

Badanie właściwości mechanicznych betonu zawierającego odpady z przemysłu papierniczego – szlam wapienny zastępujący częściowo cement

Investigation on Mechanical Properties of Concrete by Using Paper Industry Waste – Lime Sludge as a Replacement for Cement

Słowa kluczowe: odpad z przemysłu papierniczego, szlam wapienny zastępujący cement, właściwości szlamu wapiennego

Keywords: Supplementary cementitious materials, Lime sludge, Mechanical properties

1. Wprowadzenie

Przemysł papierniczy jest jednym z kluczowych gałęzi przemysłowych przyczyniających się do rozwoju indyjskiej gospodarki. W Indiach działa 759 fabryk papieru o wydajności 12,7 miliona ton i zużyciu na poziomie 11 milionów ton, co daje 9,3 kg per capita. Prognozuje się, że zapotrzebowanie na papier do roku 2025 zwiększy się do 24 milionów ton. Około 550 fabryk w Indiach wykorzystuje makulaturę jako główne źródło włókien do produkcji papieru, tektury i papieru gazetowego. Aby uzyskać papier dobrej jakości odzyskiwanie odpadów papierniczych można przeprowadzić tylko kilka razy, co przyczynia się do powstawania dużej ilości odpadów stałych. Odpady stałe wytworzone w jednej z fabryk papieru, ITC Badrachalam opisano w punkcie 1.1.

1.1. Odpady stałe z przemysłu papierniczego

Stale odpady wytwarzane przez ITC Bhadrachalam przy produkcji papieru można ogólnie podzielić na dwa rodzaje: odpady palne -

1. Introduction

The pulp and paper industry is one of the key industrial sectors contributing to the Indian economy. There are 759 paper mills in India with an operating capacity of 12.7 million tonnes and consumption at 11 million tonnes with 9.3 kg per capita consumption of paper. Projected demand for paper by 2025 is 24 million tonnes. About 550 mills in India use waste paper (recycling) as primary fibre source for paper, paperboard and newsprint production. 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

1.1. Solid waste from paper industry

The solid wastes generated in ITC Bhadrachalam while manufacturing paper are classified generally into two categories i.e. combustible (organic) and non-combustible wastes (inorganic) is shown in Table 2 and quantity of wastes generated is shown in Table 3 (1).

Tablica 1 / Table 1

ROZWÓJ PRODUKCJI PAPIERU W INDIACH (1)

GROWTH OF PAPER MILLS IN INDIA (1)

| Year/ Rok | No of Units Liczba fabryk | Installed capacity Wydajność maksymalna, mln ton | Production Produkcja, mln ton | Capacity Utilization Wykorzystanie mocy produkcyjnej, (%) | Perceptia Consumption Zużycie na osobę, kg |
|--------------|------------------------------|--|-------------------------------------|--|--|
| 1950 | 17 | 0.13 | 0.11 | 85 | 0.9 |
| 1970 | 57 | 0.77 | 0.75 | 99 | 1.9 |
| 1990 | 325 | 3.3 | 2.43 | 62 | 3.6 |
| 2000 | 380 | 3.94 | 4.87 | 99 | 5.5 |
| 2006 | 660 | 8.5 | 6.8 | 80 | 6.7 |
| 2007 | 667 | 8.5 | 8.3 | 100 | 8.3 |
| 2010 | 759 | 12.7 | 10.11 | 80 | 9.3 |

Tablica 2 / Table 2

GŁÓWNE ŹRÓDŁA PAPIERNICZYCH ODPADÓW STAŁYCH

THE MAJOR SOURCES OF SOLID WASTE GENERATED

| Sources / Źródła | Type / Rodzaj | Wastes / Odpady |
|---|---|--|
| Raw material preparation , Paper Machine, ETP* Przygotowanie surowców, maszyna papiernicza, oczyszczalnia ścieków | Combustible Wastes [Organic] Odpady palne [organiczne] | Straw and agro waste dust, pith, fibrous sludge, primary and secondary sludge Słoma i pyły rolnicze, łodygi, szlam z włóknami, szlam pierwotny i wtórny |
| Bleach liquor preparation plant, steam boiler/ Instalacja przygotowywania wybielaczy, kocioł parowy | Non Combustible Wastes [Inorganic] Odpady niepalne [nieorganiczne] | Lime sludge, Fly ash and Cinder Szlam wapienny, popiół lotny i żużel |

* Effluent Treatment Plant/Oczyszczalnia ścieków

organiczne i niepalne - nieorganiczne, co przedstawiono w tablicy 2, a ilość powstających odpadów w tablicy 3.

1.2. Potrzeba utylizacji odpadu wapiennego

Beton jest szeroko stosowanym materiałem konstrukcyjnym w budownictwie (1,2). Ogólnie rzecz biorąc, jakość surowców pochodzących ze złóż naturalnych można kontrolować lepiej niż jakość materiałów pochodzących z odzysku odpadów. Jednak stosowanie odpadów staje się coraz bardziej opłacalne gdyż naturalne surowce stają się coraz droższe i trudno dostępne, a koszty przetworzenia gruzu budowlanego i innych odpadów rosną. Produkcja papieru generalnie wiąże się z dużą ilością odpadów stałych. Aby jakość papieru utrzymać na odpowiednim poziomie, zużyty papier można poddawać procesowi odzyskiwania ograniczoną ilość razy, co przyczynia się do powstawania dużej ilości odpadów stałych. Oznacza to, że połamane, złej jakości włókna papierowe trzeba oddzielić i usunąć z osadem ściekowym. Taki osad z produkcji papieru każdego roku zajmuje duże powierzchnie składowisk odpadów, a także przyczynia się do poważnych problemów związanych z zanieczyszczeniem powietrza. Aby ograniczyć problemy związane z usuwaniem odpadów, powstawaniem zanieczyszczeń powietrza, ważne jest opracowanie technologii wykorzystania odpadów z przemysłu papierniczego do produkcji materiałów budowlanych

1.2. Need for lime sludge utilization

Concrete is widely used as a structural material in building construction (2,3). 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. Paper making generally produces a large amount of solid waste. Recycling of paper fibers can be done only for a limited number of times to make a good quality paper, which produces a large amount of solid waste. It means that the broken, low-quality paper fibers are separated out to become waste sludge. This paper mill sludge consumes a large percentage of local landfill space every year and also contributes to serious air pollution problems. To reduce disposal and pollution problems emanating from these industrial wastes, it is most essential to develop profitable building materials from them (4,5).

