

Alina PIETRZAK
Politechnika Częstochowska

PROEKOLOGICZNE TECHNOLOGIE W BUDOWNICTWIE NA PRZYKŁADZIE „ZIELONEGO BETONU”

W artykule opisano dotychczasowe próby zastosowania popiołów pochodzących ze współspalania osadów ściekowych jako dodatku do produkcji mieszanki betonowej oraz wykorzystanie osadu ściekowego do produkcji kruszywa lekkiego, powstałego w wyniku termicznej niskotemperaturowej syntezy osadów ściekowych z mineralnymi odpadami komunalnymi i wydobywczymi, które może również wchodzić w skład mieszanki betonowej.

Słowa kluczowe: zielony beton, osady ściekowe, mieszanka betonowa

WPROWADZENIE

Działalność człowieka, w zasadzie w mniejszym bądź większym stopniu, wpływa na otaczające nas środowisko przyrodnicze. Bardzo istotne staje się więc zrozumienie konsekwencji działań, racjonalne kształtowanie środowiska, a przede wszystkim odpowiednie gospodarowanie jego zasobami. Świadomość społeczeństwa o konieczności ochrony środowiska naturalnego pogłębia się i rozszerza na kolejne dziedziny życia.

Biorąc pod uwagę składniki wchodzące w skład mieszanki betonowej, można stwierdzić, że powstały beton jest materiałem przyjaznym dla środowiska. Jednak zapotrzebowanie, skala, na jaką jest produkowany, stanowi duże obciążenie otaczającego nas środowiska przyrodniczego. Główny wpływ na wielkość tego obciążenia ma rodzaj i ilość użytego cementu, co związane jest z dużą emisją CO₂. Zmniejszenie obciążenia betonem uzyskuje się w wyniku optymalizacji składu mieszanki betonowej, ograniczenia zużycia cementu między innymi poprzez użycie cementów mieszanych i zastąpienie go innymi materiałami wiążącymi [1].

Podczas ostatnich kilku dziesięcioleci wzrosło zainteresowanie wtórnym wykorzystaniem produktów ubocznych pochodzących z różnych gałęzi przemysłowych. Zakres stosowanych dodatków mineralnych do betonu uległ rozszerzeniu o nowe rodzaje surowców i odpadów. Do produkcji mieszanki betonowej stosuje się popioły lotne, pyły krzemionkowe, mielone żużle wielkopiecowe, popioły z biopaliw, popioły ze spalania osadów pościekowych, cementy mineralizowane. W artykule skupiono się zaś na wykorzystaniu osadów ściekowych do produkcji betonu.

Osady ściekowe, powstające w oczyszczalniach ścieków są odpadami, których unieszkodliwienie i zagospodarowanie jest problemem światowym. Zgodnie z usta-

wą z dnia 27 kwietnia 2001 r., osadów ściekowych należy się pozbyć, nie tylko ze względów prawnych, ale również estetycznych oraz praktycznych. Ze względu na zawartość związków organicznych i biogenych odpady te przez wiele lat były wykorzystywane w rolnictwie jako bogate źródło substancji niezbędnych do wzrostu roślin. Jednak z powodu wspólnego odprowadzania ścieków komunalnych i przemysłowych osady ściekowe są zanieczyszczone związkami metali ciężkich, substancjami organicznymi, bakteriami chorobotwórczymi, grzybami, jajami pasożytów i innymi niebezpiecznymi substancjami. Sprawiają one, że biotechnologie w przeróbce osadów nie spełniają aktualnie obowiązujących wymagań dla zastosowań bezpośrednio w rolnictwie lub przy produkcji kompostów [2, 3].

W wyniku ciągłego zwiększania się ilości wytwarzanych odpadów ściekowych zachodzi konieczność znalezienia alternatywnych metod ich wykorzystania lub utylizacji. Jedną z tych metod może być właśnie zastosowanie osadów ściekowych w przemyśle materiałów budowlanych, a zwłaszcza w technologii betonu i innych materiałach na bazie cementu. Pozwala to na wykorzystanie materiałów odpadowych jako dodatku pasywnego (wypełniacza), a także jako dodatku aktywnego (zamiennika części spoiwa) [4].

