

Badania wytrzymałości i trwałości betonu zwykłego, średniej klasy i betonu o wysokiej wytrzymałości z dodatkami mineralnymi w odpowiednio dobranych proporcjach

A study of concrete strength and durability by mineral additives optimization in conventional low, medium and high grades concretes

1. Wprowadzenie

Beton jest powszechnie stosowanym materiałem w budownictwie (1). W związku z rosnącym zapotrzebowaniem na energię, elektrycznie węglowe są coraz bardziej powszechne na całym świecie. Pomimo, że popiół lotny jest wartościowym dodatkiem mineralnym do cementu portlandzkiego popiołowego i do betonu, tylko około 4% z jego zasobów jest wykorzystywane w tym celu. Stosowanie superplastyfikatorów pozwala na przyspieszenie wzrostu wytrzymałości betonu z popiołem lotnym, aż do uzyskania pożądanych właściwości w początkowym okresie twardnienia poprzez dodanie pyłu krzemionkowego.

Zainteresowanie stosowaniem tworzyw o dużych wytrzymałościowych opartych na spoiwach cementowych wzrasta stosunkowo szybko. Przemysł papierniczy jest jednym z kluczowych branż produkcyjnych w Indiach. Pracuje w nim 759 fabryk papieru o zdolnościach produkcyjnych 12,7 milionów ton i zużyciu 11 milionów ton co odpowiada 9,3 kg na jednego mieszkańca. Przewidywane zapotrzebowanie na papier w 2025 roku wynosi 24 mln ton. Wzrost kosztów budowy rodzi potrzebę badań związanych z wykorzystaniem nowych materiałów takich jak mleko wapienne po produkcji papieru do częściowego zastępowania cementu oraz ich wpływu na beton (2). Na całym świecie powstało wiele prac dotyczących nowych materiałów zastępujących cement w takich proporcjach, aby osiągnąć taką samą wytrzymałość.

Chociaż opisano wiele materiałów zastępujących częściowo cement w betonie jak na przykład popioły lotne, obecnie próbuje się wykorzystać także inne materiały (5, 6). Właściwości dotyczące skurczu wapna i cementu opisali Wang. i in. (21). Badano wytrzymałość zwykłego cementu portlandzkiego, na którą wpływ ma porowatość, wielkość porów i ich struktura, a do badań wykorzystano pięć dodatków mineralnych, a mianowicie mleko wapienne, granulowany żużel wielkopiecowy, popiół lotny, kamień wapienny i granulowany żużel fosforowy oraz mączkę marmurową (2, 6, 14,

1. Introduction

Concrete is very commonly used material for building construction (1). Due to increasing energy demand, coal-burning power plants become more widespread around the world. Although fly ash is a valuable mineral additive for blended Portland cement and concrete, only about 4% of the total available fly ash is used for this purpose. By incorporation of superplasticizers, the strength development of fly ash concrete can be accelerated to achieve the desired performance at early ages by adding accelerating agents like silica fume. Application of high strength cementitious products for the field applications was increasing rapidly. Paper industry is one of the crucial manufacturing segments paying to the Indian economy. There are 759 paper mills in India with an operating capacity of 12.7 million tonnes and consumption of 11 million tonnes with 9.3 kg per capita consumption of paper. Projected demand for paper by 2025 is 24 million tonnes. The increase in dumping difficulties and construction cost hints to the research of other materials like lime sludge for partial replacement of cement and its effect in concrete (2). Significant research is being done all over the globe so as to find new materials as substitute to cement up to certain proportions at least, attaining same strength. Though the literature gives lot of evidence on extent of new materials as a substituent (partially) in concrete like fly ash, now a new material is being tried as a replacement of cement (5, 6). Shrinkage properties of lime and cement were discussed by Wang Z. et.al (21). A study was conducted on the strength of ordinary Portland cement [OPC] paste which is influenced by porosity, pore size and its distribution and in this context six mineral additives namely lime sludge, granulated blast furnace slag, fly ash, limestone and granulated phosphorous furnace slag, waste marble powder were taken for the investigation (2, 6, 14, 20).

Lime sludge usage as partial cement replacement can be used in masonry cement, plastering works, for floors and foundation purposes which can be building materials of small scale (18). The use of lime sludge in concrete is an alternative measure for landfill problems and study on the mechanical and durability properties

*Corresponding author: e-mail- drprasadravi@gmail.com

20, 21). Chociaż próbuje się zastąpić cement różnymi materiałami, to wytrzymałość na ściskanie jest kluczowym czynnikiem określającym przydatność takiego tworzywa.

Mleko wapienne można stosować jako częściowy zamiennik w cemencie do murowania, w pracach tynkarskich, do podłóg i fundamentów, jako materiał budowlany wykorzystywany na małą skalę (18). Zastosowanie mleka wapiennego w betonie jest dobrą alternatywą biorąc pod uwagę problemy związane z zaleganiem odpadów na wysypiskach, a badania właściwości mechanicznych i trwałości takiego betonu przeprowadzili Mohammed i in. (16). Badania skupiały się także na wykorzystaniu mleka wapiennego z produkcji gazu acetylenowego, który otrzymuje się na drodze hydrolizy węgla wapnia, a w wyniku tego wytwarzane jest mleko wapienne. Ponadto badano wpływ temperatury na postęp reakcji mleka wapiennego, metakaolinu i pyłu krzemionkowego w temperaturze 20°C i 60°C, w okresie 3-28 dni. Wiele krajów przeprowadzało badania na innych materiałach odpadowych w celu zmniejszenia ich szkodliwego wpływu na środowisko naturalne (2).

Materiały naturalne mają przewagę nad surowcami wtórnymi biorąc pod uwagę lepszą kontrolę jakości. Jednak wykorzystanie surowców wtórnych ulegnie zwiększeniu, ponieważ surowców naturalnych jest coraz mniej, a koszty usuwania gruzu budowlanego i innych materiałów odpadowych wzrastają, nie wspominając o względach estetycznych. Produkcja papieru wiąże się z wytwarzaniem dużej ilości odpadów stałych. Włókna papierowe można wykorzystać wtórnie ograniczoną ilość razy, aby wyprodukować papier dobrej jakości, przy jednoczesnym wytworzeniu dużej ilości odpadów stałych. Mleko wapienne po produkcji papieru można wykorzystać jako materiał zastępujący cement.

W niniejszej pracy do przygotowania spoiwa cementowego o odpowiednim składzie chemicznym jako surowców stosowano glinę prażoną, popiół lotny, fluorogips, cement portlandzki, fosfogips i mleko wapienne. W celu otrzymania pucolony zgodnie z normą indyjską IS 1344-1981 glinę kalcynowano w temperaturze 700°C przez 1,5 godziny.

