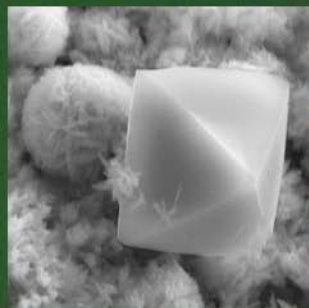
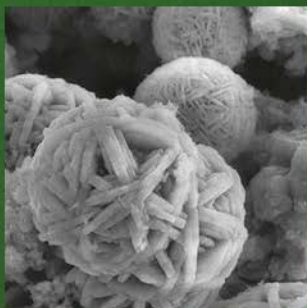
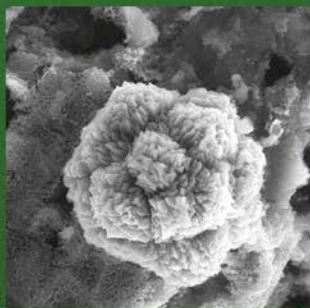


MONOGRAFIE, STUDIA, ROZPRAWY

M110

Jolanta Latosińska

**MODYFIKACJA POPIOŁU
Z KOMUNALNYCH OSADÓW ŚCIEKOWYCH
POPRAZ ZEOLITYZACJĘ
WYBRANE ZAGADNIENIA**



Politechnika Świętokrzyska

Kielce 2019

MONOGRAFIE, STUDIA, ROZPRAWY

M111

Jolanta Latosińska

**MODYFIKACJA POPIOŁU
Z KOMUNALNYCH OSADÓW ŚCIEKOWYCH
POPRAZ ZEOLITYZACJĘ
WYBRANE ZAGADNIENIA**

Kielce 2019

MONOGRAFIE, STUDIA, ROZPRAWY NR M111

Redaktor Naukowy serii

NAUKI TECHNICZNE – INŻYNIERIA ŚRODOWISKA I ENERGETYKA

prof. dr hab. inż. Andrzej KULICZKOWSKI

Recenzenci:

prof. dr hab. inż. Izabela MAJCHRZAK-KUCĘBA

dr hab. inż. Magdalena WDOWIN, prof. IGSMiE PAN

Redakcja

Irena PRZEORSKA-IMIOŁEK

Projekt okładki

Tadeusz UBERMAN

Wyniki badań uzyskane w ramach projektu finansowanego ze środków
Narodowego Centrum Nauki na podstawie decyzji nr DEC-2011/03/D/ST8/04984

Wydanie monografii finansowane w ramach projektu z programu Ministra
Nauki i Szkolnictwa Wyższego pod nazwą „Regionalna Inicjatywa Doskonałości”
w latach 2019-2022, nr projektu 025/RID/2018/19, kwota finansowania 12 000 000 zł



Ministerstwo Nauki
i Szkolnictwa Wyższego

© Copyright by Politechnika Świętokrzyska, Kielce 2019

Wszelkie prawa zastrzeżone. Żadna część tej pracy nie może być powielana
czy rozpowszechniana w jakiegokolwiek formie, w jakikolwiek sposób:
elektroniczny bądź mechaniczny, włącznie z fotokopiowaniem, nagrywaniem
na taśmy lub przy użyciu innych systemów, bez pisemnej zgody wydawcy.

PL ISSN 1897-2691

PL ISBN 978-83-65719-49-2

Wydawnictwo Politechniki Świętokrzyskiej
25-314 Kielce, al. Tysiąclecia Państwa Polskiego 7
tel./fax 41 34 24 581
e-mail: wydawca@tu.kielce.pl
www.wydawnictwo.tu.kielce.pl

Spis treści

1. Wprowadzenie	5
2. Cel i zakres pracy	7
3. Regulacje prawne w zakresie termicznego przekształcania komunalnych osadów ściekowych	8
4. Spalanie komunalnych osadów ściekowych	10
4.1. Charakterystyka osadów ściekowych – właściwości paliwowe	11
4.2. Technologie monospalania osadów ściekowych	15
4.3. Rodzaje stałych pozostałości po spalaniu osadów ściekowych	16
4.4. Lokalizacja spalarni osadów ściekowych	17
5. Charakterystyka jakościowa popiołu z termicznej przeróbki komunalnych osadów ściekowych	20
5.1. Skład chemiczny i fazowy popiołu po spalaniu osadów ściekowych	20
5.2. Metale ciężkie w popiołach po spalaniu osadów ściekowych	23
5.3. Właściwości fizyczne popiołu ze spalania osadów ściekowych	25
6. Metody zagospodarowania popiołu z osadów ściekowych	27
6.1. Dodatek popiołu z osadów ściekowych do cementu	27
6.2. Kruszywo lekkie z popiołu z osadów	28
6.3. Materiały spiekane na bazie popiołu z osadów ściekowych	28
6.4. Materiały zwitryfikowane na bazie popiołu z osadów ściekowych	29
6.5. Odzysk fosforu z popiołu z osadów ściekowych	30
6.6. Popioły z osadów ściekowych w budownictwie drogowym	30
6.7. Zestawianie i składowanie popiołu z osadów	30
6.8. Inne metody wykorzystania popiołu z komunalnych osadów ściekowych	31
6.9. Zeolityzacja popiołu z komunalnych osadów ściekowych	31
7. Zeolity syntetyczne	33
7.1. Metody otrzymywania zeolitów	35
7.2. Wykorzystanie surowców odpadowych do syntezy zeolitów	38
7.3. Właściwości wybranych zeolitów syntetycznych	40
8. Zeolityzacja popiołu z osadów ściekowych w badaniach własnych	43
8.1. Metodyka badań	43
8.2. Charakterystyka surowców użytych do badań	46
8.3. Procedury zeolityzacji popiołów z osadu ściekowego	54
8.4. Wyniki konwersji popiołów metodą hydrotermalną	61

8.5. Wyniki zeolityzacji popiołów otrzymane metodą fuzji	73
8.6. Podsumowanie	87
9. Ocena wpływu parametrów procesowych na wybrane właściwości uzyskanych materiałów w aspekcie inżynierii środowiska	89
9.1. Wpływ temperatury obróbki termicznej osadu	94
9.2. Wpływ metody konwersji	94
9.2.1. Konwersja metodą hydrotermalną	94
9.2.2. Konwersja metodą fuzji	105
9.3. Optymalizacja wielokryterialna właściwości popiołów z osadu ściekowego po konwersji	120
9.4. Podsumowanie	135
10. Propozycje zastosowań zeolitów z popiołów z osadów ściekowych w oczyszczaniu wód i ścieków	136
10.1. Wody zużyte zanieczyszczone metalami ciężkimi	136
10.1.1. Metodyka badań	137
10.1.2. Wyniki usuwania metali ciężkich	137
10.2. Odcieki składowiskowe	141
10.2.1. Metodyka badań	142
10.2.2. Odcieki składowiskowe użyte do badań	142
10.2.3. Wyniki podczyszczania odcieków składowiskowych	143
10.3. Podsumowanie	147
11. Wnioski końcowe	148
Literatura	150
Załączniki	
Załącznik 1. Charakterystyka surowych popiołów z osadu ściekowego	167
Załącznik 2. Charakterystyka popiołów z osadu po konwersji	171
Załącznik 3. Dane uzupełniające do analizy statystycznej	189
Załącznik 4. Odczyn pH po procesie sorpcji metali ciężkich z monoroztworów	221
Streszczenie	223
Summary	225

