

Badanie właściwości betonów z dodatkiem popiołów lotnych pochodzących z termicznej obróbki osadów ściekowych

Properties of concrete with fly ash addition from sewage sludge thermal treatment

1. Wprowadzenie

Osady ściekowe powstają jako odpad w procesach oczyszczania ścieków. Wraz z rozbudową sieci kanalizacyjnej i powstawaniem nowych oczyszczalni ścieków wzrasta ilość wytwarzanych komunalnych osadów ściekowych. Według danych GUS (1) ilość osadów ściekowych wytworzonych w komunalnych oczyszczalniach ścieków wyniosła w 2000 roku 359,8 tysięcy ton suchej masy, zaś w roku 2013 540,3 tysięcy ton, co oznacza przyrost o około 50%. W 2000 roku jedynie 5,9 tysięcy ton osadów poddano spalaniu, co stanowiło około 1,6% powstających osadów ściekowych, a w 2013 roku 72,9 tysięcy ton, co stanowiło 13,5% tych osadów. Ilość spalanych osadów wzrosła więc w okresie 2000-2013 ponad trzynastokrotnie. W okresie do roku 2022 do podstawowych celów gospodarki komunalnymi osadami ściekowymi zaliczono ich stosowanie w cementowniach, spalanie w kotłach energetycznych oraz spalarniach osadów ściekowych. Udział tych metod wykorzystania osadów powinien osiągnąć 35%.

Przedstawione dane statystyczne oraz prognozy zakładające zwiększanie ilości powstających osadów komunalnych pozwalają przypuszczać, że będzie także wzrastać ilość popiołów ze spalania tych osadów, które trzeba będzie wykorzystać. Zaletą tego rozwiązania jest to, że zastosowanie spalania osadów pozwala na około dziesięciokrotne zmniejszenie masy odpadów (2). Zgodnie z krajowym planem gospodarki odpadami z 2014 (3) stwierdzono, że nie wszystkie rozwiązania w zakresie gospodarki komunalnymi osadami ściekowymi są kompleksowe, to znaczy, nie uwzględniają całkowitego zagospodarowania odpadów.

Potencjalną metodą wykorzystania odpadów z termicznej obróbki osadów jest dodawanie ich do betonów (4-6). Krzemionkowe popioły lotne, które są wykorzystywane w budownictwie jako składnik cementu lub dodatek do betonu muszą spełniać wymagania zawarte w normie PN-EN 450-1:2012: „Popiół lotny do betonu”. Definicja popiołu lotnego zawarta w tej normie nie odnosi się do popiołów powstałych ze spalania odpadów miejskich i przemysłowych. Popiół lotny traktowany jest jako dodatek typu II. Przed

1. Introduction

Sewage sludge is formed as a waste during wastewater treatment. The amount of produced municipal sewage sludge increases with sewage network development and with opening new sewage treatment plants. According to the data of Polish Central Statistical Office (1), the amount of sewage sludge produced in municipal sewage treatment plants was 359.8 thousand tons of dry sludge solids in 2000, and 540.3 thousand tons in 2013, which means the increase of about 50%. In 2000, only 5.9 thousand tons of sludge was incinerated, which comprised about 1.6% of produced sewage sludge, and 72.9 thousand tons in 2013, which comprised 13.5% of this sludge. Thus, the amount of incinerated sewage sludge increased more than thirteen times between 2000 and 2013. The usage of sewage sludge in cement plants as well as its incineration in power boilers and sewage sludge incinerators were included to basic purposes of municipal sewage sludge management up to 2022. Participation of these utilization methods should achieved 35%.

Presented statistical data and forecasts assuming the increase in amount of produced municipal sludge suggest, that the amount of ashes from these wastes incineration, which will have to be used, will also increase. The advantage of this solution is, that the usage of sewage sludge incineration causes about tenfold decrease of sewage sludge mass (2). According to national waste management plan from 2014 (3), it was stated, that not all solutions in terms of municipal sewage sludge management are comprehensive, it means, they do not take into account the total waste management.