2. Materiały i metody

2.1. Materiały użyte w badaniach

2.1.1. Cement

Zastosowano cement portlandzki klasy 53 według normy indyjskiej IS: 12269 – 1987. Początek czasu wiązania, koniec czasu wiązania, ciężar właściwy i konsystencja normowa wynosiły kolejno 45 min, 215 min, 3,11 g/cm³ i 30%. Wytrzymałość na ściskanie po 28 dniach wynosiła 54,5 MPa.

2.1.2. Kruszywo drobne

Do badań zastosowano kruszywo drobne należące do kategorii drugiej, zgodnie z normą indyjską IS: 383 – 1970. Kruszywo to pozyskano z pobliskiej rzeki. Gęstość nasypowa, moduł rozdrobnienia

was conducted by Mohammed et.al (16). Works were also focussed on reused lime sludge from acetylene gas which is being produced from hydrolysis of calcium carbide where lime sludge is lifted besides influence of curing temperature. The research embraced also the reaction of the lime sludge, metakaolin and silica fume at 20°C and 60°C, in the period between 3-28 days. Many countries have started working on other landfill materials so as to decrease its hazardous nature on the environment (2).

In general, natural materials have a quality control advantage over recycled materials. But the economic feasibility of recycling will increase with time, as natural materials become increasingly scarce and the disposal costs of construction debris and other waste materials keep increasing including aesthetic problem. Paper making generally produces a large amount of solid waste. Recycling of paper fibres can be done only for a limited number of times to make a good quality paper, which produces a large amount of solid waste. Lime sludge as supplementary cementitious material can be used as a solution.

Although different additives are tried as new materials replacing cement, compressive strength is the key factor so as to judge the materials efficiency. In this investigation to make cementitious binders OPC was partially replaced by calcined clay, fly ash, fluorogypsum, phosphogypsum and lime sludge which were used as mineral additives. To produce pozzolana as per IS 1344-1981 clay was calcined at 700°C for 1.5 hours.

2. Materials and methods

2.1. Materials

2.1.1. Cement

OPC of 53 grade as per IS: 12269 – 1987 was used. The initial setting time, final setting time, specific gravity and standard consistency, are 45 min, 215 min, 3.11 g/cm³ and 30%, respectively. The compressive strength of standard cement mortar cubes at 28 days is 54.50 MPa.

2.1.2. Fine aggregate

The fine aggregate used was obtained from a nearby river source. The bulk density, fineness modulus and specific gravity of the sand used were 1.41 g/cm³, 2.90 and 2.68 g/cm³, respectively. The grading of fine aggregate was 6 mm as maximum grains size, 10% was passing through 4.75 mm sieve and 10% through 150 µm sieve as per IS: 383 – 1970.

2.1.3. Coarse aggregate

The coarse aggregate used was crushed granite. The grading was 20 mm as maximum grains size and retained on 10 mm sieve was used up to 60%, and 40% had maximum grains size equal 10 mm and was retained on 4.75 mm as per IS 383: 1970 The properties of coarse aggregate were: bulk density of 1.46 g/cm³, fineness modulus 7.1 and specific gravity 2.78 g/cm³.

piasku oraz ciężar właściwy wynosiły kolejno 1,41 g/cm³, 2,68 oraz 2,43 g/cm³. Maksymalne ziarno miało 6 mm, a 10% przechodziło przez sito 4,75 mm oraz 10% przez sito 150 µm według normy indyjskiej IS: 383 – 1970.

2.1.3. *Kruszywo grube*

Stosowano kruszywo grube, którym był łamany granit o maksymalnej średnicy ziaren 20 mm stanowiących 60% jego objętości, natomiast pozostałe 40% stanowiły ziarna o średnicy 10 mm i ich dolna średnica wynosiła 4,75 mm zgodnie z normą indyjską IS: 383 – 1970. Gęstość nasypowa kruszywa grubego, moduł rozdrobnienia i ciężar właściwy wynosiły odpowiednio 1,46 g/cm³, 7,1 oraz 2,78 g/cm³.

2.1.4. *Popiół lotny*

W badaniach zastosowano popiół lotny klasy F o małej zawartości wapna dostarczony z elektrociepłowni w Ramagundam w Indiach.

2.1.5. *Pył krzemionkowy*

Do produkcji betonu o dużej wytrzymałości zastosowano pył krzemionkowy o właściwościach zgodnych z normą indyjską IS: 15388, Część-II (2003) dostarczony przez firmę Elkam o powierzchni właściwej według Blaine'a 700 m²/kg i ciężarze właściwym 2,22 g/cm³.

2.1.6. *Mleko wapienne*

Mleko wapienne zawierało włókna celulozowe, niewielką ilość wapnia i dużą zawartość chlorku wapnia, minimalną ilość krzemionki oraz pozostałości związków chemicznych związanych w wodzie. Zawartość wilgoci wynosiła prawie 40%. Mleko to trudno poddawało się suszeniu, było maziste i miało dużą lepkość plastyczną. Widoczne są także różnice w zawartości grudek oraz lepkości plastycznej. Mleko wapienne stosowane w badaniach pochodziło z tego samego źródła. Początek czasu wiązania, koniec czasu wiązania, jego ciężar właściwy i konsystencja normowa wynosiły kolejno 42 min, 780 min, 1,98 g/cm³ i 32%.

2.1.7. *Woda*

Do badań użyto wody pitnej, którą wykorzystano do przygotowania mieszanki i do przechowywania próbek betonowych zgodnie z normą indyjską IS 457-2005.

Skład chemiczny mleka wapiennego, popiołu lotnego i cementu podano w tablicy 1.

2.2. *Metody*

Celem badań było ustalenie korzystnego dodatku trzech składników popiołu lotnego, pyłu krzemionkowego i mleka wapiennego, które zastępowały cement zgodnie z normą indyjską IS 10262:2009. Najpierw zaprojektowano mieszanki betonowe o pożądanej wytrzymałości na ściskanie: 30 MPa, 50 MPa i 70 MPa, bez dodatków mineralnych. Pierwszy etap badań obejmował zastępowanie cementu popiołem lotnym w różnych ilościach, to znaczy 5%, 10%, 15%, 20% i 25% masowych. Następnie przygotowano mieszanki,

