

Obieg zamknięty w zagospodarowaniu komunalnych osadów ściekowych

Circular economy in management of municipal sewage sludge

Jolanta Latosińska, Jarosław Gawdzik^{*)}

Słowa kluczowe: *komunalne osady ściekowe, zagospodarowanie, obieg zamknięty, materiały budowlane*

Streszczenie

Ideą obiegu zamkniętego, będącego alternatywą liniowego modelu gospodarki, jest wykorzystanie odpadów powstających w cyklu życia produktów. Dotychczas nieunikniony odpad, powstający podczas oczyszczania ścieków (komunalne osady ściekowe) wymaga w każdej oczyszczalni indywidualnego rozwiązania w zakresie jego zagospodarowania. Zagospodarowanie osadów ściekowych determinowane jest ich właściwościami, przepustowością oczyszczalni, kosztami oraz obowiązującym stanem prawnym. Mając na uwadze powyższe, w artykule przedstawiono metody surowcowego wykorzystania osadów ściekowych. Szczególny akcent położono na wprowadzenie osadów ściekowych do zestawu surowcowego materiałów budowlanych. Potwierdzono, że realizacja gospodarki cyrkularnej, w ramach gospodarki osadami ściekowymi, prowadzi do ograniczenia zużycia surowców, zwiększenia strumienia odpadów poddawanych odzyskowi i recyklingowi.

Keywords: *sewage sludge, management, circular economy, building materials*

Abstract

The idea of a circular economy as an alternative to a linear economy model is the use of waste generated in the life cycle of products. Until now, the unavoidable waste generated during wastewater treatment – municipal sewage sludge – has required an individual solution for its management in every treatment plant. The management of sewage sludge is determined by its properties, the capacity of the treatment plant, the costs and the applicable legal status. Bearing the above in mind, the article presents methods of raw material use of sewage sludge. A particular emphasis was placed on the introduction of sewage sludge to the raw material mix of building materials. It has been confirmed that the implementation of a circular economy as part of sewage

1. Wstęp

Gospodarka o obiegu zamkniętym nie jest nową alternatywą dla liniowego modelu ekonomicznego. Idea gospodarki o obiegu zamkniętym pojawiła się w latach 60. XX w., a prezentowane w literaturze jej liczne definicje odzwierciedlają ewolucyjność tworzenia i wdrażania [44,35]. W dokumencie Komisji Europejskiej [24] gospodarkę o obiegu zamkniętym definiuje się jako gospodarkę, w której wartość produktów, materiałów i zasobów jest utrzymywana tak długo, jak to możliwe, a wytwarzanie odpadów jest zminimalizowane.

Gospodarka o obiegu zamkniętym składa się z dwóch strumieni, tj. strumienia zasobów odnawialnych, tzw. cykl biologiczny i strumienia zasobów nieodnawialnych – cykl techniczny. W cyklu technicznym stosowanie zastępuje konsumpcję, która występuje wyłącznie w cyklu biologicznym [35].

Gospodarka o obiegu zamkniętym jest realizowana m.in. poprzez ograniczenie ilości materiałów potrzebnych do wykonania danej usługi i ograniczenie stosowania materiałów niebezpiecznych lub wykorzystania w produktach i/lub podczas produkcji materiałów, które nadają się do recyklingu, zwiększenie trwałości produktów i efektywności wykorzystania zasobów, tworzenie rynków surowców wtórnych, ekoprojektowanie produktów, wspieranie rozwoju i zwiększanie dostępności usług dla konsumentów, zachęcanie konsumentów do ograniczania generowania odpadów oraz do segregowania i korzystania z systemów zbiórki, które minimalizują koszty

recyklingu i ponownego wykorzystania, symbiozę przemysłową, promowanie dzielenia się i innowacyjnych modeli biznesowych, prowadzących do nowych relacji pomiędzy przedsiębiorstwami, a konsumentami w celu stworzenia nowego i powtarzalnego modelu [6,12].

Zatem efektywne wdrażanie gospodarki o obiegu zamkniętym wymaga realizacji hierarchii gospodarki odpadami, w której za podstawę przyjęto zapobieganie ich powstawaniu. Oznacza to, że na każdym etapie procesu powstawania produktu lub świadczenia usługi, należy minimalizować ilość odpadów. Jeśli ze względów technicznych lub ekonomicznych nie ma takich możliwości, to należy odpady poddać recyklingowi lub odzyskowi [4].