The addition of wastes from sludge thermal treatment to concrete is the potential method of their usage (3-5). Siliceous fly ash, which is used in concrete as cement component or concrete additive has to meet the requirements of the Polish standard PN-EN 450-1:2012: „Fly ash for concrete”. Definition of fly ash contained in this standard does not refer to fly ash from incineration of urban and industrial wastes. Fly ash is treated as additive type II. Before the fly ash usage, the standard PN-EN 450-1:2012 allows various types of its

stosowaniem popiołu norma PN-EN 450-1:2012 dopuszcza jego poddawanie różnego rodzaju obróbce, na przykład sortowaniu, suszeniu, separacji, mieszaniu, przesiewaniu, mieleniu lub zmniejszeniu zawartości węgla.

Ziarna popiołu lotnego są najczęściej kształtu kulistego, ale mogą być także nieregularne lub graniaste. Ich średnica waha się od 1 do 150 μm i jest zbliżona do uziarnienia cementu (7). Popioły zawierają około 80% szkła i mają dużą miękkość. Powierzchnia właściwa Blaine'a wynosi 250 – 550 m^2/kg (8). Krzemionkowe popioły lotne zawierają przede wszystkim krzemionkę, tlenek glinu oraz tlenek żelaza, w mniejszej ilości CaO, oraz niewielkie ilości MgO, K_2O i SO_3 (9).

W przypadku spalania paliw alternatywnych zaleca się aby zawartość popiołu lotnego była w nich mniejsza od 10%. Paliwami alternatywnymi mogą być: drewno, biomasa, odpady ze ścieków komunalnych, odpady papiernicze i makulatura, koks porafinacyjny oraz paliwa płynne i gazowe. Przydatność popiołów za spalania paliw alternatywnych należy ustalić i udokumentować (6, 10).

Schemat technologiczny spalania osadów ściekowych można znaleźć w materiałach Miejskiego Zakładu Wodociągów i Kanalizacji w Warszawie (11). Powstałe w procesach oczyszczania ścieków osady są transportowane do silosów, w których przebiega proces fermentacji. Następnie są suszone i podawane do komory spalania w piecu fluidalnym. Popiół z odpylenia gazów odlotowych wytrącony w filtrach workowych lub elektrofiltrach ma pomarańczową barwę, ze względu na zawartość tlenku żelaza (12). Skład chemiczny zależy od rodzaju osadów ściekowych, lecz zazwyczaj mają one znaczną zawartość tlenków krzemu, wapnia i fosforu (13).

Od kilku lat podejmuje się próby zagospodarowania popiołów ze spalania osadów ściekowych w budownictwie. Skład chemiczny pozwala oczekiwać właściwości puzolanowych, lecz do tej pory przeprowadzono zbyt mało badań aby można było określić jak wpływają one na właściwości mieszanki betonowej i stwardniałego betonu.

Celem przeprowadzonych doświadczeń było zbadanie wpływu dodatków popiołów lotnych ze spalania osadów ściekowych na właściwości betonów cementowych.

2. Materiały i metody

W doświadczeniach stosowano popioły lotne ze spalania osadów ściekowych pochodzących z Oczyszczalni Ścieków „Czajka” w Warszawie. Osady spalano w Stacji Termicznej Utylizacji Osadów Ściekowych. Spalanie osadów odbywa się w dwóch piecach ze złożem fluidalnym.

Przeciętną zawartość metali ciężkich w popiołach lotnych wykorzystanych do badań podano w tablicy 1. W tablicy 2 przedstawiono przeciętne właściwości popiołów lotnych, stosowanych w doświadczeniach.

treatment, for example sorting, drying, separation, mixing, sieving, grinding and carbon content reduction.

Fly ash grains are usually spherical, but they may also be irregular or angular in shape. Their diameter varies from 1 to 150 μm and is similar to cement grading (7). Fly ash contains about 80% of glass and is characterized by high fineness. Specific surface area ranges from 250 to 550 m^2/kg (8). Siliceous fly ash contains mainly silica, aluminum oxide and iron oxide, CaO in less amount, and slight content of MgO, K_2O and SO_3 (9).