2.1.4. *Fly ash*

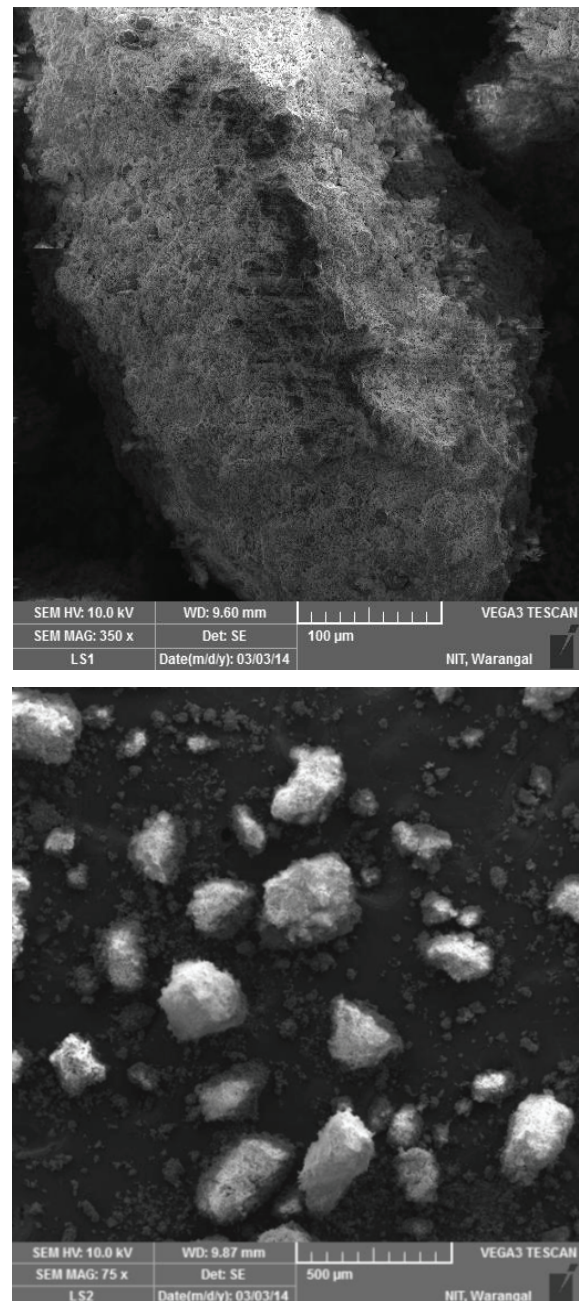
For the investigation, dry fly ash of low calcium confirming Class F, obtained from Thermal Power Plant, Ramagundam, India was used.

2.1.5. *Silica fume*

Silica fume conforming to IS: 15388, Part-II (2003) obtained from Elkam Company with Blaine's specific surface area of 700 m²/kg and specific gravity of 2.22 g/cm³ has been used in high strength concrete.

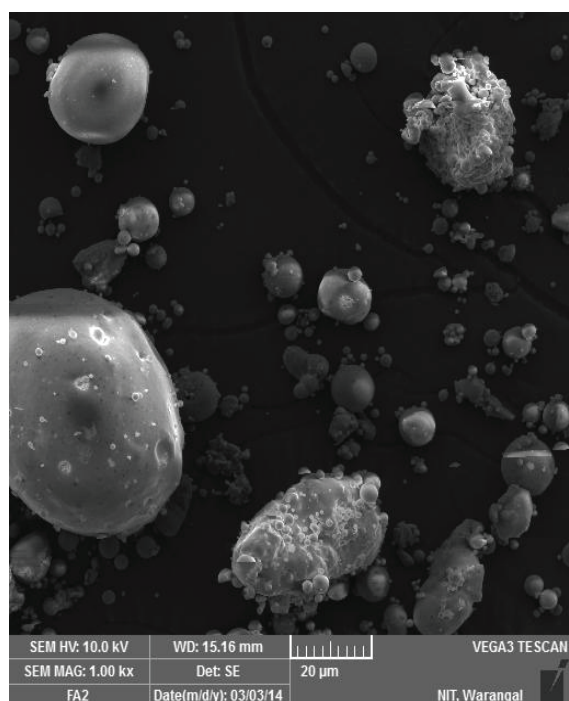
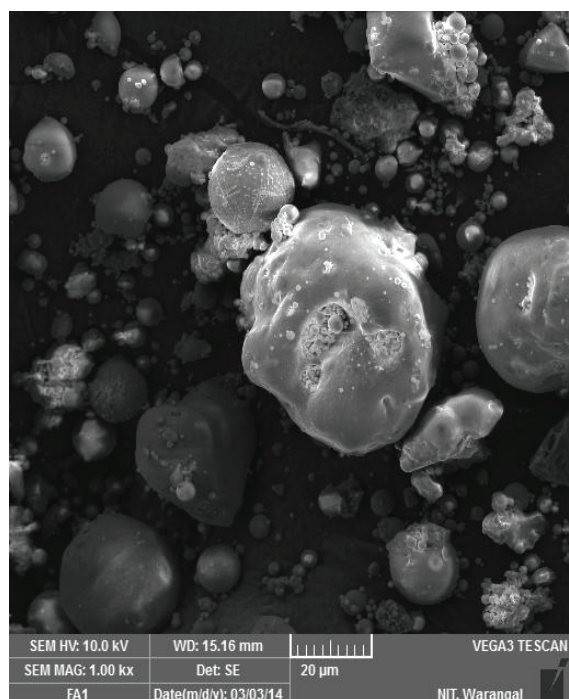
2.1.6. *Lime sludge*

Lime sludge consists of cellulose fibres, low calcium, and maximum calcium chloride, minimum amount of silica and residual chemi-



Rys. 1. Mikrostruktura mleka wapiennego

Fig. 1. SEM images of lime sludge



Rys. 2. Mikrostruktura popiołu lotnego

Fig. 2. SEM images of fly ash

w których cement zastępowano dwoma dodatkami, a mianowicie popiołem lotnym w ilości ustalonej w poprzednich próbach, oraz pył krzemionkowy w ilości 4%, 6%, 8% i 10% masowych. Po ustaleniu korzystnych dodatków popiołu lotnego i pyłu krzemionkowego, przygotowano mieszanki, w których cement zastępowano popiołem lotnym, pyłem krzemionkowym, a także mlekiem wapiennym. Dodawano je w sumarycznej ilości 5%, 10%, 15% i 20%. Dodatek superplastyfikatora wynosił 1,2% masy spoiwa. Składy mieszanek podano w tablicy 2.

cals bound up with water. The moisture content is nearly about 40%. The material is hard to dry, sticky, viscous and can vary in lumpiness and viscosity. Lime sludge was obtained from the same source throughout the investigation. Procured lime sludge was stored properly. The initial setting time, final setting time, specific gravity and standard consistency, are respectively 42 min, 780 min, 1.98 g/cm³ and 32% water demand respectively.

2.1.7. Water

Potable water was used for mixing and curing as per IS: 456-2000.

Chemical analysis of fly ash, silica fume and lime sludge are given in Table 1.

