

Gabriel Borowski<sup>1)</sup>, Michał Miłczak<sup>1)</sup>

## BADANIA PRZYDATNOŚCI BRYKIETÓW Z POPIOŁÓW PALENISKOWYCH JAKO PODBUDOWY DROGOWE

**Streszczenie.** W publikacji przedstawiono wyniki badań przydatności brykietów wytworzonych z popiołów paleniskowych z dodatkiem lepszczu. Określono właściwości fizyczno-chemiczne popiołów oraz przedstawiono sposób ich przetwarzania. Prace obejmowały określenie sposobu przygotowania materiału do brykietowania, analizę procesu zagęszczania w prasie stemplej oraz ocenę wytrzymałościową brykietów. Istotnymi czynnikami analizy było rodzaj i ilość dodawanego lepszczu, wilgotność mieszanki, wielkość nacisku prasy formującej brykiety oraz czas sezonowania. Wyniki przeprowadzonych badań wykazały, że z popiołów paleniskowych uzyskuje się brykiety o dużej odporności mechanicznej, które nadają się wykorzystania jako zamiennik kruszywa mineralnego na podbudowy drogowe.

### WPROWADZENIE

W celu uzyskania energii cieplnej w procesie spalania węgla oraz coraz częściej biomasy powstają różnego rodzaju odpady energetyczne, do których m.in. zalicza się: popioły lotne, żużle, mieszaniny popiołowo-żużłowe, mikrosfery, popioły z kotłów fluidalnych oraz gips z odsiarczania spalin. Pozostałości te nadal nie są w całości zagospodarowane, a znacząca ich ilość umieszczana jest na składowiskach przyczyniając się do degradacji środowiska. Z tego względu należy sukcesywnie kontynuować prace badawcze nad gospodarczym wykorzystywaniem popiołów lotnych oraz paleniskowych. Obecnie największe zastosowanie tych popiołów ma miejsce w przemyśle budowlanym, gdzie są równoważnikiem pełnowartościowych surowców mineralnych używanych w produkcji materiałów budowlanych takich jak cement, klinkier cementowy, kruszywa lekkie oraz ceramika budowlana [4, 5, 6].

Popioły paleniskowe ze spalania paliw w kotłach energetycznych zaliczane są do odpadów drobnoziarnistych, które w swojej naturalnej postaci stwarzają duże problemy związane z zagospodarowaniem. Korzystnie jest wykorzystywać je po odpowiednim przetworzeniu poprzez dostosowanie ich właściwości fizycznych oraz chemicznych. Jednym z często stosowanych sposobów przetwarzania materiałów sypkich jest scalanie metodą brykietowania. Brykietowanie nadaje popiołom postać jednorodnie zbryloną, pod warunkiem doboru odpowiednich parametrów procesu oraz zastosowaniu dodatków wiążących [1]. Przydatność brykietów do określonego zastosowania wy-

---

<sup>1)</sup> Katedra Podstaw Techniki, Politechnika Lubelska.

maga zbadania ich właściwości w aspekcie spełnienia wymogów konkretnego odbiorcy. W przypadku zastosowania w przemyśle budowlanym, brykiety te muszą spełniać następujące wymogi [7, 8]:

- odporność mechaniczna na ściskanie,
- odporność na rozdrabnianie i ścieranie,
- sprężystość,
- gęstość,
- odporności na działania czynników atmosferycznych, w szczególności mrozoodporność,
- nasiąkliwość i wodoprzepuszczalność.

Spełnienie tych wymogów wiąże się z przeprowadzeniem licznych prób i badań doświadczalnych, z uwzględnieniem zachowania określonych parametrów w dłuższym okresie czasu, czyli sezonowania.

W niniejszej pracy przedstawiono wyniki badań brykietów wytworzonych z popiołów paleniskowych ze spalania biomasy drzewnej, która stanowi coraz większy udział w uzyskiwaniu energii cieplnej, zwłaszcza w kotłach zasilających gospodarstwa indywidualne. Wyniki poddano analizie w zakresie możliwości wykorzystania tych brykietów jako zamiennika naturalnego kruszywa stosowanego do podbudowy dróg.