Literatura

- [1] Uchwała nr 88 Rady Ministrów z dnia 1 lipca 2016 r. w sprawie Krajowego planu gospodarki odpadami 2022, M.P. 2016 nr 0, poz. 784.
- [2] Aktualizacja Krajowego Programu Oczyszczania Ścieków Komunalnych – AKPOŚK 2017, Obwieszczenie Ministra Środowiska z dnia 11 grudnia 2017 roku, M.P., poz. 1183.
- [3] GUS, Bank Danych Regionalnych, 11.07.2018. <https://bdl.stat.gov.pl>.
- [4] Rozporządzenie Ministra Gospodarki z dnia 16 lipca 2015 r. w sprawie dopuszczania odpadów do składowania na składowiskach, Dz.U. 2015 nr 0, poz. 1277.
- [5] Bień J.D.: Zagospodarowanie komunalnych osadów ściekowych metodami termicznymi. *Inżynieria i Ochrona Środowiska* 4(2012), s. 439-449.
- [6] Wzorek M.: Assessment of leachability of harmful components from alternative fuels prepared with the use of sewage sludge. *Ecological Chemistry and Engineering*. S 19(2012), s. 617-627.
- [7] Bień J., Neczaj E., Worwąg M., Grosser A., Nowak D., Milczarek M., Janik M.: Kierunki zagospodarowania osadów w Polsce po roku 2013. *Inżynieria i Ochrona Środowiska* 4(2011), s. 375-384.
- [8] Pająk T.: Termiczne przekształcenie osadów ściekowych. *Przegląd Komunalny* 12(2010), s. 77-82.
- [9] Donatello S., Cheeseman C.R.: Recycling and recovery routes for incinerated sewage sludge ash. *Waste Management* 33(2013), s. 2328-2340.
- [10] Zabielska-Adamska K.: Produkt spalania komunalnych osadów ściekowych jako grunt antropogeniczny. *Rocznik Ochrony Środowiska* 17(2015), s. 1286-1305.
- [11] Suchecki T.T.: Zeolity z popiołów lotnych. Otrzymywanie i aplikacje w inżynierii środowiska. Wrocław Wydawnictwo Zakład Narodowy im. Ossolińskich 2005, s. 84.
- [12] Bao W, Zou H., Gan S., Xu X., Ji G., Zheng K.: Adsorption of heavy metal ions from aqueous solutions by zeolite based on oil shale ash: kinetic and equilibrium studies. *Chemical Research in Chinese Universities* 29(2013), s. 126-131.
- [13] Espejel-Ayala F., Schouwenaars R., Durán-Moreno A., Ramírez-Zamora R.M.: Use of drinking water sludge in the production process of zeolites. *Research on Chemical Intermediates* 40(2014), s. 2919-2928.
- [14] Yang G., Yang T.: Synthesis of zeolites from municipal incinerator fly ash. *Journal of Hazardous Materials* 62(1998), s. 75-89.
- [15] Wajima T., Haga M., Kuzawa K., Ishimoto H., Tamada O., Ito K., Nishiyama T., Downs R.T., Rakovan J.F.: Zeolite synthesis from paper sludge ash at low temperature (90°C) with addition of diatomite. *Journal of Hazardous Materials* B132(2006), s. 244-252.
- [16] **Latosińska J.**: Zeolitization of sewage sludge ash with a fusion method. *Journal of Ecological Engineering* 17(2016), s. 138-146.
- [17] **Latosińska J.**: The evaluation of possibility of material recovery from sewage sludge ash by zeolitization. 16th International Multidisciplinary Scientific GeoConference SGEM 2016, SGEM Vienna GREEN Extended Scientific Sessions, SGEM2016 Conference Proceedings, 2016, s. 47-54.

- [18] pod red. Kwiatkiewicz P., Szczerbowski R.: Energetyka – aspekty badań interdyscyplinarnych. **Latosińska J.**, Dańczuk M., Wpływ zeolityzacji popiołów z osadów ściekowych na ich zastosowanie w inżynierii środowiska. Poznań. Fundacja Na Rzecz Czystej Energii 2017, s. 457-468.
- [19] **Latosińska J.**: Zeolite synthesis as potential application of sewage sludge ash, 17th International Multidisciplinary Scientific Conference SGEM 2017, Conference Proceeding, 17, Energy and Clean Technologies, 42(2017), s. 699-706.
- [20] **Latosińska J.**: Sewage sludge ash as a new raw material for the synthesis of zeolites, Publication title: Sewage sludge. Assesment, Treatment and Environmental Impact. Wydawca Nova Science Publishers, red. Eric Danso-Boateng, 2017, s. 267-287.
- [21] **Latosińska J.**: Limitation of the environmental impact of ashes from combustion of sewage sludge by synthesis of zeolites. E3S Web of Conferences 14, Energy and Fuels 2016, 14(2017), s. 1-10.
- [22] **Latosińska J.**: The synthesis of zeolites from sewage sludge ash. Proceeding of ECOpole 11(2017), s. 29-36.
- [23] Lee J.S., Eom S.W., Choi H.Y.: Synthesisi of zeolite from sewage sludge incinerator fly ash by hydrothermal reaction in open system. Korean Journal of Environmental Health Sciences 33(2007), s. 317-324.
- [24] Je-Seung L., Sook-Nye C., Chul-Hwi P.: Synthesis of Zeolite P1 and Analcime from Sewage Sludge Incinerator Fly Ash. Journal of Korean Society of Environmental Engineers 30(2008), s. 659-665.
- [25] Zhang Y., Leng Z., Zou F., Wang L., Chen S.S., Tsang D.C.W.: Synthesis of zeolite A using sewage sludge ash for applicaton in warm mix asphalt. Journal of Cleaner Production 172(2018), s. 686-695.
- [26] Dyrektywa Parlamentu Europejskiego i Rady 2010/75/UE z dnia 24 listopada 2010 r. w sprawie emisji przemysłowych (zintegrowane zapobieganie zanieczyszczeniom i ich kontrola), (wersja przekształcona) (Tekst mający znaczenie dla EOG).
- [27] Dyrektywa Rady 2000/76/WE z dnia 4 grudnia 2000 r. w sprawie spalania odpadów
- [28] Dyrektywa Rady 1999/31/WE z dnia 26 kwietnia 1999 r. w sprawie składowania odpadów.
- [29] Decyzja Rady z dnia 19 grudnia 2002 r. ustanawiająca kryteria i procedury przyjęcia odpadów na składowiska, na podstawie art. 16 i załącznika II do dyrektywy 1999/31/WE (2003/33/WE).
- [30] Ustawa z dnia 14 grudnia 2012 roku o odpadach, Dz.U. Nr 0, poz. 21, 2013, z póź. zm.
- [31] Ustawa z dnia 27 kwietnia 2001 roku Prawo ochrony Środowiska, Dz.U. Nr 62, poz. 627, 2001, z póź. zm.
- [32] Rozporządzenie Ministra Środowiska z dnia 9 grudnia 2014 roku w sprawie katalogu odpadów, Dz.U. nr 0, poz. 1923.
- [33] Rozporządzenie Ministra Środowiska z dnia 6 lutego 2015 roku w sprawie komunalnych osadów ściekowych, Dz.U. Nr 0, poz. 257.
- [34] Rozporządzenie Ministra Środowiska z dnia 30 kwietnia 2013 r. w sprawie składowisk odpadów, Dz.U. 2013 nr 0, poz. 523.

