

*Research on the briquetting process of basalt waste mixtures***Badania procesu brykietowania mieszanek odpadów bazaltowych**

DOI: 10.15199/62.2026.7.8

Tests were carried out on briquetting mixts. of basalt waste with a moisture content of 1.31% and lignite with a moisture content of 50.12%, municipal sewage sludge with a moisture content of 9.37% and coffee grounds with a moisture content of 8.45% in a gravity-fed roller press equipped with rings with asymmetrical thickening layout. Drop strength and compressive strength of the briquettes and energy demand were also detd.

Keywords: briquetting, basalt waste, gravity-fed roller press

Przeprowadzono badania brykietowania mieszanek odpadowego bazaltu o wilgotności 1,31%, węgla brunatnego o wilgotności 50,12%, komunalnych osadów ściekowych o wilgotności 9,37% oraz fusów kawy o wilgotności 8,45% w prasie walcowej, wyposażonej w pierścienie o niesymetrycznym układzie zagęszczania zasilanej grawitacyjnie. Określono wytrzymałość na rzut i ściskanie brykietów oraz jednostkowe zapotrzebowanie na energię.

Słowa kluczowe: brykietowanie, odpady bazaltowe, prasa walcowa

Zakwaszenie gleb w Polsce stanowi jeden z najważniejszych czynników ograniczających produkcję roślinną. Przyczyniają się do niego zarówno warunki klimatyczno-glebowe, jak i działalność człowieka. W latach 2021–2024 potrzebie wapnowania podlegało 64% przebadanych gleb, z czego dla 19% gleb nawożenie wapnem było konieczne, dla 12% potrzebne, dla 15% gleb wskazane, a dla 18% ograniczone¹⁾. Mając to na uwadze, a także uwzględniając zobowiązania Unii Europejskiej określone w Porozumieniu Paryskim (Paris Agreement) w zakresie zmniejszenia emisji CO₂ przy produkcji rolniczej, w Katedrze Systemów Wytwarzania AGH od wielu lat prowadzone są próby scalania materiałów zawierających wapń, w tym odpadów^{2–9)}. Trudno zbywalny drobnoziarnisty bazalt, który powstaje przy wydobywaniu i obróbce skał, zawiera wiele składników mineralnych i mikroelementów, poprawiających strukturę gleby oraz chroniących rośliny przed chorobami grzybicznymi i szkodnikami. Niewątpliwą zaletą jego stosowania jako nawozu jest nietoksyczność i niemoż-

ność przedawkowania¹⁰⁾. W powiązaniu z komunalnymi osadami ściekowymi podawanymi w kontrolowany sposób, węglem brunatnym i ewentualnie fusami kawy, mogą uzupełnić rynek nawozów mineralnych. Pozytywne wyniki brykietowania w prasie walcowej ustabilizowanych komunalnych osadów ściekowych (kod odpadu 19 08 05) z węglem brunatnym¹¹⁾ oraz trudności w kontroli procesu scalania odpadowego bazaltu z komunalnymi osadami ściekowymi w granulatorze bębnowym¹⁰⁾ zasugerowały kierunek badań przedstawiony w tym artykule. Przy zastosowaniu w mieszance komunalnych osadów ściekowych należy mieć na uwadze ograniczenia wymienione w § 2.1 rozporządzenia¹²⁾. W celu polepszenia jakości wytworzonego nawozu zdecydowano o dodawaniu do mieszanek odpadowego bazaltu fusów kawy. Oceniając ich skład chemiczny oraz pH pod kątem przydatności jako surowca do produkcji nawozów organiczno-wapniowych lub polepszaczy gleby, można stwierdzić, że mieszanki fusów z kawy są niezwykle cenne ze względu na wysoką zawartość wapnia i magnezu jako składników



Dr hab. inż. Bogdan KOSTURKIEWICZ, prof. AGH (ORCID: 0000-0002-4261-7901), w roku 1987 ukończył studia na Wydziale Maszyn Górniczych i Hutniczych AGH w Krakowie. Pracuje na stanowisku profesora uczelni w Katedrze Systemów Wytwarzania na Wydziale Inżynierii Mechanicznej i Robotyki tej samej uczelni. Specjalność – inżynieria mechaniczna.



Dr hab. inż. Andrzej JANEWICZ, prof. AGH (ORCID: 0000-0003-4233-5530), w roku 1989 ukończył studia na Wydziale Maszyn Górniczych i Hutniczych AGH w Krakowie. Pracuje na stanowisku profesora uczelni w Katedrze Systemów Wytwarzania na Wydziale Inżynierii Mechanicznej i Robotyki tej samej uczelni. Specjalność – inżynieria mechaniczna.

