

Janusz SZYMKÓW¹, Michał MARKUSZEWSKI²

e-mail: janusz.szymkow@pwr.wroc.pl

¹ Katedra Inżynierii Kriogenicznej, Lotniczej i Procesowej, Wydział Mechaniczno-Energetyczny, Politechnika Wroclawska, Wrocław² WABCO Polska, Wrocław

Badania granulacji komunalnych osadów ściekowych z pyłem bazaltowym

Wstęp

Zmiana parametrów określających jakość ścieków odprowadzanych do środowiska w kierunku bardziej rygorystycznych wymagań powoduje stałe zwiększanie ilości osadów powstających w procesach oczyszczania ścieków.

Dotychczas rozwijały się trzy zasadnicze kierunki postępowania z komunalnymi osadami ściekowymi:

- bezpieczne składowanie,
- gospodarcze wykorzystanie łącznie z przyrodniczym (w tym rolniczym) zagospodarowaniem,
- spalanie i współspalanie.

Od dnia 1 stycznia 2013 r. obowiązuje zakaz składowania odpadów (w tym komunalnych osadów ściekowych) na składowisku odpadów innych niż niebezpieczne, jeżeli przekraczają graniczne wymagania, tab. 1. [Rozporządzenie MG, 2015].

Tab. 1. Kryteria składowania odpadów na składowiskach innych niż niebezpieczne

| Parametr | Wartość graniczna |
|---------------------------------|-------------------|
| Ogólny węgiel organiczny, % s.m | 5 |
| Strata przy prażeniu, % s.m. | 8 |
| Ciepło spalania, MJ/kg s.m. | 6 |

Pomimo rosnącej tendencji do spalania osadów liczba instalacji do ich termicznej przeróbki jest dość ograniczona [Pajak, 2010; Sadecka 2012]. Nadal opracowywane i rozwijane są technologie wytwarzania paliw alternatywnych na bazie komunalnych osadów ściekowych [Rečko, 2005; Robak i in., 2008; Hehlman i in., 2011]. W 2008 r. termicznie przekształcano niewiele ponad 1 % wytworzonych osadów, zaś w 2014 r. już blisko 15,1 %, tendencja ta jest stale rosnąca [Uchwała RM, 2016].

Znaczna część wytwarzanych komunalnych osadów ściekowych przeznaczana jest na cele rolnicze. Przykładowo z wytworzonych w 2014 roku 556 tys Mg suchej masy na cele rolnicze wykorzystano 107,2 tys Mg. Wprowadzenie do gleby składników zawierających się w komunalnych osadach ściekowych, takich jak: substancje organiczne, azot, fosfor, wapń, magnez oraz mikroelementy niezbędne do życia roślin i fauny glebowej [Malej, 2000] powoduje przywrócenie równowagi ekologicznej terenom zdegradowanym. Wykorzystuje się to m.in. do rekultywacji hałd, składowisk przemysłowych, nieużytków czy niwelacji terenów. Stosowanie tych osadów w rolnictwie nie ogranicza się wyłącznie do problemu rekultywacji, lecz również służą one do nawożenia upraw. W szczególności stosowanie komunalnych osadów ściekowych po kompostowaniu wzbogaca i uzupełnia rynek nawozów naturalnych i stanowi alternatywę dla nawozów sztucznych, a co najważniejsze – ich stosowanie wpływa na efektywność uzyskiwanych plonów [Kowalski i in., 2012].

Postać komunalnych osadów ściekowych, jaką uzyskują one po przeróbce w oczyszczalni, stwarza trudności w ich transporcie i magazynowaniu. W celu umożliwienia szerokiego wykorzystania tych osadów do nawożenia upraw roślinnych należy je odpowiednio przygotować, najlepiej w postaci zgranulowanej. Granulacja jest istotna w gospodarce dlatego, że dzięki niej materiały ziarniste uzyskują formę fizyczną umożliwiającą bezpieczny transport i realizację dalszych operacji technologicznych. Dotyczy to zarówno produktów docelowych (np. nawozów sztucznych), jak i różnych odpadów przemysłowych, które można powtórnie wykorzystać lub bezpiecznie składować [Heim, 2012; Obraniak, 2013].