In the case of alternative fuels combustion, less than 10% of fly ash content is recommended. Alternative fuels can be: wood, biomass, wastes from municipal wastewater, waste paper, petroleum coke as well as fluid and gaseous fuels. The usefulness of fly ash from alternative fuels combustion should be determined and documented (6, 10).

Technological diagram of sewage sludge incineration can be found in materials of Municipal Water And Sewage Company in Warsaw (11). Sewage sludge produced in wastewater treatment is transported to silos, in which fermentation process takes place. Afterwards, it is dried and transferred to combustion chamber in fluidized bed. Fly ash from flue gases dedusting precipitated in bag filters or electrofilters is orange due to the iron oxide content (12). Chemical composition depends on sewage sludge type, however, it usually contains considerable content of silica, calcium and phosphorous oxides (13).

For several years, developing attempts of fly ash from sewage sludge incineration in concrete have been made. Chemical composition allows to expect pozzolanic properties, however, not enough studies were conducted to determine their influence on the properties of concrete mix and hardened concrete.

The aim of this work was examination of the influence of fly ash from sewage sludge incineration on cement-based concrete.

2. Materials and methods

Fly ash after sewage sludge incineration from Sewage Treatment Plant „Czajka” in Warsaw was used in these studies. Sewage sludge was incinerated in The Thermal Utilization Station of Sewage Sludge. Sewage sludge incineration takes place in two kilns with fluidized beds.

The average heavy metals content in used fly ash is given in Table 1. The average properties of this fly ash are presented in Table 2.

Concrete of class C35/45 was produced in studies. Its consistence class was determined as S3, according to standard PN-EN-206-1:2003. Concrete mix composition was designed using three equations method (14). Portland cement CEM I 32.5R and natural aggregate with grain size of $D_{\text{max}} = 16 \text{ mm}$ were used. Four concretes were prepared:

- reference concrete without fly ash,

Tablica 1 / Table 1

ZAWARTOŚĆ METALI CIĘŻKICH W POPIOŁACH LOTNYCH (2)

CONTENT OF HEAVY METALS IN FLY ASH (2)

Metal	Jednostka Unit	Metoda / Method	Wyniki oznaczeń / Results		Dopuszczalna graniczna zawartość ** Permissible content **
			Zakres zmienności Variability range	Średnia Average	
Sucha masa / Dry mass	%	PN-EN 14346:2011		99,5	-
Aresen / As	mg/kg s.m.	PN-EN 12457-4:2006; PN-EN ISO 11885:2009; KJ-I-5.4-174	< 1,0	-	≤ 2
Bar / Ba	mg/kg s.m.	PN-EN 12457-4:2006; PN-EN ISO 11885:2009; KJ-I-5.4-174	< 1,0	-	≤ 100
Kadm / Cd	mg/kg s.m.	PN-EN 12457-4:2006; PN-EN ISO 11885:2009; KJ-I-5.4-174	< 0,13	-	≤ 1
Chrom /Cr	mg/kg s.m.	PN-EN 12457-4:2006; PN-EN ISO 11885:2009; KJ-I-5.4-174	0,1	-	≤ 10
Miedź /Cu	mg/kg s.m.	PN-EN 12457-4:2006; PN-EN ISO 11885:2009; KJ-I-5.4-174	< 0,25	-	≤ 50
Rtęć / Hg	mg/kg s.m.	PN-EN 12457-4:2006; KJ-I-5.4-170	< 0,005	-	≤ 0,2
Molibden /Mo	mg/kg s.m.	PN-EN 12457-4:2006; PN-EN ISO 11885:2009; KJ-I-5.4-174	4,52÷6,32	5,32	≤ 10
Nikiel / Ni	mg/kg s.m.	PN-EN 12457-4:2006; PN-EN ISO 11885:2009; KJ-I-5.4-174		< 0,25	≤ 10
Ołów / Pb	mg/kg s.m.	PN-EN 12457-4:2006; PN-EN ISO 11885:2009; KJ-I-5.4-174		< 0,25	≤ 10
Antymon /Sb	mg/kg s.m.	PN-EN 12457-4:2006;KJ-I-5.4-170	<0,02÷0,28	< 0,02	≤ 0,7
Selen / Se	mg/kg s.m.	PN-EN 12457-4:2006; KJ-I-5.4-170	0,13÷1,44	0,52	≤ 0,5
Cynk / Zn	mg/kg s.m.	PN-EN 12457-4:2006; PN-EN ISO 11885:2009; KJ-I-5.4-174		< 1,0	≤ 50