- [35] Rozporządzenie Ministra Rozwoju z dnia 21 stycznia 2016 r. w sprawie wymagań dotyczących prowadzenia procesu termicznego przekształcania odpadów oraz sposobów postępowania z odpadami powstałymi w wyniku tego procesu, Dz.U. 2016 nr 0, poz. 108.
- [36] Rozporządzenie Ministra Środowiska z dnia 1 marca 2018 roku w sprawie standardów emisyjnych dla niektórych rodzajów instalacji, źródeł spalania paliw oraz urządzeń spalania lub współspalania odpadów, Dz.U. Nr 0, poz. 680.
- [37] Ustawa o biokomponentach i biopaliwach ciekłych, Dz.U. Nr 169, poz. 1199, 2006, z póź. zm.
- [38] Dyrektywa Parlamentu Europejskiego i Rady 2009/28/WE z dnia 23 kwietnia 2009 roku w sprawie promowania stosowania energii ze źródeł odnawialnych.
- [39] Ustawa z dnia 10 kwietnia 1997 roku Prawo energetyczne, Dz.U. nr 54, poz. 348, 1997, z póź. zm.
- [40] Ustawa z dnia 12 czerwca 2015 r. o systemie handlu uprawnieniami do emisji gazów cieplarnianych, Dz.U. Nr 0, poz. 1223, z póź. zm.
- [41] Rozporządzenie Ministra Środowiska z dnia 8 czerwca 2016 r. w sprawie warunków technicznych kwalifikowania części energii odzyskanej z termicznego przekształcania odpadów, Dz.U. 2016 nr 0, poz. 847.
- [42] Werther J., Ogada T.: Sewage sludge combustion. *Progress in Energy and Combustion Science* 25(1999), s. 55-116.
- [43] Kosior-Kazberuk M.: Application of SSA as Partial Replacement of Aggregate in Concrete. *Polish Journal of Environmental Studies* 20(2011), s. 365-370.
- [44] Bień J.B., Kacprzak M., Kamizela T., Kowalczyk M., Neczaj E., Pająk T., Wystalska K.: Komunalne osady ściekowe – zagospodarowanie energetyczne i przyrodnicze. *Politechnika Częstochowska*, Częstochowa 2015, s. 150.
- [45] Magdziarz A., Wilk M., Gajek M., Nowak-Woźny D., Kopia A., Kalembe-Rec I., Koziński J.A.: Properties of ash generated during sewage sludge combustion: A multifaceted analysis. *Energy* 113(2016), s. 85-94.
- [46] Kacprzak M., Neczaj E., Fijałkowski K., Grobelak A., Grosser A., Worwąg M., Rorat A., Brattebo H., Almås Å., Singh B.R.: Sewage sludge disposal strategies for sustainable development. *Environmental Research* 156(2017), s. 39-46.
- [47] Bień J.B., Wystalska K.: Osady ściekowe. Teoria i praktyka. Wydawnictwo Politechniki Częstochowskiej, Częstochowa 2011, s. 353.
- [48] Podedworna J., Umiejewska K.: Technologia osadów ściekowych. Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa 2008, s. 208.
- [49] Syed-Hassan SSA., Wang Y., Hu S., Su S., Xiang J.: Thermochemical processing of sewage sludge to energy and fuel: Fundamentals, challenges and considerations. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 80(2017), s. 888-913.
- [50] Niu Y., Tan H., Hui S.: Ash-related issues during biomass combustion: Alkali-induced slagging, silicate melt-induced slagging (ash fusion), agglomeration, corrosin, ash utilization, and related countermeasures. *Progress in Energy and Combustion Science* 52(2016), s. 1-61.
- [51] Visser H.J.M.: The influence of fuel combustion on agglomeration behavior in fluidized bed combustion. ECN-C-04-054 2004, s. 44.

- [52] Kijo-Kleczkowska A., Środa K., Kosowska-Golachowska M., Musiał K., Wolski K.: Mechanisms and kinetics of granulated sewage sludge combustion. *Waste Management* 46(2015), s. 459-471.
- [53] Nadziakiewicz J., Waclawiak K., Stelmach S.: *Procesy termiczne utylizacji odpadów*. Wyd. Politechniki Śląskiej, Gliwice 2007, s. 278.
- [54] Środa K., Kijo-Kleczkowska A., Otwinowski H.: Metody utylizacji osadów ściekowych. *Archiwum Gospodarki Odpadami i Ochrony Środowiska* 15(2013), s. 33-50.
- [55] Yu M.M., Masandi M.S., Grace J.R., Bi X.T., Lim C.J., Li Y.: Co-gasification of biosolids with biomass: Thermogravimetric analysis and pilot scale study in a bubbling fluidized bed reactor. *Bioresource Technology* 175(2015), s. 51-58.
- [56] Wzorek M.: Characterisation of the properties of alternative fuels containing sewage sludge. *Fuel Processing Technology* 104(2012), s. 80-89.
- [57] Atienza-Martinez M., Fonts I., Lazaro L., Ceamanos J., Gea G.: Fast pyrolysis of torrefied sewage sludge in a fluidized bed reactor. *Chemical Engineering Journal* 259(2015), s. 467-480.
- [58] Magdziarz A., Wilk M.: Thermal characteristics of the combustion process of biomass and sewage sludge. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry* 114(2013), s. 519-529.
- [59] Heidrich Z., Witkowski A.: *Urządzenia do oczyszczania ścieków, projektowanie, przykłady obliczeń*, Seidel-Przywecki, Warszawa 2010, s. 287.
- [60] Stasta P., Boran J., Bebar L., Stehlik P., Oral J.: Thermal processing of sewage sludge. *Applied Thermal Engineering* 26(2006), s. 1420-1426.
- [61] Rosik-Dulewska Cz.: *Podstawy gospodarki odpadami*. PWN, Warszawa 2008, s. 390.
- [62] Bennamoun L., Arlabosse P., Léonard A.: Review on fundamental aspect of application of drying process to wastewater sludge. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 28(2013), s. 29-43.
- [63] Rogers H. R.: Sources, behaviour and fate of organic contaminants during sewage treatment and in sewage sludge. *The Science of the Total Environment* 185(1996), s. 3-26.
- [64] Kim J., Kang H-O., Qureshi T.I.: Heating value characteristics of sewage sludge: A comparative study of different sludge types. *Journal of Chemical Society of Pakistan* 27(2005), s. 124-129.
- [65] Wang X., Jin Y., Wang Z., Mahar R.B., Nie Y.: A research on sintering characteristics and mechanisms of dried sewage sludge. *Journal of Hazardous Materials* 160(2008), s. 489-494.
- [66] Beck A., Johnson D.L., Jones K.C.: The form and bioavailability of non-ionic organic chemicals in sewage sludge-amended agricultural soils. *The Science of the Total Environment* 185(1996), s. 125-149.
- [67] Nadziakiewicz J., Ścierański W., Czekalski R.: Zmiany właściwości cieplnych osadu ściekowego podczas składowania na otwartym składowisku, pod red. Wandrasza J.W., Pikonia K.: *Paliwa z odpadów*, t. IV, Gliwice 2003, s. 115-120.
- [68] Folgueras M.B., Díza R.M., Xiberta J.: Pyrolysis of blends of different types of sewage sludge with one bituminous coal. *Energy* 30(2005), s. 1079-1091.
- [69] Kempa E.S.: *Gospodarka odpadami miejskimi*. Arkady, Warszawa 1983, s. 506.

- [70] pod red. Welp J.E.: Wastewater Solids Incineration Systems. Wyd. Water Environment Federation, Alexandria, USA, 2009.
- [71] Bień J.B., Gałwa-Widera M., Kamizela T., Kowalczyk M., Wystalska K.: Gospodarka osadami ściekowymi i uciążliwości zapachowe w małych i średnich oczyszczalniach ścieków. Politechnika Częstochowska, Częstochowa 2016, s. 280.
- [72] Integrated Pollution Prevention and Control. Reference Document on Best Available Techniques in Common Waste Water and Waste Gas Treatment, Management Systems in the Chemical Sector. European Commission. 2003
- [73] Werther J., Ogada T., Philippek Ch.: Sewage sludge combustion in the fluidized bed comparison of stationary and circulating fluidized bed technique. Proceedings of the International Conference on Fluidized Bed Combustion 2(1995), s. 951-962.
- [74] Hout H., Li S., Lu Q.: Gaseous Emission of Monocombustion of Sewage Sludge in a Circulating Fluidized Bed. Industrial & Engineering Chemistry Research 52(2013), s. 5556-5562.
- [75] Chodur M.: Procesy termicznego przekształcania osadów ściekowych z przemysłowych i komunalnych oczyszczalni ścieków, Techniczne, ekonomiczne i organizacyjne aspekty gospodarki odpadami, V Jubileuszowe Międzynarodowe Forum Gospodarki Odpadami, Gniezno, Poznań PZITS 2003.
- [76] Chodur M.: System BioCon – ekonomiczny proces suszenia i spalania osadów ściekowych. EkoTechnika 4(2002), s. 38-39.
- [77] Fieducik J., Gawroński A.: Suszenie i spalanie osadów ściekowych jako metoda ich utylizacji na przykładzie spalarni w Olsztynie. Zeszyty Naukowe Politechniki Rzeszowskiej. Budownictwo i Inżynieria Środowiska z. 57, 271(2010), s. 147-154.
- [78] Mokrzycki E., Uliasz-Bocheńczyk A.: Możliwości wykorzystania odpadów komunalnych jako paliw alternatywnych. Zeszyty Naukowe Wydziału Budownictwa i Inżynierii Środowiska. Seria: Inżynieria Środowiska. Politechnika Koszalińska 20(2001), s. 207-216.
- [79] Mokrzycki E., Uliasz-Bocheńczyk A.: Paliwa alternatywne dla przemysłu cementowego. Wydawnictwo Instytut GSMiE PAN, Kraków 2004, s. 128.
- [80] pod red. Heidrich Z.: Kierunki przeróbki i zagospodarowania osadów ściekowych, Pająk T., Zagospodarowanie produktów spalania osadów ściekowych. Wydawnictwo Seidel-Przywecki, Sp. z o.o., 2010, s. 161-169.
- [81] **Latosińska J.**, Gawdzik J.: The impact of combustion technology of sewage sludge on mobility of heavy metals in sewage sludgeash. Ecological Chemistry and Engineering S 21(2014), s. 465-475.
- [82] Mininni G., Blanch A.R., Lucena F., Berselli S.: EU policy on sewage sludge utilization and perspectives on new approaches of sludge management. Environmental Science and Pollution Research 22(2014), s. 7361-7374.
- [83] Lin K.L., Lin D.F., Luo H.L.: Sewage sludge ash on pozzolanic reaction of co-melted slag blended cement, International Water Association Conference and Exhibition, New Brunswick 2007, s. 1063-1068.
- [84] Wang L., Skjevraak G., Hustad J.E., Grønli M.G.: Sintering characteristics of sewage sludge ashes at elevated temperatures. Fuel Processing Technology 96(2012), s. 88-97.