Po operacji odwadniania na prasach filtracyjnych zawartość wody w komunalnych osadach ściekowych wynosi 78÷85%, co kwalifikuje je jako osady maziste. W celu ich dalszej przeróbki w procesie granulacji bębnowej należy dodać pewną ilość materiału pylistego [Rosik-Dulewska i in., 2009; Szymków i in., 2013].

Powszechnie stosowane w rolnictwie środki wzbogacające gleby w składniki mineralne wytwarzane są z dolomitów, wapieni i innych skał węglanowych, jednak niemal wszystkie substancje tego rodzaju dostarczają glebie zaledwie jednego lub dwóch składników mineralnych [Zagrożdżon, 2008]. W sposób wyjątkowy wyróżniają się jednak mączki bazaltowe, które w swoim składzie zawierają szereg składników mineralnych i mikroelementów. Wyraźnie podkreślonymi zaletami mączek bazaltowych jest ich nietoksyczność oraz niemożność przedawkowania. Mączka bazaltowa posiada również właściwości chroniące rośliny przed chorobami grzybiczymi i szkodnikami. Dodatkowo przy stosowaniu rozdrobnionego bazaltu granulacji od 0,001 do 0,003 m poprawia się struktura gleb. Ze względu na te zalety wydaje się, że zgranulowana mieszanka osadu z pyłem bazaltowym może być doskonałym nawozem użyźniającym i wzbogacającym w mikroelementy gleby pod uprawy roślinne, a postać zgranulowana pozwoli na łatwą dystrybucję i przechowywanie.

Badania doświadczalne

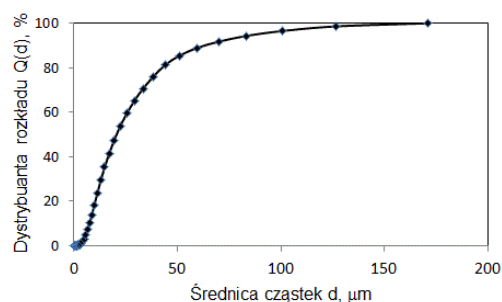
Surowce

Komunalny osad ściekowy z oczyszczalni ścieków PWiK sp. z o.o. w Bolesławcu [2014] był poddany badaniom po odwodnieniu na prasie filtracyjnej. Przeciętna zawartość suchej masy w osadzie wynosiła 23%. Oczyszczalnia posiada wymagane prawem zezwolenie na wykorzystanie komunalnych osadów ściekowych na cele rolnicze. Zgodnie z *Rozporządzeniem Ministra Środowiska [2015]* co dwa miesiące wykonywane są badania osadów (m.in. na zawartość metali ciężkich), a następnie spełniające powyższe wymagania komunalne osady ściekowe zostają dopuszczone do rolniczego zastosowania. Określa się również sposób ich dawkowania na 1 ha gruntu.

Mączka bazaltowa wykorzystana podczas granulacji była pozyskana z *Łużyckiej Kopalni Bazaltu Księgiński*. Jest to produkt pozostały po przeróbce skał bazaltowych. Skład ziarnowy materiału określono na laserowym analizatorze LAU-11. Charakterystyczne parametry granulometryczne mączki bazaltowej były następujące:

uziarnienie 0÷200 μm ; $d_{50} = 11,72 \mu\text{m}$; $d_{90} = 74,8 \mu\text{m}$.

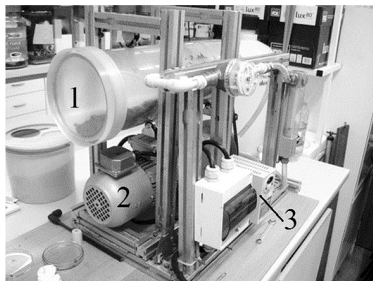
Badań składu chemicznego nie przeprowadzono. Uznano, że zalecenia dotyczące stosowania mączki bazaltowej zamieszczone na stronach *Instytutu Uprawy i Nawożenia Gleb* w Puławach dotyczące mączki bazaltowej są wystarczające [UNG, 2012].



Rys 1. Uziarnienie mączki bazaltowej (wyznaczone w pracy)

Aparatura

Badania prowadzono w laboratoryjnym granulatorze bębnowym o działaniu okresowym (Rys. 2). W porównaniu z innymi aparatami do granulacji cechuje go energooszczędność, niskie koszty eksploatacji instalacji oraz możliwość sterowania rozmiarem cząstek (średnicą zastępczą) otrzymywanego produktu [Gluba i Obraniak, 2010].