The replacement of Portland cement with lime sludge also reduces the greenhouse linked with the production of Portland cement because one ton of this binder is causing the emission of approximately 0.8 ton CO₂. Since the worldwide production of Portland cement is expected to reach nearly 2.1 billion tons by 2020, replacement of 20% of lime sludge could dramatically reduce the

Tablica 3 / Table 3

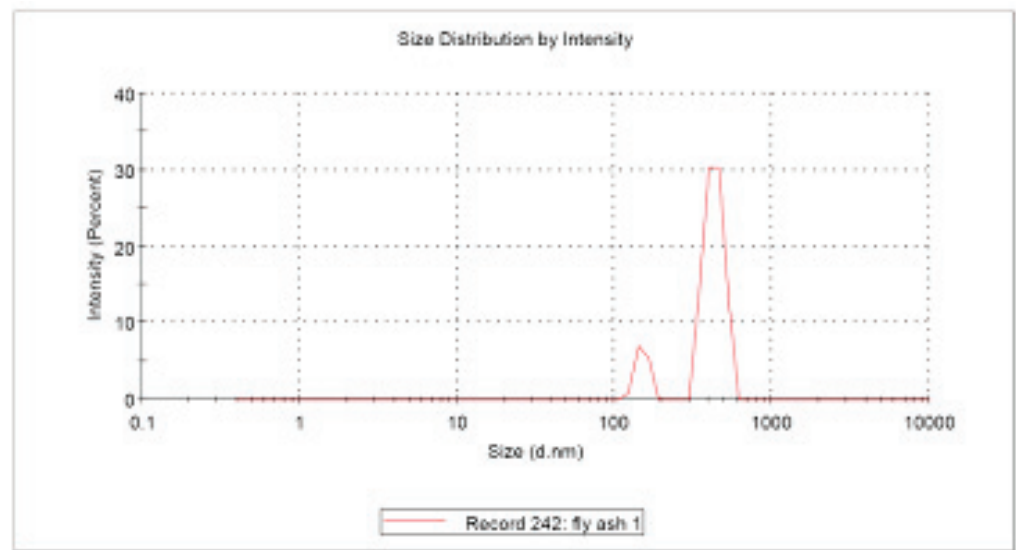
ILOŚĆ WYTWARZANYCH ODPADÓW STAŁYCH

THE QUANTITY OF SOLID WASTE GENERATED

| S.No. L. p. | Solid waste/ Odpady stałe | Quantity, kg/t of Paper/ Ilość, kg/tonę papieru, |
|----------------|---|---|
| 1 | Raw material preparation rejects [bagasse pith, straw dust etc.] Odpady z przygotowania surowców [łodygi trzciny cukrowej, pyły z siana i słomy, etc.] | 45-480 |
| 2 | Process rejects / Produkty wybrakowane | 20-100 |
| 3 | Lime sludge / Szlam wapienny | 35-65 |
| 4 | ETP* sludge / Szlam z oczyszczalni ścieków | 35-180 |
| 5 | Cinder/fly ash / Żużle i popioły lotne | 50-330 |

* Effluent Treatment Plant/Oczyszczalnia ścieków

(3,4). Częściowe zastąpienie cementu portlandzkiego przez szlam wapienny wywołuje również zmniejszenie emisji dwutlenku węgla, ponieważ produkcja jednej tony cementu portlandzkiego wiąże się z powstawaniem około 0,8 tony CO₂. Szacuje się, że do roku 2020 światowa produkcja cementu portlandzkiego osiągnie poziom 2,1 miliarda ton, w związku z tym zastąpienie 20% cementu szlamem wapiennym może radykalnie zmniejszyć globalną emisję dwutlenku węgla (5). W pracy zbadano możliwość wykorzystania osadu jako dodatku mineralnego do betonu.



Rys. 1. Rozkład wielkości cząstek w szlamie wapiennym

Fig. 1. Particle size distribution of lime sludge

2. Badania wstępne

2.1. Analiza rozkładu wielkości cząstek szlamu

Rozkład wielkości cząstek szlamu wapiennego oznaczono w zawiesinie wodnej, przy użyciu laserowego miernika. Jak pokazano na rysunku 1, średnia wielkość cząstek w szlamie wapiennym wynosi około 3 μm.

2.2. Obserwacje mikroskopowe

Z przeprowadzonych obserwacji mikroskopowych [rysunek 2] wynika, że szlam wapienny składa się z włókien celulozowych. Zawartość wapnia, w badanym szlamie wapiennym, jest bardzo duża, natomiast krzemionki bardzo mała.

2.3. Skład i właściwości szlamu wapiennego

Skład i właściwości szlamu wapiennego przedstawiono w tablicy 4

3. Skład mieszanek betonowych

Mieszanki betonowe klasy M25 i M35 zaprojektowano zgodnie z normą IS 10262: 2009 (5) i przygotowano z nich próbki do badań. Składy mieszanek przedstawiono w tablicach 5 i 6.

4. Materiały

W badaniach zastosowano następujące materiały:

Cement

Stosowano cement portlandzki klasy 53 zgodny z normą IS: 12269 (6), o gęstości 3,15 g/cm³.

global carbon emissions (5). In the present study usage of sludge as a supplementary cementitious material in concrete is proposed.

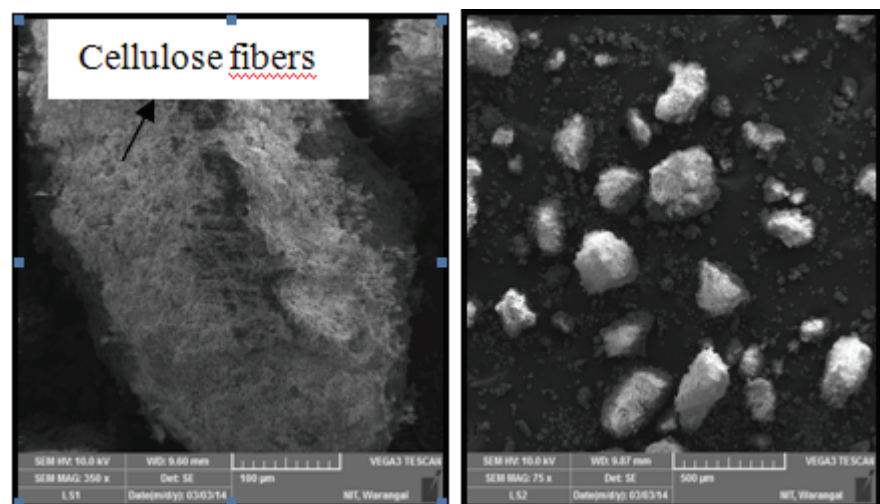
2. Preliminary tests

2.1. Particle size analyse

The particles size distribution of lime sludge was determined in water suspension using laser as analyser. The result is presented in Fig.1. From the above graph it has been observed that for lime sludge, the average size of the particles is about 3 microns.