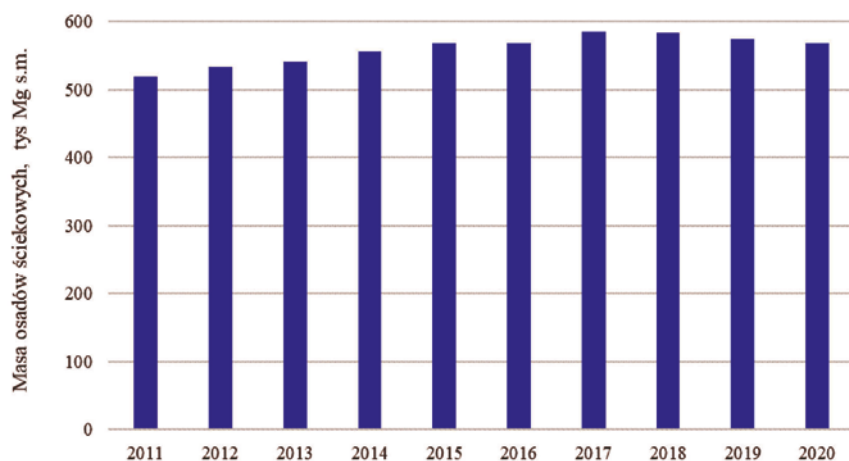
Komunalne osady ściekowe należące do biologicznego cyklu gospodarki o obiegu zamkniętym, ze względu na charakterystykę fizyczno-chemiczną i mikrobiologiczną, mogą stanowić zagrożenie dla zdrowia ludzi oraz środowiska. W związku z tym niezbędna jest ich przeróbka, która obejmuje zagęszczanie, kondycjonowanie, stabilizację i odwadnianie różnymi metodami fizycznym, chemicznymi oraz biologicznymi. Przeróbka osadów ściekowych jest etapem przygotowującym je do ostatecznego unieszkodliwiania i odzysku. Na każdym etapie gospodarki osadami ściekowymi mogą być stosowane rozwiązania, zgodne z ideą gospodarki o obiegu zamkniętym, np. odzysk energii pozyskiwanej w efekcie fermentacji metanowej, odzysk fosforu [4]. W niniejszej pracy uwagę skupiono na zagospodarowaniu osadów ściekowych w produkcji materiałów budowlanych.

^{*)} Jolanta Latosińska, dr hab. inż. prof. PŚk, Politechnika Świętokrzyska w Kielcach, Wydział Inżynierii Środowiska, Geomatyki i Energetyki, jlatosin@tu.kielce.pl, Jarosław Gawdzik, dr hab. inż. prof. PŚk, Politechnika Świętokrzyska w Kielcach, Wydział Inżynierii Środowiska, Geomatyki i Energetyki, jgawdzik@tu.kielce.pl



Rys.1. Zagospodarowanie komunalnych osadów ściekowych zgodnie z hierarchią gospodarowania odpadami.

Fig.1. Management of municipal sewage sludge in accordance with the waste management hierarchy.



Rys. 2. Komunalne osady ściekowe powstające w Polsce, opracowanie własne na podstawie [18].

Fig.2. Municipal sewage sludge generated in Poland, own elaboration based on [18].

2. Hierarchia gospodarki odpadami w zagospodarowaniu komunalnych osadów ściekowych

Krajowe zasady gospodarki komunalnymi osadami ściekowymi regulują przepisy [45,46,47,54] realizujące wymogi dyrektyw Unii Europejskiej [10,11]. Zagospodarowanie osadów ściekowych według hierarchii gospodarki odpadami przedstawiono na rys. 1.

Realizacja podstawowej zasady – zapobieganie powstawaniu – w przypadku komunalnych osadów ściekowych jest złożonym zadaniem, ponieważ jest determinowane stanem gospodarki wodno-ściekowej. W ostatnim dziesięcioleciu wzrosła liczba powstających osadów ściekowych, będąca konsekwencją takich czynników jak: wzrost wydajności oczyszczalni ścieków, rozbudowa sieci kanalizacyjnej, zwiększający się ładunek zanieczyszczeń w ściekach komunalnych, stosowanie pogłębionego usuwania biogenów [rys.2, 55].

Nieustanna konieczność ograniczenia poziomu zanieczyszczenia środowiska wodnego, których źródłem są oczyszczone ścieki, realizowana jest dzięki stosowaniu zaawansowanych technologii ich oczyszczania. Do BAT

oczyszczania ścieków komunalnych zaliczona jest technologia reaktorów membranowych (MBR). MBR wykorzystuje połączenie osadu czynnego z filtracją na membranach mikrofiltracyjnych lub ultrafiltracyjnych. Ścieki oczyszczone w reaktorach spełniają najwyższe normy jakości, zarówno pod względem fizyczno-chemicznym, jak i mikrobiologicznym. Natomiast osady ściekowe, jak wykazały wyniki badań przedstawione przez Kowalik i in. [26], pochodzące z oczyszczalni MBR mają znacznie wyższe wartości miedzi oraz kadmu, w porównaniu do osadów z oczyszczalni pracujących w klasycznym systemie sekwencyjnych reaktorów porcjowych (SBR). Tym samym, z punktu widzenia zagospodarowania osadów ściekowych, nie jest to działanie zmniejszające zawartość substancji niebezpiecznych w materiałach i produktach.

Wykorzystanie właściwości glebotwórczych i nawozowych, podczas stosowania osadów ściekowych na powierzchni ziemi, wpisuje się w hierarchię postępowania z odpadami. Jednak wprowadzenie osadów ściekowych do środowiska stanowi potencjalne źródło jego zanieczyszczenia metalami ciężkimi, wielopierścieniowymi węglowodorami aromatycznymi, adsorbowanymi organicznymi związkami chloru, polichlorowanymi dwufenylami, polichlorowanymi dibenzodioksynami, polichlorowanymi dibenzofuranami

[13,27,58]. Osady ściekowe są także źródłem zanieczyszczenia mikroplastikiem [43]. Badania z tego zakresu dowodzą, że ilość mikroplastików w glebie jest proporcjonalna do zastosowanej dawki osadów ściekowych [7]. Ponadto czynnikami ograniczającymi stosowanie osadów na powierzchni ziemi jest znalezienie chętnych odbiorców oraz sezonowość, w tym uzależnienie od warunków pogodowych.