Rys. 2. Stanowisko badawcze: 1 – bęben; 2 – silnik; 3 – falownik

Zasadniczym elementem instalacji był bęben – 1 o średnicy $D = 0,172$ m i długości $L = 0,5$ m, napędzany motoreduktorem – 2 poprzez przekładnię pasową. Prędkość obrotową bębna granulatora określano i regulowano przetwornikiem częstotliwościowym – 3.

Metodyka badań

Zwykle procesowi granulacji przez otaczanie poddaje się materiały suche dozując odpowiednią ilość cieczy wiążącej. Ponieważ komunalny osad ściekowy jest wysoce uwodniony, zamiast cieczy dodaje się suchy materiał ziarnisty. Na podstawie badań własnych stwierdzono, że dodać należy odpowiednią jego ilość, ponieważ stopniowe dozowanie nie daje zadowalających wyników. Testowa seria badań pozwoliła określić przybliżone granice stosunku masy wilgotnego osadu do masy pyłu bazaltowego, przy którym granulacja w ogóle zachodzi. Zakres prędkości obrotowych bębna określono obliczając prędkości charakterystyczne: początek i koniec kataraktowania, wirowanie całego złoża

$$n_{ch} = \frac{C}{D^{0,47} \varphi^{0,14}}, \quad (1)$$

gdzie:

C – stała zależna od prędkości charakterystycznej, [-]

$C = 54$ dla początku kataraktowania

$C = 72$ dla końca kataraktowania

$C \geq 86$ dla wirowania całego złoża

D – średnica bębna, [m]

φ – stopień wypełnienia bębna, [%]

oraz prędkość krytyczną

$$n_{kr} = \frac{42,3}{\sqrt{D}} \quad (2)$$

Obliczone wartości prędkości charakterystycznych podano w tab. 2.

Tab. 2. Wartości charakterystycznych prędkości obrotowych bębna ($\varphi = 0,13$)

| Charakterystyczna prędkość obrotowa | Równanie | n , [obr/min] |
|-------------------------------------|----------|-----------------|
| Dla początku kataraktowania | (1) | 86,3 |
| Prędkość krytyczna | (2) | 102,0 |
| Dla końca kataraktowania | (1) | 115,1 |
| Prędkość wirowania | (1) | 137,5 |

Osad ściekowy przed dodaniem do granulacji został rozdrobniony poprzez przetarcie przez sito o oczkach 5×5 mm.

Po wstępnych badaniach wyznaczono zakres udziału mączki bazaltowej w całym wsadzie. Dolną granicę określono na 35%, a górną na 55% masy całego wsadu. Zarówno osad ściekowy jak i mączkę bazaltową ważono na wadze z dokładnością do 0,001 kg. W trakcie badań granu-

lowano mieszanek osadu i pyłu bazaltowego w ilości 1,2 kg, przy różnym udziale pyłu bazaltowego co odpowiadało 13 % stopniu wypełnienia bębna. Wykonano trzy serie pomiarowe. Pierwsza seria prób wykonana została przy stałej prędkości obrotowej bębna granulatora $n = 97$ obr/min a zmieniana była zawartość pyłu bazaltowego we wsadzie. W tym przypadku prędkość obrotową bębna założono w pobliżu średniej charakterystycznych prędkości, lecz poniżej prędkości krytycznej (Tab. 2.). Dwie pozostałe serie wykonano przy zmiennej prędkości obrotowej bębna, lecz przy stałej (dla danej serii) zawartości pyłu bazaltowego. Zawartość mączki bazaltowej przyjęto na podstawie przeciętnej wielkości cząstek. Dla $X = 45\%$ jest to przybliżona wartość środkowa, a dla $X = 55\%$ wartość skrajna (maksymalna).

Uzyskany produkt granulacji suszono w temperaturze 105°C do stałej masy badając wilgotność uzyskanego granulatu. Parametry składu granulometrycznego wyznaczono na podstawie analizy obrazu. Zdjęcia każdej próbki importowano do programu *AutoCAD*, a następnie mierzono wielkości granul. Jako średnicę zastępczą przyjęto najmniejszy rzut cząstki. Uzyskane tą metodą wartości przeliczono na rzeczywiste, wykorzystując obliczoną dla każdego zdjęcia skalę. Analizę statystyczną rozkładu wykonano w programie *MS Excel*.