2.2. SEM and EDX results

Small amount of cement samples is required (around 0.5g to 1.0g) to prepare a thin tablet with the help of hydraulic press. This helps to generate a very smooth surface which is required to get undistorted SEM image or micrograph.



Rys. 2. Mikrofotografie szlamu wapiennego

Fig. 2. SEM images of lime sludge

Tablica 4 / Table 4

ANALIZA CHEMICZNA I WŁAŚCIWOŚCI SZLAMU WAPIENNEGO

CHEMICAL ANALYSIS AND PROPERTIES OF LIME SLUDGE

| Składnik / Constituent | Content / Zawartość, % | Property / Właściwość | |
|--------------------------------|------------------------|--|------------------------|
| CaO | 40.63 | Specific gravity / Gęstość | 1.98 g/cm ³ |
| SiO ₂ | 0.58 | Standard consistency / Konsystencja normowa | 32% |
| Al ₂ O ₃ | 0.35 | Initial setting time / Początek czasu wiązania | 42 min |
| Fe ₂ O ₃ | 1.53 | Final setting time / Koniec czasu wiązania | 780 min |
| MgO | 0.67 | | |

Początek czasu wiązania cementu wynosił 30 minut.

Kruszywo drobne

Wykorzystano piasek rzeczny, strefy II według normy IS: 383 (7), o gęstości 2,62 g/cm³ oraz o wskaźniku mialkości 3.

Kruszywo grube

Zastosowano kruszywo grube zgodne z normą IS: 383 (7). 60% zastosowanego kruszywa stanowiła frakcja 10-20 mm, a 40% frakcja 10-4,75 mm.

Woda

Do badań wykorzystano wodę pitną, zgodną z normą IS: 456-2000.

4.1. Rodzaje próbek

Z mieszanek betonu M25 i M35 przygotowano próbki walcowe, sześciennie i belki. W betonie zastępowano część cementu szlammem wapiennym, a mianowicie 10%, 20% i 30%.

- kostki:** pomiary wytrzymałości na ściskanie wykonywano na próbkach sześciennych, o wymiarach 100 mm × 100 mm × 100 mm.
- walce:** wytrzymałość na zginanie przy rozłupywaniu badano na walcach o średnicy 150 mm i wysokości 300 mm.
- belki:** wytrzymałości na zginanie przeprowadzono na belkach, o wymiarach: 500 mm x 100 mm x 100 mm.

4. Właściwości mechaniczne**4.1. Wytrzymałość na ściskanie**

Wytrzymałość na ściskanie badano zgodnie z normą IS 516 (8), na próbkach z mieszanek M25 i M35 o różnej zawartości szlamu wapiennego. Wyniki po 7 i 28 dniach przedstawiono w tablicach 7 i 8 oraz na wykresach – rysunki 3-6.

W przypadku betonu M25 wytrzymałość na ściskanie po 7 dniach twardnienia zwiększyła się, zarówno w przypadku 10% jak i 20% zastąpienia cementu szlammem wapiennym. W przypadku zastąpienia 30% cementu, wytrzymałość zmniejszyła się. Dla betonu, w którym 10% cementu zastąpiono szlammem, wytrzymałość zwiększyła się o około 13%.

Tablica 5 / Table 5

SKŁAD MIESZANKI BETONU M25

MIX PROPORTION OF M25

| Mix proportion Skład | Water Woda, kg/m ³ | Cement, kg/m ³ | Fine aggregate Kruszywo drobne, kg/m ³ | Coarse aggregate Kruszywo grube, kg/m ³ |
|--|-------------------------------------|------------------------------|--|--|
| By mass Masowo, kg | 191.6 | 365 | 585.8 | 1162.85 |
| By volume Objętościowo, m ³ | 0.525 | 1 | 1.6 | 3.18 |

Tablica 6 / Table 6

SKŁAD MIESZANKI BETONU M35

MIX PROPORTION OF M35

| Mix proportion Skład | Water Woda, kg/m ³ | Cement, kg/m ³ | Fine aggregate Kruszywo drobne, kg/m ³ | Coarse aggregate Kruszywo grube, kg/m ³ |
|---|-------------------------------------|------------------------------|--|---|
| By mass Masowo, kg | 191.6 | 425.73 | 543 | 1154 |
| By volume Objętościowo, m ³ | 0.45 | 1 | 1.27 | 2.7 |

From Fig. 2. it is evident that lime sludge consists of cellulose fibers. Calcium content in lime sludge is very high. Silica content is very low.

2.3. Composition and properties of lime sludge

The composition and properties of lime sludge are shown in Table 4.

3. Mix proportions

A mix of M25 and M35 grade concrete was designed as per IS 10262:2009 (6) and the same was used to prepare the test sam-

Tablica 7 / Table 7

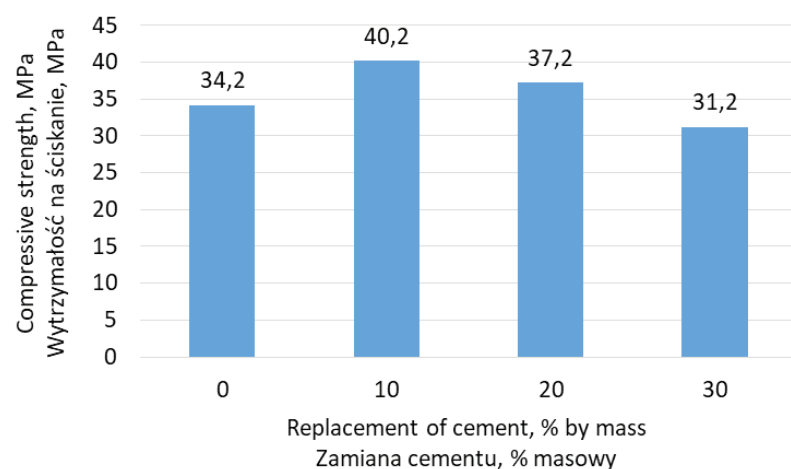
WYTRZYMAŁOŚĆ NA ŚCISKANIE PRÓBEK Z BETONU M25