* Adres do korespondencji:

AGH Akademia Górniczo-Hutnicza im. Stanisława Staszica w Krakowie, al. Mickiewicza 30, 30-059 Kraków, tel.: (12) 617-24-95, e-mail: kostur@agh.edu.pl

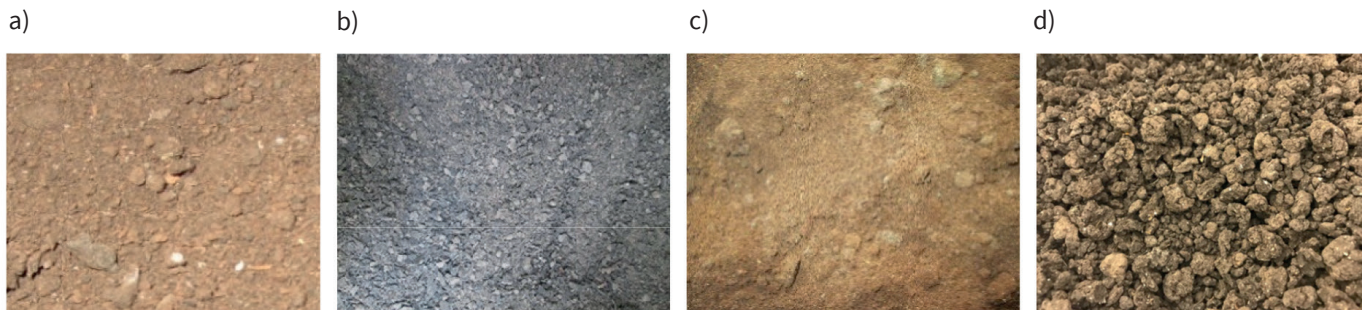


Fig. 1. The materials used in the research: a) lignite, b) basalt waste, c) coffee grounds, d) municipal sewage sludge

Rys. 1. Materiały zastosowane w badaniach: a) węgiel brunatny, b) odpadowy bazalt, c) fusy kawy, d) komunalne osady ściekowe

odkwaszających glebę oraz potasu jako składnika nawozowego. Mogą one znacząco poprawić wartość rolniczą gleb lekkich o niskim pH, ubogich w węgiel organiczny i o niskim kompleksie sorpcyjnym^{13, 14}. Scalanie ma na celu nadanie mieszankom korzystnych właściwości użytkowych, ułatwiających transport, przechowywanie i stosowanie. Umożliwia przede wszystkim skuteczne dawkowanie nawozu oraz ogranicza jego przenikanie do wód gruntowych.

Celem pracy było badanie procesu brykietowania mieszanek odpadowego bazaltu, węgla brunatnego, komunalnych osadów ściekowych i fusów kawy w prasie walcowej, wyposażonej w pierścienie o niesymetrycznym układzie zagęszczania zasilanej grawitacyjnie.

Część doświadczalna

Materiały

Do badań użyto mieszanek odpadowego bazaltu z kopalni Targowica, należącej do spółki Trzuskawica SA, pobieranego bezpośrednio z linii technologicznej, o wilgotności 1,31% i gęstości nasypowej 1,606 g/cm³, węgla brunatnego ze złoża Bełchatów-pole Szczerców o wilgotności 50,12% i gęstości nasypowej 0,550 g/cm³, ustabilizowanych komunalnych osadów ściekowych z Oczyszczalni Ścieków w Bochni o wilgotności 9,37% i gęstości nasypowej 0,654 g/cm³ oraz fusów z kawy Arabika o wilgotności 8,45% i gęstości nasypowej 0,351 g/cm³ (rys. 1). Skład granulometryczny użytych w badaniach materiałów przedstawiono na rys. 2. Średnica ziarna d_{80} odpadowego bazaltu wynosiła 2,32 mm, węgla brunatnego 2,10 mm, komunalnych osadów ściekowych 4,74 mm, a fusów z kawy 0,7 mm. Analizę chemiczną odpadowego bazaltu przedstawiono w tabeli 1, a zawartość wybranych parametrów w komunalnych osadach ściekowych w tabeli 2. Opis badanego węgla brunatnego z odkrywki Szczerców przedstawiono w literaturze¹¹.

Aparatura

Przed przystąpieniem do brykietowania mieszanek odpadowego bazaltu wyznaczono charakterystyki zagęszczania, których jakościowa i ilościowa ocena umożliwiają dobór konfiguracji układu zagęszczania prasy walcowej.