## CHARAKTERYSTYKA POPIOŁÓW Z BIOMASY

Z ekologicznego punktu widzenia korzystną cechą paliwa jest mała zawartość części lotnych, popiołu, siarki i innych szkodliwych substancji przy relatywnie dużej wartości opałowej [9, 10]. W tabeli 1 przedstawiono wyniki pomiarów tych parametrów wraz z podstawowymi cechami fizycznymi paliwa z biomasy drzewnej w porównaniu z węglem kamiennym.

**Tabela 1.** Właściwości fizyczne i energetyczne biomasy drzewnej i węgla

Parametr	Biomasa z drewna liściastego	Węgiel kamienny
Gęstość nasypowa, kg/m <sup>3</sup>	80	880
Zawartość wilgoci, %	14,0	7,1
Wartość opałowa, kJ/kg	19 000	28 000
Zawartość części lotnych, %	66,5	26,6
Zawartość popiołu, %	2,0	12,2
Zawartość siarki, %	0,1	0,9
Tlen, %	30,2	7,0
Węgiel, %	42,0	81,0
Azot, %	0,5	1,1

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 biomacie. 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.

Z tego też względu jako materiał do dalszych badań wybrano popioły paleniskowe z przydomowych kotłów energetycznych opalanych drewnem liściastym takim, jak brzoza, grab, buk i dąb. Określono jego skład chemiczny oraz porównano z analogicznymi cechami popiołu ze spalania węgla kamiennego oraz mieszanki węglowo-biomasy (tabela 2).

Skład chemiczny popiołu ze spalania biomasy drewna liściastego jest znacząco różny w porównaniu do składu popiołu z węgla oraz mieszanki węglowo-biomasy. Głównymi składnikami chemicznymi w popiele z biomasy są związki  $\text{CaO}$ ,  $\text{SiO}_2$  oraz  $\text{K}_2\text{O}$ . Z kolei w popiele ze spalania zarówno węgla, jak i mieszanki występują głównie związki  $\text{SiO}_2$ , oraz  $\text{Al}_2\text{O}_3$ . Należy mieć na uwadze fakt 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.

Najważniejsze parametry fizyczne popiołów paleniskowych ze spalania biomasy drzewnej przedstawiono w tabeli 3.

**Tabela 2.** Skład chemiczny popiołu ze spalania biomasy drzewnej w porównaniu do węgla i mieszanki węglowo-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 <sub>2</sub>	23,50	50,82	48,97
K <sub>2</sub> O	15,20	2,98	3,51
MgO	7,60	2,76	2,93
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	6,70	28,64	27,52
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	2,80	0,89	1,90
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1,70	6,16	6,09
Inne	0,70	5,09	4,58

**Tabela 3.** Właściwości fizyczne popiołu ze spalania biomasy drzewnej

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

Popioły ze spalania biomasy drzewnej posiadają duży stopień rozdrobnienia o wymiarach ziaren wynoszących najczęściej od 0,01 do 1,0 mm. Materiał ten często występuje z gabarytowo większymi pojedynczymi zanieczyszczeniami, które powinny się odseparować. Charakteryzuje się zarówno małą zawartością wilgoci, jak i gęstością usypową. Cechy te wpływają na występowanie znacznego pylenia popiołów oraz konieczności zapewnienia dużej powierzchni podczas składowania i transportu.

## SPOSÓB WYTWARZANIA I METODYKA BADAŃ BRYKIETÓW

W procesie brykietowania materiałów drobnoziarnistych istotną rolę odgrywają czynniki związane z przygotowaniem materiału. Przygotowanie materiału do brykietowania obejmuje rozdrabnianie, mieszanie składników oraz dosuszanie do wilgotności mniejszej niż 12% [1, 3].