Tablica 1 / Table 1

SKŁAD CHEMICZNY MLEKA WAPIENNEGO, PYŁU KRZEMIONKOWEGO, POPIOŁU LOTNEGO

CHEMICAL COMPOSITION OF LIME SLUDGE SILICA FUME AND FLY ASH

Constituent Składnik	Lime sludge Mleko wapienne	Silica fume Pył krzemionkowy	Fly ash Popiół lotny
CaO	40.30	1.4	4.32
Si ₂ O ₂	1.12	81.8	61.28
Fe ₂ O ₃	1.32	1.2	4.18
Al ₂ O ₃	1.48	4.6	24.93
MgO	6.08	1.4	1.38
LOI Strata prażenia	33.93	7.1	2.06

2.2. Methods

In order to achieve the objectives of the investigation, a detailed experimental work is planned. The purpose of the investigation is to determine the optimum dosages of fly ash, silica fume and lime sludge that can replace the cement using the guidelines of IS 10262:2009. Concrete mix proportions of target mean compressive strength of 30 MPa, 50 MPa and 70 MPa were designed without any mineral addition [Table 2].

The experimental investigation primarily embraced fly ash at different cement replacement levels of 5%, 10%, 15%, 20% and 25% [Tables 3-5]. With the optimal dosage of fly ash, a binary mix is developed using fly ash and silica fume by replacing cement at different levels of 4%, 6%, 8%, 10% [Tables 6-8]. All the percentage replacements were done by mass of cement. After obtaining the optimal dosages of fly ash and silica fume, a triple blend mix is developed with fly ash [FA], silica fume [SF] and lime sludge [LS] by replacing cement at the levels of 5%, 10%, 15% and 20% introducing lime sludge as supplementary cementitious material [Tables 9-11].

Superplasticizer addition of 1.2% by mass of binder content in all experiments was used.

3. Wyniki badań i dyskusja

Do określenia urabialności mieszanek zastosowano metodę opadu stożka. Przygotowano mieszaniny próbne, na podstawie których ustalono stały dodatek superplastyfikatora wynoszący 1,2% masy spoiwa, we wszystkich klasach betonu. Pomiary wytrzymałości na ściskanie kostek sześciennych o wymiarach 150 mm x 150 mm x 150 mm zgodnie z normą indyjską IS 516-1959 przeprowadzono na wszystkich mieszankach w celu ustalenia optymalnej zawartości popiołu lotnego, pyłu krzemionkowego i mleka wapiennego we wszystkich klasach betonu. Kostki sześciennie dojrzewały przez 28 dni w powietrzu o WW 90% i w temperaturze 25°C.

3.1. Urabialność mieszanek betonowych i wytrzymałość na ściskanie betonu

Wyniki opadu stożka dla wszystkich betonów z różnym procentowym dodatkiem popiołu lotnego, pyłu krzemionkowego i mleka wapiennego podano w tablicach 3–11. Podczas badania właściwości świeżych mieszanek betonowych stwierdzono, że urabialność mieszanek zawierających różny dodatek popiołu lotnego, pyłu krzemionkowego i mleka wapiennego maleje ze wzrostem ilości tych dodatków. Jest to spowodowane zwiększeniem zawartości materiału o dużej mianości w mieszankach betonowych. Spowodowało to trudności uzyskania takiej samej urabialności, nawet przy dodatku superplastyfikatora. Zwiększenie dodatku składników zastępujących cement powodowało wzrost objętości zaczynu, co powodowało zmniejszenie wydzielania mlecza. Należy zauważyć, że opad stożka w przypadku wszystkich mieszanek był większy od 70 mm. Większy opad stożka przypisuje się dużemu rozdrobieniu dodatków mineralnych oraz ich właściwościom absorbowania wody. Początkowo optymalne zawartości dodatków mineralnych określono oddzielnie dla popiołu lotnego, mleka wapiennego i pyłu krzemionkowego biorąc pod uwagę betony o pożądanej wytrzymałości 30 MPa, 50 MPa i 70 MPa, po czym na podstawie tych wyników przygotowano i zbadano betony z korzystną zawartością wszystkich dodatków mineralnych, a wyniki porównano z betonami bez dodatków mineralnych.

Na podstawie wyników z Tablic 3-12 wybrano korzystny dodatek trzech składników czyli popiołu lotnego, pyłu krzemionkowego i mleka wapiennego wynoszący kolejno 15%, 8% oraz 15%.

Tablica 3 / Table 3

BADANIA BETONU 30 MPa Z DODATKIEM POPIOŁU LOTNEGO
OPTIMIZATION OF FLY ASH CONTENT IN CONCRETE OF 30 MPa

Replacement by fly ash Popiół lotny zastępujący cement, %	Quantity of cement Zawartość cementu, kg/m ³	Quantity of fly ash Zawartość popiołu, kg/m ³	Compressive strength* Wytrzymałość na ściskanie*, MPa
0	394	-	30.5
5	374.3	19.7	32.2
10	354.6	39.4	33.8
15	334.9	59.1	36.1
20	315.2	78.8	34.4
25	295.5	98.5	33.5

*Remark / Uwaga: after 28 days of hardening / po 28 dniach twardnienia

Tablica 2 / Table 2

SKŁAD MIESZANEK

MIX PROPORTION

Material / Material	30 MPa	50 MPa	70 MPa
	Quantity / Zawartość, kg/m ³		
Cement / Cement	394	418	440
Fine aggregate / Kruszywo drobne	775	816	847
Coarse aggregate / Kruszywo grube	1140	1082	1045
Water / Woda	197	167	144

3. Results and discussion

Standard cubes of size 150 mm x 150 mm x 150 mm as per IS 516-1959 were cast to evaluate the compressive strength of each blend mix to establish the optimum dosage of fly ash, silica fume and lime sludge, for each grade of concrete. The concrete cubes were cured for 28 days in the air of RH 90% and at 25°C.

3.1. Optimization of mineral additives content

The highest strength of concrete was found at 15% replacement of cement with fly ash in all the three grades of concrete. Keeping the fly ash content as constant, silica fume was varied from 0 to 10% replacement of cement and optimum dosage in concrete with optimised fly ash was observed at 8%. Further keeping the fly ash and silica fume as constant, lime sludge was varied from 0 to 20% replacement of cement and the highest strength was found at 15% replacement level. Taking into account the optimised content of fly ash, silica fume and lime sludge a composition of ternary blended concrete was established. Strength properties were examined for ternary mixes of all grades of concrete by testing the specimens to measure the compressive strength, split tensile strength and flexural strength. Standards cubes of 150 mm x 150 mm x 150 mm, standard cylinders of 150 mm diameter and 300 mm height and beams of size 500 mm x 100 mm x 100 mm were used for strength measurements of ternary mixes which were cured for 28 days in aforementioned condition. The results are given in Table 12.