COMPRESSIVE STRENGTH OF M25 GRADE CONCRETE

| LS Zawartość szlamu, % | After 7days / Po 7 dniach | | | After 28 days / Po 28 dniach | | |
|---------------------------|---------------------------|-------------------|-----------------------------------|------------------------------|-------------------|------------------------------------|
| | Load Obciążenie, kN | N/mm ² | Average Średnia N/mm ² | Load Obciążenie, kN | N/mm ² | Average Średnia, N/mm ² |
| 0% | 165 | 16.5 | 15.83 | 330 | 33 | 34.17 |
| | 150 | 15 | | 340 | 34 | |
| | 160 | 16 | | 355 | 35.5 | |
| 10% | 180 | 18 | 17.83 | 405 | 40.5 | 40.17 |
| | 170 | 17 | | 395 | 39.5 | |
| | 185 | 18.5 | | 405 | 40.5 | |
| 20% | 165 | 16.5 | 16.33 | 345 | 34.5 | 37.17 |
| | 165 | 16.5 | | 390 | 39 | |
| | 160 | 16 | | 380 | 38 | |
| 30% | 165 | 16.5 | 15.83 | 315 | 31.5 | 31.17 |
| | 150 | 15 | | 320 | 32 | |
| | 160 | 16 | | 300 | 30 | |

W przypadku betonu M25 z cementu, którego 20% zastąpiono szlamem wapiennym ma po 28 dniach twardnienia wytrzymałość na ściskanie większą od próbki wzorcowej. Zastąpienie 30% cementu już powoduje zmniejszenie wytrzymałości w stosunku do betonu wzorcowego, jednak nawet w tym przypadku jest ono niewielkie. Największą wytrzymałość uzyskuje się przy zastąpieniu 10% cementu szlamem wapiennym. W przypadku zastąpienia 10% i 20% cementu zwiększenie wytrzymałości wynosi odpowiednio około 18% i około 9%.

Beton M35 z cementu, w którym zastąpiono 10% i 20% szlamem wapiennym, wytrzymałość na ściskanie kostek po 7 dniach zwiększyła się, względem próbek wzorcowych. Natomiast zastąpienie 30% dało mniejszą wytrzymałość od próbek wzorcowych. W przypadku zastąpienia 10% cementu szlamem zwiększenie wytrzymałości wyniosło 58%.



Rys. 4. Wytrzymałość na ściskanie betonu M25 po 28 dniach dojrzewania

Fig. 4. Variation of compressive strength for M25 grade concrete at 28 days

ples. The design mix proportions are shown in the Tables 5 and 6.

3.1. Materials

The materials used in this investigation are the following

Cement

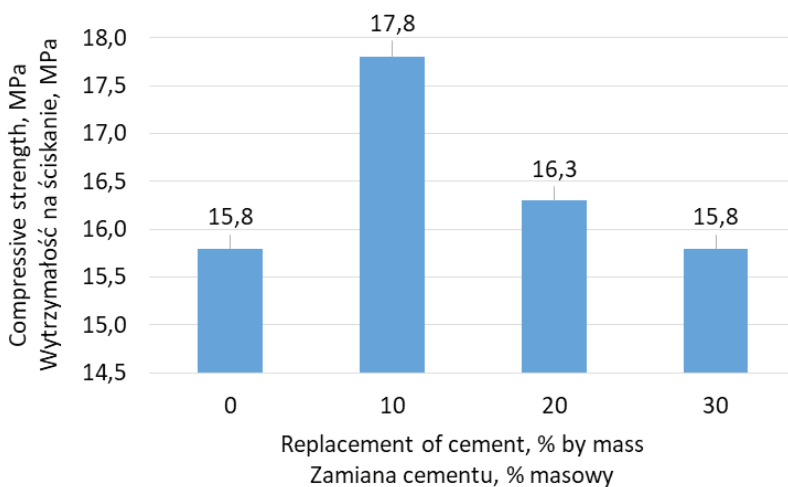
The cement used in present work is OPC 53grade cement confirming to IS:12269 (7). The specific gravity of cement is 3.15 g/cm³. The initial setting time is 30 min.

Fine aggregate

River sand confirming to IS 383, zone II sand has been used. Specific gravity is 2.62 g/cm³ and fineness modulus is 2.95.

Coarse aggregate

The coarse aggregate fraction 60% passing through 20 mm, retained on 10 mm and 40% passing through



Rys. 3. Wytrzymałość na ściskanie betonu M25 po 7 dniach twardnienia

Fig. 3. Variation of compressive strength for M25 grade concrete after 7 days

10 mm and retained on 4.75 mm are used. The Coarse aggregates used was conforming to IS: 383(8).

Water

Potable water is used in this investigation as per IS:456-2000.

3.2. Type of samples

Different types of specimens like cubes, cylinders and prisms are cast from M25 and M35 grade concrete by replacing cement with lime sludge at different percentages such as 10%, 20% and 30%.

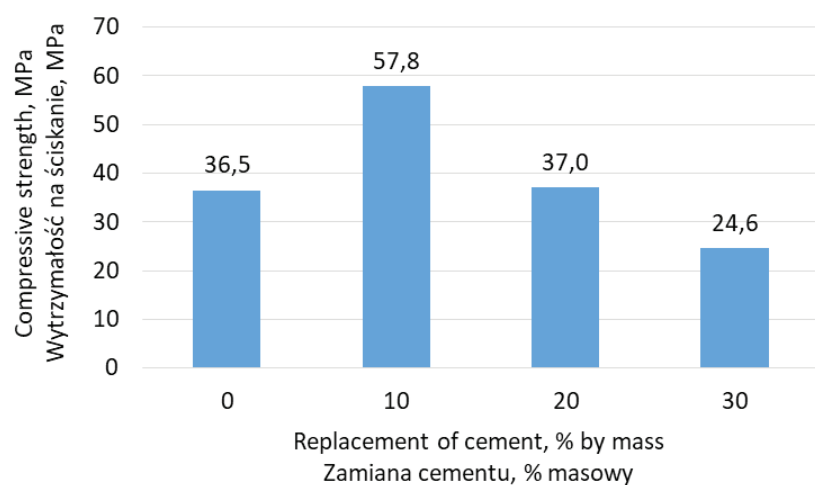
a) **Cubes:** Standard cube of size 100 × 100 × 100 mm were cast and these specimens were tested in direct compression for compressive strength measurement.

