lokowana na zwałowiskach przykopalnianych lub centralnych. Duże ilości odpadów poprzeroóbczych (poflotacyjnych) powstaje przy eksploatacji rud miedzi oraz cynku i ołowiu. Są one lokowane transportem hydraulicznym na tzw. stawy osadowe zlokalizowane na powierzchni terenu.

Odpady niebezpieczne – odpady, które ze względu na swoje pochodzenie, skład chemiczny, biologiczny i inne właściwości, stanowią zagrożenie dla ludzi lub środowiska. Właściwości odpadów niebezpiecznych określa się na podstawie właściwości ich składników. Składnikami odpadów są substancje chemiczne klasyfikowane jako niebezpieczne w ustawie o substancjach i preparatach chemicznych.

Odzysk surowca – ponowne użycie surowców do produkcji.

Osad ściekowy – produkt mechanicznego, biologicznego, chemicznego oczyszczania (w tym podczyszczania) ścieków bytowo-gospodarczych, przemysłowych, rolniczych, opadowych. Osady ściekowe mogą mieć konsystencję płynną, mazistą lub ziemistą, zależnie od charakteru osadu surowego i jego obróbki (transformacji). chemiczne i biologiczne właściwości osadów ściekowych zależą od rodzaju ścieków, sposobu ich oczyszczania i transformacji.

Pellets – walcowy granulaty o średnicy od 6 do 12 mm i długości około 50 mm. Wykorzystywany jest jako paliwo podawane automatycznie do palnika kotła

lub kominka. Podstawowe właściwości energetyczne jak wartość opałowa, zawartość popiołu, siarki i wilgoci są podobne jak w brykietach. Zaletą pellets jest możliwość jego transportu, przechowywania i dostarczania w sposób zbliżony do paliw płynnych.

Popioły lotne – lotna frakcja odpadowa ze spalaniu paliw w kotłach energetycznych. Są to mialkie pyły mineralne w kolorze od jasno- do ciemnoszarego lub jasnobrazowym. Składają się w przeważającej części z tlenków krzemu, glinu i żelaza. Zawierają różnego rodzaju pierwiastki śladowe jak: Ba, Cu, Sr, Ni, Cr, Zn, Cd, Mo, V, Se, Pb, As i inne oraz niewielką ilość niespalonego paliwa. Składnikami popiołów są przede wszystkim tlenki: SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 , CaO , MgO , Na_2O , K_2O i TiO_2 .

Popioły paleniskowe (żużel paleniskowy) – pozostająca na ruszcie frakcja odpadowa ze spalaniu paliw w kotłach energetycznych. Żużel często wykorzystuje się do produkcji materiałów budowlanych, rekultywacji i makroniwelacji terenów oraz budowy dróg i nasypów.

Prasa filtracyjna – urządzenie służące do rozdzielania zawiesin zawierających nieznaczne ilości cząstek stałych. Rozróżnia się prasy filtracyjne komorowe (służące do usuwania ciał stałych z zawiesin o dużej zawartości cieczy) oraz prasy filtracyjne ramowe (służące do usuwania cieczy z zawiesin o dużej zawartości ciał stałych).

Produkt uboczny – materiał przygotowany do dalszego wykorzystania, który jednak nie był celem procesu produkcyjnego, w ramach której może być myty, suszony, rafinowany lub homogenizowany oraz uzupełniany o pewne właściwości lub inne materiały.

Pył – małe cząstki ciała stałego, osiadające pod wpływem swojego ciężaru, ale mogące przez pewien czas pozostawać w zawieszeniu. Zazwyczaj przyjmuje się, że są to cząstki o średnicy poniżej 75 μm .

Pył węglowy – 1) bardzo drobne cząstki węgla, które jeśli są suche, łatwo wzbijają się w powietrze; 2) sortyment węgla suchego o ziarnach poniżej 1 mm.

Scalanie – zamierzony i trwały proces łączenia drobnych cząstek materiału w aglomeraty o określonym kształcie i wymiarach, uniemożliwiający rozkruszenie w dłuższym okresie sezonowania.

Sezonowanie – składowanie wyrobów w odpowiednich warunkach na powietrzu lub w pomieszczeniu w założonym okresie. Celem sezonowania jest osiągnięcie przez wyrób przydatności użytkowej, np. spadek wilgotności do wymaganej wartości.

Skład granulometryczny – ilościowy rozkład ziaren materiału pod względem ich wielkości. Wielkość ziaren jest określona wymiarami liniowymi: długością, szerokością i grubością, mierzonymi w dwóch wzajemnie prostopadłych do siebie płaszczyznach. Oznaczenie wykonuje się za pomocą klasyfikatora wielositowego, dobierając zestaw sit odpowiedni do zakresu wymiarowego cząstek.

Składowisko odpadów – prawnie zlokalizowany i urządzony obiekt zorganizowanego deponowania odpadów o znanych właściwościach. Wyróżnia się następujące rodzaje składowisk: zwałowisko, wysypisko, osadnik i wylewisko.

Spektrometr – urządzenie służące do określania składu chemicznego wszelkich materiałów. Umożliwia analizę jakościową, pozwalającą określić jakie pierwiastki występują w próbce, oraz analizę ilościową, wskazującą w jakich ilościach pierwiastki te występują. Pomiar polega na wzbudzeniu świecenia pierwiastków występujących w próbce i analizie powstałego w ten sposób widma.

Spiekanie – proces zachodzący przy podgrzaniu próbki do temperatury 0,4 – 0,85 temperatury topnienia. Zbiór stykających się ze sobą drobnych ziaren wiąże się wzajemnie po podgrzaniu. Towarzyszy temu skurcz całego układu i przejście sypkiego lub słabo związanego materiału ziarnistego w lity, wytrzymały polikryształ.

Stopień zagęszczenia – stosunek wysokości (objętości) początkowej materiału drobnoziarnistego do wysokości (objętości) po zakończeniu zagęszczenia. Brykiety powinny posiadać stopień zagęszczenia w granicach od 1,6 do 2,0. Znajomość stopnia zagęszczenia brykiету ułatwia dobór parametrów urządzenia formującego, np. prasy walcowej z zasilaniem grawitacyjnym.

Surowce energetyczne – surowce o dużej wartości opałowej (> 16 MJ/kg) spalane w kotłach umożliwiające uzyskanie energii cieplnej. Do surowców energetycznych zaliczamy węgiel kamienny, węgiel brunatny, koks oraz biomasę w postaci trocin, torfu, słomy itp., zob. *biobrykiety*.

Surowce mineralne – naturalne wytwory przyrody, pochodzące z głębi litosfery lub jej powierzchni, użytkowane przez człowieka dla różnych celów. W geologii i górnictwie surowce, które podlegają eksploatacji górniczej nazywamy kopalinami. Obecnie praktycznie wszystkie surowce mineralne są kopalinami, tzn. są przedmiotem wykorzystywania przez człowieka. Kopaliny dzieli się na kopaliny pospolite, występujące powszechnie na terenie całego kraju i mające znaczenie lokalne (żwiry, piaski – z wyjątkiem formierskich i szklarskich, niektóre gliny, ily itp.) oraz kopaliny podstawowe, mające istotne znaczenie dla gospodarki kraju, w tym rzadko występujące oraz unikatowe. Ze względu na stan skupienia, surowce mineralne dzielimy na ciekłe (ropa naftowa, solanki,

wody lecznicze i termalne), stałe (skały i minerały) oraz gazowe (gaz ziemny, metan). Klasyfikacja surowców mineralnych: 1) surowce energetyczne, służące przede wszystkim do wytwarzania energii (węgiel kamienny i brunatny, ropa naftowa, gaz ziemny, metan, uran); 2) surowce metaliczne, wykorzystywane przede wszystkim w przemyśle metalurgicznym, obejmujące wszystkie metale, głównie żelazo, aluminium, miedź, cynk i ołów; 3) surowce chemiczne wykorzystywane przede wszystkim w przemyśle chemicznym (sól kamienna, sole potasowe, siarka, baryt); 4) surowce skalno-budowlane, służące do szeroko rozumianego budownictwa i drogownictwa (granity, bazalty, marmury, żwiry, piaski, gliny).

Symulacja komputerowa – odtwarzanie zjawiska lub zachowania danego obiektu za pomocą jego modelu. Szczególnym rodzajem modelu jest model matematyczny zapisanego w postaci programu komputerowego. Techniki symulacyjne są szczególnie przydatne tam, gdzie analityczne wyznaczenie rozwiązania byłoby zbyt pracochłonne, a niekiedy nawet niemożliwe.

Szlam – roztwór wodny drobnych ziaren materiału pozostałego po obróbce przemysłowej. Często jest zanieczyszczony olejami, smarami, minerałami oraz metalami i ich związkami.

Termiczna utylizacja – proces spalania odpadów zawierających substancje niebezpieczne dla środowiska. W wyniku spalania powstają popioły zawierające często metale ciężkie i ich związki – należy je zagospodarować lub unieszkodliwić. Spalanie umożliwia unieszkodliwienie organizmów chorobotwórczych.

Ujednorodnienie – wytworzenie jednolitej mieszaniny z różnorodnych składników ciał stałych i ciekłych, zob. *homogenizacja*.

Unieszkodliwienie odpadów – poddawanie odpadów procesom przekształcania biologicznego, fizycznego lub chemicznego w celu doprowadzenia ich do stanu, który nie stwarza zagrożeń dla życia lub zdrowia ludzi oraz dla środowiska.

Utylizacja odpadów – wykorzystanie surowców odpadowych lub materiałów, które straciły wartość użytkową, np. makulatury w papiernictwie, złomu w hutnictwie czy fekaliów do nawożenia. Najczęstszym sposobem utylizacji jest spalanie. Czasem piece utylizacyjne są wykorzystywane do podgrzewania wody użytkowej.

Uzdatnianie odpadów – przekształcenie (transformacja) odpadowej masy do postaci mniej uciążliwej dla środowiska albo stanowiącej produkt użyteczny lub surowiec wtórny. Główne sposoby transformacji odpadów to: odwodnienie, neutralizacja odczynu, odsolenie, chemiczna dezaktywacja, detoksykacja, mineralizacja substancji organicznej i sterylizacja.

Walce brykietujące – element brykietarki walcowej o kształcie cylindra z rozmieszczonymi na powierzchni wgłębieniami formującymi. Między dwoma synchronicznie i przeciwbieżnie obracającymi się walcami zagęszczany jest materiał drobnoziarnisty w sposób ciągły. Walce umieszczone są poziomo (jeden obok drugiego) lub pionowo (jeden nad drugim).

Wilgotność ciała stałego – ilość zawartej w ciele stałym wody w procentach. Wodę tę można usunąć z ciała w procesie suszenia.

Witryfikacja (zeszklwienie) – powstawanie fazy szklistej na powierzchni wyrobu (wypraski) poddawanego spiekaniu w wysokiej temperaturze. Potencjalnie niebezpieczne substancje zawarte w wyprasce „są uwięzione” w sposób trwały. Nie istnieje zatem niebezpieczeństwo ich wymywania i migracji do otoczenia.

Wysypisko – prawnie usankcjonowany obiekt do składowania odpadów bytowo-gospodarczych, usuwanych z miast, osiedli wiejskich i ośrodków rekreacyjnych. Istnieją też wysypiska „dzikie” i wysypiska zaniechane. Tereny wysypisk „dzikich” i zaniechanych należy koniecznie poddać rekultywacji.

Zagęszczanie – proces technologiczny polegający na zwiększaniu gęstości materiału drobnoziarnistego. Umożliwia lepsze i ściślejsze wypełnienie naczynia lub matrycy formującej. W procesie usuwane są również pęcherzyki powietrza co zmniejsza porowatość i poprawia jednorodność materiału. Zagęszczanie może być prowadzone ręcznie (przez potrząsanie), mechanicznie (za pomocą prasy) lub próżniowo (odsysanie powietrza zawartego w materiale poprzez podłączenie pompy).

Zawiesina – układ niejednorodny, dwufazowy, w postaci cząstek jednego ciała rozproszonych (faza rozproszona) w drugim ciele (faza rozpraszająca), np. cząstek ciała stałego w gazie lub cząstek cieczy w cieczy. Jeżeli cząstki te są dostatecznie małe, mowa jest o układzie koloidalnym. Gęstość fazy rozproszonej w zawiesinach jest na ogół większa niż gęstość fazy rozpraszającej i z tego powodu rozproszone cząstki fazy stałej mają tendencję do sedimentacji (opadania).

Zestalenie – sposób scalania materiału drobnoziarnistego spoiwami mineralnymi, przede wszystkim cementem. Nie wymaga dużych nakładów inwestycyjnych i energii. Produkt zestalania może być stosowany jako kruszywo np. do niwelacji terenu w drogownictwie.

Zwałowisko odpadów – prawnie zlokalizowany i urządzony obiekt zorganizowanego deponowania odpadów kopalnianych lub innych masowych odpadów o stałej konsystencji.

Żużel – uboczny produkt wytopienia żelaza w wielkim piecu.

WYKAZ WAŻNIEJSZYCH OZNACZEŃ

α	–	kąt chwytu
β	–	kąt ekspansji zwrotnej
γ_w	–	kąt zagęszczania
μ	–	współczynnik kinetycznego tarcia zewnętrznego
θ	–	kąt tarcia
ρ	–	gęstość
ρ_0	–	gęstość początkowa materiału
ρ_s	–	gęstość w stanie zsypanym
ρ_u	–	gęstość pozorną
τ	–	naprężenia styczne
σ	–	naprężenie normalne
σ_w	–	naprężenia własne
ν	–	liczba Poissona
ν	–	jednostkowy opór zagęszczania
a	–	szczelina między walcami
B	–	szerokość czynna walców
E	–	moduł Younga
f	–	porowatość
H_p	–	wysokość początkowa zagęszczanego materiału
k	–	liczba wgłębień formujących walca
K	–	odporność brykietu na zrzut
K_0	–	współczynnik sprężystości podłużnej
l	–	przemieszczenie stempla
m	–	stopień rozdrobnienia
M	–	masa
M_o	–	moment obrotowy
M_s	–	masa całkowicie suchego ciała
M_w	–	masa wody zawartej w ciele
p	–	nacisk jednostkowy stempla
P	–	siła nacisku stempla
q_u	–	masa utrzęsiona
P_e	–	granica plastyczności
P_s	–	granica sprężystości
r	–	współczynnik rozbieżności
R	–	promień walców
R_0	–	promień walców w układzie zastępczym
s	–	stopień zagęszczania
S	–	szerokość pasma

t	–	czas zagęszczania
T	–	temperatura
T_s	–	siła styczna
U	–	zawartość wody
v_w	–	prędkość obwodowa walców
v_s	–	prędkość obrotowa ślimaka
V_b	–	objętość brykietu
V_l	–	objętość naczynia pomiarowego
w	–	wilgotność
W	–	wodoodporność

WYKAZ ILUSTRACJI

Rys. 1. Płytowa prasa filtracyjna	18
Rys. 2. Schemat ideowy brykieciarki tłokowej	23
Rys. 3. Schemat ideowy brykieciarki ślimakowej	24
Rys. 4. Budowa brykieciarki stemplowej	25
Rys. 5. Schemat ideowy brykieciarki stemplowej	26
Rys. 6. Laboratoryjna brykieciarka stemplowa RUF 2,2/2500/60	27
Rys. 7. Schemat brykieciarki walcowej	28
Rys. 8. Zasada pracy brykieciarki walcowej	28
Rys. 9. Brykieciarki z walcami roboczymi umieszczonymi: a – poziomo, b – pionowo	30
Rys. 10. Widok ogólny laboratoryjnej prasy walcowej LPW 450	31
Rys. 11. Schemat funkcjonalny laboratoryjnej prasy walcowej LPW 450	32
Rys. 12. Koncepcja przemysłowej linii technologicznej do brykietowania surowców energetycznych	33
Rys. 13. Koncepcja przemysłowej linii technologicznej do brykietowania popiołów	35
Rys. 14. Koncepcja przemysłowej linii technologicznej do brykietowania popiołów ze spalania osadów ściekowych	36
Rys. 15. Schemat obciążeń wywieranych na brykiet oraz wydzielony element jego objętości	38
Rys. 16. Uproszczony schemat procesu scalania w prasach walcowych	40
Rys. 17. Schemat układu zagęszczania prasy walcowej	41
Rys. 18. Porównanie symulacji procesu brykietowania i kompaktowania	44
Rys. 19. Rozkład stopnia zagęszczenia materiału w procesach brykietowania i kompaktowania	45
Rys. 20. Rozkład naprężeń poprzecznych w procesach brykietowania i kompaktowania	45
Rys. 21. Resztkowe naprężenia w brykietach opuszczających wgłębienia formujące	46
Rys. 22. Obszar zastosowań modelu matematycznego Drucker-Prager Cap	48
Rys. 23. Wpływ oporów tarcia na maksymalną siłę ściskania w prasie stemplowej	50
Rys. 24. Symulacja stopnia zagęszczenia brykietu	51
Rys. 25. Rozkład stopnia zagęszczenia w przekroju poprzecznym brykietu	52
Rys. 26. Wypraski uzyskane w wyniku kompaktowania odpadów drobnoziarnistych	55