The optimum dosages for additives FA, SF and LS were 15%, 8% and 15% respectively as shown in Tables 3-11. Mechanical

Tablica 4 / Table 4

BADANIA BETONU 50 MPa Z DODATKIEM POPIOŁU LOTNEGO

OPTIMIZATION OF FLY ASH CONTENT IN CONCRETE OF 50 MPa

Replacement of fly ash Popiół lotny zastępujący cement, %	Quantity of cement Zawartość cementu, kg/m ³	Quantity of fly ash Zawartość popiołu, kg/m ³	Compressive strength Wytrzymałość na ściskanie, MPa
0	418	-	50.8
5	397.1	20.9	53.2
10	376.2	41.8	55.4
15	355.3	62.7	58.1
20	334.4	83.6	56.7
25	313.5	104.5	54.6

Tablica 5 / Table 5

BADANIA BETONU 70 MPa Z DODATKIEM POPIOŁU LOTNEGO

OPTIMIZATION OF FLY ASH CONTENT IN CONCRETE OF 70 MPa

Replacement of fly ash, Popiół lotny zastępujący cement, %	Quantity of cement, Zawartość cementu, kg/m ³	Quantity of fly ash, Zawartość popiołu, kg/m ³	Compressive strength, Wytrzymałość na ściskanie, MPa
0	440	-	70.2
5	418	22	73.8
10	396	44	76.2
15	374	66	78.5
20	354	88	76.8
25	330	110	74.3

Tablica 6 / Table 6

BADANIA BETONU 30 MPa Z DODATKIEM PYŁU KRZEMIONKOWEGO

OPTIMIZATION OF SILICA FUME CONTENT IN CONCRETE OF 30 MPa

Replacement of silica fume, Pył krzemionkowy zastępujący cement, %	Quantity of cement Zawartość cementu, kg/m ³	Quantity of fly ash Zawartość popiołu lotnego, kg/m ³	Quantity of silica fume, Zawartość pyłu krzemionkowego, kg/m ³	Compressive strength, Wytrzymałość na ściskanie, MPa
0	334.9	59.1	-	30.5
4	321.5		13.4	37.9
6	314.8		20.1	39.2
8	308.1		26.8	41.2
10	301.4		33.5	40.1

Tablica 7 / Table 7

BADANIA BETONU 50 MPa Z DODATKIEM PYŁU KRZEMIONKOWEGO

OPTIMIZATION OF SILICA FUME CONCENT IN CONCRETE OF 50 MPa

Replacement of silica fume, Pył krzemionkowy zastępujący cement, %	Quantity of cement Zawartość cementu, kg/m ³	Quantity of fly ash Zawartość popiołu lotnego, kg/m ³	Quantity of silica fume, Zawartość pyłu krzemionkowego, kg/m ³	Compressive strength Wytrzymałość na ściskanie, MPa
0	355.3	62.7	-	50.8
4	341		14.2	60.2
6	334		21.3	62.5
8	326.8		28.4	64.8
10	319.7		35.5	63.1

Tablica 8 / Table 8

BADANIA BETONU 70 MPa Z DODATKIEM PYŁU KRZEMIONKOWEGO
OPTIMIZATION OF SILICA FUME CONTENT IN CONCRETE OF 70 MPa

Replacement of silica fume Pył krzemionkowy zastępujący cement, %	Quantity of cement Zawartość cementu, kg/m ³	Quantity of fly ash Zawartość popiołu lotnego, kg/m ³	Quantity of silica fume Zawartość pyłu krzemionkowego, kg/m ³	Compressive strength Wytrzymałość na ściskanie, MPa
0	374	66	-	70.2
4	359.1		14.9	80.3
6	351.6		22.4	82.2
8	344.1		29.9	84.5
10	336.6		37.4	82.5

Tablica 9 / Table 9

BADANIA BETONU 30 MPa Z DODATKIEM MLEKA WAPIENNEGO
OPTIMIZATION OF LIME SLUDGE CONTENT IN CONCRETE OF 30 MPa

Replacement of lime sludge Mleko wapienne zastępujące cement, %	Quantity of cement Zawartość cementu, kg/m ³	Quantity of fly ash Zawartość popiołu lotnego, kg/m ³	Quantity of silica fume Zawartość pyłu krzemionkowego, kg/m ³	Quantity of lime sludge Zawartość mleka wapiennego, kg/m ³	Compressive strength Wytrzymałość na ściskanie, MPa
0	308.1	59.1	26.8	-	30.5
5	292.7			15.4	42.7
10	277.3			30.8	44.5
15	261.8			46.2	43.6
20	246.5			61.6	42.5

Następnie zbadano właściwości mechaniczne oraz trwałość betonów wszystkich klas z dodatkiem tej mieszanki trójskładnikowej określając wytrzymałość na ściskanie, rozciąganie przy rozłupywaniu oraz na zginanie. W celu określenia wpływu mieszanki trójskładnikowej na trwałość betonu wykonano także badania sorpcyjności i odporności betonu na migrację jonów chlorkowych. Badania wytrzymałości betonów z trzema dodatkami mineralnymi dojrzewającymi przez 28 dni zgodnie z normą indyjską IS 516-1959 (11), wykonano na kostkach sześciennych o wymiarach 150 mm x 150 mm x 150 mm, walcach o średnicy 150 mm i wysokości 300 mm oraz beleczkach o wymiarach 100 mm x 100 mm x 500 mm.

3.2. Badania sorpcyjności

Badania sorpcyjności przeprowadzono dla wszystkich betonów na kostkach o wymiarach 150 mm x 150 mm x 150 mm. Przygotowanie próbek obejmowało również zabezpieczenie bocznych powierzchni przed dostępem wody, co zmniejszało również jej odparowywanie. próbki ważono, a następnie umieszczano je w naczyniu i zanurzano w wodzie do poziomu około 5 mm powyżej dolnej ich krawędzi, zgodnie z normą ASTM C 1585 (4). Po określonym czasie wyjmowano je z naczynia i ponownie ważono. Przed ważeniem usuwano z ich powierzchni nadmiar wody za pomocą mokrej ściereczki. Po ważeniu próbki ponownie umieszczano w naczyniu z wodą, do następnego pomiaru. Pomiaru wykonywano

and durability properties were determined for optimised concrete mixes of 30 MPa, 50 MPa and 70 MPa. Compressive strength, split tensile strength and flexural strength were obtained for these mixes. Sorptivity and RCPT were conducted to observe the ternary effect on durability of concrete.

There was significant improvement in strength characteristics of concrete with the use of mineral additives. Increase in compressive strength was about 43 % in 30 MPa, 32 % in 50 MPa and 23% in 70 MPa concrete respectively, whereas the increase in split tensile strength was about 20%, 12% and 13% respectively. The increase in flexural strength was about 20% in low grade, 15% in medium and 11% in higher grade concrete. From these results, it was evident that the mineral additives are contributing for increase in strength properties of the ternary blended cement concrete significantly.