Do rozdrabniania wykorzystuje się młynki elektryczne, które dobiera się uwzględniając właściwości rozdrabnianych materiałów. Najczęściej stosuje się młynki udarowe oraz nożowe (tnące).

Mieszanie składników wykonuje się w mieszarkach łopatkowych lub ślimakowych, przy czym ścianki urządzenia mogą być podgrzewane w celu szybszego dosuszenia składników. Korzystne jest dodanie do mieszarki materiału wiążącego, tzw. lepiszcza. Często stosowanymi lepiszczami są skrobia, melasa, ług sodowy, szkło wodne, wapno, gips i wiele innych.

Uzyskanie wymaganej wilgotności wymaga przeprowadzenia dosuszania termicznego. Suszenie można przeprowadzić w suszarce bębnowej. Materiał ładuje się podajnikiem do bębna suszarki gdzie następuje właściwy proces suszenia. Podczas ruchu obrotowego znajdujący się w bębnie ślimak przesuwa materiał w kierunku wylotu. Utrata wilgotności następuje poprzez bezpośredni styk suszonego surowca z gorącymi elementami grzejnymi albo ze strumieniem powietrza. Dosuszony do poniżej 12% wilgotności materiał wpada na dno komory skąd transportowany jest do zasobnika prasy brykietującej.

W przypadku przygotowania mieszanki popiołów ze spalania biomasy drzewnej nie występowała potrzeba wstępnego dosuszania oraz rozdrabniania materiału. Konieczne było natomiast dodanie niewielkiej ilości wody dla uzyskania ok. 5% wilgotności mieszanki, co wpłynęło korzystnie na proces brykietowania. Do mieszaniny dodawano

następujące lepiszcza: melasę, wapno hydratyzowane oraz cement. Przygotowano też partię materiału bez dodatków wiążących.

Do mieszania składników zastosowano laboratoryjną mieszarkę elektryczną, a następnie przeprowadzono pomiary wilgotności przy pomocy wagosuszarki firmy KETT typu FD-620. Urządzenie umożliwia pomiar wilgotności z dokładnością  $\pm 0,1\%$  w zakresie temperatur 50–195 °C, przy czym zadana temperatura suszenia wynosiła 100 °C.

Przygotowaną mieszankę brykietowano wykorzystując prasę hydrauliczną PH-100 o sile docisku stempla do 100 kN. Wykorzystano matrycę formującą własnej konstrukcji umożliwiającą uzyskanie brykietów o kształcie walcowym, którego średnica wynosi 30 mm. Cechy fizyczne brykietów oraz stosowane naciski jednostkowe stempla podano w tabeli 4.

Gotowe brykiety poddano badaniom wytrzymałościowym z uwzględnieniem wpływu sezonowania. Odporność mechaniczną brykietów określono na podstawie następujących parametrów [1, 2]:

- odporność na zrzut grawitacyjny,
- maksymalna wartości nacisku stempla powodująca zniszczenie struktury brykieta.

Odporność brykieta na zrzut grawitacyjny oceniano poprzez procentowy ubytek masy po trzykrotnym zrzućeniu partii brykietów z wysokości 2,0 m na stalową płytę o grubości 20 mm. Po każdym zrzućeniu przesiewano próbki przez sito o rozmiarze oczek większym niż dopuszczalny minimalny wymiar brykieta [4]. Wymagana minimalna odporność grawitacyjną na zrzut powinna wynosić co najmniej 90%.

Wartość siły nacisku stempla powodująca zniszczenie struktury brykieta określono eksperymentalnie w ten sposób, że umieszczony go poziomo między płaskimi powierzchniami hydraulicznej maszyny wytrzymałościowej i ściskano aż do momentu zniszczenia jego struktury. Minimalna wartość jednostkowego nacisku stempla powodująca zniszczenie brykieta powinna wynosić co najmniej 1,0 MPa.