Nowe materiały odpadowe, które mogą być wykorzystywane w technologii betonu, powstają głównie w wyniku procesu termicznej mineralizacji wysuszonego osadu ściekowego, proces ten jest dopuszczony przez polskie prawo. Spalony osad, w postaci popiołu lub mieszaniny popiołowo-żużlowej, stanowi materiał, który może być dalej przetwarzany i wykorzystany jako popiół lotny stosowany jako dodatek do betonu. Przetworzony osad ściekowy może również być wykorzystany przy produkcji sztucznego kruszywa lekkiego, którego głównymi składnikami są właśnie osady ściekowe oraz mineralne odpady komunalne i wydobywcze [3-5].

Praktyczne zastosowanie nowych materiałów odpadowych wymaga oceny ich właściwości użytkowych. W pracy opisano dotychczasowe próby wykorzystania popiołów pochodzących ze współspalania osadów ściekowych jako dodatku do produkcji mieszanki betonowej oraz wykorzystanie osadu ściekowego do produkcji kruszywa lekkiego, powstałego w wyniku termicznej niskotemperaturowej syntezy osadów ściekowych z mineralnymi odpadami komunalnymi i wydobywczymi, które może również wchodzić w skład mieszanki betonowej.

1. BETON ZIELONY

Beton - sztuczna skała wytwarzana z kruszywa, spoiwa i wody - stanowi najważniejszy materiał konstrukcyjny, który dzięki swej wytrzymałości i trwałości daje pełną swobodę w wykorzystywaniu go w budownictwie, a tym samym w kształtowaniu przestrzeni.

Jedną z wielu inicjatyw, która miała na celu poprawę osiągnięć w aspekcie wpływu działalności człowieka na otaczające go środowisko naturalne, było stworzenie betonu zielonego, którego nazwa nie ma nic wspólnego z jego barwą. „Zielony” jest tok myślenia obejmujący cały proces powstawania betonu, począwszy od wytwarzania, pozyskiwania surowców poprzez projektowanie mieszanki i kon-

strukcji z uwzględnieniem jej trwałości, wykorzystania pozostałości z produkcji aż po wtórne użycie betonu. Takie podejście do produkcji i eksploatacji betonu ma na uwadze względy ekologiczne i ekonomiczne.

Określenie „zielony” zostało przypisane do betonu spełniającego jedno z następujących pięciu kryteriów [1]:

- emisja CO₂ związana z wyprodukowaniem betonu jest obniżona o 30%,
- beton zawiera co najmniej 20% produktów odpadowych użytych jako kruszywo,
- przy produkcji betonu wykorzystane są własne produkty odpadowe przemysłu betonowego,
- przy produkcji betonu wykorzystane są nowe rodzaje produktów odpadowych, uprzednio umieszczonych na składowiskach lub unieszkodliwionych w inny sposób,
- pochodzące z odpadów paliwa naturalne w aspekcie CO₂ zastępujące co najmniej 10% paliw kopalnych użytych przy produkcji cementu.

Beton zielony musi spełniać ponadto trzy postulaty środowiskowe, mianowicie [1]:

- nie należy stosować w betonie materiałów zawierających substancje znajdujące się na liście niepożądanych materiałów Duńskiej Agencji Ochrony Środowiska,
- możliwość odzysku i recyklingu betonu nie powinna być mniejsza w porównaniu z konwencjonalnym betonem,
- zawartość substancji niebezpiecznych w odciekach i zrzutach wody z produkcji betonu nie powinna ulec zwiększeniu.

2. POPIOŁY POWSTAJĄCE W PROCESIE TERMICZNEJ MINERALIZACJI OSADU ŚCIEKOWEGO I ICH ZASTOSOWANIE PRZY PRODUKCJI MIESZANKI BETONOWEJ ORAZ INNYCH MATERIAŁÓW NA BAZIE CEMENTU