3.2. Sorptivity study

The sorptivity tests were carried out on all mixes with size of 150 mm x 150 mm x 150 mm. The preparation of samples also included water impermeability of their lateral faces, reducing the effect of water evaporation. The test started with the registration of mass of samples and afterwards they were placed in contact with a level of water capable to submerge them about 5 mm [ASTM C 1585 (4)]. After a predefined period of time, the samples were

Tablica 10 / Table 10

BADANIA BETONU 50 MPa Z DODATKIEM MLEKA WAPIENNEGO

OPTIMIZATION OF LIME SLUDGE CONTENT IN CONCRETE OF 50 MPa

Replacement of lime sludge Mleko wapienne zastępujące cement, %	Quantity of cement Zawartość cementu kg/m ³	Quantity of fly ash Zawartość popiołu lotnego, kg/m ³	Quantity of silica fume Zawartość pyłu krzemionkowego, kg/m ³	Quantity of lime sludge Zawartość mleka wapiennego, kg/m ³	Compressive strength Wytrzymałość na ściskanie, MPa
0	326.8	62.7	28.4	-	50.8
5	310.4			16.4	66.2
10	294.1			32.7	68.5
15	277.8			49	67.3
20	261.4			65.3	65.9

Tablica 11 / Table 11

BADANIA BETONU 70 MPa Z DODATKIEM MLEKA WAPIENNEGO

OPTIMIZATION OF LIME SLUDGE CONTENT IN CONCRETE OF 70 MPa

Replacement of lime sludge Mleko wapienne zastępujące cement, %	Quantity of cement Zawartość cementu, kg/m ³	Quantity of fly ash Zawartość popiołu lotnego, kg/m ³	Quantity of silica fume, Zawartość pyłu krzemionkowego, kg/m ³	Quantity of lime sludge Zawartość mleka wapiennego, kg/m ³	Compressive strength, Wytrzymałość na ściskanie, MPa
0	344.1	66	29.9	-	70.2
5	326.8			17.2	85.2
10	309.7			34.4	87.5
15	292.4			51.6	86.2
20	275.2			68.8	84.6

po 15 min, 30 min, 1 h, 2 h, 4 h, 6 h, 24 h, 48 h, 72 h, 7 dniach, 14 dniach i 28 dniach.

Zależność między sumaryczną absorpcją wody w kg/m², a pierwiastkiem kwadratowym z czasu trwania doświadczenia t^{0.5} wskazuje na odchylenie od liniowości w ciągu pierwszych kilku minut. Z tego powodu w obliczeniach współczynnika sorpcji, wykorzystano wyniki dla okresów zanurzenia od 15 min do 72 godzin, w przypadku których krzywe tych zależności zbliżyły się do liniowości.

Współczynnik sorpcji [k] obliczono ze wzoru:

$$\frac{W}{A} = k\sqrt{t}$$

gdzie

W – ilość wody zaabsorbowanej w kg;

A – przekrój powierzchni próbki, która stykała się z wodą, m²;

t – czas min;

k – współczynnik sorpcji próbki kg/m²/min^{0.5}.

W tablicy 13 podano współczynniki sorpcji dla wszystkich klas betonu bez i z dodatkami mineralnymi obliczone dla danego pierwiastka kwadratowego z czasu w minutach, a na rysunku 3

removed and weighed. Immediately after weighting, the samples were replaced in the recipient till reach the following measuring time. The procedure was repeated, consecutively, at various times such as 15 min, 30 min, 1 h, 2 hrs, 4 hrs, 6 hrs, 24 hrs, 48 hrs, 72 hrs, 7days, 14days and 28days as per ASTM C 1585 (4).

The relationship between cumulative water absorption [kg/m²] and square root of exposure time [t^{0.5}] shows deviation from linearity during first few minutes. Thus, for the calculation of sorptivity coefficient, only the section of the curves for exposure period from 15 min to 72 hrs, where the curves were consistently linear, was used.

The sorptivity coefficient [k] was obtained by using the following expression:

$$\frac{W}{A} = k\sqrt{t}$$

Where

W - the amount of water adsorbed in [kg];

A - the cross-section of specimen that was in contact with water [m²];

t - time [min];

k - the sorptivity coefficient of the specimen [kg/m²/min^{0.5}].

Tablica 12 / Table 12

WYTRZYMAŁOŚĆ BETONÓW BEZ I Z DODATKAMI MINERALNYMI, MPa

STRENGTH PROPERTIES OF CONCRETE WITH TERNARY MIX, MPa

Grade Klasa	Mix Mieszanka	Compressive strength Wytrzymałość na ściskanie	Split tensile strength Wytrzymałość na r ozciąganie przy rozłupywaniu	Flexural strength Wytrzymałość na zginanie
30MPa	Without additives / Bez dodatków	30.5	2.61	3.92
	With FA+SF+LS / Z dodatkami*	43.6	3.12	4.72
50MPa	Without additives / Bez dodatków	50.8	3.45	5.08
	With FA+SF+LS / Z dodatkami*	67.3	3.88	5.82
70MPa	Without additives / Bez dodatków	70.2	3.97	5.97
	With FA+SF+LS / Z dodatkami*	86.2	4.5	6.64

* trzy dodatki: popiół lotny, pył krzemionkowy i mleko wapienne/three additives: fly ash, silica fume and lime sludge

Tablica 13 / Table 13

WSPÓŁCZYNNIK SORPCJI DLA WSZYSTKICH KLAS BETONU W FUNKCJI PIERWIASKA KWADRATOWEGO Z CZASU W MINUTACH

SORPTIVITY COEFFICIENT FOR ALL GRADES OF CONCRETE WITH SQUARE ROOT OF TIME IN MINUTES

Mix Mieszanka	\sqrt{t}	18.97	37.94	65.72	100.39	141.98	173.89	200.79
M30 without additives bez dodatków		0.0073	0.0045	0.0027	0.0019	0.0012	0.0010	0.0008
M30 with FA+SF+LS z dodatkami*		0.0084	0.0049	0.0030	0.0020	0.0016	0.0014	0.0012
M50 without additives bez dodatków		0.00539	0.00328	0.00182	0.00128	0.00075	0.00079	0.00062
M50 with FA+SF+LS z dodatkami*		0.00565	0.00336	0.00196	0.00137	0.00085	0.00084	0.00073
M70 without additives bez dodatków		0.00492	0.00269	0.00162	0.00106	0.00059	0.00061	0.00044
M70 with FA+SF+LS z dodatkami*		0.00536	0.00363	0.00223	0.00151	0.00081	0.00084	0.00064

* trzy dodatki: popiół lotny, pył krzemionkowy i mleko wapienne/three additives: fly ash, silica fume and lime sludge

pokazano zależność tego współczynnika od pierwiastka kwadratowego z czasu w minutach.

3.3. Odporność na penetrację jonów chlorkowych

Odporność betonu na migrację jonów chlorkowych oznaczono przyspieszoną metodą badania przepuszczalności chlorków według ASTM C 1202. Polega ona na rejestrowaniu ładunku prądu

The water absorption and sorptivity coefficient of the specimens were determined and plotted as the square root of time in minutes as shown in Table 13 and Fig. 3.