Podczas badań przeprowadzono testy wytrzymałościowe granul na ściskanie. Pomiary wykonano tensometrycznym przetwornikiem siły *C9B* w zakresie do 500N, a wartości sił rejestrowano wzmacniaczem pomiarowym *Spider 8* firmy *HBM GmbH*. Do analizy pobierano po 10 granul z danej frakcji, które po procesie granulacji suszono w suszarce. Badania prowadzono przy kącie pochylenia bębna równym 0° .

Wyniki i dyskusja

Wyniki badań procesu granulacji podano w tab. 3-5 oraz przedstawiono na rys. 3-6.

Tab. 3. Parametry statystyczne procesu granulacji ($n = 97$ obr/min)

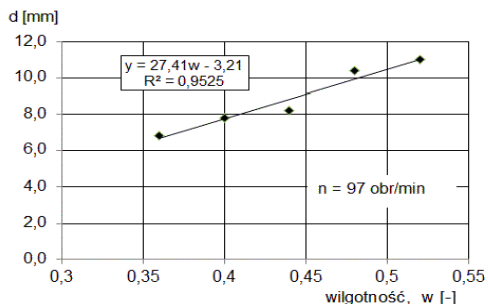
| Udział pyłu bazaltowego, [%] | Wartość średnia, [mm] | Odchylenie standardowe, [mm] | Mediana, [mm] | Wilgotność granulatu, [-] |
|------------------------------|-----------------------|------------------------------|---------------|---------------------------|
| 35 | 11,0 | 6,02 | 9,3 | 0,59 |
| 40 | 10,4 | 4,91 | 9,2 | 0,54 |
| 45 | 8,2 | 3,07 | 7,5 | 0,47 |
| 50 | 7,8 | 3,12 | 7,2 | 0,45 |
| 55 | 6,8 | 2,01 | 6,7 | 0,45 |

Tab. 4. Parametry statystyczne procesu granulacji (udział masowy pyłu bazaltowego $X = 45\%$)

| Obroty bębna, [obr/min] | Wartość średnia, [mm] | Odchylenie standardowe, [mm] | Mediana, [mm] | Wilgotność granulatu, [-] |
|-------------------------|-----------------------|------------------------------|---------------|---------------------------|
| 33 | 5,5 | 1,82 | 5,4 | 0,47 |
| 55 | 7,5 | 5,40 | 5,4 | 0,46 |
| 76 | 7,9 | 2,77 | 7,6 | 0,49 |
| 97 | 8,2 | 3,07 | 7,5 | 0,47 |
| 119 | 5,5 | 2,83 | 4,8 | 0,53 |
| 141 | 9,1 | 3,15 | 9,0 | 0,43 |

Tab. 5. Parametry statystyczne procesu granulacji (udział masowy pyłu bazaltowego $X = 55\%$)

| Obroty bębna, [obr/min] | Wartość średnia, [mm] | Odchylenie standardowe, [mm] | Mediana, [mm] | Wilgotność granulatu, [-] |
|-------------------------|-----------------------|------------------------------|---------------|---------------------------|
| 33 | 7,9 | 2,47 | 8,3 | 0,47 |
| 55 | 5,7 | 2,16 | 5,7 | 0,46 |
| 76 | 4,8 | 1,88 | 4,5 | 0,48 |
| 97 | 8,2 | 3,07 | 7,5 | 0,45 |
| 119 | 8,0 | 3,65 | 6,9 | 0,40 |
| 141 | 5,6 | 1,40 | 5,6 | 0,47 |



Rys. 3. Zależność średniej średnicy granul od wilgotności teoretycznej

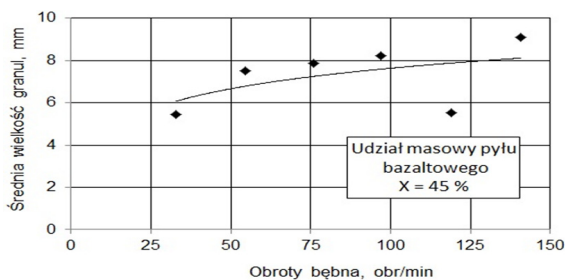
Na rys. 3. pokazano wpływ wilgotności teoretycznej (w = masa cieczy/masa całego wsadu) na wielkość przeciętnej średnicy granul. Otrzymana wielkość granul zależała w wyraźny sposób od stosunku masy wilgotnego osadu ściekowego do masy pyłu bazaltowego. Ponadto na podstawie obserwacji prowadzonych podczas badań stwierdzono, że wraz ze wzrostem zawartości pyłu bazaltowego pozostaje więcej materiału niezgranulowanego