Rys. 27. Kształt granulek	56
Rys. 28. Granulowanie na talerzu granulacyjnym	57
Rys. 29. Porównanie kształtu i rozmiarów brykietów z odpadów	58
Rys. 30. Kształt i wymiary ziaren poszlifierskich	59
Rys. 31. Suszarka bębnowa	62
Rys. 32. Klasyfikacja mieszadeł	62
Rys. 33. Ważniejsze typy mieszarek	63
Rys. 34. Laboratoryjna prasa hydrauliczna PH-300	66
Rys. 35. Zespół formujący w prasie PH-300	66
Rys. 36. Konstrukcja zespołu formującego laboratoryjnej prasy stemplowej PH-300	69
Rys. 37. Brykiety w kształcie „siodła” uzyskane z brykieciarki walcowej	70
Rys. 38. Zależność między stopniem zagęszczenia a wilgotnością przy stosowa- nych naciskach prasy w procesie brykietowania odpadów szlifierskich	73
Rys. 39. Wilgotnościomierz laboratoryjny KETT FD-620	74
Rys. 40. Stanowisko do analizy obrazu	75
Rys. 41. Struktura brykiety wykonanego z materiału bez dodatków wiążących ...	77
Rys. 42. Struktura brykiety wykonanego z dodatkiem 5% kwasu octowego	77
Rys. 43. Struktura brykiety wykonanego z dodatkiem 8% melasy	77
Rys. 44. Stanowisko badawcze z maszyną wytrzymałościową ZWICK Z100	81
Rys. 45. Przykład wyników badań ściskania brykietów w maszynie wytrzymało- ściowej ZWICK Z100	81
Rys. 46. Zależność wytrzymałości na ściskanie od czasu sezonowania brykietów ..	99
Rys. 47. Przebieg krzywych ściskania w próbie powodującej zniszczenie brykiety .	99

WYKAZ TABEL

Tabela 1.	Dane techniczne dwóch różnych typów brykociarek	30
Tabela 2.	Wyniki zastosowania modelu Druckera-Pragera do symulacji procesu kompaktowania	43
Tabela 3.	Określenie współczynników modelu Drucker-Prager Cap	49
Tabela 4.	Pomiary doświadczalne dla wybranej partii próbek	50
Tabela 5.	Podstawowe rodzaje domieszek i efekty ich zastosowania	65
Tabela 6.	Podstawowe dane techniczne pras walcowych do brykietowania odpadów drobnoziarnistych	67
Tabela 7.	Podstawowe rodzaje pierścieni formujących	70
Tabela 8.	Wykorzystanie popiołów lotnych i żużli do budowy dróg	86
Tabela 9.	Skład chemiczny popiołów lotnych z kotłów konwencjonalnych i fluidalnych	88
Tabela 10.	Skład chemiczny popiołu ze spalania biomasy drzewnej w porównaniu do węgla oraz mieszanki węgla i biomasy	89
Tabela 11.	Właściwości fizyczne popiołu ze spalania biomasy drzewnej	89
Tabela 12.	Cechy fizyczne przygotowanych do badań partii brykietów	91
Tabela 13.	Właściwości mechaniczne brykietów z uwzględnieniem sezonowania ...	91
Tabela 14.	Właściwości węgla i biomasy drzewnej	94
Tabela 15.	Wyniki pomiarów wybranych parametrów brykietowania	97
Tabela 16.	Właściwości mechaniczne brykietów świeżych i sezonowanych w zależności od wilgotności mieszczanki	98
Tabela 17.	Zawartość metali ciężkich w osadach ściekowych	102
Tabela 18.	Wymywalność substancji niebezpiecznych	104
Tabela 19.	Wybrane właściwości wyrobów spiekanych	105

WYKORZYSTANIE BRYKIETOWANIA DO ZAGOSPODAROWANIA ODPADÓW

Steszczenie

W monografii przedstawiono efektywne sposoby wykorzystania drobnoziarnistych odpadów produkcyjnych, w tym niebezpiecznych dla środowiska. Potwierdzono, że istnieje możliwość skutecznej utylizacji tych odpadów przez scalanie metodą brykietowania.

W procesie scalania materiałów drobnoziarnistych istotne jest uzyskanie brykietów o ściśle określonych właściwościach, dostosowanych do planowanego wykorzystania. Przedstawiona w niniejszej monografii metodyka badawcza umożliwia uzyskanie zagęszczonego i jednocześnie zbrylonego wyrobu, o żądanym kształcie i wymiarach oraz określonej wytrzymałości mechanicznej.

Treść monografii obejmuje zagadnienia przygotowania surowców do brykietowania, w tym charakterystykę i wybrane właściwości fizyczno-mechaniczne materiałów sypkich. Opisano metody i urządzenia przetwórcze oraz sposób przygotowania mieszanki. Określono niektóre parametry procesu brykietowania zarówno w badaniach laboratoryjnych, jak i symulacyjnych, z zastosowaniem metody elementów skończonych. Przedstawiono procedurę badawczą weryfikacji jakości uzyskanych brykietów zapewniającą spełnienie określonych przez odbiorców wymogów. Zaproponowano również przykładowe koncepcje przemysłowych linii technologicznych, wykorzystujące brykietarki walcowe do formowania drobnoziarnistych materiałów odpadowych.

W końcowej części opracowania przedstawiono analizy badawcze trzech najbardziej charakterystycznych sposobów wykorzystania brykietów z odpadów oraz potencjalne efekty użytkowe:

- w budownictwie jako zamiennika kruszywa na podbudowy drogowe,
- w energetyce jako alternatywne źródło energii cieplnej,
- w inżynierii środowiska do utylizacji substancji niebezpiecznych.

Opracowanie kończą wnioski. Obrazują one najważniejsze efekty przeprowadzonych analiz na podstawie danych literaturowych oraz wyników własnych prac badawczych. Potwierdzają osiągnięcie celu założonego we wstępie monografii. Wskazują również celowość kontynuacji prac badawczych w celu dalszego rozwoju inżynierii wytwarzania wyrobów przemysłowych.

USING BRIQUETTING FOR WASTE MANAGEMENT

Summary

The monograph presents the effective ways of utilizing the manufacturing powder waste, including this hazardous for the environment. It was confirmed that there is possibility of efficient disposal of such waste by using briquetting method for integration.

In the powder material integration process a strictly defined property of briquettes is significant to obtain considerable designed utilization. Research methodology presented in this book enables to acquire compacted as well as agglomerated product. It has desired shape, size and mechanical properties.

The content of the monograph concerns the problem of material preparation for briquetting, including specification and selected physico-mechanical properties of powders. The methods, manufacturing devices and the process of preparing composition were also described. Some parameters of briquetting were determined using laboratory and computational methods. Finite elements method was employed as well. Research procedure to verify the quality of briquettes was presented, providing to achieve demands defined by recipients. Sample conceptions of industrial technological lines were proposed with briquetting roller machines being used to form powder waste materials.

At the end of the book the research analysis for the three most characteristic utilizing methods of briquettes made from waste as well as the potential practical effects were presented as follow:

- in building engineering as ballast substitute for roads substructure,
- in power engineering as alternative source of thermal energy,
- in environmental engineering to utilize hazardous substances.

The study ends with conclusions. They provide the main effects of conducted analysis based on literature data and own research work as well. They also confirm achieving the goal established in the introduction of this monograph. The efficiency of investigations follow-up was suggested for further development of processing engineering of industrial products.

ZAŁĄCZNIKI

WYKAZ ZAŁĄCZNIKÓW

Załącznik 1. Katalog odpadów wraz z listą odpadów niebezpiecznych	137
Załącznik 2. Składniki odpadów, które kwalifikują je jako odpady niebezpieczne	167
Załącznik 3. Właściwości odpadów, które powodują, że odpady są niebezpieczne	169
Załącznik 4. Procesy odzysku	170
Załącznik 5. Procesy unieszkodliwiania odpadów	171
Załącznik 6. Schemat blokowy programu symulacji komputerowej brykietowania	172
Załącznik 7. Procedura doboru elementów formujących prasy walcowej	173
Załącznik 8. Schemat instalacji doświadczalnej do badań procesu brykietowania	174
Załącznik 9. Schemat instalacji doświadczalnej do badań procesu granulowania	175

ZAŁĄCZNIK 1. Katalog odpadów wraz z listą odpadów niebezpiecznych

Odpady niebezpieczne oznakowano indeksem górnym w postaci gwiazdki „*” przy kodzie rodzaju odpadów. Dwie pierwsze cyfry kodu określają źródło powstawania odpadów (Dz.U. 2001, Nr 112, poz. 1206).

Kod	Grupy, podgrupy i rodzaje odpadów
01	Odpady powstające przy poszukiwaniu, wydobywaniu, fizycznej i chemicznej przeróbce rud oraz innych kopalin
01 01	Odpady z wydobywania kopalin
01 01 01	Odpady z wydobywania rud metali (z wyłączeniem 01 01 80)
01 01 02	Odpady z wydobywania kopalin innych niż rudy metali
01 01 80	Odpady skalne z górnictwa miedzi, cynku i ołowiu
01 03	Odpady z fizycznej i chemicznej przeróbki rud metali
01 03 04*	Odpady z przeróbki rud siarczkowych powodujące samoczynne zakwaszenie środowiska w czasie składowania
01 03 05*	Inne odpady poprzarobcze zawierające substancje niebezpieczne (z wyłączeniem 01 03 80)
01 03 06	Inne odpady poprzarobcze niż wymienione w 01 03 04, 01 03 05, 01 03 80 i 01 03 81
01 03 07*	Inne odpady zawierające substancje niebezpieczne z fizycznej i chemicznej przeróbki rud metali
01 03 08	Odpady w postaci pyłów i proszków inne niż wymienione w 01 03 07
01 03 09	Czerwony szlam powstający przy produkcji tlenku glinu inny niż wymieniony w 01 03 07
01 03 80*	Odpady z flotacyjnego wzbogacania rud metali nieżelaznych zawierające substancje niebezpieczne
01 03 81	Odpady z flotacyjnego wzbogacania rud metali nieżelaznych inne niż wymienione w 01 03 80
01 03 99	Inne niewymienione odpady
01 04	Odpady z fizycznej i chemicznej przeróbki kopalin innych niż rudy metali
01 04 07*	Odpady zawierające niebezpieczne substancje z fizycznej i chemicznej przeróbki kopalin innych niż rudy metali
01 04 08	Odpady żwiru lub skruszone skały inne niż wymienione w 01 04 07
01 04 09	Odpadowe piaski i ropy
01 04 10	Odpady w postaci pyłów i proszków inne niż wymienione w 01 04 07
01 04 11	Odpady powstające przy wzbogacaniu soli kamiennej i potasowej inne niż wymienione w 01 04 07
01 04 12	Odpady powstające przy płukaniu i oczyszczaniu kopalin inne niż wymienione w 01 04 07 i 01 04 11
01 04 13	Odpady powstające przy cięciu i obróbce postaciowej skał inne niż wymienione w 01 04 07
01 04 80*	Odpady z flotacyjnego wzbogacania węgla zawierające substancje niebezpieczne
01 04 81	Odpady z flotacyjnego wzbogacania węgla inne niż wymienione w 01 04 80
01 04 82*	Odpady z flotacyjnego wzbogacania rud siarkowych zawierające substancje niebezpieczne
01 04 83	Odpady z flotacyjnego wzbogacania rud siarkowych inne niż wymienione w 01 04 82
01 04 84*	Odpady z flotacyjnego wzbogacania rud fosforowych (fosforytów, apatytów) zawierające substancje niebezpieczne
01 04 85	Odpady z flotacyjnego wzbogacania rud fosforowych (fosforytów, apatytów) inne niż wymienione w 01 04 84

Kod	Grupy, podgrupy i rodzaje odpadów
01 04 99	Inne niewymienione odpady
01 05	Płuczki wiertnicze i inne odpady wiertnicze
01 05 04	Płuczki i odpady wiertnicze z odwiertów wody słodkiej
01 05 05*	Płuczki i odpady wiertnicze zawierające ropę naftową
01 05 06*	Płuczki i odpady wiertnicze zawierające substancje niebezpieczne
01 05 07	Płuczki wiertnicze zawierające baryt i odpady inne niż wymienione w 01 05 05 i 01 05 06
01 05 08	Płuczki wiertnicze zawierające chlorki i odpady inne niż wymienione w 01 05 05 i 01 05 06
01 05 99	Inne niewymienione odpady
02	Odpady z rolnictwa, sadownictwa, upraw hydroponicznych, rybołówstwa, leśnictwa, łowiectwa oraz przetwórstwa żywności
02 01	Odpady z rolnictwa, sadownictwa, upraw hydroponicznych, leśnictwa, łowiectwa i rybołówstwa
02 01 01	Osady z mycia i czyszczenia
02 01 02	Odpadowa tkanka zwierzęca
02 01 03	Odpadowa masa roślinna
02 01 04	Odpady tworzyw sztucznych (z wyłączeniem opakowań)
02 01 06	Odchody zwierzęce
02 01 07	Odpady z gospodarki leśnej
02 01 08*	Odpady agrochemikaliów zawierające substancje niebezpieczne, w tym środki ochrony roślin I i II klasy toksyczności (bardzo toksyczne i toksyczne)
02 01 09	Odpady agrochemikaliów inne niż wymienione w 02 01 08
02 01 10	Odpady metalowe
02 01 80*	Zwierzęta padłe i ubite z konieczności oraz odpadowa tkanka zwierzęca, wykazujące właściwości niebezpieczne
02 01 81	Zwierzęta padłe i odpadowa tkanka zwierzęca stanowiące materiał szczególnego i wysokiego ryzyka inne niż wymienione w 02 01 80
02 01 82	Zwierzęta padłe i ubite z konieczności
02 01 83	Odpady z upraw hydroponicznych
02 01 99	Inne niewymienione odpady
02 02	Odpady z przygotowania i przetwórstwa produktów spożywczych pochodzenia zwierzęcego
02 02 01	Odpady z mycia i przygotowywania surowców
02 02 02	Odpadowa tkanka zwierzęca
02 02 03	Surowce i produkty nienadające się do spożycia i przetwórstwa
02 02 04	Osady z zakładowych oczyszczalni ścieków
02 02 80*	Odpadowa tkanka zwierzęca wykazująca właściwości niebezpieczne
02 02 81	Odpadowa tkanka zwierzęca stanowiąca materiał szczególnego i wysokiego ryzyka, w tym odpady z produkcji pasz mięsno-kostnych inne niż wymienione w 02 02 80
02 02 82	Odpady z produkcji mączki rybnej inne niż wymienione w 02 02 80
02 02 99	Inne niewymienione odpady
02 03	Odpady z przygotowania, przetwórstwa produktów i używek spożywczych oraz odpady pochodzenia roślinnego, w tym odpady z owoców, warzyw, produktów zbożowych, olejów jadalnych, kakao, kawy, herbaty oraz przygotowania i przetwórstwa tytoniu, drożdży i produkcji ekstraktów drożdżowych, przygotowywania i fermentacji melasy (z wyłączeniem 02 07)

Kod	Grupy, podgrupy i rodzaje odpadów
02 03 01	Szlamy z mycia, oczyszczania, obierania, odwirowywania i oddzielania surowców
02 03 02	Odpady konserwantów
02 03 03	Odpady poekstrakcyjne
02 03 04	Surowce i produkty nienadające się do spożycia i przetwórstwa
02 03 05	Osady z zakładowych oczyszczalni ścieków
02 03 80	Wytłoki, osady i inne odpady z przetwórstwa produktów roślinnych (z wyłączeniem 02 03 81)
02 03 81	Odpady z produkcji pasz roślinnych
02 03 82	Odpady tytoniowe
02 03 99	Inne niewymienione odpady
02 04	Odpady z przemysłu cukrowniczego
02 04 01	Osady z oczyszczania i mycia buraków
02 04 02	Nienormatywny węglan wapnia oraz kreda cukrownicza (wapno defekacyjne)
02 04 03	Osady z zakładowych oczyszczalni ścieków
02 04 80	Wysłodki
02 04 99	Inne niewymienione odpady
02 05	Odpady z przemysłu mleczarskiego
02 05 01	Surowce i produkty nieprzydatne do spożycia oraz przetwarzania
02 05 02	Osady z zakładowych oczyszczalni ścieków
02 05 80	Odpadowa serwatka
02 05 99	Inne niewymienione odpady
02 06	Odpady z przemysłu piekarniczego i cukierniczego
02 06 01	Surowce i produkty nieprzydatne do spożycia i przetwórstwa
02 06 02	Odpady konserwantów
02 06 03	Osady z zakładowych oczyszczalni ścieków
02 06 80	Nieprzydatne do wykorzystania tłuszcze spożywcze
02 06 99	Inne niewymienione odpady
02 07	Odpady z produkcji napojów alkoholowych i bezalkoholowych (z wyłączeniem kawy, herbaty i kakao)
02 07 01	Odpady z mycia, oczyszczania i mechanicznego rozdrabniania surowców
02 07 02	Odpady z destylacji spirytualiów
02 07 03	Odpady z procesów chemicznych
02 07 04	Surowce i produkty nieprzydatne do spożycia i przetwórstwa
02 07 05	Osady z zakładowych oczyszczalni ścieków
02 07 80	Wytłoki, osady moszczowe i pofermentacyjne, wywary
02 07 99	Inne niewymienione odpady
03	Odpady z przetwórstwa drewna oraz z produkcji płyt i mebli, masy celulozowej, papieru i tektury
03 01	Odpady z przetwórstwa drewna oraz z produkcji płyt i mebli
03 01 01	Odpady kory i korka
03 01 04*	Trociny, wióry, ścinki, drewno, płyta wiórowa i fornir zawierające substancje niebezpieczne
03 01 05	Trociny, wióry, ścinki, drewno, płyta wiórowa i fornir inne niż wymienione w 03 01 04