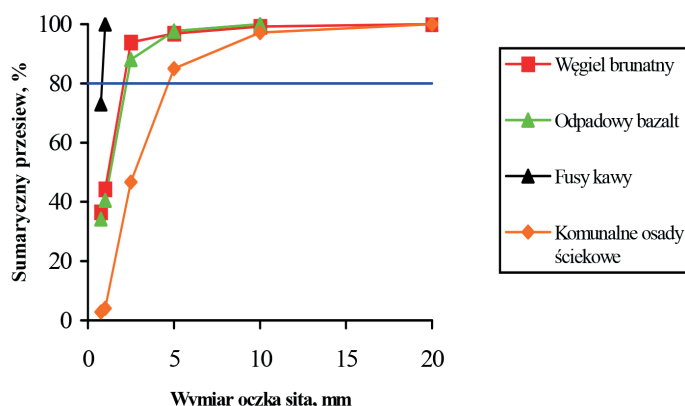


Fig. 2. Results of the grain composition analysis of the materials used in the study

Rys. 2. Wyniki analizy składu ziarnowego materiałów zastosowanych w badaniach

W badaniach zastosowano urządzenia i stanowiska wchodzące w skład uniwersalnej instalacji do aglomeracji ośrodków ziarnistych Katedry Systemów Wytwarzania AGH. Jednostkowy opór zagęszczania i charakterysty-

Table 1. Chemical composition of the basalt waste

Tabela 1. Skład chemiczny odpadowego bazaltu

Składnik	Zawartość składnika ± niepewność pomiaru, %
SiO ₂	44,1±0,7
Al ₂ O ₃	13,4±0,5
Fe ₂ O ₃	12,9±0,3
CaO	9,89±0,16
MgO	8,11±0,23
Cr ₂ O ₃	< 0,10
MnO	0,18±0,02
K ₂ O	1,26±0,12
P ₂ O ₅	0,66±0,15
SO ₃	< 0,10
Na ₂ O	2,29±0,30
TiO ₂	3,10±0,24
ZrO ₂	< 0,10

Table 2. Selected parameters content in the municipal sewage sludge

Tabela 2. Zawartość wybranych składników w komunalnych osadach ściekowych

Składnik	Zawartość składnika	Dopuszczalna zawartość metali ciężkich przy zastosowaniu w rolnictwie oraz do rekultywacji gruntów na cele rolne ⁵⁾ , mg/kg s.m.
Zawartość azotu ogólnego, % s.m.	4,6	
Azot amonowy, % s.m.	0,25	
Fosfor ogólny, % s.m.	> 1,0	
Wapń, % s.m.	10	
Magnez, % s.m.	0,47	
Ołów, mg/kg s.m.	8,8	750
Kadm, mg/kg s.m.	< 0,050	20
Rtęć, mg/kg s.m.	< 0,10	16
Nikiel, mg/kg s.m.	7,0	300
Cynk, mg/kg s.m.	350	2500
Miedź, mg/kg s.m.	88	1000
Chrom, mg/kg s.m.	12	500

Table 3. Tested composite basalt waste' composition

Tabela 3. Skład mieszanek odpadów bazaltowych

Materiał	Zawartość, % s.m.	
	mieszanka odpadowego bazaltu, węgla brunatnego i komunalnych osadów ściekowych	mieszanka odpadowego bazaltu, węgla brunatnego, komunalnych osadów ściekowych i fusów kawy
Odpadowy bazalt	33,33	30
Komunalne osady ściekowe	33,33	30
Węgiel brunatny	33,33	30
Fusy kawy	-	10

ki zagęszczania wyznaczono, zagęszczając mieszanki w cylindrycznej matrycy zamkniętej o średnicy wewnętrznej równej 30 mm, w uniwersalnej maszynie wytrzymałościowej ZDM-10. Otrzymane brykiety ważono na wadze analitycznej WA35 (typ PRL TA-14) oraz mierzono ich wysokość suwmiarką ($\pm 0,02$ mm).

Badania procesu brykietowania mieszanek odpadowego bazaltu przeprowadzano w laboratoryjnej prasie walcowej LPW 450 o średnicy walców 450 mm, wyposażonej w niesymetryczny układ zagęszczania oraz zasyp grawitacyjny. Schemat instalacji doświadczalnej, model zastosowanych pierścieni formujących oraz opis aparatury pomiarowej zaprezentowano w literaturze¹⁵⁻¹⁷⁾.

Analiza chemiczna próbki odpadowego bazaltu topionej metodą perły została wykonana metodą fluorescencji rentgenowskiej XRF (ARL Perform'X) wg normy¹⁸⁾.