Na podstawie uzyskanych wyników (Tab. 3-5) można również stwierdzić, że niższa zawartość pyłu bazaltowego powoduje powstanie granulatu o bardziej nierównomiernych rozmiarach. Świadczy o tym wartość odchylenia standardowego, która w przypadku próbki zawierającej w swoim składzie 35% masy pyłu wynosi $\sigma = 6,02$ mm, co stanowi około 54% wartości średniej rozmiaru cząstek, podczas gdy dla próbki o zawartości pyłu równej 55% masy wsadu wartość odchylenia standardowego wynosi $\sigma = 2,01$ mm, co stanowi 29% średniej wielkości cząstek w tej próbce.

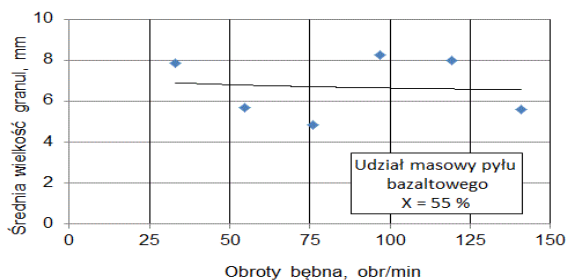
Dla serii wykonanej przy stałej zawartości pyłu równej 45% masy wsadu średni rozmiar granulatu rośnie wraz ze wzrostem prędkości obrotowej bębna aż do osiągnięcia pewnej stabilizacji (Rys 4). Przy zawartości mączki bazaltowej 55% trudno stwierdzić podobną zależność. W tym przypadku przyjęta w badaniach graniczna zawartość pyłu określonego wstępnie z zakresu możliwej granulacji powoduje duże zaburzenia w samym procesie. Część tworzących się dużych granul ulega wtórnemu rozdrobieniu. Ponadto, jak wspomniano poprzednio, duża ilość mączki pozostaje niezgranulowana.

Przed badaniem wytrzymałości granul na ściskanie wstępnie oceniano ich wytrzymałość ściskając je w palcach. Wytrzymałość przebadanych aglomeratów zmieniała się w szerokim zakresie od 4 do 37 N/granula (Tab. 6) i nie zależała od procentowego udziału bazaltu, co może świadczyć o nierównomiernym jego rozkładzie w aglomeratach.

W wyniku aglomeracji mieszanki o niższej zawartości pyłu generalnie



Rys. 4. Zależność średniej średnicy granul od prędkości obrotowej bębna



Rys. 5. Zależność średniej średnicy granul od prędkości obrotowej bębna

Tab.6. Wytrzymałość granul na ściskanie ($n = 97$ obr/min)

| Zawartość bazaltu, [%] | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 |
|------------------------|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|
| 0,35 | 15 | 17 | 11 | 9 | 12 | 20 | 8 | 7 | 15 | 4 |
| 0,45 | 4 | 12 | 19 | 24 | 37 | 14 | 11 | 14 | 17 | 10 |
| 0,55 | 5 | 20 | 13 | 15 | 15 | 7 | 23 | 14 | 7 | 9 |

uzyskuje się granulaty o większej średniej średnicy (Tab.3), jednak wykazuje on obniżoną wytrzymałość i ulega łatwemu zniszczeniu.

Ponadto liczne większe granule (powyżej 9÷10 mm) po wysuszeniu nie były zwarte, lecz miały zewnętrzną skorupę. Świadczy to, że duża część komunalnego osadu ściekowego została tylko obtoczona przez pył bazaltowy, a po wysuszeniu ta wewnętrzna część granulii się skurczyła.

Podsumowanie i wnioski

Przeprowadzone wstępne eksperymenty pokazały możliwość granulowania komunalnych osadów ściekowych z pyłem bazaltowym.

Głównym problemem był optymalny dobór proporcji składników mieszanki w aspekcie wilgotności oraz prędkości obrotowej, aby uzyskać jednorodny pod względem wielkości granulaty.