Kod	Grupy, podgrupy i rodzaje odpadów
03 01 80*	Odpady z chemicznej przeróbki drewna zawierające substancje niebezpieczne
03 01 81	Odpady z chemicznej przeróbki drewna inne niż wymienione w 03 01 80
03 01 82	Osady z zakładowych oczyszczalni ścieków
03 01 99	Inne niewymienione odpady
03 02	Odpady powstające przy konserwacji drewna
03 02 01*	Środki do konserwacji i impregnacji drewna niezawierające związków chlorowcoorganicznych
03 02 02*	Środki do konserwacji i impregnacji drewna zawierające związki chlorowcoorganiczne
03 02 03*	Metaloorganiczne środki do konserwacji i impregnacji drewna
03 02 04*	Nieorganiczne środki do konserwacji i impregnacji drewna
03 02 05*	Inne środki do konserwacji i impregnacji drewna zawierające substancje niebezpieczne
03 02 99	Inne niewymienione odpady
03 03	Odpady z produkcji oraz z przetwórstwa masy celulozowej, papieru i tektury
03 03 01	Odpady z kory i drewna
03 03 02	Osady i szlamy z produkcji celulozy metodą siarczynową (w tym osady tugu zielonego)
03 03 05	Szlamy z odbarwiania makulatury
03 03 07	Mechanicznie wydzielone odrzuty z przeróbki makulatury i tektury
03 03 08	Odpady z sortowania papieru i tektury przeznaczone do recyklingu
03 03 09	Odpady szlamów defekosaturacyjnych
03 03 10	Odpady z włókna, szlamy z włókien, wypełniaczy i powłok pochodzące z mechanicznej separacji
03 03 11	Osady z zakładowych oczyszczalni ścieków inne niż wymienione w 03 03 10
03 03 80	Szlamy z procesów bielenia podchlorynem lub chlorem
03 03 81	Szlamy z innych procesów bielenia
03 03 99	Inne niewymienione odpady
04	Odpady z przemysłu skórzanego, futrzarskiego i tekstylnego
04 01	Odpady z przemysłu skórzanego i futrzarskiego
04 01 01	Odpady z mizdrowania (odzierki i dwoiny wapniowe)
04 01 02	Odpady z wapnienia
04 01 03*	Odpady z odtłuszczenia zawierające rozpuszczalniki (bez fazy ciekłej)
04 01 04	Brzezka garbująca zawierająca chrom
04 01 05	Brzezka garbująca niezawierająca chromu
04 01 06	Osady zawierające chrom, zwłaszcza z zakładowych oczyszczalni ścieków
04 01 07	Osady niezawierające chromu, zwłaszcza z zakładowych oczyszczalni ścieków
04 01 08	Odpady skóry wygarbowanej zawierające chrom (wióry, obcinki, pył ze szlifowania skór)
04 01 09	Odpady z polerowania i wykańczania
04 01 99	Inne niewymienione odpady
04 02	Odpady z przemysłu tekstylnego
04 02 09	Odpady materiałów złożonych (np. tkaniny impregnowane, elastomery, plastomery)
04 02 10	Substancje organiczne z produktów naturalnych (np. tłuszcze, woski)

Kod	Grupy, podgrupy i rodzaje odpadów
04 02 14*	Odpady z wykarćzania zawierające rozpuszczalniki organiczne
04 02 15	Odpady z wykarćzania inne niż wymienione w 04 02 14
04 02 16*	Barwniki i pigmenty zawierające substancje niebezpieczne
04 02 17	Barwniki i pigmenty inne niż wymienione w 04 02 16
04 02 19*	Odpady z zakładowych oczyszczalni ścieków zawierające substancje niebezpieczne
04 02 20	Odpady z zakładowych oczyszczalni ścieków inne niż wymienione w 04 02 19
04 02 21	Odpady z nieprzetworzonych włókien tekstylnych
04 02 22	Odpady z przetworzonych włókien tekstylnych
04 02 80	Odpady z mokrej obróbki wyrobów tekstylnych
04 02 99	Inne niewymienione odpady
05	Odpady z przeróbki ropy naftowej, oczyszczania gazu ziemnego oraz pirolitycznej przeróbki węgla
05 01	Odpady z przeróbki (np. rafinacji) ropy naftowej
05 01 02*	Osady z odsalania
05 01 03*	Osady z dna zbiorników
05 01 04*	Kwaśne szlamy z procesów alkilowania
05 01 05*	Wycieki ropy naftowej
05 01 06*	Zaolejone osady z konserwacji instalacji lub urządzeń
05 01 07*	Kwaśne smoły
05 01 08*	Inne smoły
05 01 09*	Osady z zakładowych oczyszczalni ścieków zawierające substancje niebezpieczne
05 01 10	Osady z zakładowych oczyszczalni ścieków inne niż wymienione w 05 01 09
05 01 11*	Odpady z alkalicznego oczyszczania paliw
05 01 12*	Ropa naftowa zawierająca kwasy
05 01 13	Osady z uzdatniania wody kotłowej
05 01 14	Odpady z kolumn chłodniczych
05 01 15*	Zużyte naturalne materiały filtracyjne (np. gliny, iły)
05 01 16	Odpady zawierające siarkę z odsiarczania ropy naftowej
05 01 17	Bitum
05 01 99	Inne niewymienione odpady
05 06	Odpady z pirolitycznej przeróbki węgla
05 06 01*	Kwaśne smoły
05 06 03*	Inne smoły
05 06 04	Odpady z kolumn chłodniczych
05 06 80*	Odpady ciekłe zawierające fenole
05 06 99	Inne niewymienione odpady
05 07	Odpady z oczyszczania i transportu gazu ziemnego
05 07 01*	Osady zawierające rtęć
05 07 02	Odpady zawierające siarkę
05 07 99	Inne niewymienione odpady
06	Odpady z produkcji, przygotowania, obrotu i stosowania produktów przemysłu chemii nieorganicznej

Kod	Grupy, podgrupy i rodzaje odpadów
06 01	Odpady z produkcji, przygotowania, obrotu i stosowania kwasów nieorganicznych
06 01 01*	Kwas siarkowy i siarkawy
06 01 02*	Kwas chlorowodorowy
06 01 03*	Kwas fluorowodorowy
06 01 04*	Kwas fosforowy i fosforawy
06 01 05*	Kwas azotowy i azotawy
06 01 06*	Inne kwasy
06 01 99	Inne niewymienione odpady
06 02	Odpady z produkcji, przygotowania, obrotu i stosowania wodorotlenków
06 02 01*	Wodorotlenek wapniowy
06 02 03*	Wodorotlenek amonowy
06 02 04*	Wodorotlenek sodowy i potasowy
06 02 05*	Inne wodorotlenki
06 02 99	Inne niewymienione odpady
06 03	Odpady z produkcji, przygotowania, obrotu i stosowania soli i ich roztworów oraz tlenków metali
06 03 11*	Sole i roztwory zawierające cyjanki
06 03 13*	Sole i roztwory zawierające metale ciężkie
06 03 14	Sole i roztwory inne niż wymienione w 06 03 11 i 06 03 13
06 03 15*	Tlenki metali zawierające metale ciężkie
06 03 16	Tlenki metali inne niż wymienione w 06 03 15
06 03 99	Inne niewymienione odpady
06 04	Odpady zawierające metale inne niż wymienione w 06 03
06 04 03*	Odpady zawierające arsen
06 04 04*	Odpady zawierające rtęć
06 04 05*	Odpady zawierające inne metale ciężkie
06 04 99	Inne niewymienione odpady
06 05	Osady z zakładowych oczyszczalni ścieków
06 05 02*	Osady z zakładowych oczyszczalni ścieków zawierające substancje niebezpieczne
06 05 03	Osady z zakładowych oczyszczalni ścieków inne niż wymienione w 06 05 02
06 06	Odpady z produkcji, przygotowania, obrotu i stosowania związków siarki oraz z chemicznych procesów przetwórstwa siarki i odsiarczania
06 06 02*	Odpady zawierające niebezpieczne siarczki
06 06 03	Odpady zawierające siarczki inne niż wymienione w 06 06 02
06 06 99	Inne niewymienione odpady
06 07	Odpady z produkcji, przygotowania, obrotu i stosowania chlorowców oraz z chemicznych procesów przetwórstwa chloru
06 07 01*	Odpady azbestowe z elektrolizy
06 07 02*	Węgiel aktywny z produkcji chloru
06 07 03*	Osady siarczanu baru zawierające rtęć
06 07 04*	Roztwory i kwasy (np. kwas siarkowy)
06 07 99	Inne niewymienione odpady

Kod	Grupy, podgrupy i rodzaje odpadów
06 08	Odpady z produkcji, przygotowania, obrotu i stosowania krzemu oraz pochodnych krzemu
06 08 02*	Odpady zawierające niebezpieczne silikony
06 08 99	Inne niewymienione odpady
06 09	Odpady z produkcji, przygotowania, obrotu i stosowania chemikaliów fosforowych oraz z chemicznych procesów przetwórstwa fosforu
06 09 02	Żużel fosforowy
06 09 03*	Poreakcyjne odpady związków wapnia zawierające lub zanieczyszczone substancjami niebezpiecznymi
06 09 04	Poreakcyjne odpady związków wapnia inne niż wymienione w 06 09 03 i 06 09 80
06 09 80	Fosfogipsy
06 09 81	Fosfogipsy wymieszane z żużłami, popiołami paleniskowymi i pyłami z kotłów (z wyłączeniem pyłów z kotłów wymienionych w 10 01 04)
06 09 99	Inne niewymienione odpady
06 10	Odpady z produkcji, przygotowania, obrotu i stosowania chemikaliów azotowych, z chemicznych procesów przetwórstwa azotu oraz z produkcji nawozów azotowych i innych
06 10 02*	Odpady zawierające substancje niebezpieczne
06 10 99	Inne niewymienione odpady
06 11	Odpady z produkcji pigmentów oraz zmętniaczy nieorganicznych
06 11 01	Poreakcyjne odpady związków wapnia z produkcji dwutlenku tytanu
06 11 80	Odpady z produkcji związków cyrkonu
06 11 81	Odpady z produkcji związków chromu
06 11 82	Odpady z produkcji związków kobaltu
06 11 83	Odpadowy siarczan żelazowy
06 11 99	Inne niewymienione odpady
06 13	Odpady z innych nieorganicznych procesów chemicznych
06 13 01*	Nieorganiczne środki ochrony roślin (np. pestycydy), środki do konserwacji drewna oraz inne biocydy
06 13 02*	Zużyty węgiel aktywny (z wyłączeniem 06 07 02)
06 13 03	Czysta sadza
06 13 04*	Odpady z przetwarzania azbestu
06 13 05*	Sadza zawierająca lub zanieczyszczona substancjami niebezpiecznymi
06 13 99	Inne niewymienione odpady
07	Odpady z produkcji, przygotowania, obrotu i stosowania produktów przemysłu chemii organicznej
07 01	Odpady z produkcji, przygotowania, obrotu i stosowania podstawowych produktów przemysłu chemii organicznej
07 01 01*	Wody popłuczne i ługi macierzyste
07 01 03*	Rozpuszczalniki chlorowcoorganiczne, roztwory z przemywania i cieczce macierzyste
07 01 04*	Inne rozpuszczalniki organiczne, roztwory z przemywania i cieczce macierzyste
07 01 07*	Pozostałości podestylacyjne i poreakcyjne zawierające związki chlorowców
07 01 08*	Inne pozostałości podestylacyjne i poreakcyjne
07 01 09*	Zużyte sorbenty i osady pofiltracyjne zawierające związki chlorowców
07 01 10*	Inne zużyte sorbenty i osady pofiltracyjne
07 01 11*	Osady z zakładowych oczyszczalni ścieków zawierające substancje niebezpieczne

Kod	Grupy, podgrupy i rodzaje odpadów
07 01 12	Osady z zakładowych oczyszczalni ścieków inne niż wymienione w 07 01 11
07 01 80	Wapno pokarbidowe niezawierające substancji niebezpiecznych (inne niż wymienione w 07 01 08)
07 01 99	Inne niewymienione odpady
07 02	Odpady z produkcji, przygotowania, obrotu i stosowania tworzyw sztucznych oraz kauczuków i włókien syntetycznych
07 02 01*	Wody popłuczne i ługi macierzyste
07 02 03*	Rozpuszczalniki chlorowcoorganiczne, roztwory z przemywania i cieczce macierzyste
07 02 04*	Inne rozpuszczalniki organiczne, roztwory z przemywania i cieczce macierzyste
07 02 07*	Pozostałości podestylacyjne i poreakcyjne zawierające związki chlorowców
07 02 08*	Inne pozostałości podestylacyjne i poreakcyjne
07 02 09*	Zużyte sorbenty i osady pofiltracyjne zawierające związki chlorowców
07 02 10*	Inne zużyte sorbenty i osady pofiltracyjne
07 02 11*	Osady z zakładowych oczyszczalni ścieków zawierające substancje niebezpieczne
07 02 12	Osady z zakładowych oczyszczalni ścieków inne niż wymienione w 07 02 11
07 02 13	Odpady tworzyw sztucznych
07 02 14*	Odpady z dodatków zawierające substancje niebezpieczne (np. plastyfikatory, stabilizatory)
07 02 15	Odpady z dodatków inne niż wymienione w 07 02 14
07 02 16*	Odpady zawierające niebezpieczne silikony
07 02 17	Odpady zawierające silikony inne niż wymienione w 07 02 16
07 02 80	Odpady z przemysłu gumowego i produkcji gumy
07 02 99	Inne niewymienione odpady
07 03	Odpady z produkcji, przygotowania, obrotu i stosowania organicznych barwników oraz pigmentów (z wyłączeniem podgrupy 06 11)
07 03 01*	Wody popłuczne i ługi macierzyste
07 03 03*	Rozpuszczalniki chlorowcoorganiczne, roztwory z przemywania i cieczce macierzyste
07 03 04*	Inne rozpuszczalniki organiczne, roztwory z przemywania i cieczce macierzyste
07 03 07*	Pozostałości podestylacyjne i poreakcyjne zawierające związki chlorowców
07 03 08*	Inne pozostałości podestylacyjne i poreakcyjne
07 03 09*	Zużyte sorbenty i osady pofiltracyjne zawierające związki chlorowców
07 03 10*	Inne zużyte sorbenty i osady pofiltracyjne
07 03 11*	Osady z zakładowych oczyszczalni ścieków zawierające substancje niebezpieczne
07 03 12	Osady z zakładowych oczyszczalni ścieków inne niż wymienione w 07 03 11
07 03 99	Inne niewymienione odpady
07 04	Odpady z produkcji, przygotowania, obrotu i stosowania organicznych środków ochrony roślin (z wyłączeniem 02 01 08 i 02 01 09), środków do konserwacji drewna (z wyłączeniem 03 02) i innych biocydów
07 04 01*	Wody popłuczne i ługi macierzyste
07 04 03*	Rozpuszczalniki chlorowcoorganiczne, roztwory z przemywania i cieczce macierzyste
07 04 04*	Inne rozpuszczalniki organiczne, roztwory z przemywania i cieczce macierzyste
07 04 07*	Pozostałości podestylacyjne i poreakcyjne zawierające związki chlorowców
07 04 08*	Inne pozostałości podestylacyjne i poreakcyjne
07 04 09*	Zużyte sorbenty i osady pofiltracyjne zawierające związki chlorowców

Kod	Grupy, podgrupy i rodzaje odpadów
07 04 10*	Inne zużyte sorbenty i osady pofiltracyjne
07 04 11*	Osady z zakładowych oczyszczalni ścieków zawierające substancje niebezpieczne
07 04 12	Osady z zakładowych oczyszczalni ścieków inne niż wymienione w 07 04 11
07 04 13*	Odpady stałe zawierające substancje niebezpieczne
07 04 80*	Przeterminowane środki ochrony roślin I i II klasy toksyczności (bardzo toksyczne i toksyczne)
07 04 81	Przeterminowane środki ochrony roślin inne niż wymienione w 07 04 80
07 04 99	Inne niewymienione odpady
07 05	Odpady z produkcji, przygotowania, obrotu i stosowania farmaceutyków
07 05 01*	Wody popłuczne i ługi macierzyste
07 05 03*	Rozpuszczalniki chlorowcoorganiczne, roztwory z przemywania i ciecze macierzyste
07 05 04*	Inne rozpuszczalniki organiczne, roztwory z przemywania i ciecze macierzyste
07 05 07*	Pozostałości podestylacyjne i poreakcyjne zawierające związki chlorowców
07 05 08*	Inne pozostałości podestylacyjne i poreakcyjne
07 05 09*	Zużyte sorbenty i osady pofiltracyjne zawierające związki chlorowców
07 05 10*	Inne zużyte sorbenty i osady pofiltracyjne
07 05 11*	Osady z zakładowych oczyszczalni ścieków zawierające substancje niebezpieczne
07 05 12	Osady z zakładowych oczyszczalni ścieków inne niż wymienione w 07 05 11
07 05 13*	Odpady stałe zawierające substancje niebezpieczne
07 05 14	Odpady stałe inne niż wymienione w 07 05 13
07 05 80*	Odpady ciekłe zawierające substancje niebezpieczne
07 05 81	Odpady ciekłe inne niż wymienione w 07 05 80
07 05 99	Inne niewymienione odpady
07 06	Odpady z produkcji, przygotowania, obrotu i stosowania tłuszczów, natłustek, mydeł, detergentów, środków dezynfekujących i kosmetyków
07 06 01*	Wody popłuczne i ługi macierzyste
07 06 03*	Rozpuszczalniki chlorowcoorganiczne, roztwory z przemywania i ciecze macierzyste
07 06 04*	Inne rozpuszczalniki organiczne, roztwory z przemywania i ciecze macierzyste
07 06 07*	Pozostałości podestylacyjne i poreakcyjne zawierające związki chlorowców
07 06 08*	Inne pozostałości podestylacyjne i poreakcyjne
07 06 09*	Zużyte sorbenty i osady pofiltracyjne zawierające związki chlorowców
07 06 10*	Inne zużyte sorbenty i osady pofiltracyjne
07 06 11*	Osady z zakładowych oczyszczalni ścieków zawierające substancje niebezpieczne
07 06 12	Osady z zakładowych oczyszczalni ścieków inne niż wymienione w 07 06 11
07 06 80	Ziemia bieląca z rafinacji oleju
07 06 81	Zwroty kosmetyków i próbek
07 06 99	Inne niewymienione odpady
07 07	Odpady z produkcji, przygotowania, obrotu i stosowania innych niewymienionych produktów chemicznych
07 07 01*	Wody popłuczne i ługi macierzyste
07 07 03*	Rozpuszczalniki chlorowcoorganiczne, roztwory z przemywania i ciecze macierzyste
07 07 04*	Inne rozpuszczalniki organiczne, roztwory z przemywania i ciecze macierzyste
07 07 07*	Pozostałości podestylacyjne i poreakcyjne zawierające związki chlorowców