- [85] Stempkowska A., Kępys W., Pietrzyk J.: Wpływ właściwości fizykochemicznych stałych pozostałości z termicznego przekształcania osadów ściekowych na możliwości ich wykorzystania w ceramice czerwonej. *Gospodarka Surowcami Mineralnymi* 31(2015), s. 109-122.
- [86] Król K., Hrycaj G., Ferens W., Rybak W.: Wpływ wybranych właściwości osadów ściekowych i biomas na skłonność ich popiołów do spiekania. *Archiwum Spalania* 8(2008), s. 47-54.
- [87] Kim M.-R., Jang J.-G., Lee S.-K., Hwang B., Lee J.K.: Correlation between the ash composition and melting temperature of waste incineration residue. *Korean Journal of Chemistry Engineering* 37(2010), s. 1028-1034.
- [88] Pan S.-C., Lin C.-C., Tseng D.-H.: Reusing sewage sludge ash as adsorbent for copper removal from wastewater. *Resources, Conservation and Recycling* 39(2003), s. 79-90.
- [89] Kępys W., Pomykała R., Pietrzyk J.: Właściwości popiołów lotnych z termicznego przekształcania komunalnych osadów ściekowych. *Inżynieria Mineralna* 1(2013), s. 11-18.
- [90] Kosior-Kazberuk M.: Nowe dodatki mineralne do betonu. *Budownictwo i Inżynieria Środowiska* 2(2011), s. 48-55.
- [91] Chesner W.H., Collins R.J., MacKay M.H.: Users Guidelines for Waste and By-Product Materials in Pavement Construction. Report No. FHWA-RD-97-148, Commack: Chesner Engineering 1998
- [92] Adam C., Kley G., Simon F.G.: Thermal treatment of municipal sewage sludge ammingatmarketable P-fertilisers. *Materials Transactions* 12(2007), s. 3056-3061.
- [93] Hartman M., Pohořelý M., Trnka O.: Behavior of inorganic constituents of municipal sewage sludge during fluidized-bed combustion. *Chemical Papers* 61(2007), s. 181-185.
- [94] Kozioł M., Nadziakiewicz J.: Wpływ zmienności właściwości osadów ściekowych na możliwości ich współspalania z węglem. *Paliwa z odpadów*, t. III, pod red. Wandrasz J. W., Nadziakiweicz J., Gliwice 2001, s. 213-228.
- [95] Borowski G.: Przetwarzanie popiołu ze spalania osadów ściekowych na materiał budowlany. *Inżynieria Ekologiczna* 25(2011), s. 251-258.
- [96] Donatello S., Tyrer M., Cheeseman C.R.: EU landfill waste acceptance criteria and EU Hazardous Waste Directive compliance testing of incinerated sewage sludge ash. *Waste Management* 30(2010), s. 63-71.
- [97] **Latosińska J.**, Gawdzik J.: Ocena immobilizacji metali ciężkich z popiołów ze spalania osadów ściekowych. *Inżynieria i Ochrona Środowiska* 17(2014), s. 415-42.
- [98] Cyr M., Coutand M., Clasters P.: Technological and environmental behavior of sewage sludge ash (SSA) in cement – based materials. *Cement and Concrete Research* 37(2007), s. 1278-1289.
- [99] Cheeseman C.R., Virdi, G.S.: Properties and microstructure of lightweight aggregate produced from sintered sewage sludge ash. *Resources, Conservation and Recycling* 45(2005), s. 18-30.
- [100] Cheeseman C.R., Sollars C.J., McEntee S.: Properties, microstructure and leaching of sintered sewage sludge ash. *Resources, Conservation and Recycling* 40(2003), s. 13-25.

- [101] Tashima M.M., Reig L., Santini Jr M.A., Moraes J.C.B., Akasaki J.L., Payá J., Borrachero M.V., Soriano L.: Compressive Strength and Microstructure of Alkali-Activated Blast Furnace Slag/Sewage Sludge Ash (GGBS/SSA) Blends Cured at Room Temperature. *Waste Biomass Valorization* 8(2017), s. 1441-1451.
- [102] Donatello S., Tong D., Cheesman C.R.: Production of technical grade phosphoric acid from incinerator sewage sludge ash (ISSA). *Waste Management* 30(2010), s. 1634-1642.
- [103] Anderson M.: Encouraging prospects for recycling incinerated sewage sludge ash (ISSA) into clay-based building products. *Journal of Chemical Technology and Biotechnology* 77(2002), s. 352-360.
- [104] Garcés P., Pérez Carrión M., García-Alcocel E., Payá J., Monzó J., Borrachero M.V.: Mechanical and physical properties of cement blended with sewage sludge ash. *Waste Management* 28(2008), s. 2495-2502.
- [105] **Latosińska J.**, Kowalski K.: Mobilność metali ciężkich z osadów ściekowych i popiołu z osadów ściekowych z oczyszczalni powyżej 200 000 RLM. *Archiwum Gospodarki Odpadami i Ochrony Środowiska* 15(2013), s. 43-50.
- [106] **Latosińska J.**: Wpływ spalania biomasy na wymywalność wybranych metali ciężkich z popiołów. Między ewolucją a rewolucją – w poszukiwaniu strategii energetycznej, t.2., Zrównoważony rozwój – OZE Elektroenergetyka – Prawo Ochrona środowiska – Ekologia – Biomasa Odpady komunalne, red. Maj J., Kwiatkiewicz P., Szczerbowski R. i inni. Wojskowa Akademia Techniczna, Poznań 2015, s. 725-738.
- [107] **Latosińska J.**: Analiza porównawcza popiołów z biomasy i paliw kopalnych – wymywalność wybranych metali ciężkich. Między ewolucją a rewolucją – w poszukiwaniu strategii energetycznej, t.2., Zrównoważony rozwój – OZE Elektroenergetyka – Prawo Ochrona środowiska – Ekologia – Biomasa Odpady komunalne, red. Maj J., Kwiatkiewicz P., Szczerbowski R. i inni. Wojskowa Akademia Techniczna, Poznań 2015, s. 839-846.
- [108] Wzorek Z.: Odzysk związków fosforu z termicznie przekształconych odpadów i ich zastosowanie jako substytutu naturalnych surowców fosforowych. Wyd. Politechniki Krakowskiej, Kraków 2008, s. 159.
- [109] Minini G., Baraguglia C.M., Marani D.: Partitioning of Cr, Cu, Pb and Zn in sewage sludge incineration by rotary kiln and fluidized bed furnaces. *Water Science and Technology* 8(2000), s. 61-68.
- [110] **Latosińska J.**, Gawdzik J.: The evaluation of the mobility and leaching of heavy metals from sewage sludge ashes, *Proceedings Venice 2014, Fifth International Symposium on Energy from Biomass and Waste, IWWG-International Waste Working Group, Venice, Italy, 17-20 November 2014*.
- [111] Gawdzik J.: Mobilność wybranych metali ciężkich w osadach ściekowych. Monografia. Politechnika Świętokrzyska, Kielce 2013, s. 140.
- [112] **Latosińska J.**: Analiza mobilności metali ciężkich z osadów ściekowych z oczyszczalni ścieków w Olsztynie i Sitkówce-Nowiny. *Inżynieria i Ochrona Środowiska* 17(2014), s. 243-253.
- [113] **Latosińska J.**, Gawdzik J.: The effect of incineration temperatures on mobility of heavy metals in sewage sludge ash. *Environment Protection Engineering* 14(2012), s. 31-44.