Coraz powszechniej stosowana termiczna mineralizacja pozwala na zmniejszenie zasobów osadu. Warunkiem do stosowania popiołów pochodzących ze spalania osadu ściekowego jako częściowego zamiennika cementu portlandzkiego w betonach jest skład chemiczny oraz właściwości pucolanowe, które wykazują analogię do tradycyjnych dodatków mineralnych [4]. Wymagania odnośnie do stosowania popiołów lotnych jako dodatku do betonu określa norma PN-EN 450-1+A1:2009 Popiół lotny do betonu - Część 1: Definicje, wymagania i kryteria zgodności [6]. Przytoczona norma dopuszcza stosowanie popiołu pochodzącego ze współspalania pyłu węglowego między innymi z osadami ze ścieków komunalnych, przy czym minimalna zawartość węgla w odniesieniu do suchej masy mieszanki paliwowej nie powinna być mniejsza niż 80%, a maksymalna zawartość popiołu lotnego pochodzącego z materiałów współspalanych nie powinna być większa niż 10%. Popioły lotne powstałe w trakcie współspalania nie tylko muszą spełniać wymagania zapewniające jakość techniczną produktów uzyskanych z ich udziałem, ale także nie mogą pogarszać właściwości tych produktów, z punktu widzenia ochrony środo-

wiska, a zwłaszcza negatywnie oddziaływać na poszczególne elementy środowiska naturalnego [7].

Skład chemiczny wybranego materiału współspalanego (osadu ściekowego) z pyłem węglowym przedstawiono w tabeli 1.

Tabela 1. Przykładowy skład chemiczny popiołów ze współspalania (Niemcy) [8]

Materiał współpalany	Zawartość składników głównych [% masy]									
	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	Na ₂ O	K ₂ O	TiO ₂	P ₂ O ₅	Na ₂ O _{eq}
Osady ściekowe 1,0%	49,2	25,4	10,6	3,9	2,6	0,7	3,7	1	0,8	3,1
Osady ściekowe 8,3%	50,3	25,4	9,5	3,6	2,8	0,6	4	1	1,1	3,3
Popiół odniesienia (węgiel)	51,8	25,9	9	3,2	2,9	0,6	4	1,1	0,2	3,2
Osady ściekowe 0,9%	49,4	29,1	11,3	1,7	1,2	1,3	3,3	1,1	0,8	3,4
Osady ściekowe 4,4%	45,5	27,2	13,6	3,8	1,2	1,1	2,5	1	3,3	2,8
Popiół odniesienia	49,4	28,2	11,6	2,1	1,4	1,2	3,3	1,1	0,7	3,4
Torf 5%	50,3	29,7	6,7	4	2,4	1,2	2,7	1,2	0,8	3
Torf 10%	52,1	30,3	7,5	4,3	2,2	1,1	2,6	1,2	0,8	2,7
Torf 15%	47,9	30,9	6,6	4,4	2,9	0,9	2,6	1,1	0,7	2,6
Popiół odniesienia	51,9	32	8,8	4	2,4	1,2	2,7	1,2	0,8	3
Torf 5%	47,7	33	4,3	4	1,1	<0,1	0,9	–	–	<0,7
Torf 10% + Osady ściekowe 4%	52,9	31,9	4,4	1,6	0,7	<0,1	1	–	–	<0,8
Torf 9,6%	50	31,5	4,5	6,3	1,6	0,3	1,1	1,6	2,2	1
Popiół odniesienia	48,7	31,4	3,9	7,1	2,4	0,4	1,3	1,4	2,4	1,3

Wpływ osadu ściekowego współspalanego z pyłem węglowym na właściwości popiołów lotnych jest następujący [8]:

- z uwagi na niższą zawartość krzemionki (SiO₂) w osadach ściekowych niż w węglu kamiennym, współspalanie osadu ściekowego skutkuje zmniejszeniem zawartości tego składnika w popiele,
- wraz ze zwiększeniem udziału współspalanych osadów ściekowych wzrasta zawartość tlenków: żelaza, wapnia i fosforu, co związane jest ze stosowaniem tlenku żelaza jako środka koagulacyjnego w oczyszczaniu ścieków oraz wysoką zawartością fosforu w osadach ściekowych,
- zawartość pozostałych składników w popiole lotnym ze współspalania mieści się w przedziale wartości jak dla popiołu ze spalania węgla,
- wraz ze zwiększeniem się ilości współspalanych osadów ściekowych wzrasta zawartość w popiole składników szklistych (alkaliów rozpuszczalnych), potencjalnie odpowiedzialnych za reakcję pucolanową, wiąże się to z wyższą zawartością CaO i P₂O₅,
- skład chemiczny (poza fosforem) i mineralogiczny nie różni się od składu popiołu ze spalania samego węgla.