Metodyka badań

Do badania brykietowania przygotowano mieszanki zawierające odpady bazaltowe o składzie przedstawio-

nym w tabeli 3. Węgiel brunatny, odpadowy bazalt, fusy kawy oraz komunalne osady ściekowe uśredniano w mieszance korbowej Wernera przez ok. 5 min. Wilgotność badanych materiałów wyznaczano metodą suszarkowo-wagową wg normy¹⁹⁾. Następnie określano ich gęstość nasypową wg normy²⁰⁾. W przypadku prób brykietowania mieszanek węgla brunatnego, odpadowego bazaltu oraz komunalnych osadów ściekowych do mieszarki korbowej Wernera dozowano przygotowane porcje tych materiałów w ilości ok. 5 kg s.m. i uśredniano przez ok. 3 min. Z otrzymanej mieszanki tworzą 4 porcje, które poddawano dalszym badaniom. Materiał uśredniano w mieszance zetowej przez ok. 2 min, po czym wyznaczano charakterystyki zagęszczania, a następnie scalano go w laboratoryjnej prasie walcowej LPW 450, przy prędkości obwodowej walców $v_w = 0,1$ m/s, która odpowiadała prędkości obrotowej $n_w = 4,24$ rpm. Początkowa szerokość szczeliny między walcami δ_{nom} wynosiła ok. 1,0 mm. Podobnie postępowano w przypadku brykietowania mieszanek węgla brunatnego, odpadowego bazaltu,



Fig. 3. Briquettes obtained from a mixture of waste basalt (brown coal, waste basalt, coffee grounds and municipal sewage sludge)

Rys. 3. Zdjęcia brykietów uzyskanych z mieszanki odpadowego bazaltu (węgiel brunatny, odpadowy bazalt, fusy kawy i komunalne osady ściekowe)

komunalnych osadów ściekowych oraz fusów kawy, które stanowiły 10% s.m.

Z materiału dostarczonego do prasy walcowej uzyskiwano brykiety w kształcie „siodła” o objętości ok. $6,5 \text{ cm}^3$ (rys. 3). Z uzyskanej próby losowo wybierano 30 brykietów, które zrzucono w 3 seriach (po 10 sztuk) z wysokości 2 m na płytę stalową o grubości 60 mm, zgodnie z normą²¹⁾, za każdym razem przesiewając pokruszoną masę przez sito o wymiarach oczka $18 \times 18 \text{ mm}$. Rozmiar sita określono jako 2/3 średniej obliczonej z 2 maksymalnych wymiarów brykieta, mierzonych we wzajemnie prostopadłych kierunkach. Szczegółowy opis tej procedury przedstawiono w literaturze²²⁾.

Podczas badań określano także wartość nacisku jednostkowego we wgłębieniu formującym oraz jednostkowe zapotrzebowanie na energię podczas realizacji procesu brykietowania wg metod opisanych w literaturze²³⁾. Przykładowe charakterystyki czasowe nacisku jednostkowego we wgłębieniu formującym oraz momentu skręcającego na wale prasy wyznaczone dla mieszanki węgla brunatnego, odpadowego bazaltu oraz komunalnych osadów ściekowych o wilgotności $w = 26,08\%$ przedstawiono na rys. 4 i 5.

Wyniki badań i ich omówienie

Przykład eksperymentalnie wyznaczonych charakterystyk zagęszczania mieszanek odpadowego bazaltu przedstawiono na rys. 6 i 7. Dla mieszanki odpadowego bazaltu, węgla brunatnego i komunalnych osadów ściekowych przy nacisku jednostkowym rów-