Kod	Grupy, podgrupy i rodzaje odpadów
07 07 08*	Inne pozostałości podestylacyjne i poreakcyjne
07 07 09*	Zużyte sorbenty i osady pofiltracyjne zawierające związki chlorowców
07 07 10*	Inne zużyte sorbenty i osady pofiltracyjne
07 07 11*	Osady z zakładowych oczyszczalni ścieków zawierające substancje niebezpieczne
07 07 12	Osady z zakładowych oczyszczalni ścieków inne niż wymienione w 07 07 11
07 07 99	Inne niewymienione odpady
08	Odpady z produkcji, przygotowania, obrotu i stosowania powłok ochronnych (farb, lakierów, emalii ceramicznych), kitu, klejów, szczeliw i farb drukarskich
08 01	Odpady z produkcji, przygotowania, obrotu i stosowania oraz usuwania farb i lakierów
08 01 11*	Odpady farb i lakierów zawierających rozpuszczalniki organiczne lub inne substancje niebezpieczne
08 01 12	Odpady farb i lakierów inne niż wymienione w 08 01 11
08 01 13*	Szlamy z usuwania farb i lakierów zawierające rozpuszczalniki organiczne lub inne substancje niebezpieczne
08 01 14	Szlamy z usuwania farb i lakierów inne niż wymienione w 08 01 13
08 01 15*	Szlamy wodne zawierające farby i lakiery zawierające rozpuszczalniki organiczne lub inne substancje niebezpieczne
08 01 16	Szlamy wodne zawierające farby i lakiery inne niż wymienione w 08 01 15
08 01 17*	Odpady z usuwania farb i lakierów zawierające rozpuszczalniki organiczne lub inne substancje niebezpieczne
08 01 18	Odpady z usuwania farb i lakierów inne niż wymienione w 08 01 17
08 01 19*	Zawiesiny wodne farb lub lakierów zawierające rozpuszczalniki organiczne lub inne substancje niebezpieczne
08 01 20	Zawiesiny wodne farb lub lakierów inne niż wymienione w 08 01 19
08 01 21*	Zmywacz farb lub lakierów
08 01 99	Inne niewymienione odpady
08 02	Odpady z produkcji, przygotowania, obrotu i stosowania innych powłok (w tym materiałów ceramicznych)
08 02 01	Odpady proszków powlekających
08 02 02	Szlamy wodne zawierające materiały ceramiczne
08 02 03	Zawiesiny wodne zawierające materiały ceramiczne
08 02 99	Inne niewymienione odpady
08 03	Odpady z produkcji, przygotowania, obrotu i stosowania farb drukarskich
08 03 07	Szlamy wodne zawierające farby drukarskie
08 03 08	Odpady ciekłe zawierające farby drukarskie
08 03 12*	Odpady farb drukarskich zawierające substancje niebezpieczne
08 03 13	Odpady farb drukarskich inne niż wymienione w 08 03 12
08 03 14*	Szlamy farb drukarskich zawierające substancje niebezpieczne
08 03 15	Szlamy farb drukarskich inne niż wymienione w 08 03 14
08 03 16*	Zużyte roztwory trawiące
08 03 17*	Odpadowy toner drukarski zawierający substancje niebezpieczne
08 03 18	Odpadowy toner drukarski inny niż wymieniony w 08 03 17
08 03 19*	Zdyspergowany olej zawierający substancje niebezpieczne
08 03 80	Zdyspergowany olej inny niż wymieniony w 08 03 19

Kod	Grupy, podgrupy i rodzaje odpadów
08 03 99	Inne niewymienione odpady
08 04	Odpady z produkcji, przygotowania, obrotu i stosowania klejów oraz szczeliw (w tym środki do impregnacji wodoszczelnej)
08 04 09*	Odpadowe kleje i szczeliwa zawierające rozpuszczalniki organiczne lub inne substancje niebezpieczne
08 04 10	Odpadowe kleje i szczeliwa inne niż wymienione w 08 04 09
08 04 11*	Osady z klejów i szczeliw zawierające rozpuszczalniki organiczne lub inne substancje niebezpieczne
08 04 12	Osady z klejów i szczeliw inne niż wymienione w 08 04 11
08 04 13*	Uwodnione szlasy klejów lub szczeliw zawierające rozpuszczalniki organiczne lub inne substancje niebezpieczne
08 04 14	Uwodnione szlasy klejów lub szczeliw inne niż wymienione w 08 04 13
08 04 15*	Odpady ciekłe klejów lub szczeliw zawierające rozpuszczalniki organiczne lub inne substancje niebezpieczne
08 04 16	Odpady ciekłe klejów lub szczeliw inne niż wymienione w 08 04 15
08 04 17*	Olej żywiczny
08 04 99	Inne niewymienione odpady
08 05	Odpady nieujęte w innych podgrupach grupy 08
08 05 01*	Odpady izocyjanianów
09	Odpady z przemysłu fotograficznego i usług fotograficznych
09 01	Odpady z przemysłu fotograficznego i usług fotograficznych
09 01 01*	Wodne roztwory wywoływaczy i aktywatorów
09 01 02*	Wodne roztwory wywoływaczy do płyt offsetowych
09 01 03*	Roztwory wywoływaczy opartych na rozpuszczalnikach
09 01 04*	Roztwory utrwalaczy
09 01 05*	Roztwory wybielaczy i kąpieli wybielająco-utrwalających
09 01 06*	Osady z zakładowych oczyszczalni ścieków zawierające srebro
09 01 07	Błony i papier fotograficzny zawierające srebro lub związki srebra
09 01 08	Błony i papier fotograficzny niezawierające srebra
09 01 10	Aparaty fotograficzne jednorazowego użytku bez baterii
09 01 11*	Aparaty fotograficzne jednorazowego użytku zawierające baterie wymienione w 16 06 01, 16 06 02 lub 16 06 03
09 01 12	Aparaty fotograficzne jednorazowego użytku zawierające baterie inne niż wymienione w 09 01 11
09 01 13*	Odpady ciekłe z zakładowej regeneracji srebra inne niż wymienione w 09 01 06
09 01 80*	Przeterminowane odczynniki fotograficzne
09 01 99	Inne niewymienione odpady
10	Odpady z procesów termicznych
10 01	Odpady z elektrowni i innych zakładów energetycznego spalania paliw (z wyłączeniem grupy 19)
10 01 01	Żużle, popioły paleniskowe i pyły z kotłów (z wyłączeniem pyłów z kotłów wymienionych w 10 01 04)
10 01 02	Popioły lotne z węgla
10 01 03	Popioły lotne z torfu i drewna niepoddanego obróbce chemicznej
10 01 04*	Popioły lotne i pyły z kotłów z paliw płynnych
10 01 05	Stałe odpady z wapniowych metod odsiarczania gazów odlotowych

Kod	Grupy, podgrupy i rodzaje odpadów
10 01 07	Produkty z wapniowych metod odsiarczania gazów odlotowych odprowadzane w postaci szlamu
10 01 09*	Kwas siarkowy
10 01 13*	Popioły lotne z emulgowanych węglowodorów stosowanych jako paliwo
10 01 14*	Popioły paleniskowe, żużle i pyły z kotłów ze współspalania zawierające substancje niebezpieczne
10 01 15	Popioły paleniskowe, żużle i pyły z kotłów ze współspalania inne niż wymienione w 10 01 14
10 01 16*	Popioły lotne ze współspalania zawierające substancje niebezpieczne
10 01 17	Popioły lotne ze współspalania inne niż wymienione w 10 01 16
10 01 18*	Odpady z oczyszczania gazów odlotowych zawierające substancje niebezpieczne
10 01 19	Odpady z oczyszczania gazów odlotowych inne niż wymienione w 10 01 05, 10 01 07 i 10 01 18
10 01 20*	Osady z zakładowych oczyszczalni ścieków zawierające substancje niebezpieczne
10 01 21	Osady z zakładowych oczyszczalni ścieków inne niż wymienione w 10 01 20
10 01 22*	Uwodnione szlamy z czyszczenia kotłów zawierające substancje niebezpieczne
10 01 23	Uwodnione szlamy z czyszczenia kotłów inne niż wymienione w 10 01 22
10 01 24	Piaski ze złóż fluidalnych (z wyłączeniem 10 01 82)
10 01 25	Odpady z przechowywania i przygotowania paliw dla opalanych węglem elektrowni
10 01 26	Odpady z uzdatniania wody chłodzącej
10 01 80	Mieszanki popiołowo-żużłowe z mokrego odprowadzania odpadów paleniskowych
10 01 81	Mikrosfery z popiołów lotnych
10 01 82	Mieszanki popiołów lotnych i odpadów stałych z wapniowych metod odsiarczania gazów odlotowych (metody suche i półsuche odsiarczania spalin oraz spalanie w złożu fluidalnym)
10 01 99	Inne niewymienione odpady
10 02	Odpady z hutnictwa żelaza i stali
10 02 01	Żużle z procesów wytopienia (wielkopiecowe, stalownicze)
10 02 02	Nieprzerobione żużle z innych procesów
10 02 07*	Odpady stałe z oczyszczania gazów odlotowych zawierające substancje niebezpieczne
10 02 08	Odpady stałe z oczyszczania gazów odlotowych inne niż wymienione w 10 02 07
10 02 10	Zgorzelina walcownicza
10 02 11*	Odpady z uzdatniania wody chłodzącej zawierające oleje
10 02 12	Odpady z uzdatniania wody chłodzącej inne niż wymienione w 10 02 11
10 02 13*	Szlamy i osady pofiltracyjne z oczyszczania gazów odlotowych zawierające substancje niebezpieczne
10 02 14	Szlamy i osady pofiltracyjne z oczyszczania gazów odlotowych inne niż wymienione w 10 02 13
10 02 15	Inne szlamy i osady pofiltracyjne
10 02 80	Zgary z hutnictwa żelaza
10 02 81	Odpadowy siarczan żelazawy
10 02 99	Inne niewymienione odpady
10 03	Odpady z hutnictwa aluminium
10 03 02	Odpadowe anody
10 03 04*	Żużle z produkcji pierwotnej

Kod	Grupy, podgrupy i rodzaje odpadów
10 03 05	Odpady tlenku glinu
10 03 08*	Słone żużle z produkcji wtórnej
10 03 09*	Czarne kożuchy żużlowe z produkcji wtórnej
10 03 15*	Zgary z wytopu o właściwościach palnych lub wydzielające w zetknięciu z wodą gazy palne w niebezpiecznych ilościach
10 03 16	Zgary z wytopu inne niż wymienione w 10 03 15
10 03 17*	Odpady zawierające smolę z produkcji anod
10 03 18	Odpady zawierające węgiel z produkcji anod inne niż wymienione w 10 03 17
10 03 19*	Pyły z gazów odlotowych zawierające substancje niebezpieczne
10 03 20	Pyły z gazów odlotowych inne niż wymienione w 10 03 19
10 03 21*	Inne cząstki stałe i pyły (łącznie z pyłami z młynów kulowych) zawierające substancje niebezpieczne
10 03 22	Inne cząstki stałe i pyły (łącznie z pyłami z młynów kulowych) inne niż wymienione w 10 03 21
10 03 23*	Odpady stałe z oczyszczania gazów odlotowych zawierające substancje niebezpieczne
10 03 24	Odpady stałe z oczyszczania gazów odlotowych inne niż wymienione w 10 03 23
10 03 25*	Szlamy i osady pofiltracyjne z oczyszczania gazów odlotowych zawierające substancje niebezpieczne
10 03 26	Szlamy i osady pofiltracyjne z oczyszczania gazów odlotowych inne niż wymienione w 10 03 25
10 03 27*	Odpady z uzdatniania wody chłodzącej zawierające oleje
10 03 28	Odpady z uzdatniania wody chłodzącej inne niż wymienione w 10 03 27
10 03 29*	Odpady z przetwarzania słonych żużli i czarnych kożuchów żużlowych zawierające substancje niebezpieczne
10 03 30	Odpady z przetwarzania słonych żużli i czarnych kożuchów żużlowych inne niż wymienione w 10 03 29
10 03 99	Inne niewymienione odpady
10 04	Odpady z hutnictwa ołowiu
10 04 01*	Żużle z produkcji pierwotnej i wtórnej
10 04 02*	Zgary z produkcji pierwotnej i wtórnej
10 04 03*	Wapno zawierające związki arsenu (arsenian wapniowy)
10 04 04*	Pyły z gazów odlotowych
10 04 05*	Inne cząstki i pyły
10 04 06*	Odpady stałe z oczyszczania gazów odlotowych
10 04 07*	Szlamy i osady pofiltracyjne z oczyszczania gazów odlotowych
10 04 09*	Odpady z uzdatniania wody chłodzącej zawierające oleje
10 04 10	Odpady z uzdatniania wody chłodzącej inne niż wymienione w 10 04 09
10 04 99	Inne niewymienione odpady
10 05	Odpady z hutnictwa cynku
10 05 01	Żużle z produkcji pierwotnej i wtórnej (z wyłączeniem 10 05 80)
10 05 03*	Pyły z gazów odlotowych
10 05 04	Inne cząstki i pyły
10 05 05*	Odpady stałe z oczyszczania gazów odlotowych
10 05 06*	Szlamy i osady pofiltracyjne z oczyszczania gazów odlotowych

Kod	Grupy, podgrupy i rodzaje odpadów
10 05 08*	Odpady z uzdatniania wody chłodzącej zawierające oleje
10 05 09	Odpady z uzdatniania wody chłodzącej inne niż wymienione w 10 05 08
10 05 10*	Zgary z wytopu o właściwościach palnych lub wydzielające w zetknięciu z wodą gazy palne w niebezpiecznych ilościach
10 05 11	Zgary inne niż wymienione w 10 05 10
10 05 80	Żużle granulowane z pieców szybowych oraz żużle z pieców obrotowych
10 05 99	Inne niewymienione odpady
10 06	Odpady z hutnictwa miedzi
10 06 01	Żużle z produkcji pierwotnej i wtórnej
10 06 02	Zgary z produkcji pierwotnej i wtórnej
10 06 03*	Pyły z gazów odlotowych
10 06 04	Inne cząstki i pyły
10 06 06*	Odpady stałe z oczyszczania gazów odlotowych
10 06 07*	Szlamy i osady pofiltracyjne z oczyszczania gazów odlotowych
10 06 09*	Odpady z uzdatniania wody chłodzącej zawierające oleje
10 06 10	Odpady z uzdatniania wody chłodzącej inne niż wymienione w 10 06 09
10 06 80	Żużle szybowe i granulowane
10 06 99	Inne niewymienione odpady
10 07	Odpady z hutnictwa srebra, złota i platyny
10 07 01	Żużle z produkcji pierwotnej i wtórnej
10 07 02	Zgary z produkcji pierwotnej i wtórnej
10 07 03	Odpady stałe z oczyszczania gazów odlotowych
10 07 04	Inne cząstki i pyły
10 07 05	Szlamy i osady pofiltracyjne z oczyszczania gazów odlotowych
10 07 07*	Odpady z uzdatniania wody chłodzącej zawierające oleje
10 07 08	Odpady z uzdatniania wody chłodzącej inne niż wymienione w 10 07 07
10 07 99	Inne niewymienione odpady
10 08	Odpady z hutnictwa pozostałych metali nieżelaznych
10 08 04	Cząstki i pyły
10 08 08*	Słone żużle z produkcji pierwotnej i wtórnej
10 08 09	Inne żużle
10 08 10*	Zgary z wytopu o właściwościach palnych lub wydzielające w zetknięciu z wodą gazy palne w niebezpiecznych ilościach
10 08 11	Zgary inne niż wymienione w 10 08 10
10 08 12*	Odpady zawierające smołę z produkcji anod
10 08 13	Odpady zawierające węgiel z produkcji anod inne niż wymienione w 10 08 12
10 08 14	Odpadowe anody
10 08 15*	Pyły z gazów odlotowych zawierające substancje niebezpieczne
10 08 16	Pyły z gazów odlotowych inne niż wymienione w 10 08 15
10 08 17*	Szlamy i osady pofiltracyjne z oczyszczania gazów odlotowych zawierające substancje niebezpieczne
10 08 18	Szlamy i osady pofiltracyjne z oczyszczania gazów odlotowych inne niż wymienione w 10 08 17