Przypisy / Notes: * s.m. – sucha masa, ** Ustawa z dnia 27 kwietnia 2001 r. o odpadach [Dz.U. Nr 62 poz. 628 z późniejszymi zmianami] / * s.m. – dry mass, ** Waste Act of April 27, 2001 [Journal of Laws No 62, item 628, as amended]

W doświadczeniach stosowano beton klasy C35/45. Konsystencję mieszanki ustalono na poziomie S3, zgodnie z normą PN-EN-206-1:2003. Skład mieszanki betonowej zaprojektowano metodą trzech równań (14). Stosowano cement portlandzki CEM I 32,5R oraz kruszywo naturalne o uziarnieniu $D_{max}=16\text{mm}$. Przygotowano cztery betony:

- beton wzorcowy bez popiołu,
- beton z dodatkiem popiołu lotnego w ilości 10%, 12%, 15% mas. jako zamiennik cementu. Mieszanki betonowe przygotowano w laboratorium Wydziału Budownictwa i Inżynierii Środowiska SGGW w Warszawie. Właściwości mieszanki betonowej badano zgodnie z obowiązującymi normami: gęstość według PN-EN 12350-6:2011, zawartość powietrza metodą ciśnieniową według PN-EN 12350-7:2007, konsystencję metodą opadu stożka według PN-EN 206-1:2003. Badano również właściwości betonu stwardniałego: wytrzymałość na ściskanie według PN-EN 12390-3:2011, wytrzymałość na zginanie według PN-EN 12390-5:2011, wytrzymałość na rozciąganie

- concrete with fly ash addition of 10%, 12% and 15% by mass, as cement replacement. Concrete mixes were prepared in laboratory of Faculty of Civil and Environmental Engineering at Warsaw University of Life Sciences. Properties of concrete mixes were examined according to current Polish standards: density according to PN-EN 12350-6:2011, air content by pressure method according to PN-EN 12350-7:2007, consistence by slump test method according to PN-EN 206-1:2003. Properties of hardened concrete were also studied: compressive strength according to PN-EN 12390-3:2011, flexural strength according to PN-EN 12390-5:2011, tensile splitting strength according to PN-EN 12390-6:2011, absorbability according to PN-88/B-06250.

Grain size distribution of aggregate used in reference concrete and in concretes with fly ash is presented on Fig. 1. Curve of used aggregate [middle curve] is located between limit curves, upper and bottom, determining area of the best grading for concretes containing aggregate with grain size between 0 and 16 mm. Concretes composition are presented in Table 4.