Tablica 8 / Table 8

WYTRZYMAŁOŚĆ NA ŚCISKANIE PRÓBEK BETONU M35

COMPRESSIVE STRENGTH OF M35 GRADE CONCRETE

| LS Zawartość szlamu, % | After 7days / 7 Po dniach | | | After 28 days / Po 28 dniach | | |
|---------------------------|---------------------------|-------------------|------------------------------------|------------------------------|-------------------|------------------------------------|
| | Load Obciążenie, kN | N/mm ² | Average Średnia, N/mm ² | Load Obciążenie, kN | N/mm ² | Average Średnia, N/mm ² |
| 0% | 403.1 | 40.31 | 36.54 | 420 | 42 | 42.17 |
| | 330.6 | 33.06 | | 430 | 43 | |
| | 362.4 | 36.24 | | 415 | 41.5 | |
| 10% | 629 | 62.9 | 57.77 | 445 | 44.5 | 48.17 |
| | 552 | 55.2 | | 520 | 52 | |
| | 552 | 55.2 | | 480 | 48 | |
| 20% | 380.5 | 38.05 | 36.99 | 440 | 44 | 44.00 |
| | 371.4 | 37.14 | | 420 | 42 | |
| | 357.8 | 35.78 | | 400 | 40 | |
| 30% | 185.7 | 18.57 | 24.63 | 410 | 41 | 41.17 |
| | 303.5 | 30.35 | | 400 | 40 | |
| | 249.7 | 24.97 | | 425 | 42.5 | |



Rys. 5. Wytrzymałość na ściskanie betonu M35 po 7 dniach

Fig. 5. Variation of compressive strength for M35 grade concrete after 7 days

W przypadku tego samego betonu M35 po 28 dniach dojrzewania, zastąpienie 10% i 20% cementu szlalem wapiennym zapewnia większą wytrzymałość na ściskanie od próbek wzorcowych. Natomiast zastąpienie 30% daje mniejszą, jednak również w tym przypadku zmniejszenie wytrzymałości jest niewielkie. Największą wytrzymałość osiągają próbki betonu ze spoiwa, w którym 10% cementu zastąpiono szlalem wapiennym. W przypadkach zastąpienia 10% i 20% cementu zwiększenie wytrzymałości wynosi odpowiednio 14% i około 4%.

Uzyskane wyniki badań betonów M25 i M35 wykazały, że zastąpienie cementu szlalem wapiennym nie przekraczające 20%, zapewnia wytrzymałość na ściskanie większą od próbek z betonu wzorcowego. Podobne wyniki uzyskali Singh i Garg (9) oraz Tay i Show (10).

b) **Cylinders:** Standard cylinders of size 150 mm diameter and 300 mm height were cast to determine the split tensile strength of concrete.

c) **Prisms:** Standard prisms of size 500 x 100 x 100 mm were used to determine the flexural strength of concrete.

4. Mechanical properties

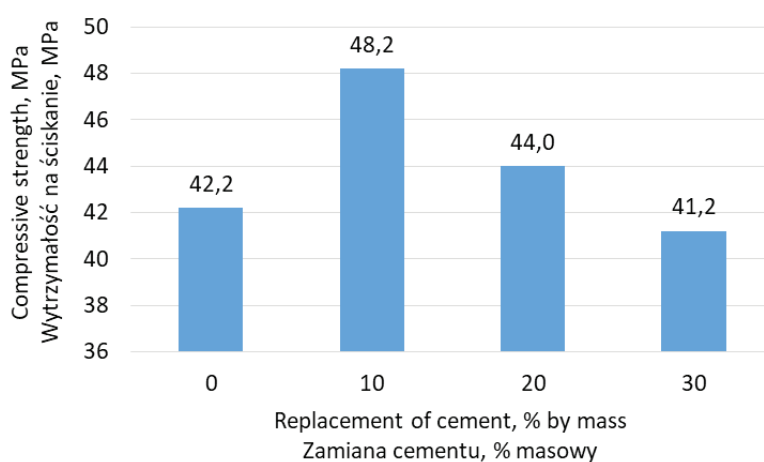
4.1. Compressive strength

Compressive strength test was conducted on cubes under direct compression using compressive testing machine as per IS 516 (9). Compressive strength of M25 and M35 grade concrete with different percentages of lime sludge were obtained. These compressive strength results were shown in Tables 7 and 8. The variation in compressive strength for both 7days and 28 days were shown in Figs.3, 4, 5 and 6.

For M25 grade concrete it was found that the 7 days compressive strength of cubes increased for both LS 10%, 20% and then it decreased. For LS 10%, increase in strength is about 13%.

For M25 grade concrete it has been found that the 28 days compressive strength increased for replacement of cement with LS till 20% compared to ordinary concrete without lime sludge and then it decreased for 30%. Even for 30% replacement the decrease of strength is very low. Maximum strength is obtained for 10% replacement. For LS 10% and LS 20% increase in strength is about 18% and about 9% respectively.

For M35 grade of concrete it has been found that the 7days compressive strength of cubes increased for cement replacement by LS 10%, 20% and then it decreased. For LS 10%, increase in strength is 58%.



Rys. 6. Wytrzymałość na ściskanie betonu M35 po 28 dniach

Fig. 6. Variation of compressive strength for M35 grade concrete after 28 days

WYTRZYMAŁOŚĆ NA ROZCIĄGANIE PRZY ROZŁUPYWANIU BETONU M25
SPLIT TENSILE STRENGTH OF M25 GRADE CONCRETE

| LS Zawartość szlamu, % | After 7 days / 7 Po dniach | | | After 28 days / Po 28 dniach | | |
|---------------------------------|----------------------------|-------------------|--|------------------------------|-------------------|--|
| | Load Obciążenie, kN | N/mm ² | Average Średnia, N/mm ² | Load Obciążenie, kN | N/mm ² | Average Średnia, N/mm ² |
| 0% | 145 | 2.1 | 2.05 | 150 | 2.12 | 2.12 |
| | 150 | 2.1 | | 155 | 2.19 | |
| | 140 | 2.0 | | 145 | 2.05 | |
| 10% | 165 | 2.3 | 2.31 | 165 | 2.34 | 2.43 |
| | 165 | 2.3 | | 180 | 2.55 | |
| | 160 | 2.3 | | 170 | 2.41 | |
| 20% | 165 | 2.3 | 2.26 | 155 | 2.19 | 2.12 |
| | 160 | 2.3 | | 140 | 1.98 | |
| | 155 | 2.2 | | 155 | 2.19 | |
| 30% | 145 | 2.1 | 1.96 | 135 | 1.91 | 1.96 |
| | 140 | 2.0 | | 140 | 1.98 | |
| | 130 | 1.8 | | 140 | 1.98 | |

4.2. Wytrzymałość na rozciąganie przy rozłupywaniu

Wytrzymałość na rozciąganie przy rozłupywaniu betonów M25 i M35 po 7 i 28 dniach dojrzewania przedstawiono w tablicach 9 i 10 oraz na rysunkach 7 – 10.