Kod	Grupy, podgrupy i rodzaje odpadów
10 08 19*	Odpady z uzdatniania wody chłodzącej zawierające oleje
10 08 20	Odpady z uzdatniania wody chłodzącej inne niż wymienione w 10 08 19
10 08 99	Inne niewymienione odpady
10 09	Odpady z odlewnictwa żelaza
10 09 03	Żużle odlewnicze
10 09 05*	Rdzenie i formy odlewnicze przed procesem odlewania zawierające substancje niebezpieczne
10 09 06	Rdzenie i formy odlewnicze przed procesem odlewania inne niż wymienione w 10 09 05
10 09 07*	Rdzenie i formy odlewnicze po procesie odlewania zawierające substancje niebezpieczne
10 09 08	Rdzenie i formy odlewnicze po procesie odlewania inne niż wymienione w 10 09 07
10 09 09*	Pyły z gazów odlotowych zawierające substancje niebezpieczne
10 09 10	Pyły z gazów odlotowych inne niż wymienione w 10 09 09
10 09 11*	Inne cząstki stałe zawierające substancje niebezpieczne
10 09 12	Inne cząstki stałe niż wymienione w 10 09 11
10 09 13*	Odpadowe środki wiążące zawierające substancje niebezpieczne
10 09 14	Odpadowe środki wiążące inne niż wymienione w 10 09 13
10 09 15*	Odpady środków do wykrywania pęknięć odlewów
10 09 16	Odpady środków do wykrywania pęknięć odlewów inne niż wymienione w 10 09 15
10 09 80	Wybrakowane wyroby żeliwne
10 09 99	Inne niewymienione odpady
10 10	Odpady z odlewnictwa metali nieżelaznych
10 10 03	Zgary i żużle odlewnicze
10 10 05*	Rdzenie i formy odlewnicze przed procesem odlewania zawierające substancje niebezpieczne
10 10 06	Rdzenie i formy odlewnicze przed procesem odlewania inne niż wymienione w 10 10 05
10 10 07*	Rdzenie i formy odlewnicze po procesie odlewania zawierające substancje niebezpieczne
10 10 08	Rdzenie i formy odlewnicze po procesie odlewania inne niż wymienione w 10 10 07
10 10 09*	Pyły z gazów odlotowych zawierające substancje niebezpieczne
10 10 10	Pyły z gazów odlotowych inne niż wymienione w 10 10 09
10 10 11*	Inne cząstki stałe zawierające substancje niebezpieczne
10 10 12	Inne cząstki stałe niż wymienione w 10 10 11
10 10 13*	Odpadowe środki wiążące zawierające substancje niebezpieczne
10 10 14	Odpadowe środki wiążące inne niż wymienione w 10 10 13
10 10 15*	Odpady środków do wykrywania pęknięć odlewów
10 10 16	Odpady środków do wykrywania pęknięć odlewów inne niż wymienione w 10 10 15
10 10 99	Inne niewymienione odpady
10 11	Odpady z hutnictwa szkła
10 11 03	Odpady włókna szklanego i tkanin z włókna szklanego
10 11 05	Cząstki i pyły
10 11 09*	Odpady z przygotowania mas wsadowych do obróbki termicznej zawierające substancje niebezpieczne

Kod	Grupy, podgrupy i rodzaje odpadów
10 11 10	Odpady z przygotowania mas wsadowych inne niż wymienione w 10 11 09
10 11 11*	Szkló odpadowe w postaci małych cząstek i proszku szklanego zawierające metale ciężkie (np. z lamp elektronopromieniowych)
10 11 12	Szkló odpadowe inne niż wymienione w 10 11 11
10 11 13*	Szlamy z polerowania i szlifowania szkła zawierające substancje niebezpieczne
10 11 14	Szlamy z polerowania i szlifowania szkła inne niż wymienione w 10 11 13
10 11 15*	Odpady stałe z oczyszczania gazów odlotowych zawierające substancje niebezpieczne
10 11 16	Odpady stałe z oczyszczania gazów odlotowych inne niż wymienione w 10 11 15
10 11 17*	Szlamy i osady pofiltrycyjne z oczyszczania gazów odlotowych zawierające substancje niebezpieczne
10 11 18	Szlamy i osady pofiltrycyjne z oczyszczania gazów odlotowych inne niż wymienione w 10 11 17
10 11 19*	Odpady stałe z zakładowych oczyszczalni ścieków zawierające substancje niebezpieczne
10 11 20	Odpady stałe z zakładowych oczyszczalni ścieków inne niż wymienione w 10 11 19
10 11 80	Szlamy fluorokrzemianowe
10 11 81*	Odpady zawierające azbest
10 11 99	Inne niewymienione odpady
10 12	Odpady z produkcji wyrobów ceramiki budowlanej, szlachetnej i ogniotrwałej (wyrobów ceramicznych, cegieł, płytek i produktów konstrukcyjnych)
10 12 01	Odpady z przygotowania mas wsadowych do obróbki termicznej
10 12 03	Cząstki i pyły
10 12 05	Szlamy i osady pofiltrycyjne z oczyszczania gazów odlotowych
10 12 06	Zużyte formy
10 12 08	Wybrakowane wyroby ceramiczne, cegły, kafle i ceramika budowlana (po przeróbce termicznej)
10 12 09*	Odpady stałe z oczyszczania gazów odlotowych zawierające substancje niebezpieczne
10 12 10	Odpady stałe z oczyszczania gazów odlotowych inne niż wymienione w 10 12 09
10 12 11*	Odpady ze szklwienia zawierające metale ciężkie
10 12 12	Odpady ze szklwienia inne niż wymienione w 10 12 11
10 12 13	Szlamy z zakładowych oczyszczalni ścieków
10 12 99	Inne niewymienione odpady
10 13	Odpady z produkcji spoiw mineralnych (w tym cementu, wapna i tynku) oraz z wytworzonych z nich wyrobów
10 13 01	Odpady z przygotowania mas wsadowych do obróbki termicznej
10 13 04	Odpady z produkcji wapna palonego i hydratyzowanego
10 13 06	Cząstki i pyły (z wyłączeniem 10 13 12 i 10 13 13)
10 13 07	Szlamy i osady pofiltrycyjne z oczyszczania gazów odlotowych
10 13 09*	Odpady zawierające azbest z produkcji elementów cementowo-azbestowych
10 13 10	Odpady z produkcji elementów cementowo-azbestowych inne niż wymienione w 10 13 09
10 13 11	Odpady z cementowych materiałów kompozytowych inne niż wymienione w 10 13 09 i 10 13 10
10 13 12*	Odpady stałe z oczyszczania gazów odlotowych zawierające substancje niebezpieczne
10 13 13	Odpady stałe z oczyszczania gazów odlotowych inne niż wymienione w 10 13 12

Kod	Grupy, podgrupy i rodzaje odpadów
10 13 14	Odpady betonowe i szlam betonowy
10 13 80	Odpady z produkcji cementu
10 13 81	Odpady z produkcji gipsu
10 13 82	Wybrakowane wyroby
10 13 99	Inne niewymienione odpady
10 14	Odpady z krematoriów
10 14 01*	Odpady z oczyszczania gazów odlotowych zawierające rtęć
10 80	Odpady z produkcji żelazostopów
10 80 01	Żużle z produkcji żelazokrzemu
10 80 02	Pyły z produkcji żelazokrzemu
10 80 03	Żużle z produkcji żelazochromu
10 80 04	Pyły z produkcji żelazochromu
10 80 05	Żużle z produkcji żelazomanganu
10 80 06	Pyły z produkcji żelazomanganu
10 80 99	Inne niewymienione odpady
11	Odpady z chemicznej obróbki i powlekania powierzchni metali oraz innych materiałów i z procesów hydrometalurgii metali nieżelaznych
11 01	Odpady z obróbki i powlekania metali oraz innych materiałów (np. procesów galwanicznych, cynkowania, wytrawiania, fosforanowania, alkalicznego odtłuszczenia, anodowania)
11 01 05*	Kwasy trawiące
11 01 06*	Odpady zawierające kwasy inne niż wymienione w 11 01 05
11 01 07*	Alkalia trawiące
11 01 08*	Osady i szlamy z fosforanowania
11 01 09*	Szlamy i osady pofiltracyjne zawierające substancje niebezpieczne
11 01 10	Szlamy i osady pofiltracyjne inne niż wymienione w 11 01 09
11 01 11*	Wody popłuczne zawierające substancje niebezpieczne
11 01 12	Wody popłuczne inne niż wymienione w 11 01 11
11 01 13*	Odpady z odtłuszczenia zawierające substancje niebezpieczne
11 01 14	Odpady z odtłuszczenia inne niż wymienione w 11 01 13
11 01 15*	Odcieki i szlamy z systemów membranowych lub systemów wymiany jonowej zawierające substancje niebezpieczne
11 01 16*	Nasycone lub zużyte żywice jonowymienne
11 01 98*	Inne odpady zawierające substancje niebezpieczne
11 01 99	Inne niewymienione odpady
11 02	Odpady i szlamy z hydrometalurgii metali nieżelaznych
11 02 02*	Szlamy z hydrometalurgii cynku (w tym jarozyt i getyt)
11 02 03	Odpady z produkcji anod dla procesów elektrolizy
11 02 05*	Odpady z hydrometalurgii miedzi zawierające substancje niebezpieczne
11 02 06	Odpady z hydrometalurgii miedzi inne niż wymienione w 11 02 05
11 02 07*	Inne odpady zawierające substancje niebezpieczne
11 02 99	Inne niewymienione odpady
11 03	Szlamy i odpady stałe z procesów odpuszczania stali

Kod	Grupy, podgrupy i rodzaje odpadów
11 03 01*	Odpady zawierające cyjanki
11 03 02*	Inne odpady
11 05	Odpady z wysokotemperaturowych procesów galwanizowania
11 05 01	Cynk twardy
11 05 02	Popiół cynkowy
11 05 03*	Odpady stałe z oczyszczania gazów odlotowych
11 05 04*	Zużyty topnik
11 05 99	Inne niewymienione odpady
12	Odpady z kształtowania oraz fizycznej i mechanicznej obróbki powierzchni metali i tworzyw sztucznych
12 01	Odpady z kształtowania oraz fizycznej i mechanicznej obróbki powierzchni metali i tworzyw sztucznych
12 01 01	Odpady z toczenia i piłowania żelaza oraz jego stopów
12 01 02	Cząstki i pyły żelaza oraz jego stopów
12 01 03	Odpady z toczenia i piłowania metali nieżelaznych
12 01 04	Cząstki i pyły metali nieżelaznych
12 01 05	Odpady z toczenia i wygładzania tworzyw sztucznych
12 01 06*	Odpadowe oleje mineralne z obróbki metali zawierające chlorowce (z wyłączeniem emulsji i roztworów)
12 01 07*	Odpadowe oleje mineralne z obróbki metali niezawierające chlorowców (z wyłączeniem emulsji i roztworów)
12 01 08*	Odpadowe emulsje i roztwory olejowe z obróbki metali zawierające chlorowce
12 01 09*	Odpadowe emulsje i roztwory z obróbki metali niezawierające chlorowców
12 01 10*	Syntetyczne oleje z obróbki metali
12 01 12*	Zużyte woski i tłuszcze
12 01 13	Odpady spawalnicze
12 01 14*	Szlamy z obróbki metali zawierające substancje niebezpieczne
12 01 15	Szlamy z obróbki metali inne niż wymienione w 12 01 14
12 01 16*	Odpady poszlifierskie zawierające substancje niebezpieczne
12 01 17	Odpady poszlifierskie inne niż wymienione w 12 01 16
12 01 18*	Szlamy z obróbki metali zawierające oleje (np. szlamy z szlifowania, gładzenia i pokrywania)
12 01 19*	Oleje z obróbki metali łatwo ulegające biodegradacji
12 01 20*	Zużyte materiały szlifierskie zawierające substancje niebezpieczne
12 01 21	Zużyte materiały szlifierskie inne niż wymienione w 12 01 20
12 01 99	Inne niewymienione odpady
12 03	Odpady z odtuszczania wodą i parą (z wyłączeniem grupy 11)
12 03 01*	Wodne ciecze myjące
12 03 02*	Odpady z odtuszczania parą
13	Oleje odpadowe i odpady ciekłych paliw (z wyłączeniem olejów jadalnych oraz grup 05, 12 i 19)
13 01	Odpadowe oleje hydrauliczne
13 01 01*	Oleje hydrauliczne zawierające PCB
13 01 04*	Emulsje olejowe zawierające związki chlorowcoorganiczne

Kod	Grupy, podgrupy i rodzaje odpadów
13 01 05*	Emulsje olejowe niezawierające związków chlorowcoorganicznych
13 01 09*	Mineralne oleje hydrauliczne zawierające związki chlorowcoorganiczne
13 01 10*	Mineralne oleje hydrauliczne niezawierające związków chlorowcoorganicznych
13 01 11*	Syntetyczne oleje hydrauliczne
13 01 12*	Oleje hydrauliczne łatwo ulegające biodegradacji
13 01 13*	Inne oleje hydrauliczne
13 02	Odpadowe oleje silnikowe, przekładniowe i smarowe
13 02 04*	Mineralne oleje silnikowe, przekładniowe i smarowe zawierające związki chlorowcoorganiczne
13 02 05*	Mineralne oleje silnikowe, przekładniowe i smarowe niezawierające związków chlorowcoorganicznych
13 02 06*	Syntetyczne oleje silnikowe, przekładniowe i smarowe
13 02 07*	Oleje silnikowe, przekładniowe i smarowe łatwo ulegające biodegradacji
13 02 08*	Inne oleje silnikowe, przekładniowe i smarowe
13 03	Odpadowe oleje i ciecze stosowane jako elektroizolatory oraz nośniki ciepła
13 03 01*	Oleje i ciecze stosowane jako elektroizolatory i nośniki ciepła zawierające PCB
13 03 06*	Mineralne oleje i ciecze stosowane jako elektroizolatory oraz nośniki ciepła zawierające związki chlorowcoorganiczne inne niż wymienione w 13 03 01
13 03 07*	Mineralne oleje i ciecze stosowane jako elektroizolatory oraz nośniki ciepła niezawierające związków chlorowcoorganicznych
13 03 08*	Syntetyczne oleje i ciecze stosowane jako elektroizolatory oraz nośniki ciepła inne niż wymienione w 13 03 01
13 03 09*	Oleje i ciecze stosowane jako elektroizolatory oraz nośniki ciepła łatwo ulegające biodegradacji
13 03 10*	Inne oleje i ciecze stosowane jako elektroizolatory oraz nośniki ciepła
13 04	Oleje żęzowe
13 04 01*	Oleje żęzowe ze statków żeglugi śródlądowej
13 04 02*	Oleje żęzowe z nabrzeży portowych
13 04 03*	Oleje żęzowe ze statków morskich
13 05	Odpady z odwadniania olejów w separatorach
13 05 01*	Odpady stałe z piaskowników i z odwadniania olejów w separatorach
13 05 02*	Szlamy z odwadniania olejów w separatorach
13 05 03*	Szlamy z kolektorów
13 05 06*	Olej z odwadniania olejów w separatorach
13 05 07*	Zaolejona woda z odwadniania olejów w separatorach
13 05 08*	Mieszanka odpadów z piaskowników i z odwadniania olejów w separatorach
13 07	Odpady paliw ciekłych
13 07 01*	Olej opałowy i olej napędowy
13 07 02*	Benzyna
13 07 03*	Inne paliwa (włącznie z mieszaninami)
13 08	Odpady olejowe nieujęte w innych podgrupach
13 08 01*	Szlamy lub emulsje z odsalania
13 08 02*	Inne emulsje
13 08 80	Zaolejone odpady stałe ze statków

Kod	Grupy, podgrupy i rodzaje odpadów
13 08 99*	Inne niewymienione odpady
14	Odpady z rozpuszczalników organicznych, chłodziw i propelentów (z wyłączeniem grup 07 i 08)
14 06	Odpady z rozpuszczalników organicznych, chłodziw i propelentów w pianach lub aerozolah
14 06 01*	Freony, HCFC, HFC
14 06 02*	Inne chlorowcoorganiczne rozpuszczalniki i mieszaniny rozpuszczalników
14 06 03*	Inne rozpuszczalniki i mieszaniny rozpuszczalników
14 06 04*	Szlamy i odpady stałe zawierające rozpuszczalniki chlorowcoorganiczne
14 06 05*	Szlamy i odpady stałe zawierające inne rozpuszczalniki
15	Odpady opakowaniowe; sorbenty, tkaniny do wycierania, materiały filtracyjne i ubrania ochronne nieujęte w innych grupach
15 01	Odpady opakowaniowe (włącznie z selektywnie gromadzonymi komunalnymi odpadami opakowaniowymi)
15 01 01	Opakowania z papieru i tektury
15 01 02	Opakowania z tworzyw sztucznych
15 01 03	Opakowania z drewna
15 01 04	Opakowania z metali
15 01 05	Opakowania wielomateriałowe
15 01 06	Zmieszane odpady opakowaniowe
15 01 07	Opakowania ze szkła
15 01 09	Opakowania z tekstyliów
15 01 10*	Opakowania zawierające pozostałości substancji niebezpiecznych lub nimi zanieczyszczone (np. środkami ochrony roślin I i II klasy toksyczności - bardzo toksyczne i toksyczne)
15 01 11*	Opakowania z metali zawierające niebezpieczne porowate elementy wzmocnienia konstrukcyjnego (np. azbest), włącznie z pustymi pojemnikami ciśnieniowymi
15 02	Sorbenty, materiały filtracyjne, tkaniny do wycierania i ubrania ochronne
15 02 02*	Sorbenty, materiały filtracyjne (w tym filtry olejowe nieujęte w innych grupach), tkaniny do wycierania (np. szmaty, ścierki) i ubrania ochronne zanieczyszczone substancjami niebezpiecznymi (np. PCB)
15 02 03	Sorbenty, materiały filtracyjne, tkaniny do wycierania (np. szmaty, ścierki) i ubrania ochronne inne niż wymienione w 15 02 02
16	Odpady nieujęte w innych grupach
16 01	Zużyte lub nienadające się do użytkowania pojazdy (włączając maszyny pozadrogowe), odpady z demontażu, przeglądu i konserwacji pojazdów (z wyłączeniem grup 13 i 14 oraz podgrup 16 06 i 16 08)
16 01 03	Zużyte opony
16 01 04*	Zużyte lub nienadające się do użytkowania pojazdy
16 01 06	Zużyte lub nienadające się do użytkowania pojazdy niezawierające cieczy i innych niebezpiecznych elementów
16 01 07*	Filtry olejowe
16 01 08*	Elementy zawierające rtęć
16 01 09*	Elementy zawierające PCB
16 01 10*	Elementy wybuchowe (np. poduszki powietrzne)
16 01 11*	Okładziny hamulcowe zawierające azbest
16 01 12	Okładziny hamulcowe inne niż wymienione w 16 01 11