- [114] Kosior-Kazberuk M.: Nowe dodatki mineralne do betonu. *Budownictwo i Inżynieria Środowiska* 2(2011), s. 47-55.
- [115] Lynn C.J., Dhir R., Ghataora G.S., West R.P.: Sewage sludge ash characteristics and potential for use in concrete. *Construction and Building Materials* 98(2015), s. 767-779.
- [116] pod red. Stefańczyka B.: *Budownictwo Ogólne, Tom 1, Materiały i wyroby budowlane*. Arkady, Warszawa 2005, s. 926.
- [117] Vouk D., Nakic D., Stirmer N., Cheeseman C.R.: Use of sewage sludge ash in cementitious material *Reviews On Advanced Materials Science* 49(2017), s. 158-170.
- [118] **Latosińska J.**, Dańczuk M.: Analiza zmienności sezonowej wybranych właściwości popiołów ze spalania osadów ściekowych, *Przegląd Naukowo-Metodyczny*, t.35, cz 4. *Ochrona środowiska i aspekty prawno-społeczne*, 34(2017), s. 933-947.
- [119] Białowiec A., Janczukowicz W., Krzemieniewski M.: Możliwości zagospodarowania popiołów po termicznym unieszkodliwianiu osadów ściekowych w aspekcie regulacji prawnych. *Rocznik Ochrony Środowiska* 11(2009), s. 959-971.
- [120] Fontes C.M.A., Barbosa M.C., Toledo Filho R.D., Goncalves J.P.: Potentiality of sewage sludge ash as mineral additive in cement mortar and high performance concrete. *International RILEM Conference on the Use of Recycled Materials in Buildings and Structures*, Barcelona 2004.
- [121] Monzo J., Paya M.V., Borrachero EPM.: Mechanical behavior of mortar containing sewage sludge ash (SSA) and portland cements with different tricalcium aluminate content. *Cement and Concret Research* 29(1999), s. 87-94.
- [122] Wang K.-S., Chiou I.-J., Chen Ch.-H., Wang D.: Lightweight properties and pore structure of foamed material made from sewage sludge ash. *Construction and Building Materials* 19(2005), s. 627-633.
- [123] Monzo J., Pay, J., Borrachero M.V., Gírbés I.: Reuse of sewage sludge ashes (SSA) in cement mixtures: the effect of SSA on the workability of cement mortars. *Waste Management* 23(2003), s. 373-381.
- [124] Garcés P., Pérez Carrión M., García-Alcocel E., Payá J., Monzó J., Borrachero M.V.: Mechanical and physical properties of cement blended with sewage sludge ash. *Waste Management* 28(2008), s. 2495-2502.
- [125] **Latosińska J.**, Lech M., Paluch A., Galarczyk Ł.: Effect of the addition of ash from the incineration of sewage sludge on the properties of cement slurries. *Structure and Environment* 8(2016), s. 253-259.
- [126] Lin K.-L., Lin Ch.-Y.: Hydration characteristics of waste sludge ash utilized as raw cement material. *Cement and Concrete Research* 35(2005), s. 1999-2007.
- [127] Kappel A., Ottosen L.M., Kirkelund G.M.: Colour, compressive strength and workability of mortars with an iron rich sewage sludge ash. *Construction and Building Materials* 157(2017), s. 1199-1205.
- [128] Chen M., Blanck, Gautier M., Mehu J., Gourdon R.: Environmental and technical assessments of the potential utilization of sewage sludge ashes (SSAs) as secondary raw materials in construction. *Waste Management* 33(2013), s. 1268-1275.
- [129] Ferreira C., Ribeiro A., Ottosen L.: Possible applications for municipal solid waste fly ash. *Journal of Hazardous Materials* 96(2003), s. 201-216.

- [130] **Latosińska J.**, Lech M.: Zastosowanie stałych produktów spalania jako pigmentów do barwienia zapraw cementowych lub betonu, zgłoszenie patentowe, 2014, A1 407456.
- [131] Szruba M.: Domieszki i dodatki do betonów. *Nowoczesne Budownictwo Inżynieryjne* 2(2017), s. 46-50.
- [132] Chiou I-J., Wang K-S., Chen C-H., Lin Y-T.: Lightweight aggregate made from sewage sludge and incinerated ash. *Waste Management* 26(2006), s. 1453-1461.
- [133] Suzuki S., Tanaka, M., Kaneko T.: Glass-ceramic from sewage sludge ash. *Journal of Materials Science* 32(1997), s. 1775-1779.
- [134] Wainwright P.J., Cresswell D.J.F.: Synthetic aggregates from combustion ashes using an innovative rotary kiln. *Waste Management* 21(2001), s. 241-246.
- [135] Kosior-Kazberuk M., Karwowska J.: Wybrane problemy zagospodarowania popiołów pochodzących ze spalania osadów ściek owych w technologii materiałów cementowych. *Inżynieria Ekologiczna* 25(2011), s. 110-123.
- [136] Wiebusch B., Seyfried C.F.: Utilization of sewage sludge ashes in the brick and tile industry. *Water Science and Technology* 36(1997), s. 251-258.
- [137] Wiebusch B., Ozaki M., Watanabe H., Seyfried C.F.: Assessment of leaching tests on construction material made of incinerator ash (sewage sludge): investigations in Japan and Germany. *Water Science and Technology* 38(1998), s. 195-205.
- [138] Anderson M., Skerratt R.G., Thoma J.P., Clay S.D.: Case study involving using fluidised bed incinerator sludge ash as a partial substitute in brick manufacture. *Water Science and Technology* 34(1996), s. 507-515.
- [139] Lin D.F., Weng C-H.: Use of sewage sludge ash as brick material. *Journal of Environmental Engineering* 10(2001), s. 922-927.
- [140] Okonu N., Takahashi S.: Full-scale application of manufacturing bricks from sewage. *Water Science and Technology* 36(1997), s. 243-250.
- [141] Merino I., Arevalo L.F., Romero F.: Characterization and possible uses of ashes from wastewater treatment plants. *Waste Management* 25(2005), s. 1046-1054.
- [142] Tay J.-H., Show K.-Y.: Resource recovery of sludge as a building and construction material – a future trend in sludge management. *Water Science and Technology* 36(1997), s. 259-266.
- [143] Lin D.F., Luo H.L., Luo H.L., Sheen Y.N.: Glazed tiles manufactured from incinerated sewage sludge ash and clay. *Journal of the Air & Waste Management Association* 55(2005), s. 163-172.
- [144] Lin D.F., Chang W.C., Yuan C., Luo H.L.: Production and characterization of glazed tiles containing incinerated sewage sludge. *Waste Management* 28(2008), s. 502-508.
- [145] Wiesbusch B., Ozaki M., Watanabe H., Seyfried C.F.: Assessment of leaching tests on construction materials made of incinerator ash (sewage sludge): investigations in Japan and Germany. *Water Science of Technology* 38(1998), s. 195-205.
- [146] pod red. Ziemia B.: *Technologia szkła*, tom 1, Arkady, Warszawa 1987, s. 547.
- [147] Borowski G., Gajewska M., Haustein E.: Możliwości zagospodarowania popiołów z termicznego przekształcania osadów ściekowych w kotłach fluidalnych. *Inżynieria i Ochrona Środowiska* 17(2014), s. 393-402.