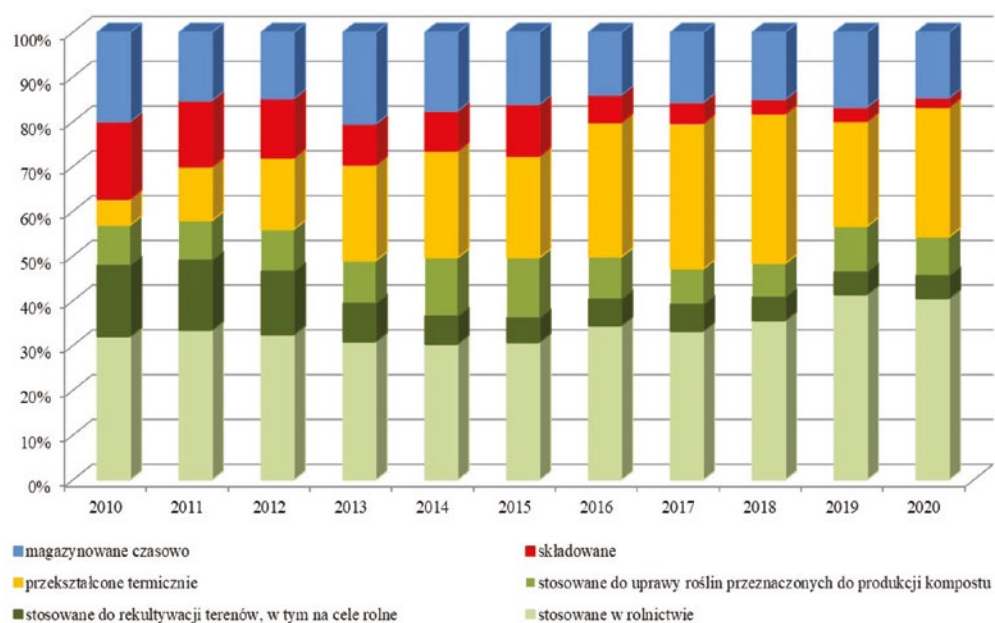
Potencjalnie istnieje możliwość zagospodarowania komunalnych osadów ściekowych jako surowca do wytwarzania tzw. biokomponentów zaawansowanych. Tym samym osady ściekowe mogą stanowić wkład w realizację Narodowego Celu Wskaźnikowego o wartości dwukrotności ich wartości energetycznej [56].

Osady ściekowe charakteryzujące się brakiem zanieczyszczeń mechanicznych, chemicznych, dobrą homogenizacją oraz dużą wilgotnością, mogą być wykorzystane, jako składnik mieszanki kompostowej. Jednak kompostowanie osadów ściekowych jest możliwe jedynie przy udziale innych substratów. W celu zapewnienia jakości kompostu, udział osadów ściekowych w masie kompostowej nie powinien przekraczać ok. 30% (masowo). Wprowadzenie osadów ściekowych do mieszanki kompostowej jest obciążone ryzykiem wprowadzenia metali ciężkich i innych substancji niebezpiecznych do składu kompostu. Natomiast, zmniejszenie zawartości masy organicznej, osiągnięte podczas procesu kompostowania, powoduje zwiększenie koncentracji zanieczyszczeń w uzyskanym produkcie [56].

Zmiany notuje się w sposobach unieszkodliwiania osadów ściekowych, szczególnie metodami termicznymi (rys.3). Były one głównie spowodowane wprowadzeniem zakazu składowania osadów ściekowych, które nie spełniają określonych wymagań jakościowych [45].

Tendencją wzrostu liczby osadów ściekowych, unieszkodliwianych metodami termicznymi, będąca konsekwencją ograniczenia przyrodniczego ich wykorzystania, od lat jest obserwowana m. in. w Szwecji, Holandii, Niemczech. Na uwagę zasługuje Szwajcaria, gdzie od 2006 r. jedyną prawnie akceptowaną metodą jest przekształcanie termiczne osadów ściekowych [14,37].

Do korzyści płynących z termicznego unieszkodliwiania osadów ściekowych należy możliwość zastosowania spalania, niezależnie od charakterystyki sanitarnej osadów, termiczna destrukcja organizmów chorobotwórczych, szybka utylizacja dużych ilości osadów ściekowych, redukcja do 90% objętości i do 85% masy osadów odwodnionych do 20% s.m., odzysk energii pochodzącej z organicznych składników osadów ściekowych, z możliwością wykorzystania jej do procesu suszenia poprzedzającego spalanie, niezależność od innych podmiotów zaangażowanych w zagospodarowanie osadów, powstanie odpadów nie stanowiących uciążliwości odorowej [25,34]. Ponadto, w obliczu wyczerpujących się zasobów kopalni bogatych w fosfor, na uwagę zasługuje możliwość odzysku tego cennego pierwiastka, nie tylko z po-



Rys.3. Metody zagospodarowania komunalnych osadów ściekowych w Polsce w latach 2010 – 2020, opracowanie własne na podstawie [18].

Fig.3. Methods of municipal sewage sludge management in Poland in 2010-2020, own elaboration based on [18].

Tabela 1. Materiały budowlane z dodatkiem komunalnych osadów ściekowych.

Table 1. Building materials with addition of municipal sewage sludge.