**Tabela 4.** Cechy fizyczne przygotowanych do badań partii brykietów

Nr partii	Rodzaj i udział lepiszcza, %	Nacisk jednostkowy stempla, MPa	Masa brykieta, g	Objętość brykieta, mm <sup>3</sup>
1	Bez lepiszcza	9,90	31,44	148,36
2	Melasa, 5%	7,10	26,30	115,02
3	Melasa, 5%	4,25	27,39	120,10
5	Melasa, 10%	4,25	30,27	137,91
6	Wapno hydratyzowane, 5%	4,25	21,35	115,87
7	Wapno hydratyzowane, 8%	4,25	22,10	117,28
8	Wapno hydratyzowane, 5% + cement 5%	4,25	23,61	120,10
9	Wapno hydratyzowane, 8% + cement, 8%	4,25	26,91	127,17
10	Wapno hydratyzowane, 8% + cement, 10%	4,25	24,57	128,58

## ANALIZA WYNIKÓW BADAŃ

Wyniki badań wytrzymałościowych brykietów z popiołów ze spalania biomasy drzewnej przedstawia tabela 5.

W większości przypadków odporność grawitacyjna na zrzut osiągała wartość powyżej 90%, którą uznano jako wymagane minimum, oprócz próbek z dodatkiem melasy jako lepiszcza. Lepiszczce to nie polepszało właściwości mechanicznych brykietów popiołowych, należało zatem zastosować innych substancji wiążących. Dodatek wapna hydratyzowanego umożliwił uzyskanie brykietów o właściwościach mechanicznych zbliżonych do minimalnych, jednak niektóre partie brykietów charakteryzowały się jednostkowym naciskiem stempla niszczącego brykiet poniżej wartości wymaganej. Dopiero dodatek cementu umożliwił uzyskanie brykietów o wysokiej odporności mechanicznej. Najkorzystniejsze cechy wytrzymałościowe wykazały brykiety zawierające lepiszcze dwuskładnikowe zawierające wapno hydratyzowane oraz cement w udziale masowym od 5 do 8%. Stwierdzono, że podwyższenie udziału któregośkolwiek ze składników lepiszcza nie przynosi istotnego poprawienia odporności mechanicznej, a wręcz przeciwnie może ona ulec pogorszeniu.

Stwierdzono korzystny wpływ sezonowania na wzrost odporności mechanicznej brykietów (tab. 5). Optymalny okres sezonowania wynosi dwa tygodnie, jednak wystarczające właściwości posiadały również brykiety świeże z dodatkiem wapna i cementu jako lepiszcza.

Zbadano wpływ nacisku jednostkowego stempla (tab. 4) oraz wilgotności mieszanki na odporność mechaniczną brykietów. Duże wartości nacisku formującego nie przekładały się na podwyższenie odporności mechanicznej brykietów. Określona do-

**Tabela 5.** Właściwości mechaniczne brykietów z uwzględnieniem sezonowania

Nr próby	Rodzaj i udział lepiszcza, %	Wartość jednostkowego nacisku stempla niszczącego brykiet, MPa		Odporność na zrzut grawitacyjny, %	
		brykiet świeży	brykiet sezonowany	brykiet świeży	brykiet sezonowany
1	Melasa, 5%	0,74	0,88	84,0	86,1
2	Melasa, 10%	0,68	0,71	85,5	89,7
3	Wapno hydratyzowane, 5%	1,02	1,13	97,1	98,0
4	Wapno hydratyzowane, 8%	0,89	0,99	95,0	96,5
5	Wapno hydratyzowane + cement, 5%	1,27	1,42	98,8	99,2
6	Wapno hydratyzowane + cement, 8%	1,58	1,70	97,6	98,8
7	Wapno hydratyzowane + cement, 10%	1,75	1,98	97,5	98,9

świadczalnie optymalna wartość nacisku jednostkowego stempla wynosiła 4,25 MPa. Najkorzystniejsza natomiast zawartość wilgoci w mieszance wynosiła w zakresie 5–8 %.