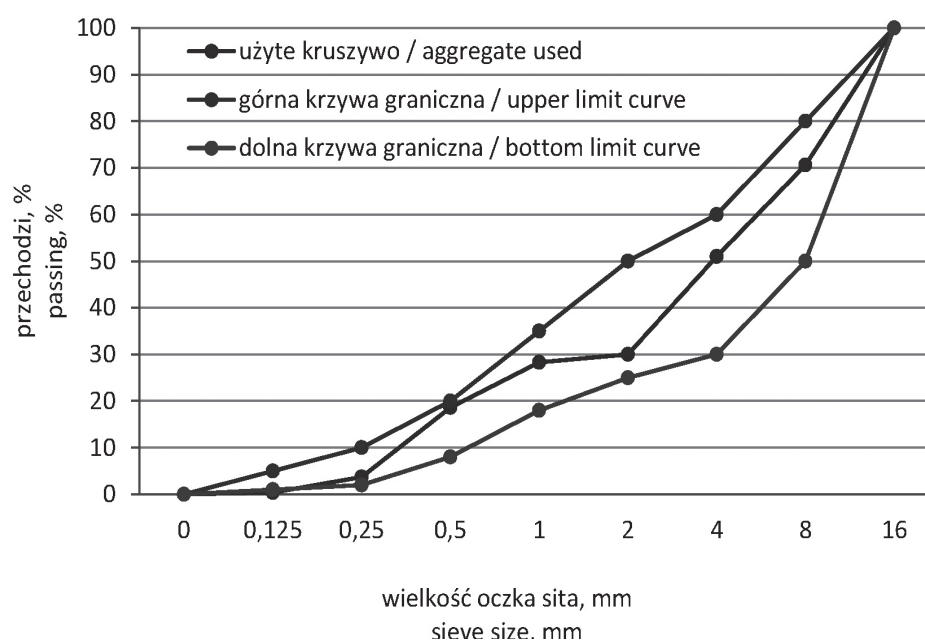
Tablica 2 / Table 2

WYBRANE WŁAŚCIWOŚCI CHEMICZNE POPIOŁÓW LOTNYCH (2)

SELECTED CHEMICAL PROPERTIES OF FLY ASH (2)

Właściwość/ properties	Jednostka Unit	Metoda / Method	Wyniki badań / Results		Dopuszczalne graniczne wartości** Permissible content **
			Zakres zmienności Variability range	Średnia Average	
Chlorki / Chlorides	%	PN-ISO 10304-1:2009; PN-EN 12457-4:2006	67,5-123	94,8	≤ 15000
Fluorki / Fluorides	mg/kg s.m.*	PN-78/C-04588-03; PN-EN 12457-4:2006	5-40	14,8	≤ 150
Siarczany (VI) / Sulphates (VI)	mg/kg s.m.	PN-ISO 10304-1:2009; PN-EN 12457-4:2006	7900-9290	8504	≤ 20000
Rozpuszczony węgiel organiczny [RWO] Dissolved organic carbon [DOC]	mg/kg s.m.	PN-EN 1484:1999; PN-EN 12457-4:2006;	10-47,1	21,3	≤ 800
Stale związki rozpuszczalne Soluble solids	mg/kg s.m.	APHA Standard Method 2540; PN-EN 12457-4:2006;	14000-16650	15430	≤ 60000

Przypisy / Notes: * s.m. – sucha masa, ** PN-EN 206-1:2003: „Beton. Część 1: Wymagania, właściwości, produkcja i zgodność” / * s.m. – dry mass, ** Polish standard PN-EN 206-1:2003: „Concrete. Part 1: Specification, performance, production and conformity”



Rys. 1. Krzywa ziarnowa kruszywa oraz krzywa graniczna dobrego uziarnienia wg PN-88/B-06250

Fig. 1. Grain size distribution curve of aggregate and limit curves of proper grading according to PN-88/B-06250

przy rozłupywaniu według PN-EN 12390-6:2011, nasiąkliwość według PN -88/B- 06250.

Na rysunku 1 przedstawiono uziarnienie kruszywa zastosowanego do wykonania betonu wzorcowego oraz betonów z dodatkiem popiołów. Krzywa użytego kruszywa [krzywa środkowa] znajduje się między krzywymi granicznymi górną i dolną wyznaczającymi obszar najlepszego uziarnienia, dla betonów z kruszywem frakcji 0-16 mm. Składy betonów przedstawiono w tablicy 4.