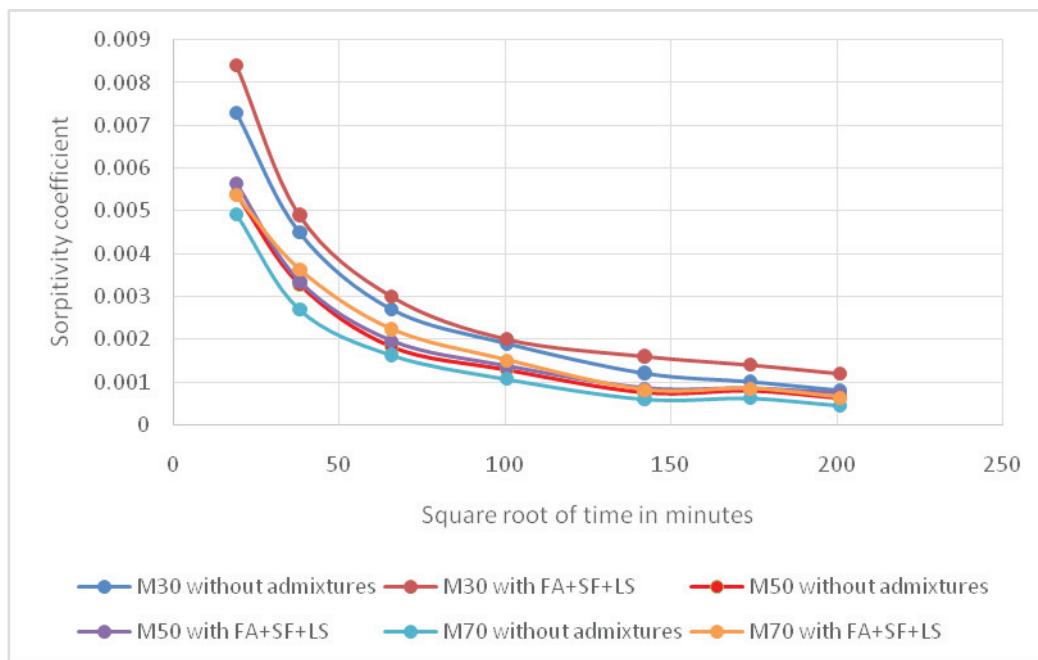
3.3. Resistance to the penetration of chloride ions

The resistance of the concrete to chloride ions penetration was determined by performing RCPT [Rapid Chloride Penetration Test].

elektrycznego przechodzącego przez krążek betonowy o średnicy 102 mm i grubości 51 mm, podczas utrzymywania przez 6 h stałej różnicy potencjałów wynoszącej 60 V [prąd stały]. Jony chlorkowe migrują z roztworu chlorku sodu, poddanego działaniu ładunku ujemnego przez próbkę betonową do roztworu wodorotlenku sodu utrzymującego potencjał dodatni. Badania odporności na penetrację jonów chlorkowych przeprowadzono na krążkach o wymiarach 100 mm x 50 mm wyciętych z cylindrów o wymiarach 100 mm x 200 mm po 28 dniach twardnienia. Pomiar ten przeprowadzono zgodnie z normą ASTM C 1202 (3). Odporność na migrację jonów chlorkowych jest powiązana z ilością sumarycznego ładunku przechodzącego przez próbkę. Przepuszczalność jonów chlorkowych maleje znacznie w czasie w przypadku większości betonów o ile ich pielęgnacja przebiegała poprawnie.

Oczywistym jest, że mieszanki z trzech dodatków popiołu lotnego, pyłu krzemionkowego i mleka wapiennego wraz z cementem portlandzkim wykazują bardzo korzystne właściwości w porównaniu do mieszanek dwuskładnikowych, a nawet lepsze niż cement portlandzki. Pył krzemionkowy zmieszany wraz popiołem lotnym o małej zawartości CaO uzupełniają się nawzajem; pył krzemionkowy poprawia właściwości wczesne betonu, a popiół lotny korzystnie wpływa na właściwości stwardniałego betonu w późniejszym okresie. Biorąc pod uwagę trwałość, takie mieszanki są znacznie lepsze w porównaniu do zwykłego betonu z cementu portlandzkiego.

Betony, w których cement zastąpiono popiołem lotnym, pyłem krzemionkowym i mlekiem wapiennym wykazują zmniejszenie przepuszczalności w czasie. Przypuszczalnie może to być spowodowane zmianą struktury porów w hydratyzującym zaczynie zawierającym dodatki mineralne. Do znacznego spadku przepuszczalności przyczynia się natomiast pył krzemionkowy, który



Rys. 3. Zależność współczynnika sorpcji od pierwiastka kwadratowego z czasu w minutach

Fig. 3. Sorptivity to square root of time in minutes

This test consists of monitoring the amount of electrical current passed through a 102 mm diameter x 51 mm thick concrete disc, when a potential difference of 60 V DC is maintained across the specimen for a period of 6 h. Chloride ions are forced to migrate out of a sodium chloride solution subjected to a negative charge through the concrete into a sodium hydroxide solution maintained at a positive potential. The tests for resistance to chloride-ion penetration were carried out on 100 mm x 50 mm discs, cut from the 100 mm x 200 mm cylinders at 28 days. This test was performed in accordance with Indian Standards and ASTM C 1202 (3) test method. The resistance to chloride ions penetration is related by the amount of total charge passed. In most concretes, if properly cured, the samples become progressively and significantly less permeable with time.

It is apparent that ternary cementitious blends of FA, SF and LS along with OPC offer significant advantages over binary blends and even greater enhancements over OPC. The combination of silica fume and low calcium fly ash improves the performance of concrete; with fly ash the samples were continuously refining

Tablica 14 / Table 14

ŁADUNEK PRZECHODZĄCY PRZEZ PRÓBKĘ – PRZEPUSZCZALNOŚĆ JONÓW CHLORKOWYCH

CHARGE PASSED THROUGH SAMPLES – CHLORIDE IONS PENETRABILITY

Charge passed [Coulombs] Ładunek przechodzący przez próbkę [kulomby]	>4000	2000-4000	1000-2000	100-1000	<100
Chloride ion penetrability Przepuszczalność jonów chlorkowych	High Duża [H]	Moderate Średnia [M]	Low Mała [L]	Very low Bardzo mała [VL]	Negligible Znikoma [N]

PRZYSPIESZONA METODA BADANIA PRZEPUSZCZALNOŚCI CHLORKÓW W BETONACH BEZ I Z DODATKIEM MIESZANKI TRÓJSKŁADNIKOWEJ
RCPT RESULTS OF CONCRETES WITH TERNARY MIX OF ADDITIVES

Grade / Klasa	Mix / Mieszanka	Resistance of chloride-ion penetration [coulombs] Odporność na penetrację jonów chlorkowych [kulomby]	Remark / Oznaczenie
30MPa	Without additives Bez dodatków	3756	M
	With FA+SF+LS Z dodatkami*	1612	L
50MPa	Without additives Bez dodatków	3584	M
	With FA+SF+LS Z dodatkami*	1245	L
70MPa	Without additives Bez dodatków	3248	M
	With FA+SF+LS Z dodatkami*	945	VL

* trzy dodatki: popiół lotny, pył krzemionkowy i mleko wapienne/three additives: fly ash, silica fume and lime sludge

nie tylko poprawia wytrzymałość wczesną, ale także wpływa korzystnie na strukturę porów. Betony o dużej wytrzymałości zawierające dodatek trójskładnikowy, wykazują znacznie mniejszą przepuszczalność jonów chlorkowych w porównaniu do betonu średniej klasy i zwykłego betonu.