## WNIOSKI

W oparciu o przedstawione wyniki badań i analiz sformułowano następujące wnioski:

1. Zasadne jest brykietowanie drobnoziarnistych popiołów paleniskowych ze spalania biomasy drzewnej.
2. Właściwości brykietów zależą od zastosowania odpowiednich substancji wiążących. Korzystny jest dodatek lepiszcza dwuskładnikowego na bazie wapna i cementu oraz doprowadzenie mieszanki do określonej wilgotności.
3. Na odporność mechaniczną brykietów korzystny wpływ ma również ich sezonowanie.
4. Brykiety z drobnoziarnistych popiołów paleniskowych mogą być wykorzystane jako substytut kruszywa mineralnego na podbudowy drogowe.
5. Konieczna jest analiza wpływu brykietów na środowisko naturalne w obszarze podbudowy, w szczególności określenie wymywalności zanieczyszczeń chemicznych.

## PIŚMIENNICTWO

1. Borowski G. Kuczmaszewski J. Utylizacja drobnoziarnistych odpadów metalowych. Monografia. Wydawnictwo Politechniki Lubelskiej, Lublin 2005.
2. Borowski G. Określenie właściwości fizyczno-mechanicznych materiałów drobnoziarnistych w celu ich zagospodarowania. *Postępy Nauki i Techniki*, 3, 2009: 67–82.
3. Borowski G. Możliwości wykorzystania odpadów z energetyki do budowy dróg. *Inżynieria Ekologiczna*, 22, 2010: 85–96.
4. Granops T. Wyniki badań i prognozy wykorzystania popiołów z Dolnej Odry w drogownictwie. W: Konferencja Międzynarodowa nt. „Zagospodarowanie odpadów paleniskowych i odpadów z odsiarczania spalin”, Świnoujście 1994.
5. Jarema-Suchorowska S. Wyniki badań nad utylizacją odpadów paleniskowych. W: Konferencja Międzynarodowa nt. „Zagospodarowanie odpadów paleniskowych i odpadów z odsiarczania spalin”, Świnoujście 1994.
6. Kępyś W. Próba odzysku popiołów lotnych i żużli z instalacji termicznego przekształcania odpadów jako kruszywa sztucznego. *Gospodarka Surowcami Mineralnymi*, tom 24, zeszyt 3/3, 2008.
7. Kukielka J. Wykorzystanie popiołów lotnych do budowy dróg. *Ekoinżynieria*, 4, 1998: 8–11.
8. Pachowski J. Popioły lotne i ich zastosowanie w budownictwie drogowym. Wyd. Komunikacji i Łączności, Warszawa 1976.
9. Piotrowski Z., Uliasz-Bocheńczyk A. Możliwości gospodarczego wykorzystania odpadów z kotłów fluidalnych. *Gospodarka Surowcami Mineralnymi*, tom 24, zeszyt 2/1, 2008.

10. Wileński P. Sposoby i warunki wykorzystania energetycznych odpadów paleniskowych w budownictwie komunikacyjnym. W: Konferencja Naukowo-Techniczna nt. „Produkty uboczne spalania węgla w energetyce jako pełnowartościowy surowiec”, Świnoujście 1996.

## **INVESTIGATION ON THE BRIQUETTES FROM THE BOILER FURNACE ASHES TO ROAD BUILDING UTILIZATION**

### **Summary**

This publication presents the results of investigations on the briquettes made with the boiler furnace ashes together with a binding agent. The physical-chemical properties of the material investigated and the way of utilization, were described. The process for preparing the material into briquettes comprised of consolidation constituents as well compressive strength test, were presented. Analysis was made of such parameters as: contribution of the binder in the mixture, moisture in the mixture, press pressure on the formation, and seasoning. The results confirm the possibility of obtaining of high toughness briquettes. They would be interchangeable with aggregates building materials.