Rodzaj materiału budowlanego	Charakterystyka osadów ściekowych	Udział osadów ściekowych w produkcie, % s.m.	Spoiva i dodatki	Udział spoiva w produkcie, % s.m.	Wytrzymałość, MPa	Źródło
Kompozyt geotechniczny	Osady stabilizowane wapnem,	50 57 62,5	Popiół lotny ze spalania papieru	50 43 37,5	-	[38]
Bločki betonowe	Osady odwodnione	5 6,5 7,8	Popiół lotny Żużel Cement	28,6/26,4/26, 43/39,4/34,0 6,0/6,0/6,0	23,7 36,92 14,8	[59]
Zaprawa cementowa	Osady ściekowe o wilgotności 97,5%	0,32	Popiół lotny ze spalania węgla	10	1-14	[19]
Cegła	Osady ściekowe wysuszone	10,0 20,0 30,0 40,0	-	-	8,9 5,4 3,1 2,0	[32]
Kruszywo lekkie	Osady ściekowe o wilgotności 80,32%	4,0	-	-	-	[28]

piołów osadów, lecz także z osadów ściekowych. W ostatniej dekadzie część metod odzysku fosforu przeszło ze skali laboratoryjnej do skali technicznej [17,23].

3. Gospodarka o obiegu zamkniętym a komunalne osady ściekowe w materiałach budowlanych

Technologia produkcji materiałów budowlanych, opierająca się na korzystaniu z zasobów nieodnawialnych, umożliwia zastępowanie ich odpadami z innych branż na różnych etapach produkcji [48]. Literatura przedmiotu dostarcza przykłady badań wpływu dodatku komunalnych osadów ściekowych na właściwości zapraw cementowych, cementu, betonu, cegieł, kruszyw lekkich. W części z nich surowiec naturalny zastępowano osadami ściekowymi w połączeniu z innym odpadem (tab.1).

Metodą zaliczaną do bezodpadowych, znaną od drugiej połowy XX w., jest współspalanie osadów ściekowych z węglem i surowcami marglistymi w piecu obrotowym do produkcji klinkieru. W Polsce większość z 12 cementowni zlokalizowana jest w południowej części kraju. W 2019 r. polski przemysł cementowy wykorzystał 13,2 tys. ton osadów ściekowych. Stanowi to 1% w strukturze rodzajowej paliw alternatywnych tej branży. Na podobnym poziomie osady ściekowe były wykorzystane w latach 2016-2018 [51].

Składniki mineralne osadów ściekowych, tj. tlenki glinu, krzemu, żelaza i wapnia, występują również w składzie klinkieru (tab.2). Tym samym zastępują część nadawy surowcowej bez obaw pogorszenia jakości klinkieru i cementu [5]. Jednocześnie odzyskiwana jest energia zawarta w osadach ściekowych oraz zredukowana emisja mi.in.: CO₂, NO_x [20].

Tabela 2. Skład tlenkowy osadów ściekowych, popiołu z osadów ściekowych, klinkieru, gliny [27,32,42].

Table 2. Oxide composition of sewage sludge, sewage sludge ash, clinker and clay [27,32,42].

Parametr	Osady ściekowe	Popiół z osadów ściekowych	Klinkier	Glina
SiO ₂ , %	8,81	25,77	20,3-23,7	59,98
Al ₂ O ₃ , %	2,11	9,54	3,8-7,5	21,85
Fe ₂ O ₃ , %	3,74	5,12	0,3-5,6	4,51
CaO, %	5,66	20,70	63,4-69,5	0,03
MgO, %	1,42	4,48	0,4-1,1	0,27
SO ₃ , %	0,01	0,30	-	-
K ₂ O, %	0,58	1,87	-	3,12
Na ₂ O, %	0,16	0,55	0,12-0,24	0,3
P ₂ O ₅ , %	7,06	21,58	-	0,73
TiO ₂ , %	0,32	0,77	-	-
Mn ₂ O ₃ , %	0,03	0,13	-	-
SrO, %	0,02	0,10	-	-
BaO, %	0,04	0,09	-	-

„ - „ brak danych.

Tabela 4. Porównanie zawartości metali ciężkich w surowcach klinkieru, osadach ściekowych oraz cemencie, mg/kg.

Table 4. Comparison of heavy metals content in raw materials of clinker, sewage sludge and cement, mg/kg.

Składnik	Surowce do produkcji klinkieru [22]						Osady ściekowe [15]	Cement [22]
	Kamień wapienny	Margiel	Surowiec żelazonośny	Popiół lotny	Paliwo technologiczne	Gips		
Cr	3	28	978	71	15	3	12,3 – 2759,8	118
Zn	25	43	9412	140	20	7	249,9-5351	313
Cd	2	3	24	14	2	1	0,4-16,7	6,4
Pb	8	12	202	41	5	12	16,2-427,1	29
Ni	3	21	22	44	16	2	1,3-83,5	36

Obecne w osadach ściekowych kalcyt i kaolinit, wpływają korzystnie na powstawanie faz krystalicznych cementu. Jednak nadmierny dodatek osadów ściekowych obniża wytrzymałość na ścislenie oraz zwiększa zapotrzebowanie na wodę i końcowy czas wiązania cementu. Maksymalna graniczna wartość dodatku osadów ściekowych to 15%. Wówczas klinkier ma podobny skład chemiczny do cementu portlandzkiego i właściwości mechaniczne porównywalne do tradycyjnego zaczynu cementowego [5].

Technologia produkcji cementu charakteryzuje się wysoką tolerancją na obecność metali ciężkich w surowcach (tab.3, tab.4) oraz ich immobilizacją w strukturze minerałów klinkierowych i w fazie szklistej [42,1]. Zatem stężenia metali ciężkich w osadach ściekowych nie przesądzą o ich wykorzystaniu w produkcji cementu.

Tabela 3. Wpływ udziału metali ciężkich w klinkierze na właściwości cementu.

Table 3. Influence of heavy metals in clinker on cement properties.