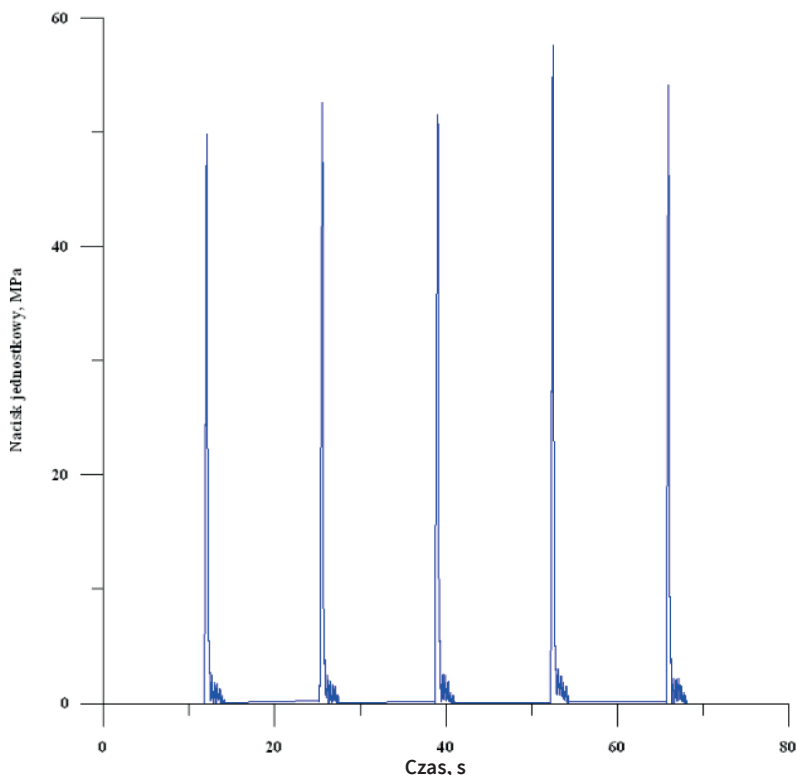


Fig. 4. Time characteristics of the unit pressure in the forming cavities

Rys. 4. Charakterystyka czasowa nacisku jednostkowego we wgłębieniu formującym

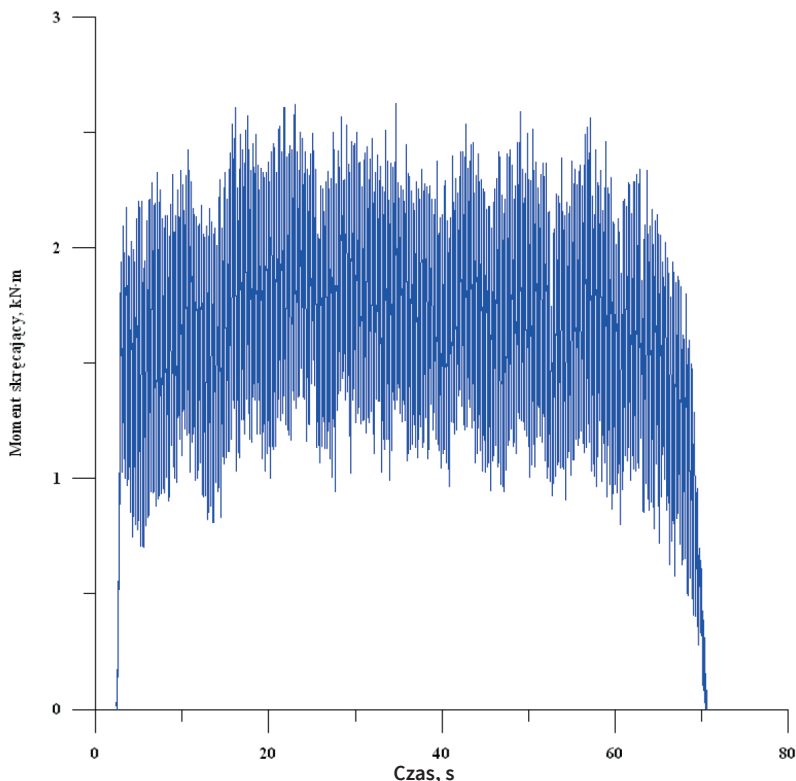


Fig. 5. Time characteristics of the torque on the roll press

Rys. 5. Charakterystyka czasowa momentu skręcającego na wale prasy walcowej

nym 100 MPa stopień zagęszczenia mieszanek s wynosił 2,18–2,59, a po dodaniu fusów kawy 2,94–3,12. Jego wartość wzrastała wraz ze wzrostem wilgotności mieszan-

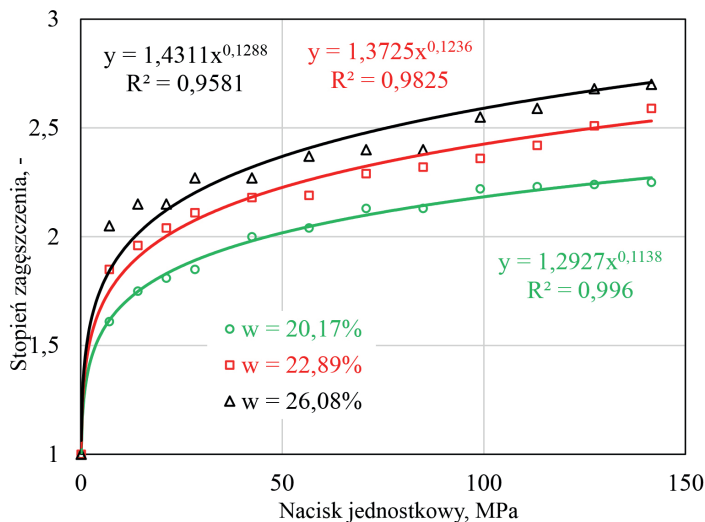


Fig. 6. Compression characteristic of basalt waste, lignite and municipal sewage sludge mixture