Kod	Grupy, podgrupy i rodzaje odpadów
16 01 13*	Płyny hamulcowe
16 01 14*	Płyny zapobiegające zamarzaniu zawierające niebezpieczne substancje
16 01 15	Płyny zapobiegające zamarzaniu inne niż wymienione w 16 01 14
16 01 16	Zbiorniki na gaz skroplony
16 01 17	Metale żelazne
16 01 18	Metale nieżelazne
16 01 19	Tworzywa sztuczne
16 01 20	Szkło
16 01 21*	Niebezpieczne elementy inne niż wymienione w 16 01 07 do 16 01 11, 16 01 13 i 16 01 14
16 01 22	Inne niewymienione elementy
16 01 99	Inne niewymienione odpady
16 02	Odpady urządzeń elektrycznych i elektronicznych
16 02 09*	Transformatory i kondensatory zawierające PCB
16 02 10*	Zużyte urządzenia zawierające PCB albo nimi zanieczyszczone inne niż wymienione w 16 02 09
16 02 11*	Zużyte urządzenia zawierające freony, HCFC, HFC
16 02 12*	Zużyte urządzenia zawierające wolny azbest
16 02 13*	Zużyte urządzenia zawierające niebezpieczne elementy ⁽¹⁾ inne niż wymienione w 16 02 09 do 16 02 12
16 02 14	Zużyte urządzenia inne niż wymienione w 16 02 09 do 16 02 13
16 02 15*	Niebezpieczne elementy lub części składowe usunięte z zużytych urządzeń
16 02 16	Elementy usunięte z zużytych urządzeń inne niż wymienione w 16 02 15
16 03	Partie produktów nieodpowiadające wymaganiom oraz produkty przeterminowane lub nieprzydatne do użytku
16 03 03*	Nieorganiczne odpady zawierające substancje niebezpieczne
16 03 04	Nieorganiczne odpady inne niż wymienione w 16 03 03, 16 03 80
16 03 05*	Organiczne odpady zawierające substancje niebezpieczne
16 03 06	Organiczne odpady inne niż wymienione w 16 03 05, 16 03 80
16 03 80	Produkty spożywcze przeterminowane lub nieprzydatne do spożycia
16 04	Odpady materiałów wybuchowych
16 04 01*	Odpadowa amunicja
16 04 02*	Odpadowe wyroby pirotechniczne (np. ogień sztuczny)
16 04 03*	Inne materiały wybuchowe
16 05	Gazy w pojemnikach ciśnieniowych i zużyte chemikalia
16 05 04*	Gazy w pojemnikach (w tym halony) zawierające substancje niebezpieczne
16 05 05	Gazy w pojemnikach inne niż wymienione w 16 05 04
16 05 06*	Chemikalia laboratoryjne i analityczne (np. odczynniki chemiczne) zawierające substancje niebezpieczne, w tym mieszaniny chemikaliów laboratoryjnych i analitycznych
16 05 07*	Zużyte nieorganiczne chemikalia zawierające substancje niebezpieczne (np. przeterminowane odczynniki chemiczne)
16 05 08*	Zużyte organiczne chemikalia zawierające substancje niebezpieczne (np. przeterminowane odczynniki chemiczne)
16 05 09	Zużyte chemikalia inne niż wymienione w 16 05 06, 16 05 07 lub 16 05 08

Kod	Grupy, podgrupy i rodzaje odpadów
16 06	Baterie i akumulatory
16 06 01*	Baterie i akumulatory ołowiowe
16 06 02*	Baterie i akumulatory niklowo-kadmowe
16 06 03*	Baterie zawierające rtęć
16 06 04	Baterie alkaliczne (z wyłączeniem 16 06 03)
16 06 05	Inne baterie i akumulatory
16 06 06*	Selektywnie gromadzony elektrolit z baterii i akumulatorów
16 07	Odpady z czyszczenia zbiorników magazynowych, cystern transportowych i beczek (z wyjątkiem grup 05 i 13)
16 07 08*	Odpady zawierające ropę naftową lub jej produkty
16 07 09*	Odpady zawierające inne substancje niebezpieczne
16 07 99	Inne niewymienione odpady
16 08	Zużyte katalizatory
16 08 01	Zużyte katalizatory zawierające złoto, srebro, ren, rod, pallad, iryd lub platynę (z wyłączeniem 16 08 07)
16 08 02*	Zużyte katalizatory zawierające niebezpieczne metale przejściowe ²⁾ lub ich niebezpieczne związki
16 08 03	Zużyte katalizatory zawierające metale przejściowe lub ich związki inne niż wymienione w 16 08 02
16 08 04	Zużyte katalizatory stosowane do katalitycznego krakingu w procesie fluidyzacyjnym (z wyłączeniem 16 08 07)
16 08 05*	Zużyte katalizatory zawierające kwas fosforowy
16 08 06*	Zużyte ciecze stosowane jako katalizatory
16 08 07*	Zużyte katalizatory zanieczyszczone substancjami niebezpiecznymi
16 09	Substancje utleniające
16 09 01*	Nadmanganiany (np. nadmanganian potasowy)
16 09 02*	Chromiany (np. chromian potasowy, dwuchromian sodowy lub potasowy)
16 09 03*	Nadtlenki (np. nadtlenek wodoru)
16 09 04*	Inne niewymienione substancje utleniające
16 10	Uwodnione odpady ciekłe przeznaczone do odzysku lub unieszkodliwiania poza miejscami ich powstawania
16 10 01*	Uwodnione odpady ciekłe zawierające substancje niebezpieczne
16 10 02	Uwodnione odpady ciekłe inne niż wymienione w 16 10 01
16 10 03*	Stężone uwodnione odpady ciekłe (np. koncentraty) zawierające substancje niebezpieczne
16 10 04	Stężone uwodnione odpady ciekłe (np. koncentraty) inne niż wymienione w 16 10 03
16 11	Odpady z okładzin piecowych i materiały ogniotrwałe
16 11 01*	Węglowodniowe okładziny piecowe i materiały ogniotrwałe z procesów metalurgicznych zawierające substancje niebezpieczne
16 11 02	Węglowodniowe okładziny piecowe i materiały ogniotrwałe z procesów metalurgicznych inne niż wymienione w 16 11 01
16 11 03*	Inne okładziny piecowe i materiały ogniotrwałe z procesów metalurgicznych zawierające substancje niebezpieczne
16 11 04	Okładziny piecowe i materiały ogniotrwałe z procesów metalurgicznych inne niż wymienione w 16 11 03
16 11 05*	Okładziny piecowe i materiały ogniotrwałe z procesów niemetalurgicznych zawierające substancje niebezpieczne
16 11 06	Okładziny piecowe i materiały ogniotrwałe z procesów niemetalurgicznych inne niż wymienione w 16 11 05

Kod	Grupy, podgrupy i rodzaje odpadów
16 06	Baterie i akumulatory
16 06 01*	Baterie i akumulatory ołowiowe
16 06 02*	Baterie i akumulatory niklowo-kadmowe
16 06 03*	Baterie zawierające rtęć
16 06 04	Baterie alkaliczne (z wyłączeniem 16 06 03)
16 06 05	Inne baterie i akumulatory
16 06 06*	Selektywnie gromadzony elektrolit z baterii i akumulatorów
16 07	Odpady z czyszczenia zbiorników magazynowych, cystern transportowych i beczek (z wyjątkiem grup 05 i 13)
16 07 08*	Odpady zawierające ropę naftową lub jej produkty
16 07 09*	Odpady zawierające inne substancje niebezpieczne
16 07 99	Inne niewymienione odpady
16 08	Zużyte katalizatory
16 08 01	Zużyte katalizatory zawierające złoto, srebro, ren, rod, pallad, iryd lub platynę (z wyłączeniem 16 08 07)
16 08 02*	Zużyte katalizatory zawierające niebezpieczne metale przejściowe ²⁾ lub ich niebezpieczne związki
16 08 03	Zużyte katalizatory zawierające metale przejściowe lub ich związki inne niż wymienione w 16 08 02
16 08 04	Zużyte katalizatory stosowane do katalitycznego krakingu w procesie fluidyzacyjnym (z wyłączeniem 16 08 07)
16 08 05*	Zużyte katalizatory zawierające kwas fosforowy
16 08 06*	Zużyte ciecze stosowane jako katalizatory
16 08 07*	Zużyte katalizatory zanieczyszczone substancjami niebezpiecznymi
16 09	Substancje utleniające
16 09 01*	Nadmanganiany (np. nadmanganian potasowy)
16 09 02*	Chromiany (np. chromian potasowy, dwuchromian sodowy lub potasowy)
16 09 03*	Nadtlenki (np. nadtlenek wodoru)
16 09 04*	Inne niewymienione substancje utleniające
16 10	Uwodnione odpady ciekłe przeznaczone do odzysku lub unieszkodliwiania poza miejscami ich powstawania
16 10 01*	Uwodnione odpady ciekłe zawierające substancje niebezpieczne
16 10 02	Uwodnione odpady ciekłe inne niż wymienione w 16 10 01
16 10 03*	Stężone uwodnione odpady ciekłe (np. koncentraty) zawierające substancje niebezpieczne
16 10 04	Stężone uwodnione odpady ciekłe (np. koncentraty) inne niż wymienione w 16 10 03
16 11	Odpady z okładzin piecowych i materiały ogniotrwałe
16 11 01*	Węglowodne okładziny piecowe i materiały ogniotrwałe z procesów metalurgicznych zawierające substancje niebezpieczne
16 11 02	Węglowodne okładziny piecowe i materiały ogniotrwałe z procesów metalurgicznych inne niż wymienione w 16 11 01
16 11 03*	Inne okładziny piecowe i materiały ogniotrwałe z procesów metalurgicznych zawierające substancje niebezpieczne
16 11 04	Okładziny piecowe i materiały ogniotrwałe z procesów metalurgicznych inne niż wymienione w 16 11 03
16 11 05*	Okładziny piecowe i materiały ogniotrwałe z procesów niemetalurgicznych zawierające substancje niebezpieczne
16 11 06	Okładziny piecowe i materiały ogniotrwałe z procesów niemetalurgicznych inne niż wymienione w 16 11 05

Kod	Grupy, podgrupy i rodzaje odpadów
16 80	Odpady różne
16 80 01	Magnetyczne i optyczne nośniki informacji
16 81	Odpady powstałe w wyniku wypadków i zdarzeń losowych
16 81 01*	Odpady wykazujące właściwości niebezpieczne
16 81 02	Odpady inne niż wymienione w 16 81 01
16 82	Odpady powstałe w wyniku klęsk żywiołowych
16 82 01*	Odpady wykazujące właściwości niebezpieczne
16 82 02	Odpady inne niż wymienione w 16 82 01
17	Odpady z budowy, remontów i demontażu obiektów budowlanych oraz infrastruktury drogowej (włączając glebę i ziemię z terenów zanieczyszczonych)
17 01	Odpady materiałów i elementów budowlanych oraz infrastruktury drogowej (np. beton, cegły, płyty, ceramika)
17 01 01	Odpady betonu oraz gruz betonowy z rozbiórek i remontów
17 01 02	Gruz ceglany
17 01 03	Odpady innych materiałów ceramicznych i elementów wyposażenia
17 01 06*	Zmieszane lub wysegregowane odpady z betonu, gruzu ceglano-ceramicznego, odpadów ceramicznych i elementów wyposażenia zawierające substancje niebezpieczne
17 01 07	Zmieszane odpady z betonu, gruzu ceglano-ceramicznego, odpadów ceramicznych i elementów wyposażenia inne niż wymienione w 17 01 06
17 01 80	Usunięte tynki, tapety, klejony itp.
17 01 81	Odpady z remontów i przebudowy dróg
17 01 82	Inne niewymienione odpady
17 02	Odpady drewna, szkła i tworzyw sztucznych
17 02 01	Drewno
17 02 02	Szkło
17 02 03	Tworzywa sztuczne
17 02 04*	Odpady drewna, szkła i tworzyw sztucznych zawierające lub zanieczyszczone substancjami niebezpiecznymi (podkłady kolejowe)
17 03	Odpady asfaltów, smół i produktów smołowych
17 03 01*	Asfalt zawierający smołę
17 03 02	Asfalt inny niż wymieniony w 17 03 01
17 03 03*	Smoła i produkty smołowe
17 03 80	Odpadowa papa
17 04	Odpady i złomy metaliczne oraz stopów metali
17 04 01	Miedź, brąz, mosiądz
17 04 02	Aluminium
17 04 03	Ołów
17 04 04	Cynk
17 04 05	Żelazo i stal
17 04 06	Cyna
17 04 07	Mieszanki metali
17 04 09*	Odpady metali zanieczyszczone substancjami niebezpiecznymi
17 04 10*	Kable zawierające ropę naftową, smołę i inne substancje niebezpieczne

Kod	Grupy, podgrupy i rodzaje odpadów
17 04 11	Kable inne niż wymienione w 17 04 10
17 05	Gleba i ziemia (włączając glebę i ziemię z terenów zanieczyszczonych oraz urobek z pogłębienia)
17 05 03*	Gleba i ziemia, w tym kamienie, zawierające substancje niebezpieczne (np. PCB)
17 05 04	Gleba i ziemia, w tym kamienie, inne niż wymienione w 17 05 03
17 05 05*	Urobek z pogłębienia zawierający lub zanieczyszczony substancjami niebezpiecznymi
17 05 06	Urobek z pogłębienia inny niż wymieniony w 17 05 05
17 05 07*	Tłuczeń torowy (kruszywo) zawierający substancje niebezpieczne
17 05 08	Tłuczeń torowy (kruszywo) inny niż wymieniony w 17 05 07
17 06	Materiały izolacyjne oraz materiały konstrukcyjne zawierające azbest
17 06 01*	Materiały izolacyjne zawierające azbest
17 06 03*	Inne materiały izolacyjne zawierające substancje niebezpieczne
17 06 04	Materiały izolacyjne inne niż wymienione w 17 06 01 i 17 06 03
17 06 05*	Materiały konstrukcyjne zawierające azbest
17 08	Materiały konstrukcyjne zawierające gips
17 08 01*	Materiały konstrukcyjne zawierające gips zanieczyszczone substancjami niebezpiecznymi
17 08 02	Materiały konstrukcyjne zawierające gips inne niż wymienione w 17 08 01
17 09	Inne odpady z budowy, remontów i demontażu
17 09 01*	Odpady z budowy, remontów i demontażu zawierające rtęć
17 09 02*	Odpady z budowy, remontów i demontażu zawierające PCB (np. substancje i przedmioty zawierające PCB: szczeliwa, wykładziny podłogowe zawierające żywice, szczelne zespoły okienne, kondensatory)
17 09 03*	Inne odpady z budowy, remontów i demontażu (w tym odpady zmieszane) zawierające substancje niebezpieczne
17 09 04	Zmieszane odpady z budowy, remontów i demontażu inne niż wymienione w 17 09 01, 17 09 02 i 17 09 03
18	Odpady medyczne i weterynaryjne
18 01	Odpady z diagnozowania, leczenia i profilaktyki medycznej
18 01 01	Narzędzia chirurgiczne i zabiegowe oraz ich resztki (z wyłączeniem 18 01 03)
18 01 02*	Części ciała i organy oraz pojemniki na krew i konserwanty służące do jej przechowywania (z wyłączeniem 18 01 03)
18 01 03*	Inne odpady, które zawierają żywe drobnoustroje chorobotwórcze lub ich toksyny oraz inne formy zdolne do przeniesienia materiału genetycznego, o których wiadomo lub co do których istnieją wiarygodne podstawy do sądenia, że wywołują choroby u ludzi i zwierząt (np. zainfekowane pieluchomajtki, podpaski, podkłady), z wyłączeniem 18 01 80 i 18 01 82
18 01 04	Inne odpady niż wymienione w 18 01 03
18 01 06*	Chemikalia, w tym odczynniki chemiczne, zawierające substancje niebezpieczne
18 01 07	Chemikalia, w tym odczynniki chemiczne, inne niż wymienione w 18 01 06
18 01 08*	Leki cytotoksyczne i cytostatyczne
18 01 09	Leki inne niż wymienione w 18 01 08
18 01 10*	Odpady amalgamatu dentystycznego
18 01 80*	Zużyte kąpiele lecznicze aktywne biologicznie o właściwościach zakaźnych
18 01 81	Zużyte kąpiele lecznicze aktywne biologicznie inne niż wymienione w 18 01 80
18 01 82*	Pozostałości z żywienia pacjentów oddziałów zakaźnych