3. Results

3.1. Properties of concrete mix

Consistence of concrete mixes is presented in Table 5. The highest slump reached reference mix with consistence class S3. In the case of concrete mixes with fly ash, slump was much lower – corresponding to consistence class S1. Thus, it can be considered, that fly ash addition decreases concrete mix fluidity. Fly ash addition

Tablica 4 / Table 4

SKŁADY MIESZANEK BETONOWYCH*

COMPOSITIONS OF CONCRETE MIXES*

	Kruszywo / Aggregate, kg/m ³				Cement, kg/m ³	Popiół lotny Fly ash, kg/m ³
	0/2 mm	2/4 mm	4/8 mm	8/16 mm		
Beton wzorcowy / Reference concrete	527	369	344	517	445	-
Beton z 10% dodatkiem popiołu / Concrete with 10% of fly ash	527	369	344	517	401	45
Beton z 12% dodatkiem popiołu / Concrete with 12% of fly ash	527	369	344	517	392	53
Beton z 15% dodatkiem popiołu / Concrete with 15% of fly ash	527	369	344	517	378	67

*we wszystkich betonach dodatek wody wynosił 193kg/m³ / water addition was 193kg/m³ in all concretes

Tablica 5 / Table 5

WŁAŚCIWOŚCI MIESZANEK BETONOWYCH

PROPERTIES OF CONCRETE MIXES

	Beton wzorcowy Reference concrete	Beton z 10 % popiołu Concrete with 10% of fly ash	Beton z 12 % popiołu Concrete with 12% of fly ash	Beton z 15 % popiołu Concrete with 15% of fly ash
Opad stożka, mm / Slump in mm	100	20	30	20
Klasa konsystencji / Consistence class	S3	S1	S1	S1
Gęstość / Density, kg/m ³	2340	2320	2310	2330
Zawartość powietrza / Air content, %	2,2	2,4	2,7	2,1

Tablica 6 / Table 6

WYTRZYMAŁOŚĆ NA ŚCISKANIE BETONU

COMPRESSIVE STRENGTH OF CONCRETE

Czas dojrzewania, dni Curing time, days	Średnia wytrzymałość na ściskanie / Average compressive strength, MPa			
	Beton wzorcowy Reference concrete	Beton z 10 % popiołu Concrete with 10% of fly ash	Beton z 12 % popiołu Concrete with 12% of fly ash	Beton z 15 % popiołu Concrete with 15% of fly ash
2	26,4	24,3	21,6	18,8
7	45,6	41,5	36,3	35,7
14	47,0	42,6	40,4	40,6
28	49,9	45,5	43,1	47,9
56	51,5	49,4	53,7	51,0

3. Wyniki

3.1. Wyniki badań mieszanki betonowej

Wyniki badań konsystencji poszczególnych mieszanek betonowych przedstawiono w tablicy 5. Największy opad stożka miała mieszanka wzorcowa, o klasie konsystencji S3. W przypadku mieszanek z dodatkiem popiołu lotnego opad stożka był znacznie mniejszy, odpowiadający klasie konsystencji S1. Można zatem uznać, że dodatek popiołu zmniejsza ciekłość mieszanki betonowej. Dodatek popiołów lotnych zmniejszył nieznacznie gęstość mieszanek betonowych. Wiązać to można z różnicami gęstości cementu i popiołu lotnego oraz różnicami w zawartości powietrza w mieszankach z popiołem lotnym [tablica 5].

slightly decreased concrete mixes density. It can be associated with differences of cement and fly ash density as well as with difference in air content of concrete mixes with fly ash [Table 5].

3.2. Properties of hardened concrete

Compressive strength is given in Table 6. Reference concrete had the highest compressive strength during almost entire curing period. In initial curing period, increasing content of fly ash resulted in lowering of compressive strength. However, reverse effect occurs in the case of longer periods of curing: after 56 days, compressive strength of concretes with fly ash is similar or even higher compared to the reference concrete.

Results of flexural strength measurements are given in Table 7.