Metal	Wpływ udziału metali ciężkich na właściwości cementu
Cd	Wysoka zawartość CdO w klinkierze opóźnia hydratację cementu, jednocześnie nie wpływa na wytrzymałość cementu [8]. Zawartość do 5% Cd w cemencie nie wpływa negatywnie na właściwości cementu [9].
Cu	Zawartość powyżej 0,25% obniża ścieralność klinkieru [3]. Według [16] udział Cu poniżej 0,35% nie wywiera negatywnego wpływu na klinkier.
Cr	Koncentracje 10 – 20 krotnie wyższe od naturalnych w klinkierze nie powodują wykrywalnych zmian [49].
Pb	Akumuluje się w cemencie bez ujemnego wpływu, jeśli udział jest poniżej 0,007% [8]. Dla wyższych koncentracji opóźnia hydratację i proces wiązania cementu [41].
Ni	Według [49,50] koncentracje niklu do 2,5% nie powodują wykrywalnych zmian właściwości cementu. Natomiast według [42] udział niklu powyżej 0,5% zmniejsza ścieralność klinkieru. Według [47] udział niklu bez wpływu na hydratację cementu i jego właściwości mechaniczne to 2%.
Zn	Bhatty [3] wykazał, że 0,5% zawartości Zn ma niewielki wpływ na ścieralność klinkieru. Według [53] udział 2% Zn zmniejsza ścieralności klinkieru. Opóźnienie hydratacji cementu i zmniejszenie wczesnej wytrzymałości na ścislenie powoduje zawartości Zn powyżej 1% w klinkierze [49,50].

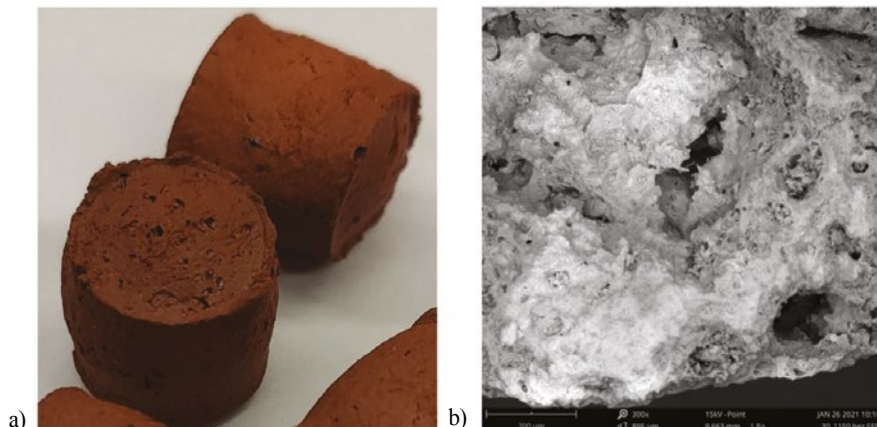
Ze względu na podobieństwo składu tlenkowego, osady ściekowe także predysponowane są do częściowej substytucji gliny w produkcji cegieł (tab.2). Jednak wysoka zawartość substancji organicznych w osadach ściekowych (30–85%) powoduje obniżenie wytrzymałości, niekorzystny wzrost skurczliwości wypalania i nasiąkliwości cegieł. Jakość cegieł zależy od zawartości osadów ściekowych i temperatury wypalania. Ponieważ są to czynniki wpływające na właściwości mechaniczne cegieł [52,57], zatem dodatek osadów ściekowych powinien być ograniczony na poziomie 9% – 15% [2]. Wylimitowanie niekorzystnego wpływu udziału substancji organicznych jest możliwe przez zastąpienie w całości lub w części osadów ściekowych popiołem po ich spalaniu [33].

Kolejnym przykładem materiału budowlanego, w produkcji którego mogą być wykorzystane komunalne osady ściekowe, jest keramzyt [29,30,31]. Produkcja keramzytu wiąże się nie tylko z koniecznością

Tabela 5. Skład tlenkowy surowca keramzytu.

Table 5. Oxide composition of raw material of lightweight expanded clay aggregate.

Parametr	SiO ₂ , %	Al ₂ O ₃ , %	Fe ₂ O ₃ , %	CaO, %	MgO, %	SO ₃ , %	K ₂ O, %	Na ₂ O, %	TiO ₂ , %
Iły septariowe [39]	51,5-60,0	14,97-18,44	5,5-6,37	1,9-7,2	2,15-3,56	0,1-0,47	2,0-3,42	0,72-0,78	0,9-1,06



Rys.4. Keramzyt: a) ziarna kruszywa z 15% s.m. komunalnych osadów ściekowych; b) mikrostruktura ziarna, powiększenie 300 x.

Fig.4. Lightweight expanded clay aggregate: a) aggregate grains with 15% d.m. of municipal sewage sludge; b) grain microstructure, magnification 300 x.

eksploatacji naturalnych złóż, ale także ze zużyciem paliw. Otrzymanie porowatego, lekkiego kruszywa wymaga wypalenia surowca w temperaturze 1100-1200°C. Skład tlenkowy osadów ściekowych wpisuje się w charakterystykę ilów septariowych – surowców keramzytu (tab.2, tab.5).

Sposób wykształcenia porowatej struktury keramzytu determinuje jego zastosowanie. Kruszywo o wysokiej porowatości całkowitej znajduje zastosowanie np.: w budownictwie. Keramzyt do zastosowań budowlanych powinien cechować się dużą zawartością porów zamkniętych, spieczoną lekko powłoką, utrudniającą wnikanie wody zarobowej z mieszanki betonowej. Kruszywo o znacznej porowatości otwartej może być stosowane w inżynierii środowiska, jako materiał filtracyjny. Optymalny udział osadów ściekowych w masie surowca do produkcji keramzytu obejmuje szeroki przedział 5 – 20% [30].