Rys. 6. Charakterystyka zagęszczania mieszanki odpadowego bazaltu, węgla brunatnego i komunalnych osadów ściekowych

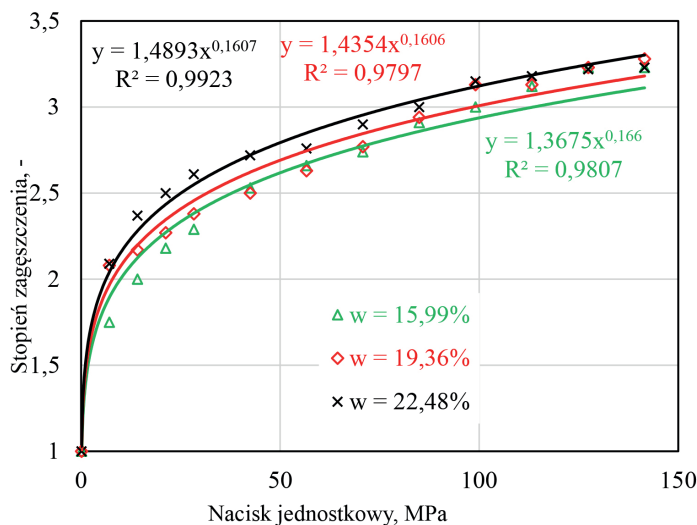


Fig. 7. Compression characteristic of basalt waste, lignite, municipal sewage sludge and coffee grounds mixture

Rys. 7. Charakterystyka zagęszczania mieszanki odpadowego bazaltu, węgla brunatnego, komunalnych osadów ściekowych i fusów kawy

ki. Jakościowy i ilościowy charakter krzywych wskazał na konieczność zastosowania niesymetrycznego układu zagęszczania.

Na podstawie przeprowadzonych badań stwierdzono, że wytrzymałość na zrzut brykietów wytworzonych z mieszanki odpadowego bazaltu, węgla brunatnego i komunalnych osadów ściekowych jest większa, niż otrzymanych z mieszanki, do której dodano fusy kawy (rys. 8). Kiedy wilgotność mieszanki odpadowego bazaltu, węgla brunatnego i komunalnych osadów przekraczała 20,17%, wytrzymałość brykietów na zrzut mierzona bezpośrednio po próbie zawierała się w granicach 93,6–98,69%. Po dodaniu fusów kawy gwałtownie spadała do maksymalnie 64,9%.

Wartość nacisku jednostkowego we wgłębieniu formującym zarejestrowanego podczas badań nie zależała od składu mieszanki (rys. 9). Maksymalną wartość nacisku jednostkowego zaobserwowano przy

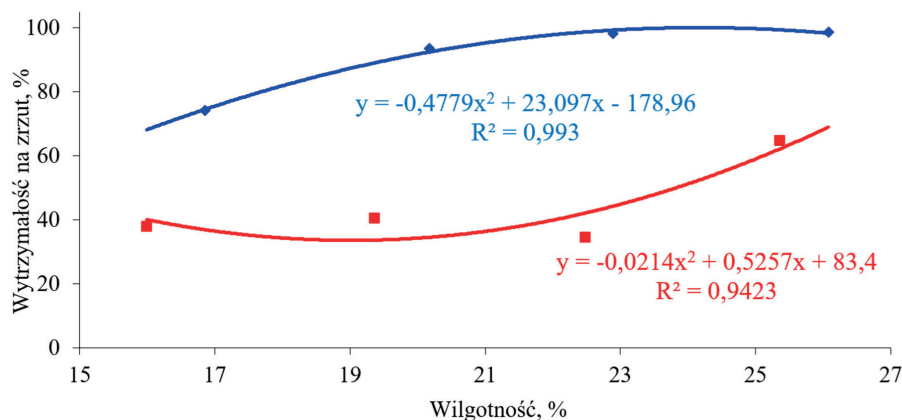


Fig. 8. Drop strength of basalt waste mixtures briquettes; – mixture of waste basalt, lignite, and municipal sewage sludge; – mixture of waste basalt, lignite, municipal sewage sludge, and coffee grounds

Rys. 8. Wyniki badań wytrzymałości na zrzut brykietów z mieszanki odpadowego bazaltu; – mieszanka odpadowego bazaltu, węgla brunatnego i komunalnych osadów ściekowych; – mieszanka odpadowego bazaltu, węgla brunatnego, komunalnych osadów ściekowych i fusów kawy