Wytrzymałość na rozciąganie przy rozłupywaniu próbek betonu M25 po 7 dniach dojrzewania, przy zastąpieniu 20% cementu szlamem wapiennym, jest większa od betonu wzorcowego. Natomiast zastąpienie 30% cementu daje mniejszą wytrzymałość od betonu wzorcowego. Zastąpienie szlamem wapiennym 10% i 20% cementu zapewnia zwiększenie wytrzymałości odpowiednio o 13% i 10%.

Po 28 dniach dojrzewania betonu M25 największą wytrzymałość na rozciąganie przy rozłupywaniu miał beton, w którym 10% cementu zastąpiono szlamem wapiennym. Była ona o około 15% większa niż wytrzymałość betonu wzorcowego. Beton ze spoiwa, w którym 30% cementu zastąpiono szlamem miał wytrzymałość mniejszą od betonu wzorcowego.

W przypadku mieszanki betonowej M35, po 7 dniach dojrzewania, zastąpienie cementu szlamem wapiennym przyniosło korzystne zmiany wytrzymałości tylko dla próbek, w których zamiana wynosiła 10%. Próbki, w których zastąpienie cementu wynosiło 20% i 30% wykazały wytrzymałość niższą od wytrzymałości betonu wzorcowego. W przypadku zastąpienia 10% zwiększenie wytrzymałości na zginanie przy rozłupywaniu wynosi około 4%.

Próbki z mieszanki betonowej M35 po 28 dniach dojrzewania wykazały zwiększenie wytrzymałości na rozłupywanie, względem próbek wzorcowych, w przypadku zastąpienia 10% i 20% cementu szlamem wapiennym. Wytrzymałość próbki, w której 30% cementu zamieniono szlamem była mniejsza od wytrzymałości próbki wzorco-

For M35 grade concrete, from the above graph it has been observed that the 28days compressive strength of cubes increased for replacing cement with LS till 20% and then it decreased for 30%. Even for 30% replacement the decrease of strength is very less. In case of LS maximum strength is obtained for 10% replacement. For LS 10% and LS 20% increase in strength is about 14% and about 4% respectively.

From the above discussions, for M25 and M35 grades concrete it has been noticed that up to replacement of 20% of cement with lime sludge compressive strength increased than that of normal concrete, similar observation made (9,10).

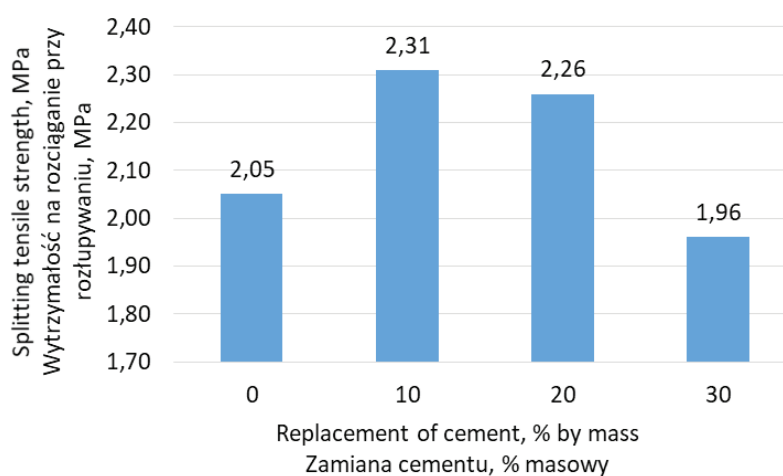
4.2. Split tensile strength

The splitting tensile strength was conducted on cylinders and the results obtained were shown in Tables 9 and 10. The variation in split tensile strength for M25 and M35 grade concretes at both 7 days and 28 days were shown in Figs. 7, 8, 9, and 10.

For M25 grade concrete it has been observed that the 7days split tensile strength of cylinders increased for 20% replacement of cement by LS and then it decreased for 30% replacement. For LS 10% and LS 20% increase in strength is about 13% and 10% respectively.

For M25 grade concrete the following split tensile strength was measured. After 28 days the split tensile strength of cylinders increased for 10% of cement replacement by LS and then it decreased for 30% replacement. For LS 10% and LS 20% increase in strength is about 15%.

In the case of M35 grade concrete cement replacement by LS gives the following results. The 7 days split tensile strength of cylinders is increased for 10% of LS and then decreased for 20% and 30% replacements. For LS 10%, increase in strength is about 4%.



Rys. 7. Wytrzymałość na rozciąganie przy rozłupywaniu betonu M25 po 7 dniach

Fig. 7. Variation of split tensile strength for M25 grade concrete after 7 days

wej. W przypadku próbek w których 10% i 20% cementu zastąpiono szlalem zwiększenie wytrzymałości na rozłupywanie wyniosło odpowiednio 13% i 5%.

Wyniki badań próbek z betonów M25 i M35 wykazały, że zastąpienie do 20% cementu szlalem wapiennym daje większą wytrzymałość na rozciąganie przy rozłupywaniu w porównaniu do betonu wzorcowego.

4.3. Wytrzymałość na zginanie

Badanie wytrzymałości na zginanie wykonano na belkach, w prasie o zakresie do 1000 kN. Próbkę zginano przy obciążeniu dwupunktowym. Wyniki wytrzymałości na zginanie zamieszczono w tablicach 11 i 12 oraz na rysunkach 11 i 12.

Zastąpienie 10% i 20% cementu szlalem wapiennym w przypadku betonu M25 powoduje po 28 dniach twardnienia zwiększenie wytrzymałości na zginanie, w stosunku do próbek referencyjnych odpowiednio o 20% i 1%.

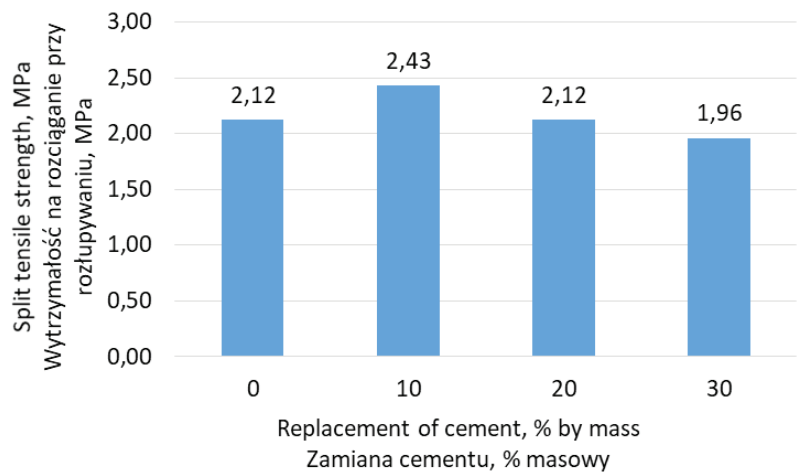
Zastąpienie 10% i 20% cementu szlalem wapiennym powoduje w przypadku betonu M35 zwiększenie wytrzymałości na zginanie po 28 dniach twardnienia odpowiednio o 25% i 12% w porównaniu z betonem wzorcowym.