Wprowadzenie osadów ściekowych do zestawu surowcowego keramzytu jest zgodne z ideą gospodarki o obiegu zamkniętym, gdyż powoduje:

- wyeliminowanie popiołów; substancje popiołowe z osadów ściekowych wbudowują się w strukturę kruszywa,
- immobilizację metali ciężkich w matrycy keramzytu [28,29]. Keramzyt może być stosowany w ogrodnictwie do upraw hydroponicznych, do zakładania ogrodów na dachach. Należy podkreślić, że wykorzystanie keramzytu w zielonych dachach przekłada się na zwiększenie efektów pasywnego chłodzenia [21].
- uzyskanie chropowatej powierzchni ziaren kruszywa (rys.4), która jest pożądana zarówno w przypadku zastosowania go do betonu lekkiego, a także jako materiału filtracyjnego,
- zmniejszenie kosztów eksploatacji oczyszczalni ścieków w wyniku eliminacji kosztów higienizacji osadów ściekowych,
- obniżenie temperatury wypalania kruszywa, co przekłada się na zmniejszenie zapotrzebowania na paliwa kopalne i jednocześnie korzystnie wpływa na efekty ekonomiczne producenta keramzytu [30],
- zmniejszenie zużycia surowca naturalnego do produkcji kruszywa, co bezpośrednio zmniejsza degradację powierzchni ziemi, ponieważ wydobycie surowca odbywa się w kopalniach odkrywkowych;
- wykorzystanie ciepła odpadowego z chłodzenia spalin do suszenia osadów ściekowych,
- zmniejszenie emisji CO, CO₂, SO₂, H₂S podczas wypalania surowca z dodatkiem osadów ściekowych w porównaniu z unieszkodliwianiem osadów ściekowych w monospalarni. Powstające ww. gazy są pożądane w surowcu, ponieważ odpowiadają za tworzenie porowatej struktury keramzytu [59].

4.Podsumowanie

Transformacja modelu gospodarki liniowej na model gospodarki cyrkularnej wymaga działań wielokierunkowych, opierających się na poszukiwaniu i wykorzystaniu miejsc styčných w różnych obszarach gospodarki. Przykładową realizacją powyższego postulatu jest zagospodarowanie komunalnych osadów ściekowych w produkcji materiałów budowlanych. Połączenie branży wodno-ściekowej z branżą materiałów budowlanych ma duży potencjał w realizacji wymogów gospodarki o obiegu zamkniętym. Umożliwia ono odzysk energii i ciepła, cyrkulację w wykorzystaniu zasobów oraz ograniczenie zużycia surowców kopalnych.

Literatura

- [1] Andrade F.R.D., Maringolo V., Kihara Y. 2003. „Incorporation of V, Zn and Pb into the crystalline phases of Portland clinker”. *Cement and Concrete Research*. 33 (1) : 63–71.
- [2] Areias I.O.R., Vieira C.M.F., Colorado H.A., Delaqua G.C.G., Monteiro S.N., Azevedo A.R.G. 2020. „Could city sewage sludge be directly used into clay bricks for building construction? A comprehensive case study from Brazil”. *Journal of Building Engineering*. 31 : 101374.
- [3] Bhatti Javed I. 2006. Effect of Minor Elements on Clinker and Cement Performance: A Laboratory Analysis. Portland Cement Association. Skokie. Illinois. USA.
- [4] Bień January, Myszograj Sylwia, Pluciennik-Koropczuk Ewelina. 2020. Gospodarka komunalnymi osadami ściekowymi w obiegu zamkniętym. red. Bień January, Gromiec Marek., Pawłowski Lucjan. Ocena gospodarki ściekowo-osadowej w Polsce. Monografie nr 166. Wydawnictwo PAN, Komitet Inżynierii Środowiska, Lublin.
- [5] Chang Zhiyang, Long Guangcheng, Zhou John L., Ma Cong. 2020. „Valorization of sewage sludge in the fabrication of construction and building materials: A review”. *Resources, Conservation and Recycling*. 154 : 104606.
- [6] Communication from the Commission to the European Parliament, the Council, the European Economic and Social Committee and the Committee of the Regions Towards a Circular Economy: A zero waste programme for Europe. COM/2014/0398 final.
- [7] Corradini Fabio, Meza Pablo, Eguiluz Raúl, Casado Francisco, Huerta-Lwanga Esperanza, Geissen Violette. 2019. „Evidence of microplastic accumulation in agricultural soils from sewage sludge disposal”. *The Science of The Total Environment*. 671 (25) : 411–420.
- [8] Dalton Jennifer L., Gardner Kevin H., Seager Thomas P., Weimer Mindy L. Spear Jean C.M., Magee Bryan J. 2004. „Properties of Portland cement made from contaminated sediments”. *Resources, Conservation and Recycling*. 41 (3) : 227–241.