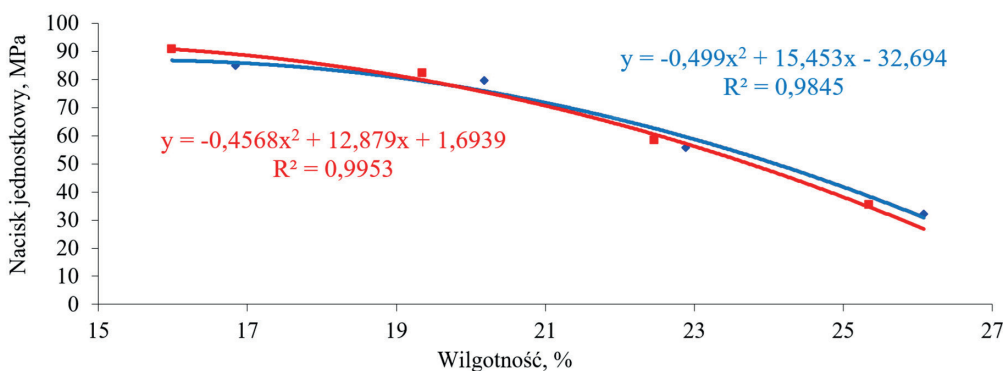


Fig. 9. Unit pressure tests results; – mixture of waste basalt, lignite, and municipal sewage sludge; – mixture of waste basalt, lignite, municipal sewage sludge, and coffee grounds

Rys. 9. Wyniki badań nacisku jednostkowego; – mieszanka odpadowego bazaltu, węgla brunatnego i komunalnych osadów ściekowych; – mieszanka odpadowego bazaltu, węgla brunatnego, komunalnych osadów ściekowych i fusów kawy

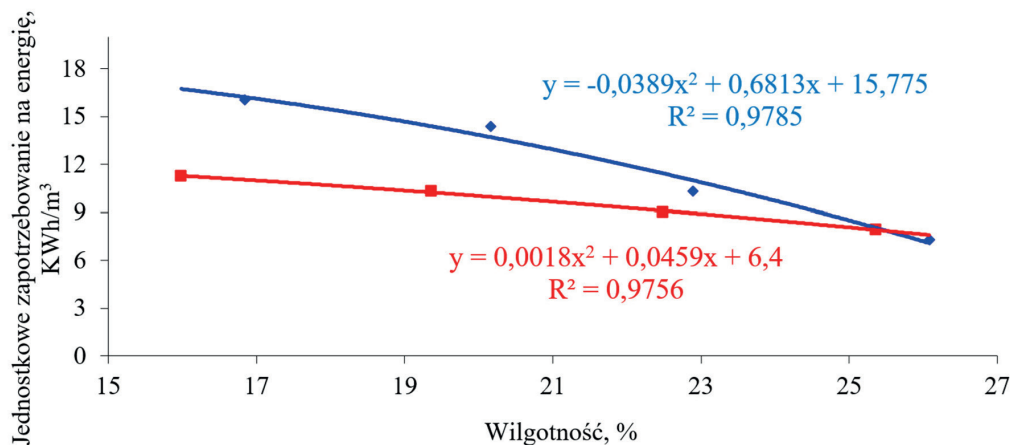


Fig. 10. Energy demand tests results; – mixture of waste basalt, lignite, and municipal sewage sludge; – mixture of waste basalt, lignite, municipal sewage sludge, and coffee grounds

Rys. 10. Wyniki badań zapotrzebowania na energię; – mieszanka odpadowego bazaltu, węgla brunatnego i komunalnych osadów ściekowych; – mieszanka odpadowego bazaltu, węgla brunatnego, komunalnych osadów ściekowych i fusów kawy

brykietowaniu mieszanek o najmniejszej wilgotności, która dla mieszanki odpadowego bazaltu, węgla brunatnego i komunalnych osadów ściekowych o wilgotności 15,99% wynosiła 90,25 MPa. Jednostkowe zapotrzebowanie na energię wynosiło 7,301–16,02 kWh/m³ (rys. 10). Było o ponad 40% większe w przypadku brykietowania mieszanek bez dodatku fusów kawy.

Podsumowanie

W prasie walcowej zasilanej grawitacyjnie i wyposażonej w niesymetryczny układ zagęszczania można uzyskać brykiety o dobrej wytrzymałości mechanicznej z mieszanki odpadowego bazaltu, węgla brunatnego i komunalnych osadów ściekowych. Dodawanie do niej nawet niewielkiej ilości fusów kawy (do 10% s.m.) gwałtownie zmniejsza jakość brykietów. Głównym tego powodem jest obniżenie o ok. 20% podatności mieszanki na scalanie (rys. 7). Być może uda się zwiększyć wytrzymałość mechaniczną brykietów poprzez zastosowanie zasilacza ślimakowego, ale potwierdzenie tej tezy wymaga wykonania dodatkowych badań.