- [148] Bień J.B., Pająk T., Wystalska K.: Unieszkodliwianie komunalnych osadów ściekowych. Wyd. Politechniki Częstochowskiej, Częstochowa 2014, s. 116.
- [149] Arnout S., Nagels E.: Modelling thermal phosphorus recovery from sewage sludge ash. *Calphad* 55(2016), s. 26-31.
- [150] Al Sayed M.H., Madan I.M., Rahman A., Buali M.: Use of sewage sludge ash in asphaltic paving mixes in hot regions. *Construction and Building Material* 9(1995), s. 19-23.
- [151] Lind B.B., Norrman J., Larsson L.B., Ohlsson S.-A., Bristav H.: Geochemicals anomalies from bottom ash in a road construction – Comparison of the leaching potential between an ash road and the surroundings. *Waste Management* 28(2008), s. 170-180.
- [152] Iżewska A., Wołoszyk Cz.: Wpływ nawożenia popiołem ze spalania komunalnych osadów ściekowych na właściwości chemiczne gleby lekkiej. *Rocznik Ochrony Środowiska* 16(2014), s. 486-497.
- [153] Żygadło M., Gawdzik J., **Latosińska J.**, Woźniak M., Seweryn A.: Sposób oczyszczania odcieków pochodzących ze składowisk odpadów komunalnych. 2012, patent, PL 214215 B1.
- [154] Chen L., Lin D.F.: Stabilization treatment of soft subgrade soil by sewage sludge ash and cement. *Journal of Hazardous Materials* 162(2009), s. 321-327.
- [155] Falaciński P., Szarek Ł.: Popiół z termicznego przekształcania komunalnych osadów ściekowych jako składnik zawieszin twardniejących. *Czasopismo Inżynierii Łądowej, Środowiska i Architektury* 64(2017), s. 49-66.
- [156] Pan S-C., Lin C-C., Tseng D-H.: Reusing sewage sludge ash as adsorbent for copper removal from wastewater. *Resources, Conservation and Recycling* 39(2003), s. 79-90.
- [157] Bouzid J., Elouear Z., Ksibi M., Fek, M., Montiel A.: A study on the removal characteristics of copper from aqueous solution by sewage sludge and pomace ashes. *Journal of Hazardous Material* 152(2008), s. 838-845.
- [158] Elouear Z., Bouzid J., Boujelben N.: Removal of nickel and cadmium from aqueous solutions by sewage sludge ash: study in single and binary systems. *Environmental Technology* 30(2009), s. 561-570.
- [159] Takahashi M., Kato S., Iwasaki S.: Technology for recovering phosphorus salt and zeolite from incinerated ash of sewage treatment sludge. *Journal of Advanced Science* 13(2001), s. 163-166.
- [160] Collella C., Wise W.S.: The IZA Handbook of Natural Zeolites: A tool of knowledge on the most important family of porous minerals. *Microporous and Mesoporous Materials* 189(2014), s. 4-10.
- [161] Żygadło M., Seweryn A., Woźniak M., Gawdzik J., **Latosińska J.**: Recykling popiołów z instalacji odzysku energii – jako przykład realizacji idei ekorozwoju. *Problemy Ekorozwoju* 6(2011), s. 207-214.
- [162] Sarbak Z.: Nieorganiczne materiały nanoporowate. Uniwersytet im. A. Mickiewicza, Poznań 2009, s. 304.
- [163] Breck D.W.: Zeolite Molecular Sieves. Structure, Chemistry, and Use. New York John Wiley and Sons 1974, s. 771.

- [164] Franus W.: Zastosowanie zeolitów wytworzonych z popiołów lotnych do usuwania zanieczyszczeń z wody i ścieków. Polska Akademia Nauk Monografie 102, Lublin 2012, s. 131.
- [165] Kołdyńska D., Gęca M., Franus M., Franus W.: Zastosowanie popiołów lotnych i zeolitów modyfikowanych chitozanem do usuwania jonów metali ciężkich. *Przemysł Chemiczny* 96(2017), s. 124-131.
- [166] Payra P., Dutta P.K.: Zeolites [w:] Scott M. Auerbach, Kathleen A. Carrado, Prabir K. Dutta: *Handbook of Zeolite Science and Technology*. New York CRC Press 2003, s. 1204.
- [167] Winczaszek B., Adamski W.: Możliwości usuwania kationów wybranych metali w procesie wymiany jonowej na syntetycznych zeolitach. *Ochrona Środowiska* 2(2006), s. 33-37.
- [168] Sadek R., Chałupka K., Dźwigaj S.: Zastosowanie i synteza materiałów zeolitowych. *Eliksir* 2(2015), s. 36-39.
- [169] Koshy N., Singh D.N.: Fly ash zeolites for water treatment applications. *Journal of Environmental Chemical Engineering* 4(2016), s. 1460-1472.
- [170] Querol X., Moreno N., Umaña J.C., Alastuey A., Hernández E., López-Soler A., Plana F.: Synthesis zeolites from coal fly ash: an overview. *International Journal of Coal Geology* 50(2002), s. 413-423.
- [171] Elliot A.D., Dong-Ke Z.: Controlled Release Zeolite Fertilisers: A value added product produced from fly ash, *International Ash Utilization Symposium (IAUS) and World of Coal Ash (WOCA)*, 2005
- [172] Querol X., Plana F., Alastuey A., Lopez-Soler A.: Synthesis of Na-zeolites from coal fly ash. *Fuel* 8(1997), s. 793-799.
- [173] Szostak R.: *Molecular sieves: principles of synthesis and identification*. New York. Van Nostrand Reinhold Catalysis Series 1989, s. 524.
- [174] Shigemoto N., Hayashi H., Miyauta K.: Selective formation of Na-X zeolite from coal fly ash by fusion with sodium hydroxide prior to hydrothermal reaction. *Journal of Material Science* 28(1993), s. 4781-4786.
- [175] Molina A., Poole C.: A comparative study using two methods to produce zeolites from fly ash. *Minerals Engineering* 17(2004), s. 167-173.
- [176] Deng L., Xu Q., Wu H.: Synthesis of zeolite-like material by hydrothermal and fusion methods using municipal solid waste fly ash. *Procedia Environmental Sciences* 31(2016), s. 662-667.
- [177] Pimraksa K., Chindaprasirt P., Setthaya N.: Synthesis of zeolite phases from combustion by-products. *Waste Management and Resources* 28(2010), s. 1122-1132.
- [178] Marui Y., Irie R., Takiyama H., Uchida H., Matsuoka, M.: Analysis of nucleation of zeolite A from clear solutions. *Journal of Crystal Growth* 237-239(2002), s. 2148-2152.
- [179] Fan Y., Zhang F.S., Zhu J., Liu Z.: Effective utilization of waste ash from MSW and coal co-combustion power plant – zeolite synthesis. *Journal of Hazardous Materials* 153(2008), s. 382-388.
- [180] Dutta P.K., Bronic J.: Mechanism of zeolite formation: Seed-gel interaction. *Zeolites* 14(1994), s. 250-255.