Wyniki badań wykazały, że zarówno w przypadku betonu M25 jak i M35, zastąpienie do 20% cementu szlalem wapiennym powoduje wzrost wytrzymałości na zginanie, w stosunku do betonu wzorcowego.

5. Wnioski

Na podstawie uzyskanych wyników wyciągnąć można następujące wnioski:

- Średni wymiar cząstek szlamu wapiennego wynosi 2,9 μm . Szlam wapienny składa się z włókien celulozowych, a zawartość tlenu wapnia w szlamie wynosi około 41%.
- Wytrzymałość na ściskanie próbek betonów M25 i M35 wzrasta odpowiednio o maksymalnie 18% i 14% w przypadku zastąpienia do 20% cementu szlalem wapiennym.
- Wytrzymałość na zginanie przy rozłupywaniu próbek betonów M25 i M35 zwiększa się maksymalnie odpowiednio o 15% i 13% przy zastąpieniu do 20% cementu szlalem wapiennym
- Wytrzymałość na zginanie próbek betonów M25 i M35 zwiększa się maksymalnie odpowiednio o 20% i 25% przy zastąpieniu do 20% cementu szlalem wapiennym



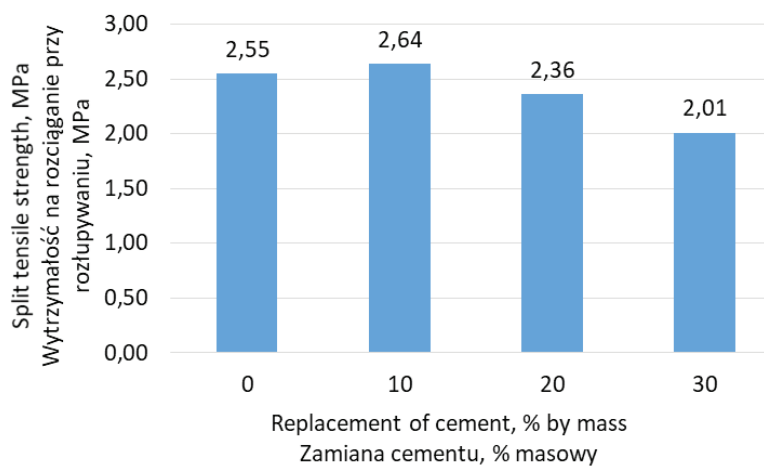
Rys. 8. Wytrzymałość na rozciąganie przy rozłupywaniu betonu M25 po 28 dniach

Fig. 8. Variation of split tensile strength for M25 grade concrete after 28 days

Tablica 10 / Table 10

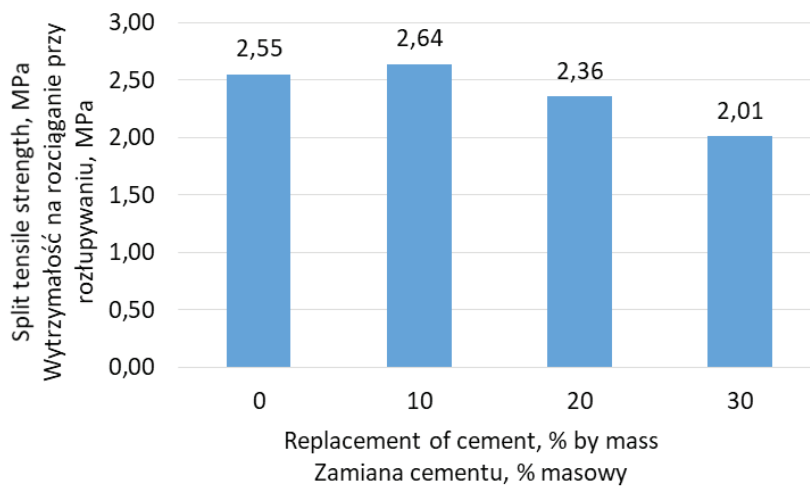
WYTRZYMAŁOŚĆ NA ROZCIĄGANIE PRZY ROZŁUPYWANIU BETONU M35
SPLIT TENSILE STRENGTH OF M35 GRADE CONCRETE

| LS Zawartość szlamu, % | After 7 days / Po 7 dniach | | | After 28 days / Po 28 dniach | | |
|---------------------------------|----------------------------|-------------------|---|------------------------------|-------------------|--|
| | Load Obciążenie, kN | N/mm ² | Average Średnia N/mm ² | Load Obciążenie, kN | N/mm ² | Average Średnia, N/mm ² |
| 0% | 180 | 2.5 | 2.55 | 185 | 2.62 | 2.52 |
| | 175 | 2.5 | | 180 | 2.55 | |
| | 185 | 2.6 | | 170 | 2.41 | |
| 10% | 180 | 2.5 | 2.64 | 195 | 2.76 | 2.85 |
| | 200 | 2.8 | | 210 | 2.97 | |
| | 180 | 2.5 | | 200 | 2.83 | |
| 20% | 175 | 2.5 | 2.36 | 180 | 2.55 | 2.64 |
| | 160 | 2.3 | | 200 | 2.83 | |
| | 165 | 2.3 | | 180 | 2.55 | |
| 30% | 150 | 2.1 | 2.01 | 155 | 2.19 | 2.29 |
| | 140 | 2.0 | | 165 | 2.34 | |
| | 135 | 1.9 | | 165 | 2.34 | |