Prezentowane w literaturze badania w większości dotyczą wpływu popiołu, który częściowo zastępuje cement portlandzki, na właściwości wytrzymałościowe kompozytów cementowych. Stwierdzono, że zastąpienie do 15% masy cementu popiołem nie wpłynie negatywnie na wytrzymałość zaprawy, badaną po 28 dniach dojrzewania. Zauważono również, że przeprowadzenie dodatkowych zabiegów technologicznych, np. takich jak zmielenie popiołu na mokro przed wprowadzeniem do zaprawy, pozwala zwiększyć zawartość popiołu do 30% masy spoiwa.

W pracy Monzo i in. z 1999 r. i 2003 r. przeprowadzono kolejno analizę narastania wytrzymałości zapraw zawierających do 30% popiołu w stosunku do masy cementu oraz opisano wpływ obecności popiołu ze spalania osadu na urabialność świeżej zaprawy, badaną na podstawie zmian rozptywu. Stwierdzono, że zmiany wytrzymałości zaprawy w czasie są uzależnione od zawartości popiołu, zawartości C_3A w cemencie oraz warunków dojrzewania, a także uziarnienia dodatku. Grubsze uziarnienie popiołu powoduje spadek wytrzymałości na ściskanie i rozciąganie materiału. Wykazano, że częściowe zastąpienie cementu popiołem powoduje zmniejszenie urabialności mieszanki. Związane jest to z nieregularną budową ziaren popiołu i dużą wodożądnością cząstek o rozwiniętej powierzchni. Ponadto wykazano również, przeprowadzając badania nad wyplukiwaniem pierwiastków śladowych ze stwardniałej zaprawy i betonów, że taka forma utylizacji popiołów nie zagraża bezpieczeństwu środowiska naturalnego oraz człowiekowi [4, 9, 10].

Popiół pochodzący ze współspalania osadu ściekowego jest bogaty w związek fosforu, dlatego też przypuszcza się, że powolne narastanie wytrzymałości betonów zawierających w swoim składzie taki popiół może być spowodowane właśnie obecnością jonów fosforanowych, które przyczyniają się do opóźnienia procesu hydratacji [4].

3. TERMICZNA METODA PRZEKSZTAŁCANIA OSADÓW ŚCIEKOWYCH I ODPADÓW MINERALNYCH W LEKKIE KRUSZYWA WYKORZYSTYWANE W BUDOWNICTWIE

Naukowcy z Instytutu Mechanizacji Budownictwa i Górnictwa Skalnego stworzyli sztuczne kruszywo, którego głównymi składnikami są osady ściekowe oraz mineralne odpady komunalne i wydobywcze. Twórcy zapewniają, że jest to efektywny i ekonomiczny sposób zagospodarowania osadów ściekowych. Opracowana metoda ma być alternatywną metodą termicznego przekształcania osadów ściekowych, w której uwodnione osady ściekowe w mieszaninie z odpowiednio dobranymi odpadami mineralnymi są przekształcane termicznie, a produktem końcowym jest sztuczne kruszywo lekkie. Powstały w ten sposób produkt można wykorzystywać jako kruszywo do betonów lekkich i do produkcji konstrukcyjnych elementów betonowych jako zamiennik keramzytu, gdyż wg naukowców z IMBiGS spełnia on wymogi norm PN-EN dla kruszyw lekkich. Może znaleźć również zastosowanie w rolnictwie, jako podłoże do upraw, w ochronie środowiska przy oczyszczaniu wody i ścieków oraz jako materiał izolacyjny i drenarski.

Otrzymany w procesie termicznym produkt jest całkowicie bezpieczny dla zdrowia człowieka oraz dla środowiska. Zawarte w osadach ściekowych związki metali ciężkich są wbudowane w strukturę krystaliczną spieku krzemianowego, stają się przez to niewymywalne nawet po rozdrobnieniu.