- [181] Sheikh A.Y., Jones A.G.: Population balance modeling of particles formation during the chemical synthesis of zeolite crystals: Assessment of hydrothermal precipitation kinetics. *Zeolites* 16(1996), s. 164-172.
- [182] Nikolakis V., Vlacho D.G., Tsapatsis M.: Modeling of zeolite crystallization: the role of gel microstructure. *Microporous and Mesoporous Materials* 21(1998), s. 337-346.
- [183] Cundy C.S., Cox P.A.: The hydrothermal synthesis of zeolites: History and development from the earliest days to the present time. *Chemical Review* 103(2003), s. 663-701.
- [184] Murayama N., Tanabe M., Yamamoto H., Shibata J.: Mechanism of zeolite synthesis from coal fly ash by alkali hydrothermal reaction. *International Journal of Mineral Processing* 64(2002), s. 1-17.
- [185] Murayama N., Tanabe M., Yamamoto H., Shibata, J.: Reaction, mechanism and application of various zeolite syntheses from coal fly ash. *Materials transactions* 44(2003), s. 2475-2480.
- [186] Król M., Misiaszek A., Mozgawa W.: Wykorzystanie perlitu w procesie syntezy zeolitu A. *Materiały Ceramiczne* 67(2015), s. 342-346.
- [187] Tanaka H., Fujii A., Effect of sintering on the dissolution of coal fly ash and synthesis of pure-form Na-A and – X zeolites by two step process. *Advanced Power Technology* 20(2009), s. 473-479.
- [188] Thadaij P., Pimraksa K., Nuntiya A.: Synthesis of High Cation Exchange Capacity Faujasite from High Calcium Fly Ash. *Australian Journal of Basic and Applied Sciences* 6(2012), s. 194-208.
- [189] Zhang M., Zhang H., Xu D., Han L., Niu D., Tian B., Zhang J., Zhang L., Wu W.: Removal of ammonium from aqueous solution using zeolite synthesized from fly ash by fusion method. *Desalination* 271(2011), s. 111-121.
- [190] Wajima T., Manakata K., Ikegami Y.: Conversion of waste sandstone cake into zeolite X using alkali fusion. *Materials Transactions* 51(2010), s. 849-854.
- [191] Moisés M.P., da Silva C.T., Meneguín J.G., Giroto E.M., Radovanovic E.: Synthesis of zeolite NaA from sugarcane bagasse ash. *Materials Letters* 108(2013), s. 243-246.
- [192] Novembre D., Di Sabatino B., Gimeno D., Pace C.: Synthesis and characterization of Na-X, Na-A and Na-P zeolites and hydroxysodalite from metakaolinite. *Clay Minerals* 46(2011), s. 339-354.
- [193] Xu R., Pang W., Yu J., Huo Q., Chen J.: *Chemistry of Zeolites and Related Porous Materials: Synthesis and Structure*. Signature John Wiley and Son 2007, s. 616.
- [194] Baerlocher Ch., McCusker L.B.: Database of Zeolite Structures: <http://www.iza-structure.org/databases> data dostępu 12.12.2017
- [195] Zhao H., Deng Y., Harsh J.B., Flury M., Boyle J.S.: Alteration of Kaolinite to Cancrinite and Sodalite by Simulated Hanford Tank Waste and its impact on Cesium retention. *Clays and Clay Minerals* 52(2004), s. 1-13.
- [196] Mozgawa W.: *Spektroskopia oscylacyjna zeolitów*. AGH, Kraków 2007, s. 154.
- [197] Günther C., Richter H., Voigt I., Michaelis A., Tzscheuschler H., Krause-Rehberg R., Serra J.M.: Synthesis and characterization of a sulfur containing hydroxy sodalite without sulfur radicals. *Microporous and Mesoporous Materials* 214(2015), s. 1-7.

- [198] pod red. Kirov G., Filizova L., Petrov O.: Natural Zeolites – SOFIA95. Minato H.: Standardization of methods for zeolite speciality determination and techniques for zeolite resources utilization, Sofia-Moscow, PENSOFT Publisher(1997), s. 282-292.
- [199] EPA Regulations on Land Disposal Restrictions, Appendix II – Toxicity Characteristic Leaching Procedure, 161:1877. The Bureau of National Affairs, Inc., Washington D.C. 20037 (1991)
- [200] Frossard E., Bauer J. P., Lothe F.: Evidence of vivianite in FeSO₄- flocculated sludges. Water Research 10(1997), s. 2449-2454.
- [201] Liew A.G.L., Idris A., Samad A.A., Wong C.H.K., Jaafar M.S., Baki A.M.: Reusability of sewage sludge in clay bricks. Journal of Material Cycles Waste Management 6(2004), s. 41-47.
- [202] Valls S., Yagüe A., Vázquez E., Mariscal C.: Physical and mechanical properties of concrete with added dry sludge from a sewage treatment plant. Cement and Concrete Research 34(2004), s. 2203-2208.
- [203] Shen J., Zhou X., Sun D., Fang J., Liu Z., Li Z.: Soil improvement with coal ash and sewage sludge: a field experiment. Environmental Geology 53(2008), s. 1777-1785.
- [204] Koruba D., Piotrowski J. Z., Latosińska J.: Biomass – alternative renewable energy source to the fossil fuels. E3S Web of Conferences 14, 02015, Energy and Fuels 2016 (2017) s. 1-10.
- [205] Bissutti I., Hilke I., Raessler M.: Determination of total organic carbon – an overview of current methods. Trends in Analytical Chemistry 23(2004), s. 716-726.
- [206] Anderson M., Elliott M., Hickson C.: Factory-scale proving trials using combined mixtures of three by-product wastes (including incinerated sewage sludge ash) in claybuilding bricks. Journal of Chemical Technology and Biotechnology 77(2002), s. 345-351.
- [207] Querol X., Alastuey A., Fernández-Turiel J.L., López-Soler A.: Synthesis of zeolites by alkaline activation of ferro-aluminous fly as. Fuel 74(1995), s. 1226-1231.
- [208] **Latosińska J.**, Żygadło M.: The application of sewage sludge as an expanding agent in the production of lightweight expanded clay aggregate mass. Environmental Technology 32(2011), s. 1471-1478.
- [209] **Latosińska J.**: The influence of temperature and time of sewage sludge incineration on the mobility of heavy metals. EPE 44(2017), s. 105-122.
- [210] **Latosińska J.**: The Evaluation of the Impact of Sewage Sludge Ash Modification on Leaching of Heavy Metals. Advances in Civil and Environmental Engineering 1(2014), s. 27-42.
- [211] Majchrzak-Kućęba I.: Mikroporowate i mezoporowate materiały z popiołów lotnych. Wyd. Politechniki Częstochowskiej. Częstochowa 2011, s. 208.
- [212] Sarbak Z.: Zastosowanie spektroskopii w podczerwieni w adsorpcji i katalizie. Wiadomości Chemiczne 65(2011), s. 363-394.
- [213] Colella C.: Ion exchange equilibria in zeolite minerals. Mineralium Deposita 31(1996), s. 554-562.
- [214] Juan R.H., Susana A., Carmen J.M.R.: Ion exchange uptake of ammonium in wastewater from a sewage treatment plant by zeolite materials from fly ash. Journal of Hazardous Materials 161(2009), s. 791-796.

- [215] Wu D.Y., Zhang B.H., Li C.J., Zhang Z.J., Kong H.N., Simultaneous removal of ammonium and phosphate by zeolite synthesis from fly ash as influenced by salt treatment. *Journal of Colloid and Interface Science* 304(2006), s. 300-306.
- [216] Wu D., Sui Y., Chen X., He S., Wang X., Kong H.: Changes of mineralogical – chemical composition, cation exchange capacity, and phosphate immobilization capacity during the hydrothermal conversion process of coal fly ash into zeolite. *Fuel* 87(2008), s. 2194-2200.
- [217] Rozporządzenie Ministra Środowiska z dnia 18 listopada 2014 r. w sprawie warunków, jakie należy spełnić przy wprowadzaniu ścieków do wód lub do ziemi, oraz w sprawie substancji szczególnie szkodliwych dla środowiska wodnego, Dz.U. Nr 0, poz. 1800.
- [218] Rozporządzenie Ministra Zdrowia z dnia 7 grudnia 2017 w sprawie jakości wody przeznaczonej do spożycia przez ludzi, Dz.U. Nr 0, poz. 2294.
- [219] Derkowski A., Franus W., Beran E., Czimerová A.: Properties and potential applications of zeolitic materials produced from fly ash using simple method of synthesis. *Power Technology* 166(2006), s. 47-54.
- [220] Temuujin J., Okada K., MacKenzie Kenneth J.D.: Zeolite formation by hydrothermal treatment of waste solution from selectively leached kaolinite. *Materials Letters* 52(2002), s. 91-95.
- [221] **Latosińska J.**: The transfer coefficient of heavy metals from the input sewage sludge to the ashes. *Structure and Environment* 8(2016), s. 183-188.
- [222] Peña R., Guerrero A., Goñi S.: Hydrothermal treatment of bottom ash from the incineration of municipal solid waste: Retention of Cs(I), Cd(II), Pb(II) and Cr(III). *Journal of Hazardous Materials* B129(2006), s. 151-157.
- [223] Mańczak K.: *Technika planowania eksperymentu*. WNT, Warszawa 1976, s. 278.
- [224] Polański Z.: *Planowanie doświadczeń w technice*. PWN, Warszawa 1984, s. 291.
- [225] Korzyński M.: *Metodyka eksperymentu*. WNT, Warszawa 2006, s. 281.
- [226] Piasta Z., Lenarcik A.: Methods of statistical multi-criteria optimisation [w:] A.M. Brandt (red.), *Optimization Methods for Material Design of Cement-based Composites*, E & FN Spon, London, New York, 1998, s. 45-59.
- [227] Piasta Z., Lenarcik A.: Applications of statistical multi-criteria optimisation in design of concretes, [in:] A. M. Brandt (red.), *Optimization Methods for Material Design of Cement-based Composites*, E & FN Spon, London, New York, 1998, s. 150-166.
- [228] Grabiec A., Piasta Z.: Analysis of superplasticizer influence on cement paste with multicriteria statistical optimization, *Archives of Civil Engineering*, 2(1996), XLII, s. 195-206.
- [229] Harrington E.C.: The desirability function. *Industrial Quality Control*, 21(1965), s. 494-498.
- [230] Zabochnicka-Świątek M.: Czynniki wpływające na pojemność adsorpcyjną i selektywność jonowymienną klinoptylolitu wobec kationów metali ciężkich. *Inżynieria i Ochrona Środowiska* 10(2007), s. 27-43.
- [231] Nawrocki J.: *Uzdatnianie wody. Procesy fizyczne, chemiczne i biologiczne. Część 2*. PWN. Warszawa 2010, s. 381.