Kod	Grupy, podgrupy i rodzaje odpadów
18 02	Odpady z diagnostowania, leczenia i profilaktyki weterynaryjnej
18 02 01	Narzędzia chirurgiczne i zabiegowe oraz ich resztki (z wyłączeniem 18 02 02)
18 02 02*	Inne odpady, które zawierają żywe drobnoustroje chorobotwórcze lub ich toksyny oraz inne formy zdolne do przeniesienia materiału genetycznego, o których wiadomo lub co do których istnieją wiarygodne podstawy do sądzenia, że wywołują choroby u ludzi i zwierząt
18 02 03	Inne odpady niż wymienione w 18 02 02
18 02 05*	Chemikalia, w tym odczynniki chemiczne, zawierające substancje niebezpieczne
18 02 06	Chemikalia, w tym odczynniki chemiczne, inne niż wymienione w 18 02 05
18 02 07*	Leki cytotoksyczne i cytostatyczne
18 02 08	Leki inne niż wymienione w 18 02 07
19	Odpady z instalacji i urządzeń służących zagospodarowaniu odpadów, z oczyszczalni ścieków oraz z uzdatniania wody pitnej i wody do celów przemysłowych
19 01	Odpady z termicznego przekształcania odpadów
19 01 02	Złom żelazny usunięty z popiołów paleniskowych
19 01 05*	Osady filtracyjne (np. placek filtracyjny) z oczyszczania gazów odlotowych
19 01 06*	Szlamy i inne odpady uwodnione z oczyszczania gazów odlotowych
19 01 07*	Odpady stałe z oczyszczania gazów odlotowych
19 01 10*	Zużyty węgiel aktywny z oczyszczania gazów odlotowych
19 01 11*	Żużle i popioły paleniskowe zawierające substancje niebezpieczne
19 01 12	Żużle i popioły paleniskowe inne niż wymienione w 19 01 11
19 01 13*	Popioły lotne zawierające substancje niebezpieczne
19 01 14	Popioły lotne inne niż wymienione w 19 01 13
19 01 15*	Pyły z kotłów zawierające substancje niebezpieczne
19 01 16	Pyły z kotłów inne niż wymienione w 19 01 15
19 01 17*	Odpady z pirolizy odpadów zawierające substancje niebezpieczne
19 01 18	Odpady z pirolizy odpadów inne niż wymienione w 19 01 17
19 01 19	Piaski ze złóż fluidalnych
19 01 99	Inne niewymienione odpady
19 02	Odpady z fizykochemicznej przeróbki odpadów (w tym usuwanie chromu, usuwanie cyjanków, neutralizacja)
19 02 03	Wstępnie przemieszane odpady składające się wyłącznie z odpadów innych niż niebezpieczne
19 02 04*	Wstępnie przemieszane odpady składające się z co najmniej jednego rodzaju odpadów niebezpiecznych
19 02 05*	Szlamy z fizykochemicznej przeróbki odpadów zawierające substancje niebezpieczne
19 02 06	Szlamy z fizykochemicznej przeróbki odpadów inne niż wymienione w 19 02 05
19 02 07*	Oleje i koncentraty z separacji
19 02 08*	Ciekłe odpady palne zawierające substancje niebezpieczne
19 02 09*	Stałe odpady palne zawierające substancje niebezpieczne
19 02 10	Odpady palne inne niż wymienione w 19 02 08 lub 19 02 09
19 02 11*	Inne odpady zawierające substancje niebezpieczne
19 02 99	Inne niewymienione odpady

Kod	Grupy, podgrupy i rodzaje odpadów
19 03	Odpady stabilizowane lub zestalone ³⁾
19 03 04*	Odpady niebezpieczne częściowo stabilizowane ⁴⁾
19 03 05	Odpady stabilizowane inne niż wymienione w 19 03 04
19 03 06*	Odpady niebezpieczne zestalone
19 03 07	Odpady zestalone inne niż wymienione w 19 03 06
19 04	Odpady zeszkłone i z procesów zeszkliwania
19 04 01	Zeszkłone odpady
19 04 02*	Popioły lotne i inne odpady z oczyszczania gazów odlotowych
19 04 03*	Niezeszkłona faza stała
19 04 04	Ciekłe odpady z procesów zeszkliwania
19 05	Odpady z tlenowego rozkładu odpadów stałych (kompostowania)
19 05 01	Nieprzekompostowane frakcje odpadów komunalnych i podobnych
19 05 02	Nieprzekompostowane frakcje odpadów pochodzenia zwierzęcego i roślinnego
19 05 03	Kompost nieodpowiadający wymaganiom (nienadający się do wykorzystania)
19 05 99	Inne niewymienione odpady
19 06	Odpady z beztlenowego rozkładu odpadów
19 06 03	Ciecze z beztlenowego rozkładu odpadów komunalnych
19 06 04	Przefermentowane odpady z beztlenowego rozkładu odpadów komunalnych
19 06 05	Ciecze z beztlenowego rozkładu odpadów zwierzęcych i roślinnych
19 06 06	Przefermentowane odpady z beztlenowego rozkładu odpadów zwierzęcych i roślinnych
19 06 99	Inne niewymienione odpady
19 08	Odpady z oczyszczalni ścieków nieujęte w innych grupach
19 08 01	Skratki
19 08 02	Zawartość piaskowników
19 08 05	Ustabilizowane komunalne osady ściekowe
19 08 06*	Nasycone lub zużyte żywice jonowymiennie
19 08 07*	Roztwory i szlamy z regeneracji wymienników jonitowych
19 08 08*	Odpady z systemów membranowych zawierające metale ciężkie
19 08 09	Tłuszcze i mieszaniny olejów z separacji olej/woda zawierające wyłącznie oleje jadalne i tłuszcze
19 08 10*	Tłuszcze i mieszaniny olejów z separacji olej/woda inne niż wymienione w 19 08 09
19 08 11*	Szlamy zawierające substancje niebezpieczne z biologicznego oczyszczania ścieków przemysłowych
19 08 12	Szlamy z biologicznego oczyszczania ścieków przemysłowych inne niż wymienione w 19 08 11
19 08 13*	Szlamy zawierające substancje niebezpieczne z innego niż biologiczne oczyszczania ścieków przemysłowych
19 08 14	Szlamy z innego niż biologiczne oczyszczania ścieków przemysłowych inne niż wymienione w 19 08 13
19 08 99	Inne niewymienione odpady
19 09	Odpady z uzdatniania wody pitnej i wody do celów przemysłowych
19 09 01	Odpady stałe ze wstępnej filtracji i skratki
19 09 02	Osady z klarowania wody

Kod	Grupy, podgrupy i rodzaje odpadów
19 09 03	Osady z dekarbonizacji wody
19 09 04	Zużyty węgiel aktywny
19 09 05	Nasycone lub zużyte żywice jonowymienne
19 09 06	Roztwory i szlamy z regeneracji wymienników jonitowych
19 09 99	Inne niewymienione odpady
19 10	Odpady z rozdrabniania odpadów zawierających metale
19 10 01	Odpady żelaza i stali
19 10 02	Odpady metali nieżelaznych
19 10 03*	Lekka frakcja i pyły zawierające substancje niebezpieczne
19 10 04	Lekka frakcja i pyły inne niż wymienione w 19 10 03
19 10 05*	Inne frakcje zawierające substancje niebezpieczne
19 10 06	Inne frakcje niż wymienione w 19 10 05
19 11	Odpady z regeneracji olejów
19 11 01*	Zużyte filtry łożowe
19 11 02*	Kwaśne smoły
19 11 03*	Uwodnione odpady ciekłe
19 11 04*	Alkaliczne odpady z oczyszczania paliw
19 11 05*	Osady z zakładowych oczyszczalni ścieków zawierające substancje niebezpieczne
19 11 06	Osady z zakładowych oczyszczalni ścieków inne niż wymienione w 19 11 05
19 11 07*	Odpady z oczyszczania gazów odlotowych
19 11 99	Inne niewymienione odpady
19 12	Odpady z mechanicznej obróbki odpadów (np. obróbki ręcznej, sortowania, zgniatania, granulowania) nieujęte w innych grupach
19 12 01	Papier i tektura
19 12 02	Metale żelazne
19 12 03	Metale nieżelazne
19 12 04	Tworzywa sztuczne i guma
19 12 05	Szkło
19 12 06*	Drewno zawierające substancje niebezpieczne
19 12 07	Drewno inne niż wymienione w 19 12 06
19 12 08	Tekstylia
19 12 09	Minerały (np. piasek, kamienie)
19 12 10	Odpady palne (paliwo alternatywne)
19 12 11*	Inne odpady (w tym zmieszane substancje i przedmioty) z mechanicznej obróbki odpadów zawierające substancje niebezpieczne
19 12 12	Inne odpady (w tym zmieszane substancje i przedmioty) z mechanicznej obróbki odpadów inne niż wymienione w 19 12 11
19 13	Odpady z oczyszczania gleby, ziemi i wód podziemnych
19 13 01*	Odpady stałe z oczyszczania gleby i ziemi zawierające substancje niebezpieczne
19 13 02	Odpady stałe z oczyszczania gleby i ziemi inne niż wymienione w 19 13 01
19 13 03*	Szlamy z oczyszczania gleby i ziemi zawierające substancje niebezpieczne
19 13 04	Szlamy z oczyszczania gleby i ziemi inne niż wymienione w 19 13 03
19 13 05*	Szlamy z oczyszczania wód podziemnych zawierające substancje niebezpieczne

Kod	Grupy, podgrupy i rodzaje odpadów
19 13 06	Szlamy z oczyszczania wód podziemnych inne niż wymienione w 19 13 05
19 13 07*	Odpady ciekłe i stężone uwodnione odpady ciekłe (np. koncentraty) z oczyszczania wód podziemnych zawierające substancje niebezpieczne
19 13 08	Odpady ciekłe i stężone uwodnione odpady ciekłe (np. koncentraty) z oczyszczania wód podziemnych inne niż wymienione w 19 13 07
19 80	Odpady z unieszkodliwiania odpadów medycznych i weterynaryjnych nieujęte w innych podgrupach
19 80 01	Odpady po autoklawowaniu odpadów medycznych i weterynaryjnych
20	Odpady komunalne łącznie z frakcjami gromadzonymi selektywnie
20 01	Odpady komunalne segregowane i gromadzone selektywnie (z wyłączeniem 15 01)
20 01 01	Papier i tektura
20 01 02	Szkło
20 01 08	Odpady kuchenne ulegające biodegradacji
20 01 10	Odzież
20 01 11	Tekstylija
20 01 13*	Rozpuszczalniki
20 01 14*	Kwasy
20 01 15*	Alkalia
20 01 17*	Odczynniki fotograficzne
20 01 19*	Środki ochrony roślin I i II klasy toksyczności (bardzo toksyczne i toksyczne np. herbicydy, insektycydy)
20 01 21*	Lampy fluorescencyjne i inne odpady zawierające rtęć
20 01 23*	Urządzenia zawierające freony
20 01 25	Oleje i tłuszcze jadalne
20 01 26*	Oleje i tłuszcze inne niż wymienione w 20 01 25
20 01 27*	Farby, tusze, farby drukarskie, kleje, lepiszcze i żywice zawierające substancje niebezpieczne
20 01 28	Farby, tusze, farby drukarskie, kleje, lepiszcze i żywice inne niż wymienione w 20 01 27
20 01 29*	Detergenty zawierające substancje niebezpieczne
20 01 30	Detergenty inne niż wymienione w 20 01 29
20 01 31*	Leki cytotoksyczne i cytostatyczne
20 01 32	Leki inne niż wymienione w 20 01 31
20 01 33*	Baterie i akumulatory łącznie z bateriami i akumulatorami wymienionymi w 16 06 01, 16 06 02 lub 16 06 03 oraz niesortowane baterie i akumulatory zawierające te baterie
20 01 34	Baterie i akumulatory inne niż wymienione w 20 01 33
20 01 35*	Zużyte urządzenia elektryczne i elektroniczne inne niż wymienione w 20 01 21 i 20 01 23 zawierające niebezpieczne składniki ¹⁾
20 01 36	Zużyte urządzenia elektryczne i elektroniczne inne niż wymienione w 20 01 21, 20 01 23 i 20 01 35
20 01 37*	Drewno zawierające substancje niebezpieczne
20 01 38	Drewno inne niż wymienione w 20 01 37
20 01 39	Tworzywa sztuczne
20 01 40	Metale
20 01 41	Odpady zmiotek wentylacyjnych

Kod	Grupy, podgrupy i rodzaje odpadów
20 01 80	Środki ochrony roślin inne niż wymienione w 20 01 19
20 01 99	Inne niewymienione frakcje zbierane w sposób selektywny
20 02	Odpady z ogrodów i parków (w tym z cmentarzy)
20 02 01	Odpady ulegające biodegradacji
20 02 02	Gleba i ziemia, w tym kamienie
20 02 03	Inne odpady nieulegające biodegradacji
20 03	Inne odpady komunalne
20 03 01	Niesegregowane (zmieszane) odpady komunalne
20 03 02	Odpady z targowisk
20 03 03	Odpady z czyszczenia ulic i placów
20 03 04	Szlamy ze zbiorników bezodpływowych służących do gromadzenia nieczystości
20 03 06	Odpady ze studzienek kanalizacyjnych
20 03 07	Odpady wielkogabarytowe
20 03 99	Odpady komunalne niewymienione w innych podgrupach

Objasnienia:

- 1) Do niebezpiecznych składników z elektrycznych i elektronicznych urządzeń można zaliczyć akumulatory i baterie wymienione w 16 06 i oznaczone jako niebezpieczne, przełączniki rtęciowe, szkło z lamp kineskopowych i inne szkło aktywne itp.
- 2) Do metali przejściowych zalicza się: skand, wanad, mangan, kobalt, miedź, itr, niob, hafn, wolfram, tytan, chrom, żelazo, nikiel, cynk, cyrkon, molibden, tantal. Metale te lub ich związki są niebezpieczne, jeżeli są klasyfikowane jako substancje niebezpieczne. Klasyfikacja substancji niebezpiecznych jest określona w przepisach odrębnych.
- 3) Procesy stabilizowania zmieniają niebezpieczne własności składników odpadów, a przez to przekształcają odpady niebezpieczne w inne niż niebezpieczne. Procesy zestalania zmieniają tylko stan fizyczny odpadów poprzez zastosowanie dodatków (np. przekształcają odpady ciekłe w stałe), nie zmieniając chemicznych własności odpadów.
- 4) Odpady uważa się za częściowo stabilizowane, jeśli po procesie stabilizowania składniki niebezpieczne, które nie zmieniły się całkowicie w składniki bezpieczne, można uwalniać do środowiska w krótkim, średnim lub długim horyzoncie czasowym.

ZAŁĄCZNIK 2. Składniki odpadów, które kwalifikują je jako odpady niebezpieczne

(Dz.U. 2010 Nr 185, poz. 1243 – zał. nr 3)

Kod	Składniki odpadu
C1	beryl, związki berylu
C2	związki wanadu
C3	związki chromu (VI)
C4	związki kobaltu
C5	związki niklu
C6	związki miedzi
C7	związki cynku
C8	arsen, związki arsenu
C9	selen, związki selenu
C10	związki srebra
C11	kadm, związki kadmu
C12	związki cyny
C13	antymon, związki antymonu
C14	tellur, związki telluru
C15	związki baru z wyjątkiem siarczanu baru
C16	rtęć, związki rtęci
C17	tal, związki talu
C18	ołów, związki ołowiu
C19	siarczki nieorganiczne
C20	nieorganiczne związki fluoru, z wyjątkiem fluoru wapnia
C21	cyjanki nieorganiczne
C22	następujące metale alkaliczne lub metale ziem alkalicznych: lit, sód, potas, wapń, magnez w postaci niezwiązanej
C23	kwaśne roztwory lub kwasy w postaci stałej
C24	roztwory zasadowe i zasady w postaci stałej
C25	azbest (pył i włókna)
C26	fosfor, związki fosforu, z wyjątkiem fosforanów mineralnych
C27	karbonylki metali
C28	nadtlenki
C29	chlorany
C30	nadchlorany
C31	azydki
C32	PCB
C33	farmaceutyki oraz związki stosowane w medycynie lub w weterynarii

Kod	Składniki odpadu
C34	biocydy i substancje fitofarmaceutyczne (np. pestycydy)
C35	substancje zakaźne
C36	kreozoty
C37	izocyjaniany, tiocyjaniany
C38	cyjanki organiczne (np. nityle)
C39	fenole, związki fenolowe
C40	halogenowane rozpuszczalniki
C41	rozwpuszczalniki organiczne, z wyjątkiem rozpuszczalników halogenowanych
C42	związki halogenoorganiczne, z wyjątkiem obojętnych materiałów spolimeryzowanych i innych substancji, o których mowa w niniejszym załączniku
C43	aromatyczne, policykliczne i heterocykliczne związki organiczne
C44	aminy alifatyczne
C45	aminy aromatyczne
C46	etery
C47	substancje o właściwościach wybuchowych, z wyjątkiem substancji wyszczególnionych w innych punktach niniejszego załącznika
C48	organiczne związki siarki
C49	jakąkolwiek pochodną polichlorowanego dibenzo-furanu
C50	jakąkolwiek pochodną polichlorowanej dibenzo-p-dioksyny
C51	węglowodory i ich związki z tlenem, azotem lub siarką nieuwzględnione w niniejszym załączniku

ZAŁĄCZNIK 3. Właściwości odpadów, które powodują, że odpady są niebezpieczne

(Dz.U. 2010 Nr 185, poz. 1243 – zał. nr 4)

Kod	Właściwości odpadów
H1	„wybuchowe”: substancje, które mogą wybuchnąć pod wpływem ognia lub które są bardziej wrażliwe na wstrząs lub tarcie niż dinitrobenzen,
H2	„utleniające”: substancje, które wykazują silnie egzotermiczne reakcje podczas kontaktu z innymi substancjami, w szczególności z substancjami łatwopalnymi,
H3-A	„wysoco łatwopalne”: 1) ciekłe substancje mające temperaturę zapłonu poniżej 21 °C (w tym nadzwyczaj łatwopalne ciecze), 2) substancje, które mogą rozgrzać się, a w efekcie zapalić się w kontakcie z powietrzem w temperaturze otoczenia bez jakiegokolwiek dostarczenia energii, 3) stałe substancje, które mogą się łatwo zapalić po krótkim kontakcie ze źródłem zapłonu i które palą się nadal lub tlą po usunięciu źródła zapłonu, 4) gazowe substancje, które są łatwopalne w powietrzu pod normalnym ciśnieniem, 5) substancje, które w kontakcie z wodą lub wilgotnym powietrzem tworzą wysoco łatwopalne gazy w niebezpiecznych ilościach,
H3-B	„łatwopalne”: ciekłe substancje mające temperaturę zapłonu równą lub wyższą niż 21 °C i niższą lub równą 55 °C,
H4	„drażniące”: substancje nieżrące, które poprzez krótki, długotrwały lub powtarzający się kontakt ze skórą lub błoną śluzową mogą wywołać stan zapalny,
H5	„szkodliwe”: substancje, które, jeśli są wdychane lub dostają się drogą pokarmową lub wnikają przez skórę mogą spowodować ograniczone zagrożenie dla zdrowia,
H6	„toksyczne”: substancje (w tym wysoco toksyczne substancje), które jeśli są wdychane lub dostają się drogą pokarmową lub wnikają przez skórę mogą spowodować poważne, ostre lub chroniczne zagrożenie dla zdrowia, a nawet śmierć,
H7	„rakotwórcze”: substancje, które, jeśli są wdychane lub dostają się drogą pokarmową lub wnikają przez skórę mogą wywoływać raka lub też zwiększyć częstotliwość jego występowania,
H8	„żrące”: substancje, które w zetknięciu z żywymi tkankami mogą spowodować ich zniszczenie,
H9	„zakaźne”: substancje zawierające żywe mikroorganizmy lub ich toksyny, o których wiadomo lub co do których istnieją wiarygodne podstawy do przyjęcia, że powodują choroby człowieka lub innych żywych organizmów,
H10	„działające szkodliwie na rozrodczość”: substancje, które, jeśli są wdychane lub dostaną się drogą pokarmową lub jeśli wnikają przez skórę mogą wywołać niedziedziczne wrodzone deformacje lub też zwiększyć częstotliwość ich występowania,
H11	„mutagenne”: substancje, które, jeśli są wdychane lub dostaną się drogą pokarmową lub jeśli wnikają przez skórę mogą wywołać dziedziczne defekty genetyczne lub też zwiększyć częstotliwość ich występowania,
H12	substancje, które w wyniku kontaktu z wodą, powietrzem lub kwasem uwalniają toksyczne lub wysoco toksyczne gazy,
H13	substancje, które po zakończeniu procesu unieszkodliwiania, mogą w dowolny sposób, wydzielić inną substancję, np. w formie odcieku, która posiada jakąkolwiek spośród cech wymienionych powyżej,
H14	„ekotoksyczne”: substancje, które stanowią lub mogą stanowić bezpośrednie lub opóźnione zagrożenie dla jednego lub więcej elementów środowiska.