Technologia opracowana w IMBiGS polega na użyciu jako surowca wyjściowego pyłu krzemionkowego, który tworzy podstawową strukturę krystaliczną nowego kruszywa silikatowego oraz osadów ściekowych, które wytwarzają porowatość kruszywa. Wspomniane pyły są odpadem powstającym podczas produkcji kruszyw naturalnych i nie są wykorzystywane gospodarczo ze względu na wielkość ziaren w tej metodzie, jednak drobnoziarniste uziarnienie jest pożądane ze względu na reakcję syntezy termicznej w fazie stałej, która jest efektywna przede wszystkim dla takich surowców. Osady ściekowe są stosowane w identycznej postaci, w jakiej są składowane na składowiskach - są zagęszczone wyłącznie metodami mechanicznymi, bez stosowania procesu osuszania. Woda stanowiąca około 80% masy osadów ściekowych, która jest silnie związana ze strukturą kłaczków osadów ściekowych, pozwala na utworzenie granulatu. Bardzo ważnym elementem nowej technologii wg naukowców z IMBiGS jest zastosowanie topnika w postaci pyłów szkła, będącego również drobnoziarnistym odpadem poprodukcyjnym. Powstaje on podczas utylizacji zużytych kineskopów i lamp oświetleniowych. Może być wytworzony również z odpadowego szkła gospodarczego, nienadającego się do powtórnego przetworzenia w hutach (rys. 1) [3].



Rys. 1. Kruszywo lekkie wytwarzane z osadów ściekowych i krzemionki odpadowej [3]

Sposobem zagospodarowania odpadów z oczyszczalni ścieków jako składnika mieszanki betonowej zajęli się również naukowcy z Katedry Technologii Produkcji Budowlanej i Materiałowej Wydziału Budownictwa Politechniki Częstochowskiej. Celem ich badań było opracowanie technologii zagospodarowania odpadu z ciągu technologicznego Oczyszczalni Ścieków „Warta” S.A. w Częstochowie do wytwarzania kompozytu betonowego, użytego jako materiał do realizacji podbudowy lokalnych dróg betonowych. Osad z piaskownika uzyskiwany jest w ilości 3000 t rocznie i do chwili opracowania technologii był utylizowany, co wiązało się z dużymi kosztami. W celu doprowadzenia do postaci nadającej się do wykorzystania

przeprowadzono operację: dezynfekcji, wypłukiwania, dominerlizowania (z użyciem cementu hutniczego, betonitu i azotanu potasu) i granulacji. Przetworzony odpad zastosowano jako zamiennik do 10% masy kruszywa drogowego przy wytwarzaniu mieszanki betonowej, użytej jako podbudowa modelowanej drogi betonowej.

Praktycznym testem nowej technologii zagospodarowania odpadów z piaskownika była realizowana na terenie oczyszczalni betonowa droga modelowana o długości 83 m i szerokości użytkowej 3 m. Konstrukcja drogi była przystosowana do technologicznego ruchu wewnętrznego oczyszczalni. Podbudowę betonową z udziałem przetworzonego odpadu posadowiono na zagęszczonej podbudowie kruszywowej. Beton układano sposobem ręcznym w deskowaniach stałych i zagęszczano listwą wibracyjną. Na podbudowie wykonano wierzchnią warstwę ścieralną drogi z betonu C 30/37. Warstwę ścieralną zatarto, uszorstniono i zabezpieczono przed utratą wody preparatem żywicznym oraz wykonano dylatacje [11, 12]. Po 28 dniach drogę dopuszczono do ruchu technologicznego w pełnym zakresie. Po roku eksploatacji nie stwierdzono na drodze żadnych defektów w postaci pęknięć, wykruszeń lub ubytków.

Z badań wynika, że beton z dodatkiem odpadu wykazał niewielki spadek wytrzymałości charakterystycznej. Nie przełożyło się to jednak na pogorszenie klasy betonu. Beton z dodatkiem odpadu wykazał spadek nasiąkliwości rzędu 10%, co przełożyło się na zwiększenie mrozoodporności. Naukowcy z KTPBiM Wydziału Budownictwa uznali, że przetworzenie odpadu, a w szczególności jego obróbki chemiczna i mechaniczna doprowadziły do powstania produktu, który wbudowany w beton nie stanowi zagrożenia dla środowiska. Potwierdzone zostało to wydaniem przez Państwowy Zakład Higieny w Warszawie stosownego atestu higienicznego.