4. Wnioski

1. Ustalono korzystny dodatek popiołu lotnego, pyłu krzemionkowego i mleka wapiennego zastępujących cement, który wynosi odpowiednio 15%, 8% i 15%, dzięki czemu możliwe jest uzyskanie maksymalnej wytrzymałości na ściskanie, na rozciąganie i na zginanie betonu.
2. Bardzo dużą odporność na wnikanie jonów chlorkowych wykazuje beton, w którym trzy dodatki zastępują cement.
3. Głębokość migracji jonów chlorkowych była znacznie mniejsza w przypadku betonów z równoczesnym dodatkiem popiołu lotnego, pyłu krzemionkowego i mleka wapiennego niż w przypadku betonu bez dodatków.
4. Beton zawierający wszystkie trzy dodatki mineralne wykazywał nieco większą sorpcyjność w porównaniu do betonu z cementu portlandzkiego.
5. Beton o dużej wytrzymałości ma mniejszą sorpcyjność w porównaniu do betonu zwykłego zarówno w przypadku betonu z trzema dodatkami mineralnymi jak i betonu bez tych dodatków.
6. Uzyskane wyniki wskazują na innowacyjną możliwość zastępowania cementu w odpowiednich proporcjach materiałem odpadowym jakim jest mleko wapienne otrzymywane w produkcji papieru.

the properties as the concrete was maturing. In terms of durability, such blends are superior to Ordinary Portland cement concrete.

Concretes in which cement was replaced with additives, namely FA, SF and LS, decrease of permeability with time is observed. Probably this may be due to the change in the pore structure of concrete with active mineral additives. The large decrease in permeability is due to addition of silica fume which not only influence on early strength gaining of concrete but also decreases the macro-pores in concrete mix specimens.

In the ternary system, the chloride permeability is very low in high strength concrete, compared to concrete of medium and low strength.

4. Conclusions

1. The advantageous percentage of cement replacement by FA, SF and LS are 15%, 8% and 15% respectively for achieving maximum compressive, split tensile and flexural strengths was found.
2. Very high resistance to chloride ions penetration can be obtained with simultaneous cement replacement by three additives.
3. Chloride ions penetration depth of all concretes with the addition of FA, SF and LS replacing cement is considerably smaller than for OPC concrete.
4. The sorptivity of concrete from cement with three additives is a little higher than for traditional concrete.
5. Sorptivity is lower for concrete with high compressive strength compared to low strength concrete in both kinds of concrete i.e. from cement with mineral additives and of OPC.
6. From the results of this work the conclusion can be drawn that paper sludge can be the innovative supplementary cementitious material and can be used for production of concrete.

Literatura / References

1. M. V. Krishna Rao, P. Rathish Kumar, A study of temperature effect on strength and sorptivity of concretes made with alternate coarse aggregates, *Cement Wapno Beton*, **84**, 251 (2016).
2. A. A. Aliabdo, A. E. M. A. Elmoaty, E. M. Auda, Re-use of waste marble dust in the production of cement and concrete, *Constr. Build. Mat.*, **50**, 28-41 (2014).
3. ASTM, C. (1997). 1202. Rapid Chloride Permeability.
4. ASTM, C. (2004). 1585. Test methods for measurement of rate of absorption of water by hydraulic cement concretes.
5. H. Binici, H. Kaplan, S. Yilmaz, Influence of marble and limestone dusts as additives on some mechanical properties of concrete, *Scientific Research and Essays*, **2**, 9, 372 (2007).
6. A. Ergun, Effects of the usage of diatomite and waste marble powder as partial replacement of cement on the mechanical properties of concrete, *Constr. Build. Mat.*, **25**, 806 (2011).
7. M. Ghrici, S. Kenai, M. Said-Mansour, Mechanical properties and durability of mortar and concrete containing natural pozzolana and limestone blended cements, *Cem. Concr. Comp.*, **29**, 542 (2007).
8. IS 10262-2009, Concrete Mix Proportioning- Guidelines, Bureau of Indian Standards, New Delhi, India.
9. IS 12269-1987, Specifications for 53 grade ordinary Portland cement, Bureau of Indian Standards, New Delhi, India.
10. IS 383-1970 (Reaffirmed 2002), Specification for coarse and fine aggregates from natural sources for concrete, Bureau of Indian Standards, New Delhi, India.
11. IS 516-1959 (Reaffirmed 1999), Method of test for strength of concrete, Bureau of Indian Standards, New Delhi, India.
12. IS 457-1957 (Reaffirmed 2005), Code of practice for general construction of plain and reinforced concrete, Bureau of Indian Standards-New Delhi, India.
13. M. S. Khan, J. Prasad, H. Abbas, Effect of high temperature on high-volume fly ash concrete, *Arabian Journal for Science and Engineering*, **38**, 6, 1369 (2013).
14. M. Lenart, Impact assessment of lime additive and chemical admixtures on selected properties of mortars, *Procedia Engineering*, **57**, 687 (2013).
15. V. M. Malhotra, High-performance high-volume fly ash concrete, *Concr. Intern.*, **24**; 30 (2002).
16. B. S. Mohammed, O. C. Fang, Mechanical and durability properties of concretes containing paper-mill residuals and fly ash, *Constr. Build. Mat.*, **25**, 2, 717 (2011).
17. M. Singh, M. Garg, Cementitious binder from fly ash and other industrial wastes, *Cem. Concr. Res.*, **29**, 309 (1999).
18. M. Singh, M. Garg, Utilization of waste lime sludge as building materials, *J. of Scientific and Industrial Research*, **67**, 161 (2008).
19. J. H. Tay, K. Y. Show, The use of lime-blended sludge for production of cementitious material, *Water Environment Research*, **64**, 6 (1992).
20. G. C. Ulubeyli, R. Artir, Properties of Hardened Concrete Produced by Waste Marble Powder, *Procedia-Social and Behavioral Sciences*, **195**, 2181 (2015).
21. Z. Wang, X. Si-fa, W. Guo-cai, Study of early strength and shrinkage properties of cement or lime solidified soil, *Energy Procedia*, **16**, 302 (2012).
22. S. Yan, K. Sagoe-Crentsil, Properties of wastepaper sludge in geopolymer mortars for masonry applications, *J. of Environmental Management*, **112**, 27 (2012).