- [232] Anielak A.M., Piaskowski K.: Zeolity naturalne i ich zastosowanie w oczyszczaniu wody oraz ścieków. *Ekologia i Technika* 2(2000), s. 31-41.
- [233] pod red. Żygadło M.: *Strategia gospodarki odpadami komunalnymi*, Wyd. PZITS, Poznań 2001, s. 484.
- [234] PN-EN ISO 7887:2012 Jakość wody. Badanie i oznaczanie barwy.
- [235] PN-EN 1484:1999 Analiza wody. Wytyczne oznaczania ogólnego węgla organicznego (OWO) i rozpuszczonego węgla organicznego (RWO).

MODYFIKACJA POPIOŁU Z KOMUNALNYCH OSADÓW ŚCIEKOWYCH POPRAZ ZEOLITYZACJĘ – WYBRANE ZAGADNIENIA

Streszczenie

Oczyszczaniu ścieków towarzyszy powstawanie osadów ściekowych, które wymagają unieszkodliwiania. Jedną z metod jest obróbka termiczna. Właściwości popiołu po spaleniu osadów są podobne do popiołów lotnych z węgla. Odpady z energetyki zawodowej wykorzystuje się do produkcji zeolitów syntetycznych. Zeolity będące sorbentami stosowane są między innymi w inżynierii środowiska. O rodzaju powstającego zeolitu decydują właściwości surowca oraz parametry konwersji chemicznej. W prezentowanej pracy proponuje się wykorzystanie zeolityzacji do modyfikacji właściwości popiołów z osadów ściekowych. Literatura dostarcza zaledwie nieliczne przykłady badań z tego zakresu. Popioły z osadu otrzymane w warunkach laboratoryjnych poddano zeolityzacji metodą hydrotermalną oraz metodą fuzji. Przyjętymi parametrami konwersji był: stosunek popiół:NaOH, stężenie NaOH, temperatura aktywacji, temperatura i czas krystalizacji. Charakterystyka otrzymanego materiału obejmowała analizę jakościową składu fazowego, pojemność wymiany kationowej (CEC), obraz struktury oraz wymywalność metali ciężkich. Ponadto dla próbek o 72-godzinny oraz 720-godzinny okresie krystalizacji i stosunku popiół:NaOH = 1:1,8 określono powierzchnię właściwą, objętość porów oraz rozmiar porów. W wyniku konwersji metodą hydrotermalną w części prób powstał (hydroksy)sodalit oraz zeolit X. Wprowadzenie fuzji z jednoczesnym zachowaniem tych samych parametrów reakcji hydrotermalnej spowodowało, że również w części prób powstał (hydroksy)sodalit, zeolit X oraz zeolit Y, zeolit P, kankrynit, (hydroksy)kankrynit. Bez względu na metodę zeolityzacji, parametry procesu oraz temperaturę obróbki termicznej osadu nie otrzymano monomineralnych zeolitów. Intensywność pików otrzymanych zeolitów była mała. Po konwersji metodą fuzji w większej liczbie prób zidentyfikowano zeolity niż metodą hydrotermalną. Próby po konwersji metodą fuzji charakteryzowały się większymi wartościami CEC niż popioły surowe oraz próby po konwersji metodą hydrotermalną. Temperatura obróbki termicznej osadu była parametrem wpływającym istotnie statystycznie na efekt zeolityzacji oraz właściwości otrzymanego materiału, lecz zmiany jej wartości miały niewielki wpływ na badane cechy zmodyfikowanych popiołów. Na podstawie wymywalności metali ciężkich z prób po konwersji metodą fuzji stwierdzono, że wyższa temperatura obróbki termicznej osadu sprzyja powstawaniu trwałych struktur. Zmodyfikowany chemicznie popiół wykazał większą skuteczność usuwania Ni, Cu, Cd, Pb z monoroztworów niż popiół surowy oraz większą skuteczność usuwania metali ciężkich z monoroztworów niż z odcieków składowiskowych.

MODIFICATION OF MUNICIPAL SEWAGE SLUDGE ASH BY ZEOLITIZATION – SELECTED ISSUES

Summary

The treatment of municipal sludge is accompanied by the formation of sewage sludge, which requires utilization. One of such methods is the thermal treatment. The properties of ash after the combustion of sludge are similar to fly ashes from coal. The wastes from power industry are used for the production of synthetic zeolites. Zeolites due to their properties are used, among others, in the environmental engineering. The type of the obtained zeolite is determined by the properties of the raw material and the chemical conversion parameters. The presented study suggests the use of zeolitization for the modification of properties of sewage sludge ash (SSA). The domestic and foreign literature does not offer many examples of research in this field. SSA obtained in the laboratory conditions was converted by the zeolitization with the hydrothermal and fusion methods. The applied parameters of conversion were: ash:NaOH ratio, concentration of NaOH, activation temperature, crystallisation time and temperature. The characterisation of the obtained material covered the quality analysis of the phase composition, the cation exchange capacity (CEC), structure layout and heavy metals leaching. Moreover, for samples of 72-hour and 720-hour crystallisation period, as well as for the ratio of ash:NaOH = 1:1,8, the following properties were defined: specific surface area, the volume of pores and the size of pores. As a result of conversion with the hydrothermal method, (hydroxy) sodalite and zeolite X were formed in some of the samples. The introduction of fusion with the simultaneous retainment of the same hydrothermal reaction parameters resulted in the formation of (hydroxy) sodalite, zeolite X and zeolite Y, zeolite P, cancrinite and (hydroxy) cancrinite in some of the samples. Zeolites were identified in a higher number of samples after the conversion with the fusion method than in the samples after the conversion with the hydrothermal method. Regardless of the zeolitization method, the parameters of the process and the temperature of the thermal treatment of sludge, no monomineral zeolites were obtained. The intensity of peaks in the obtained zeolites was small. Samples after the conversion with the fusion method were characterised with higher values of CEC than raw ashes and samples after the conversion with the hydrothermal method. The temperature of the sludge treatment was the parameter having a significant statistical influence on the effect of zeolitization and the properties of the obtained material but the change of its value had a small influence on the tested properties of the modified ashes. On the basis of the results of heavy metals leaching from samples after the zeolitization with the fusion method, it was stated that higher temperature of the thermal treatment of sludge is favourable for the formation of durable structures. The modified ash had higher effectiveness in the removal of Ni, Cu, Cd and Pb from monosolutions than the raw ash and a higher effectiveness in the removal of heavy metals from monosolutions than from the landfill leachate.