ZAKOŃCZENIE

Osady ściekowe powstające w oczyszczalniach ścieków są odpadem, którego unieszkodliwienie i zagospodarowanie jest problemem ogólnoswiatowym, w związku z czym poszukiwanie sposobu ich zagospodarowania staje się koniecznością. W perspektywie do 2018 r. strategię w gospodarce osadami ściekowymi określa Krajowy Plan Gospodarki Odpadami 2010, który zakłada docelowo, między innymi: całkowite zaniechanie składowania osadów ściekowych, ograniczenie wykorzystania rolniczego i przyrodniczego do poziomu około 10%, ograniczenie wykorzystania do rekultywacji do poziomu około 10% i co najistotniejsze, osiągnięcie ponad 50% poziomu utylizacji metodami termicznymi [3]. W pracy przedstawiono przykłady wykorzystania tych osadów, po ich wcześniejszym przetworzeniu, do produkcji zapraw i betonów, zastępując część cementu portlandzkiego bądź jako kruszywo lekkie. Pamiętać należy jednak, że bezpieczne ich stosowanie wymaga szerokiej wiedzy opartej na wynikach badań, które powinny uwzględniać aspekty środowiskowe i techniczne oraz zmiany uwarunkowań prawnych.

LITERATURA

- [1] Pade C., Koncepcja osiągow ekwiwalentnych - zielony beton, II Seminarium Techniczne „Popioły w betonie”, Poznań 2005.
- [2] Środa K., Kijo-Kleczkowska A., Otwinowski H., Termiczne unieszkodliwianie osadów ściekowych, Inżynieria Ekologiczna 2012, 28.
- [3] www.dim-waste.eu (Termiczne metody przekształcania osadów ściekowych i odpadów mineralnych w lekkie kruszywa dla budownictwa, Instytut Mechanizacji Budownictwa i Górnictwa Skalnego).
- [4] Kosior-Kazberuk M., Nowe dodatki mineralne do betonu, Budownictwo i Inżynieria Środowiska 2011, 2.
- [5] Ochrona środowiska 2010, Główny Urząd Statystyczny, Warszawa 2010.
- [6] PN-EN 450-1: 2009 Popiół lotny do betonu - Część 1: Definicje, wymagania i kryteria zgodności.
- [7] Giergiczny Z., Popiół lotny w składzie cementu i betonu, Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice 2013.
- [8] CEN/TR 15677 Fly ash obtained from co-combustion - A report on the situation in Europe, CEN, Brussels 2007.
- [9] Monzo J., Paya J., Borrachero M.V., Peris-Mora E., Mechanical behaviour of mortars containing sewage sludge ash (SSA) and Portland cements with different tricalcium aluminate content, Cement and Concrete Research 1999, 29.
- [10] Monzo J., Paya J., Borrachero M.V., Girbes I., Reuse of sewage sludge ashes (SSA) in cement mixtures: the effect of SSA on the workability of cement mortars, Waste Management 2003, 23.
- [11] Rajczyk J., Rajczyk P., Respondek Z., Management method for from sewage plants as a component of concrete designer for local roads, The 28th International Conference on Solid Waste Technology and Management, Philadelphia 2013.
- [12] Rajczyk J., Technologia formowania konstrukcji betonowych, Seria Monografie nr 164, Wydawnictwo Politechniki Częstochowskiej, Częstochowa 2009.

ENVIRONMENT-FRIENDLY TECHNOLOGIES IN THE CONSTRUCTION INDUSTRY ON THE EXAMPLE OF “GREEN CONCRETE”

The article describes the current attempts to use ash from co-combustion of sewage sludge as an additive in the manufacture of concrete and the use of sewage sludge for the production of lightweight aggregate, resulting from the low-temperature thermal synthesis of sewage sludge with mineral and mining waste, which may also be included in the concrete mix.

Keywords: green concrete, sewage sludge, manufacture of the concrete