Na podstawie przeprowadzonych badań uzyskano informacje o obciążeniach wałów prasy walcowej występujących podczas brykietowania mieszanek, naciskach jednostkowych występujących we wgłębieniach formujących oraz jednostkowym zapotrzebowaniu na energię. Informacje te mogą być pomocne przy opracowaniu koncepcji linii technologicznej. Zagospodarowanie mieszanki odpadowego

bazaltu, węgla brunatnego i komunalnych osadów ściekowych jako nawozu w postaci brykietów będzie sprzyjać tworzeniu gospodarki o obiegu zamkniętym.

Autorzy artykułu dziękują Pani mgr Marcie Łuczak za dostarczenie informacji o badanych materiałach.

Artykuł został sfinansowany w ramach subwencji badawczej; wniosek 18162.

Otrzymano: 13-05-2026

Zaakceptowano: 26-06-2026

Zrecenzowano: 16-06-2026

Opublikowano: 17-07-2026

LITERATURA

- [1] GUS, *Ochrona środowiska 2025*, Warszawa 2025.
- [2] P. Gara, *Przem. Chem.* 2015, **94**, nr 9, 1509.
- [3] B. Kosturkiewicz, A. Janewicz, M. Hryniewicz, P. Gara, M. Bembek, Ł. Kosturkiewicz, *Przem. Chem.* 2016, **95**, nr 8, 1492.
- [4] B. Kosturkiewicz, A. Janewicz, M. Hryniewicz, *Przem. Chem.* 2017, **96**, nr 9, 1873.
- [5] B. Kosturkiewicz, A. Janewicz, M. Hryniewicz, Ł. Kosturkiewicz, *E3S Web of Conf.* 2017, **14**, nr 02031.
- [6] B. Kosturkiewicz, Ł. Kosturkiewicz, *Przem. Chem.* 2021, **100**, nr 9, 813.
- [7] B. Kosturkiewicz, Ł. Kosturkiewicz, *Przem. Chem.* 2022, **101**, nr 11, 1031.
- [8] B. Kosturkiewicz, Ł. Kosturkiewicz, *Przem. Chem.* 2023, **102**, nr 10, 1100.
- [9] B. Kosturkiewicz, Ł. Kosturkiewicz, *Przem. Chem.* 2024, **103**, nr 10, 1164.
- [10] J. Szymków, M. Markuszewski, *Inż. Aparat. Chem.* 2017, **56**, nr 6, 219.
- [11] B. Kosturkiewicz, *Przem. Chem.* 2024, **103**, nr 8, 873.
- [12] Rozporządzenie Ministra Środowiska z dnia 6 lutego 2015 r. w sprawie stosowania komunalnych osadów ściekowych, *Dz.U.* 2015, poz. 257.
- [13] D. Pujol, C. Liu, J. Gominho, M.À. Olivella, N. Fiol, I. Villaescusa, H. Pereira, *Ind. Crop. Prod.* 2013, **50**, 423.
- [14] R. Cruz, P. Baptista, S. Cunha, J. A. Pereira, S. Casal, *Molecules* 2012, **17**, 1535.
- [15] A. Magdziarz, M. Wilk, B. Kosturkiewicz, *Chem. Proc. Eng.* 2011, **32**, nr 4, 299.
- [16] B. Kosturkiewicz, A. Janewicz, A. Magdziarz, *Polish J. Environ. Stud.* 2014, **23**, nr 4, 1385.
- [17] B. Kosturkiewicz, A. Janewicz, *E3S Web Conf.* 2019, **108**, 02001.
- [18] PN-EN ISO 12677: 2011, *Analiza chemiczna wyrobów ogniotrwałych techniką fluorescencji (XRF). Metoda perły.*
- [19] PN-EN ISO 18134-1:2015-11, *Biopaliwa stałe. Oznaczanie zawartości wilgoci. Metoda suszarkowa.*
- [20] PN-80/C-04532, *Oznaczanie gęstości nasypowej.*
- [21] PN-ISO 616:1999, *Koks z węgla kamiennego. Oznaczanie wskaźników zrzucania.*
- [22] B. Kosturkiewicz, A. Janewicz, *Przem. Chem.* 2020, **99**, nr 9, 1332.
- [23] B. Kosturkiewicz, A. Janewicz, *Przem. Chem.* 2017, **96**, nr 8, 1691.