- [9] Diez J. M., Madrid J., Macias A. 1997. „Characterisation of cement-stabilized Cd wastes”. *Cement and Concrete Research*. 27 (4) : 337–343.
- [10] Dyrektywa Parlamentu Europejskiego i Rady 2008/98/WE z dnia 19 listopada 2008 r. w sprawie odpadów.
- [11] Dyrektywa Rady 86/278/EWG z dnia 12 czerwca 1986 r. w sprawie ochrony środowiska w szczególności gleby, w przypadku wykorzystania osadów ściekowych w rolnictwie.
- [12] EEA Report No 6/2017 Circular by Design—Products in the Circular Economy; Publications Office of the European Union 2017: Luxembourg.
- [13] Eljarrat E., Caixach J., Rivera J. 2003. A comparison of TEQ contributions from PCDDs, PCDFs and dioxin like PCBs in sewage sludge from Catalonia, Spain. „Chemosphere” 51 (7) : 595–601.
- [14] Eurostat, <https://ec.europa.eu/eurostat/databrowser/view>, data dostępu 25.03.2022.
- [15] Gawdzik Jarosław. 2013. Mobilność wybranych metali ciężkich w osadach ściekowych. M44. Politechnika Świętokrzyska. Kielce.
- [16] Gineys N., Aouad G., Sorrentino F., Damidot D. 2011. „Incorporation of trace elements in Portland cement clinker: Thresholds limits for Cu, Ni, Sn or Zn”. *Cement and Concrete Research*. 41 (11) : 1177–1184.
- [17] Gromiec Tomasz, Gromiec Marek. 2019. „Postęp w odzysku fosforu z odcieków z przeróbki osadów ściekowych za pomocą technologii krystalizacji struwitu w Ameryce Północnej i Europie – wybrane przykłady”. *Gospodarka Wodna*. 8 : 27–31.
- [18] GUS, Bank Danych Regionalnych, 24.03.2022, <https://bdl/stst.gov.pl>.
- [19] Hamood Alaa, Khatib Jamal M., Williams Craig. 2017. „The effectiveness of using Raw Sewage Sludge (RSC) as a water replacement in cement mortar mixes containing Unprocessed Fly Ash (u-FA)”. *Construction and Building Materials*. 147 : 27–34.
- [20] Houillon G., Joliet O. 2005. „Life cycle assessment of processes for the treatment of wastewater urban sludge: energy and global warming analysis”. *Journal of Cleaner Production*. 13 (3) : 287–299.
- [21] Huang Yi-Yu, Ma Tien-Jih. 2019. „Using Edible Plant and Lightweight Expanded Clay Aggregate (LECA) to Strengthen the Thermal Performance of Extensive Green Roofs in Subtropical Urban Areas”. *Energies*. 12 (3) : 424.
- [22] Kalarus Dariusz, Garbaciak Albin. 2008. „Zmiany zawartości metali ciężkich w cementach wraz z rozwojem nowych technologii produkcji”. *Dni Betonu*. Wisła.
- [23] Kasprzyk Magda, Gajewska Magdalena, Molendowska Sylwia. 2017. „Possibilities of phosphorus recovery from effluents, sewage sludge and ashes from sewage sludge thermal processing”. *Ecological Engineering*. 18 (4) : 65–78.
- [24] Komisja Europejska. Closing the Loop—An EU Action Plan for the Circular Economy; Communication No. 614:(COM (2015), 614); Bruksela, Belgia, 2015.
- [25] Kosior-Kazberuk Marta. 2011. „Application of SSA as Partial Replacement of Aggregate in Concrete”. *Polish Journal of Environmental Studies*. 20 (2) : 365–370.
- [26] Kowalik Robert, Latońska Jolanta, Metyka-Telka Monika, Porowski Rafał, Gawdzik Jarosław. 2021. „Comparison of the possibilities of environmental usage of sewage sludge from treatment plants operating with MBR and SBR Technology”. *Membranes* 11 (722) : 1–13.
- [27] Latońska Jolanta. 2020. „Risk assessment of soil contamination with heavy metals from sewage sludge and ash after its incineration”. *Desalination and Water Treatment*. 199 : 297–306.
- [28] Latońska Jolanta, Żygadlo Maria. 2008. „Badanie wymywalności metali ciężkich z kruszywa lekkiego spiekane z dodatkiem odpadów”. *Ochrona przed korozją*. 5s/A/2008 : 191–197.
- [29] Latońska Jolanta, Żygadlo Maria. 2009. „Effect of sewage sludge addition on porosity of Lightweight Expanded Clay Aggregate (LECA) and level of heavy metals leaching from ceramic matrix”. *Environmental Protection Engineering Journal*. 2 : 189–196.
- [30] Latońska Jolanta, Żygadlo Maria. 2011. „The application of sewage sludge as an expanding agent in the production of lightweight expanded clay aggregate mass”. *Environmental Technology*. 32 (13) : 1471–1478.
- [31] Latońska Jolanta, Żygadlo Maria, Czapiak Przemysław. 2021. „The Influence of Sewage Sludge Content and Sintering Temperature on Selected Properties of Lightweight Expanded Clay Aggregate”. *Materials*. 14 (12) : 3363.
- [32] Liew Abdul G., Idris Azni, Wong Calvin H.K., Samad Abdul Aziz Abdul, Noor Megat Johari Megat Mohd, Baki Aminuddin M. 2004. „Incorporation of sewage sludge in clay brick and its characterization.” *Waste Management and Research*. 22 (4) : 226–233.
- [33] Lin Deng-Fong, Weng Chih-Huang. 2001. „Use of sewage sludge ash as brick material”. *Journal of Environmental Engineering*. 127 (10) : 922–927.