Tablica 7 / Table 7

WYTRZYMAŁOŚCI NA ZGINANIE BETONU PO 28 DNIACH DOJRZEWANIA
FLEXURAL STRENGTH OF CONCRETE AFTER 28 DAYS OF HARDENING

	Beton wzorcowy Reference concrete	Beton z 10 % popiołu Concrete with 10% of fly ash	Beton z 12 % popiołu Concrete with 12% of fly ash	Beton z 15 % popiołu Concrete with 15% of fly ash
Średnia wytrzymałość na zginanie f_{cf} Average flexural strength f_{cf} , MPa	9,4	7,8	5,7	7,2
Średnia wytrzymałość na rozciąganie f_{ctsr} Average tensile splitting strength f_{ctsr} , MPa	3,4	2,9	3,1	3,2

Tablica 8 / Table 8

WYNIKI BADAŃ NASIĄKLIWOŚCI BETONÓW
ABSORBABILITY OF CONCRETES

	Beton wzorcowy Reference concrete	Beton z 10 % popiołu Concrete with 10% of fly ash	Beton z 12 % popiołu Concrete with 12% of fly ash	Beton z 15 % popiołu Concrete with 15% of fly ash
Średnia nasiąkliwość Average absorbability, %	4,1	4,4	4,7	5,1

3.2. Wyniki badań betonu stwardniałego

Wyniki badania wytrzymałości na ściskanie betonów przedstawiono w tablicy 6. W trakcie prawie całego okresu dojrzewania największą wytrzymałość na ściskanie wykazuje beton wzorcowy. W początkowym okresie dojrzewania wytrzymałość na ściskanie betonu malała wraz ze wzrostem dodatku popiołu. Natomiast w przypadku dłuższych okresów dojrzewania występuje efekt odwrotny: po 56 dniach betony z dodatkiem popiołu uzyskują wytrzymałość podobną lub nawet większą od betonu wzorcowego.

Wyniki badania wytrzymałości na zginanie przedstawiono w tablicy 7.

Największą wytrzymałość na zginanie osiągnął beton bez popiołu. Wytrzymałość betonu z 10% dodatkiem popiołu ze spalania osadów ściekowych była mniejsza o 17%. Najmniejszą wytrzymałość miał beton z dodatkiem 12% popiołu; była ona mniejsza od wytrzymałości betonu wzorcowego o 40%. Wytrzymałość próbek, w których zawartość popiołu wynosiła 15% masy cementu, była większa od wytrzymałości z 12% dodatkiem popiołu. Dodatek popiołu ze spalania osadów wpływa niekorzystnie na wytrzymałość na rozciąganie przy rozłupywaniu [tablica 7]. Największą wytrzymałość uzyskały próbki betonu kontrolnego. W betonach z popiołem wraz ze wzrostem ilości popiołu wytrzymałość na rozciąganie nieznacznie rosła. Na uwagę zasługuje wykazana zależność, że wpływ popiołu lotnego jest większy na wytrzymałość na zginanie niż na wytrzymałość na ściskanie, czy rozciąganie przy rozłupywaniu.

Badania nasiąkliwości wykazały, że wraz ze wzrostem dodatku popiołu ze spalania osadów ściekowych rośnie nasiąkliwość betonu. Największą nasiąkliwość wykazały próbki z 15% dodatkiem popiołu; jest ona większa o około 25% od betonu wzorcowego.

Concrete without fly ash addition had the highest flexural strength. Flexural strength of concrete with 10% of fly ash from sewage sludge incineration was 17% lower. However, the lowest flexural strength had concrete with 12% of fly ash; it was 40% lower compared to reference concrete. Concrete with 15% of fly ash had higher flexural strength compared to concrete with 12% of fly ash. Addition of fly ash unfavourably influenced on tensile splitting strength [Table 7]. Reference concrete had the highest tensile splitting strength. In concretes with fly ash, tensile splitting strength slightly increased with fly ash content. Noteworthy is the demonstrated dependence, that influence of fly ash is more noticeable in the case of flexural strength than compressive strength or tensile splitting strength.

Absorbability tests have shown, that increasing content of fly ash from sewage sludge incineration caused an increase in concrete absorbability. Samples with 15% of fly ash had the highest absorbability which is about 25% higher compared to reference concrete.

4. Conclusions

Based on results of concretes with fly ash from sewage sludge incineration examination, following conclusions can be drawn:

1. Cement replacement by the fly ash causes reduction of initial compressive strength, however, the influence after longer curing periods is very low.
2. Fly ash addition causes flexural strength reduction. This influence is higher than in the case of compressive strength.
3. The sample without fly ash had the highest tensile splitting strength after 28 days of hardening. In other samples, increasing fly ash content caused an increase in tensile splitting strength.