Osobnym zagadnieniem było uzyskanie produktu o odpowiedniej wytrzymałości, który byłby odporny na ścieranie i zginięcie podczas składowania i transportu.

Odmiennej rodzaj stosowanych materiałów powodował inny charakter procesu granulacji bębnowej. Występowały zdecydowane trudności z kontrolą procesu. Zdaniem autorów lepszym rozwiązaniem byłaby granulacja ciśnieniowa lub mieszarkowa.

LITERATURA

- Gluba T., Obraniak A., (2010). Wpływ parametrów procesowych na efekt okresowej granulacji nawozu Lubofoska. *Inż. Ap. Chem.*, 49(1), 77-78
- Hehlmann J., Szeja W., Jodkowski M., Benducki P., (2011). Badania nad otrzymywaniem kompozytowego biopaliwa energetycznego z udziałem pofermentacyjnej biomasy ściekowej *Rocznik Ochr. Śr.*, 13, 921-934
- Heim A., (2012). Granulacja - proces wciąż ważny. *Chemik* 66(5), 356-359
- Instytut Uprawy Nawożenia i Gleboznawstwa (IUNG) *Wykaz nawozów i środków poprawiających właściwości gleby zakwalifikowanych do stosowania w rolnictwie ekologicznym.* (12.2012), <http://www.iung.pulawy.pl/>
- Kowalski A., Stepowska A., (2012). Ocena przydatności kompostów granulowanych powstałych na bazie osadów ściekowych do uprawy papryki w tunelu nieogrzewanym. *Nowości Warzywnicze*, (54-55), 39-44
- Małej J., (2000). Właściwości osadów ściekowych oraz wybrane sposoby ich unieszkodliwiania i utylizacji. *Rocznik Ochr. Śr.*, 2, 71-101
- Obraniak A., (2013). Granulacja popiołów lotnych uzyskanych ze spalania węgla brunatnego. *Inż. Ap. Chem.*, 52(3), 213-215
- Pająk T., (2010). Komunalne osady ściekowe – analiza i ocena wybranych aspektów gospodarki osadami. *Instal*, (11), 74-79
- PWiK w Bolesławcu (2014). (12.2014) <https://www.pwik.boleslawiec.pl/>
- Recko K., (2005). Termiczna utylizacja osadów ściekowych. *Arch. Gosp. Odp. i Ochr. Śr.*, 2, 17-24
- Robak J., Matuszek K., (2008). Granulowanie paliwa z odpadów. *Chemik*, 61(9), 418-424
- Robak J., Kopczyński M., Ociepa W., (2006). Sposoby utylizacji odpadów w technikach kompaktowania – granulacja. *Zesz. Nauk. PŁ, Inż. Chem.*, 29
- Rosik-Dulewska C., Nocoń K., Karwaczyńska U., (2016). Wytwarzanie granulatu z komunalnych osadów ściekowych i popiołów lotnych w celu ich przyrodniczego (nawozowego) odzysku. *IPiŚ PAN, Prace i Studia*, 78, DOI: 10.13140/RG.2.2.30862.56646
- Rozporządzenie Ministra Środowiska z dnia 6 lutego 2015 r. w sprawie komunalnych osadów ściekowych. *Dz.U.* 2015 poz. 257
- Rozporządzenie Ministra Gospodarki z dnia 16 lipca 2015 r. w sprawie dopuszczania odpadów do składowania na składowiskach. *Dz.U.* 2015 poz. 1277
- Sadecka Z., (2012). *Suszenie osadów - hybrydowe?*. III Ogólnopolska Konferencja Szkoleniowa: Metody zagospodarowania osadów ściekowych, Chorzów, 13-14 luty 2012. Wyd. ABRYS. 86-96.
- Szymków J., Świtecka M., (2013). Granulacja higienizowanych osadów ściekowych. *Inż. Ap. Chem.*, 52(3), 262-263
- Uchwała nr 88 Rady Ministrów z dnia 1 lipca 2016 r. w sprawie Krajowego planu gospodarki odpadami 2022. *M.P.* 2016 poz. 784
- Ustawa z dnia 14 grudnia 2012 r. o odpadach. *Dz.U.* 2013 poz. 21
- Zagożdżon P.P., (2008). Mączki bazaltowe w zastosowaniach rolniczych i pokrewnych, *Pr. Nauk. Inst. Gór. PWR, Studia i materiały*, 123, 34, Wrocław