- [34] Magdziarz Aneta, Wilk Małgorzata, Gajek Marcin, Nowak-Woźny Dorota, Kopia Agnieszka, Kalemba-Rec Izabela, Kozłowski Janusz A. 2016. „Properties of ash generated during sewage sludge combustion: A multifaceted analysis”. *Energy*. 113 : 85–94.
- [35] Mazur-Wierzbička Ewa. 2021. „Circular economy: advancement of European Union countries”. *Environmental Science Europe*. 33. 111.
- [36] Michalak Dorota, Rosiek Ksymbena, Szyja Paulina. 2020. *Gospodarka niskoemisyjna. Gospodarka cyrkularna. Zielona Gospodarka. Uwarunkowania i wzajemne powiązania*. Wydawnictwo Uniwersytet Łódzki. Łódź.
- [37] Mininni G., Blanch A.R., Lucena F. i in. 2014. „EU policy on sewage sludge utilization and perspectives on new approaches of sludge management”. *Environmental Science and Pollution Research*. 22. 7361–7374.
- [38] Mladenović Ana, Hamler Sandra, Zupančič Nina. 2017. „Environmental characterisation of sewage sludge/paper ash-based composites in relation to their possible use in civil engineering”. *Environmental Science and Pollution Research* 24 : (1) 1030–1041.
- [39] Mojsiejko Jarosław. 1970. Iły plioceni i oligoceni jako surowce do produkcji kruszywa lekkiego – keramzytu, Instytut Geologiczny. Biuletyn 244. Z badań złóż surowców skalnych w Polsce. t. VI.
- [40] Piasecki Jan. 1992. Ilościowy opis zjawiska termicznego pęcznienia glin, Politechnika Szczecińska, 498, Instytut Inżynierii Lądowej, 32.
- [41] Poluszyńska Joanna, Pokorska Małgorzata. 2000. „Termiczna utylizacja osadów ściekowych w piecu obrotowym do wypalania klinkieru”. [w:] *Charakterystyka i zagospodarowanie osadów ściekowych*. red. Hupka Jan. Gdańsk. 1 : 129–135.
- [42] Puertas F., García-Díaz I., Barba A., Gazulla M.F., Palacios M., Gómez M.P., Martínez-Ramirez S. 2008. „Ceramic wastes as alternative raw materials for Portland cement clinker production”. *Cement and Concrete Composites*. 30 (9) : 798–805.
- [43] Ragoobur Doorga, Huerta-Lwanga Eeperanza, Somaroo Geeta Devi. 2021. „Microplastics in agricultural soils, wastewater effluents and sewage sludge in Mauritius”. *Science of The Total Environment*. 798. 149326.
- [44] red. Kulczycka Joanna. 2019. *Gospodarka o obiegu zamkniętym w polityce i badaniach naukowych*. IGSMiE PAN, Kraków.
- [45] Rozporządzenie Ministra Gospodarki z dnia 16 lipca 2015 roku w sprawie dopuszczania odpadów do składowania na składowiskach, Dz.U. nr 0 poz. 1277.
- [46] Rozporządzenie Ministra Środowiska z dnia 30 kwietnia 2013 roku w sprawie składowisk odpadów, Dz.U. nr 0 poz. 523.
- [47] Rozporządzenie Ministra Środowiska z dnia 6 lutego 2015 roku w sprawie komunalnych osadów ściekowych, Dz. U. Nr 0, poz. 257.
- [48] Smol Marzena, Kulczycka Joanna, Henclik Anna, Gorazda Katarzyna, Wzorek Zbigniew. 2015. „The possible use of sewage sludge ash (SSA) in the construction industry as a way towards a circular economy”. *Journal of Cleaner Production*. 95: 45–54.
- [49] Stephan D., Maleki H., Knöfel D., Eber B., Härdtl r. 1999. „Influence of Cr, Ni and Zn on properties of pure clinker phases, Part I. C3S”. *Cement and Concrete Research*. 29 (5) : 545–552.
- [50] Stephan D., Mallmann r., Knöfel D., Härdtl r. 1999. „High intake of Cr, Ni and Zn in clinker. Part II. Influence on the hydration properties”. *Cement and Concrete Research*. 29 (12) : 1959–1967.
- [51] Stowarzyszenie Producentów Cementu. <https://www.polskicement.pl/> data dostępu 20.04.2022.
- [52] Tay Joo-Hwa, Show Kuan-Yeow. 1997. „Resources recovery of sludge as building and construction material – a future trend in sludge management”. *Water Science and Technology*. 36 (11) : 259–266.
- [53] Tsvivilis S., Kakali G. 1997. „A study of the grindability of Portland cement clinker containing transition metal oxides”. *Cement and Concrete Research*. 27 (5) : 673–678.
- [54] Ustawa z dnia 14 grudnia 2012 roku o odpadach, Dz. U. Nr 0, poz. 21, 2013, z póź. zm.
- [55] V Aktualizacja Krajowego Programu Oczyszczania Ścieków Komunalnych – AKPOŚK, 2017.
- [56] VI Aktualizacja Krajowego Programu Oczyszczania Ścieków Komunalnych – AKPOŚK, 2020, projekt.
- [57] Weng Chih-Huang, Lin Deng-Fong, Chiang Pen-Chi. 2003. „Utilization of sludge as brick materials”. *Advances in Environmental Research*. 7 (3) : 679–685.
- [58] Włodarczyk-Makula Maria, Macherzyński Bartłomiej. 2017. „Stymulacja rozkładu 3-pierścieniowych WWA podczas fermentacji osadów ściekowych”. *Rocznik Ochrona Środowiska*. 19 : 451–464.
- [59] Yang Jiakuan, Shi Yafei, Yang Xiao, Liang Mei, Li Ye, Li Yalin, Ye Nan. 2013. „Durability of autoclaved construction materials of sewage sludge–cement–fly ash–furnace slag”. *Construction and Building Materials*. 48 : 398–405.