4. Wnioski

Na podstawie wyników z przeprowadzonych badań betonów z dodatkiem popiołów lotnych, pochodzących ze spalania osadów ściekowych, można wyciągnąć następujące wnioski:

1. Zastąpienie cementu popiołem lotnym powoduje zmniejszenie wczesnych wytrzymałości betonu na ściskanie, natomiast wpływ na wytrzymałość po dłuższym okresie dojrzewania jest nieznaczny.
2. Dodatek popiołu lotnego powoduje zmniejszenie wytrzymałości na zginanie. Wpływ ten jest większy niż w przypadku wytrzymałości na ściskanie.
3. Największą wytrzymałość na rozciąganie przy rozłupywaniu po 28 dniach dojrzewania, wykazała próbka betonu bez dodatku popiołu. W pozostałych próbkach następuje wzrost wytrzymałości wraz ze wzrostem zawartości popiołu.
4. Wraz ze wzrostem dodatku popiołu rośnie nasiąkliwość betonu.

4. Increasing content of fly ash caused an increase in concrete absorbability.

Literatura / References

1. Ochrona Środowiska 2014. Główny Urząd Statystyczny. Warszawa 2014
2. Raport z badań: „Czajka” 2014
3. Krajowy plan gospodarki odpadami 2014 (KPGO 2014) przyjęty uchwałą nr 217 Rady Ministrów z dnia 24 grudnia 2010 r. w sprawie „Krajowego planu gospodarki odpadami 2014” (M.P. Nr 101, poz. 1183)
4. C. J. Lynn, R. K. Dhir, G. S. Ghataora, R. P. West, Sewage sludge ash characteristics and potential for use in concrete, *Constr. Build. Mater.* **98**, 767-779 (2015)
5. D.B. Istique, L. Reig, J.C.B. Moraes, J.L. Akasaki, M.V. Borrachero, L. Soriano, J. Payá, J.A. Malmonge, M.M. Tashima, Behaviour of metakaolin-based geopolymers incorporating sewage sludge ash (SSA) *Mater. Lett.* **180**, 192-195 (2016)
6. F. Baeza-Brotons, P. Garcés, J. Payá, J. M. Saval, Portland cement systems with addition of sewage sludge ash. Application in concretes for the manufacture of blocks *J. Clean. Prod.* **82**, 112-124 (2014)
7. R. C. Joshi, R. P. Lohtia, Fly ash in concrete: production properties and uses, *Advances and Concrete Technology* (V. M. Malhot ed.) Vol. 2, Gordon and Breach Science Publishers, s. 269, Ottawa Ontario, Canada (1997)
8. ACI Committee 232, Use of fly ash in concrete. ACI committee report 232. 2R-96. ACI, (1996).
9. Z. Giergiczny, Popiół lotny w składzie cementu i betonu. Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice 2013
10. J. Filipiak, Popiół lotny w budownictwie. Badania wytrzymałościowe gruntów stabilizowanych mieszanką popiołowo-cementową, Środkowo-pomorskie Towarzystwo Naukowe Ochrony Środowiska.
11. <http://www.mpwik.com.pl> – Miejskie Przedsiębiorstwo Wodociągów i Kanalizacji w Warszawie sp. z o.o.
12. W. Kępys, R. Pomykała, J. Pietrzyk, Właściwości popiołów lotnych z termicznego przekształcania komunalnych osadów ściekowych. *Inżynieria Mineralna* **14**, 11-18 (2013)
13. Kosior-Kazberuk M., J. Karwowska 2011. Wybrane problemy zagospodarowania popiołów pochodzących ze spalania osadów ściekowych w technologii materiałów cementowych. *Inżynieria Ekologiczna* **25**, 110-123 (2011)
14. Z. Jamroży. Beton i jego technologie. Warszawa: Wydawnictwo Naukowe PWN, 2005