ZAŁĄCZNIK 4. Procesy odzysku

(Dz.U. 2010 Nr 185, poz. 1243 – zał. nr 5)

Kod	Rodzaj procesu
R1	Wykorzystanie jako paliwa lub innego środka wytwarzania energii
R2	Regeneracja lub odzyskiwanie rozpuszczalników
R3	Recykling lub regeneracja substancji organicznych, które nie są stosowane jako rozpuszczalniki (włączając kompostowanie i inne biologiczne procesy przekształcania)
R4	Recykling lub regeneracja metali i związków metali
R5	Recykling lub regeneracja innych materiałów nieorganicznych
R6	Regeneracja kwasów lub zasad
R7	Odzyskiwanie składników stosowanych do usuwania zanieczyszczeń
R8	Odzyskiwanie składników z katalizatorów
R9	Powtórna rafinacja oleju lub inne sposoby ponownego wykorzystania oleju
R10	Rozprowadzanie na powierzchni ziemi w celu nawożenia lub ulepszenia gleby
R11	Wykorzystanie odpadów pochodzących z któregokolwiek z działań wymienionych w punktach od R1 do R10
R12	Wymiana odpadów w celu poddania któremukolwiek z działań wymienionych w punktach od R1 do R11
R13	Magazynowanie odpadów, które mają być poddane któremukolwiek z działań wymienionych w punktach od R1 do R12 (z wyjątkiem tymczasowego magazynowania w czasie zbiórki w miejscu, gdzie odpady są wytwarzane)
R14	Inne działania polegające na wykorzystaniu odpadów w całości lub części
R15	Przetwarzanie odpadów, w celu ich przygotowania do odzysku, w tym do recyklingu

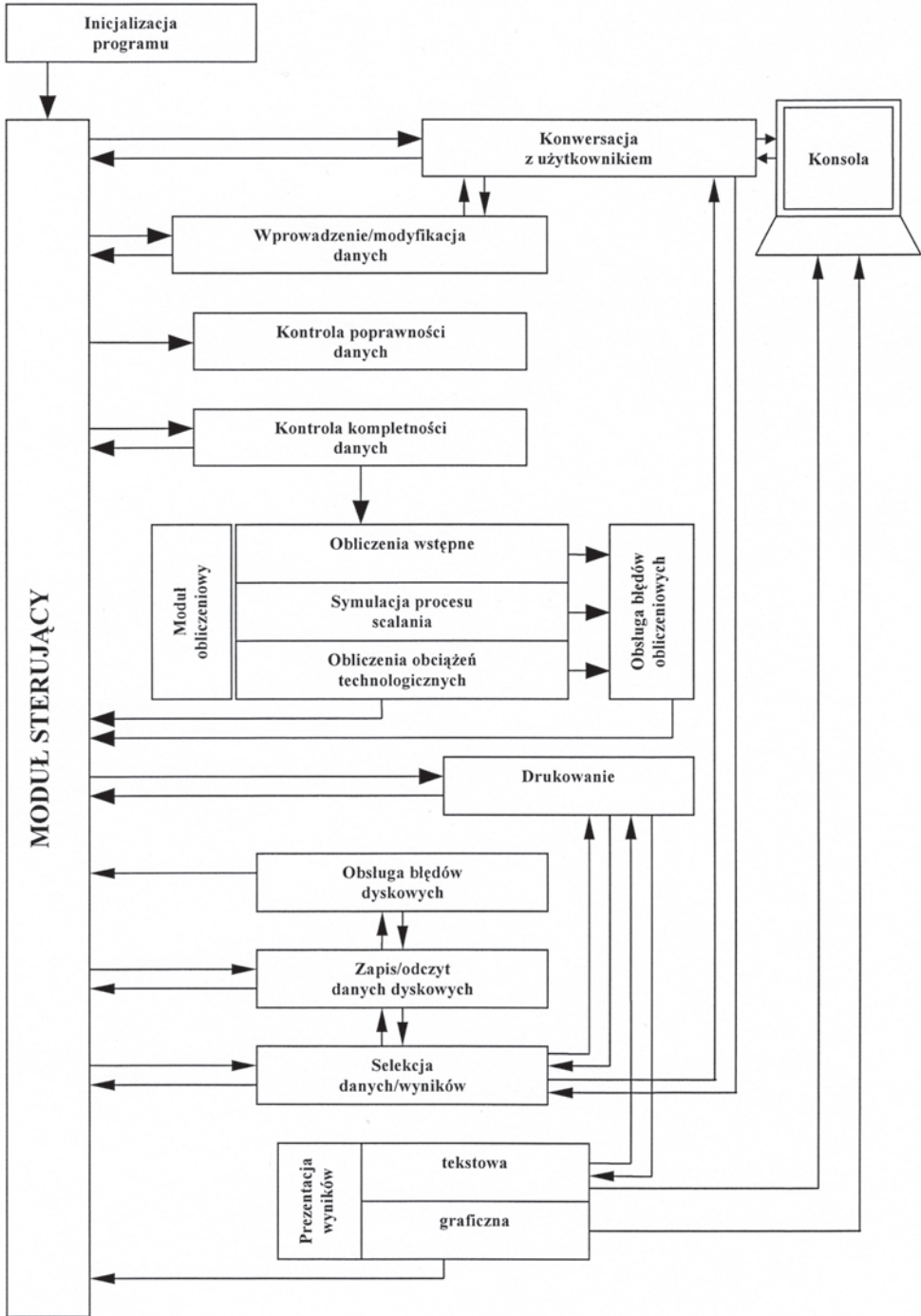
ZAŁĄCZNIK 5. Procesy unieszkodliwiania odpadów

(Dz.U. 2010 Nr 185, poz. 1243 – zał. nr 6)

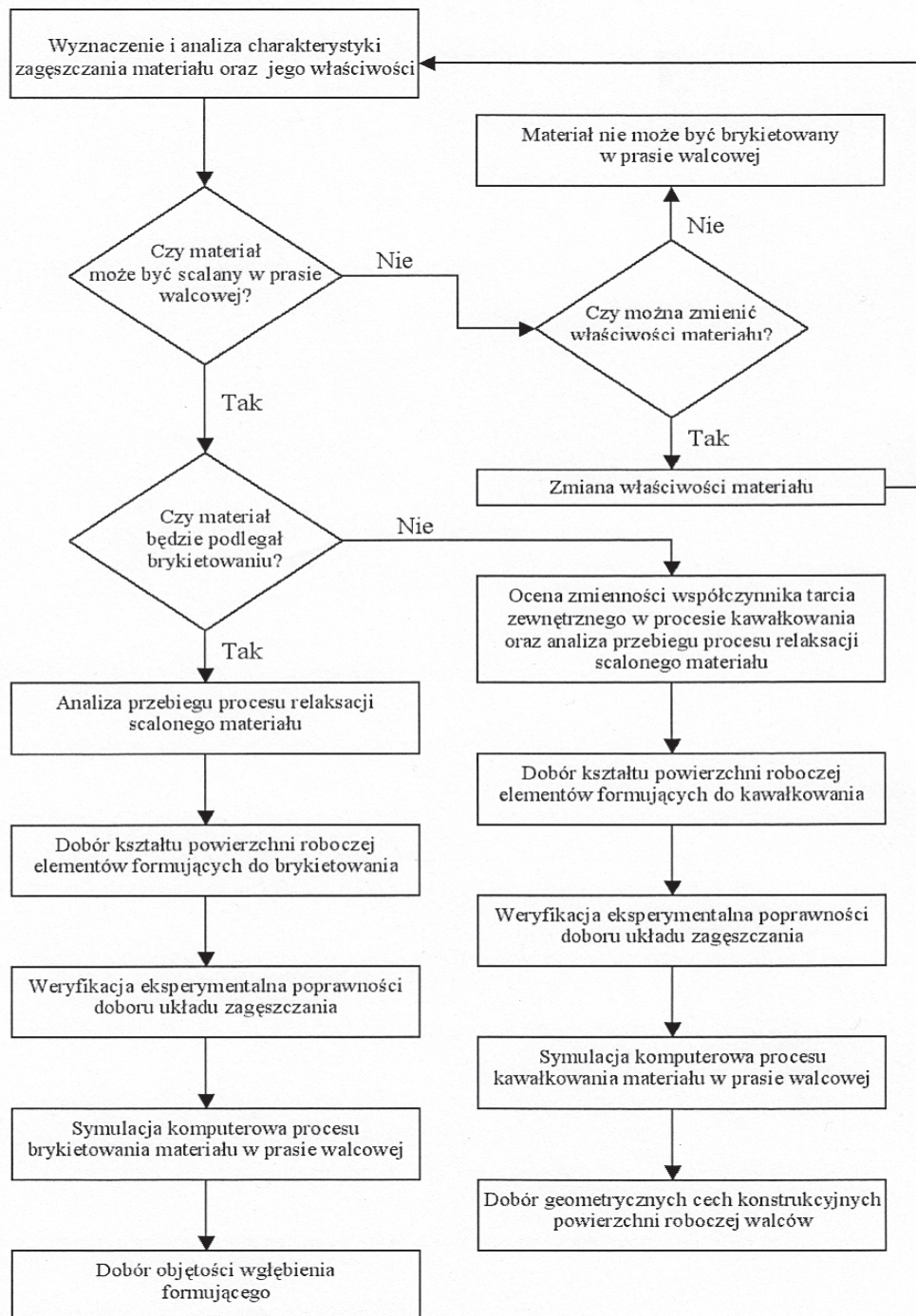
Kod	Rodzaj procesu
D1	Składowanie na składowiskach odpadów obojętnych
D2	Obróbka w glebie i ziemi (np. biodegradacja odpadów płynnych lub szlamów w glebie i ziemi)
D3	Składowanie przez głębokie zatłaczanie (np. zatłaczanie odpadów, które można pompować)
D4	Retencja powierzchniowa (np. umieszczanie odpadów na poletkach osadowych lub lagunach)
D5	Składowanie na składowiskach odpadów niebezpiecznych lub na składowiskach odpadów innych niż niebezpieczne
D6	Odprowadzanie do wód z wyjątkiem mórz*
D7	Lokowanie (zatapianie) na dnie mórz
D8	Obróbka biologiczna niewymieniona w innym punkcie niniejszego załącznika, w wyniku której powstają odpady, unieszkodliwiane za pomocą któregośkolwiek z procesów wymienionych w punktach od D1 do D12 (np. fermentacja)
D9	Obróbka fizyczno-chemiczna niewymieniona w innym punkcie niniejszego załącznika, w wyniku której powstają odpady, unieszkodliwiane za pomocą któregośkolwiek z procesów wymienionych w punktach od D1 do D12 (np. parowanie, suszenie, strącanie)
D10	Termiczne przekształcanie odpadów w instalacjach lub urządzeniach zlokalizowanych na lądzie
D11	Termiczne przekształcanie odpadów w instalacjach lub urządzeniach zlokalizowanych na morzu
D12	Składowanie odpadów w pojemnikach w ziemi (np. w kopalni)
D13	Sporządzanie mieszanki lub mieszanie przed poddaniem któremukolwiek z procesów wymienionych w punktach od D1 do D12
D14	Przepakowywanie przed poddaniem któremukolwiek z procesów wymienionych w punktach od D1 do D13
D15	Magazynowanie w czasie któregośkolwiek z procesów wymienionych w punktach od D1 do D14 (z wyjątkiem tymczasowego magazynowania w czasie zbiórki w miejscu, gdzie odpady są wytwarzane)
D16	Przetwarzanie odpadów, w wyniku którego są wytwarzane odpady przeznaczone do unieszkodliwiania

* Odprowadzanie do wód z wyjątkiem mórz w całości objęte jest zakazem.

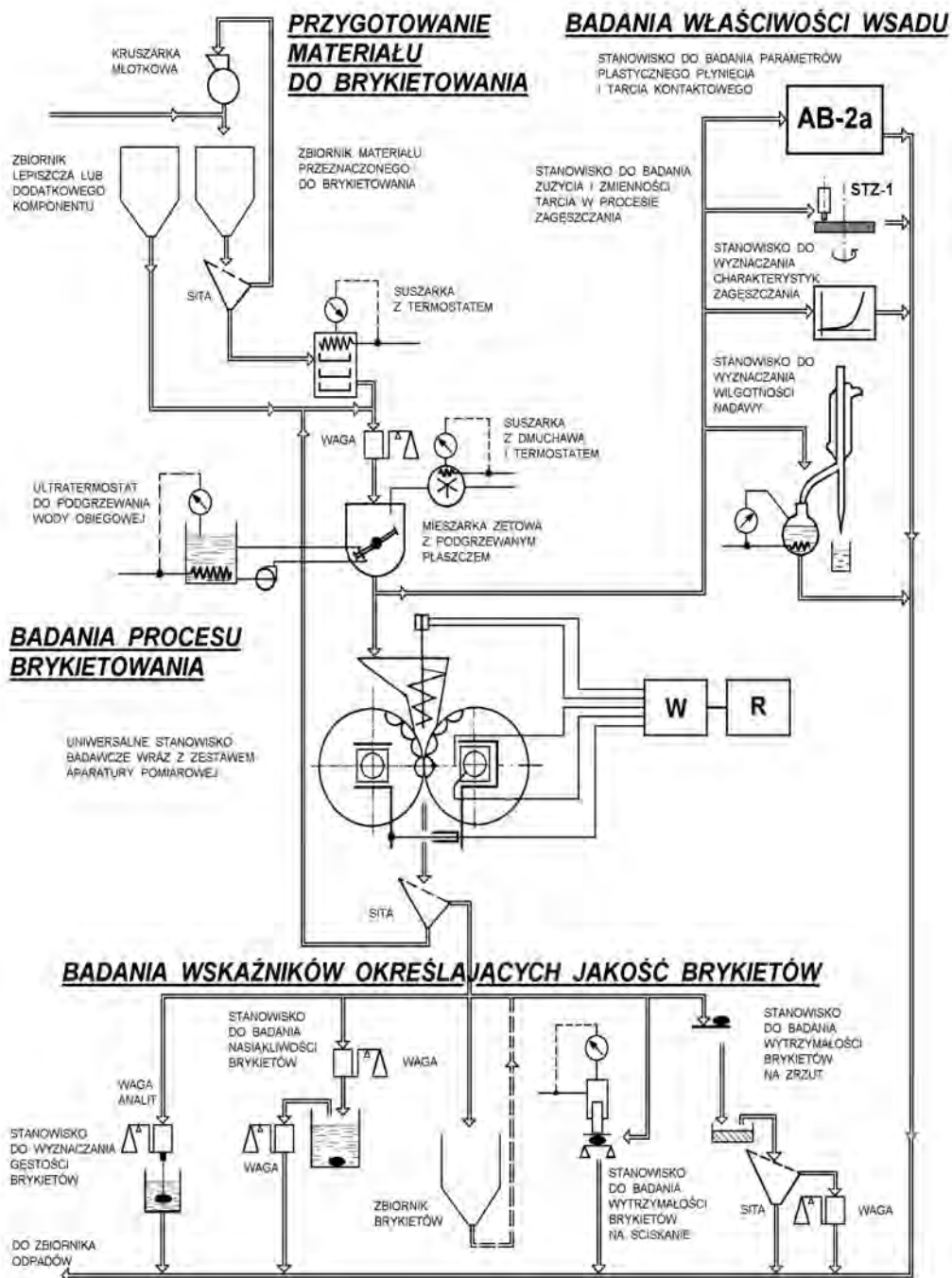
ZAŁĄCZNIK 6. Schemat blokowy programu symulacji komputerowej brykietowania



ZAŁĄCZNIK 7. Procedura doboru elementów formujących prasy walcowej



ZAŁĄCZNIK 8. Schemat instalacji doświadczalnej do badań procesu brykietowania



ZAŁĄCZNIK 9. Schemat instalacji doświadczalnej do badań procesu granulowania