Rys. 9. Wytrzymałość na rozciąganie przy rozłupywaniu betonu M35 po 7 dniach

Fig. 9. Variation of split tensile strength for M35 grade concrete after 7 days



Rys. 10. Wytrzymałość na rozciąganie przy rozłupywaniu betonu M35 po 28 dniach

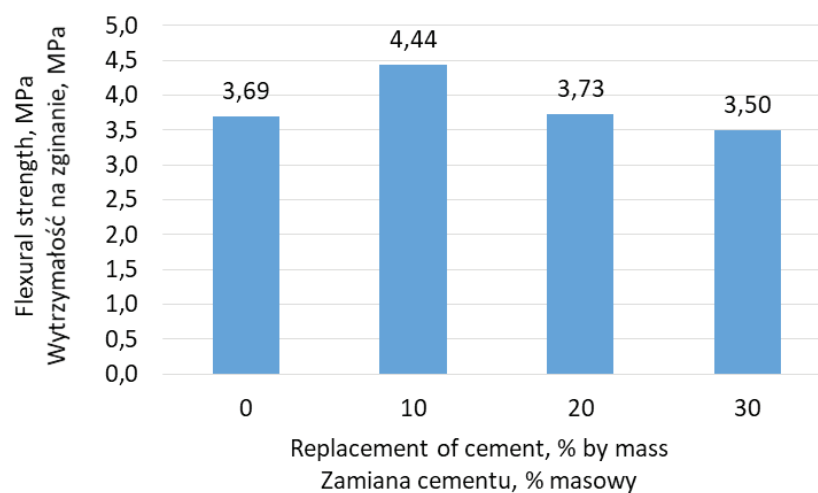
Fig. 10. Variation of split tensile strength for M35 grade concrete after 28 days

Tablica 11 / Table 11

WYTRZYMAŁOŚĆ NA ZGINANIE BETONU M25 PO 28 DNIACH

FLEXURAL STRENGTH OF M25 GRADE CONCRETE AT 28 DAYS

| LS Zawartość szlamu, % | Maximum load Maksymalne obciążenie, kN | Strength/ Wytrzymałość, N/mm ² | Average Średnia, N/mm ² |
|------------------------|--|---|------------------------------------|
| 0% | 9.81 | 3.92 | 3.69 |
| | 9.56 | 3.82 | |
| | 8.34 | 3.34 | |
| 10% | 12.6 | 5.04 | 4.44 |
| | 9.85 | 3.94 | |
| | 10.82 | 4.33 | |
| 20% | 10 | 4.00 | 3.73 |
| | 8.17 | 3.27 | |
| | 9.83 | 3.93 | |
| 30% | 8.49 | 3.40 | 3.50 |
| | 9.51 | 3.80 | |
| | 8.24 | 3.30 | |



Rys. 11. Wytrzymałość na zginanie betonu M25 po 28 dniach

Fig. 11. Variation of flexural strength for M25 grade concrete after 28 days

For M35 grade concrete, the 28 days split tensile strength is increased for 10%, 20% replacement of cement by LS and then decreased for 30% replacement. For LS 10% and 20% increase in strength is 13% and 5% respectively.

From the above discussions, for M25 and M35 grades concrete it has been noticed that up to 20% replacement of cement with lime sludge gives the higher split tensile strength, compared to ordinary concrete.

4.3. Flexural strength

The flexural strength test is conducted on prisms and were loaded under dynamic testing machine of 1000 kN capacity. The specimen was tested under two point loading. The flexural strength results were shown in Tables 11 and 12. The variation of flexural strength after 28 days of hardening were shown in Figs. 11 and 12.

For M25 grade concrete [Fig. 11] the 28 days flexural strength of prisms increased for up to 20% replacement of cement with LS and then it decreased for 30% replacement. For LS 10% and 20% addition the increase in strength is 20% and 1% respectively.

For M35 grade concrete the 28 days flexural strength of prisms increased up to 20% replacement of cement by LS and then it decreased for 30% replacement. For LS replacement of 10% and 20% increase in strength is 25% and 12% respectively.

From the above discussions, it has been noticed that up to the replacement of 20% of cement with lime sludge gives the higher flexural strength as that of normal concrete for both M25 and M35 grade concretes.

6. Conclusions

From the present investigation, following conclusions are drawn.

1. The average size of lime sludge particles is 2.88 microns. The lime sludge is composed of cellulose fibers and the lime content in sludge is about 41%.
2. Compressive strength is increased up to 18% and 14% for both M25 and M35 grade concretes respectively when the percentage of replacement of cement by lime sludge is up to 20% .
3. Split tensile strength is increased up to 15% and 13% for both M25 and M35 grades concrete respectively when the percentage of replacement of cement by lime sludge is increased up to 20%.
4. Flexural strength is increased up to 20% and 25% for both M25 and M35 grades concrete respectively

Tablica 12 / Table 12

WYTRZYMAŁOŚĆ NA ZGINANIE BETONU M35 PO 28 DNIACH

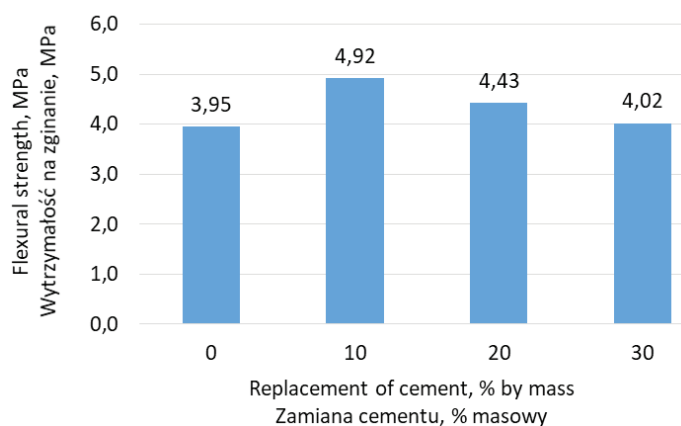
FLEXURAL STRENGTH OF M35 GRADE CONCRETE AFTER 28 DAYS

| LS Zawartość szlamu, % | Maximum load Maksymalne obciążenie, kN | Strength Wytrzymałość, N/mm ² | Average Średnia, N/mm ² |
|---------------------------------|---|--|--|
| 0% | 10.81 | 4.32 | 3.95 |
| | 9.24 | 3.70 | |
| | 9.58 | 3.83 | |
| 10% | 11.6 | 4.64 | 4.92 |
| | 12.76 | 5.10 | |
| | 12.54 | 5.02 | |
| 20% | 12.16 | 4.86 | 4.43 |
| | 10.18 | 4.07 | |
| | 10.86 | 4.34 | |
| 30% | 10.95 | 4.38 | 4.02 |
| | 9.36 | 3.74 | |
| | 9.84 | 3.94 | |

5. Stosując zastępowanie do 20% cementu szlamem wapiennym można uzyskać wytrzymałość co najmniej porównywalną z betonem wzorcowym lub nawet większą.
6. Wykorzystanie odpadów papierniczych w postaci szlamów wapiennych pozwoli zmniejszyć problemy z zagospodarowaniem odpadów przemysłowych, a także związane z zanieczyszczeniami.

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*, **83**, 239- 251 (2016).
2. G. Rutkowska, P. Wichowski, K. Świgoń, P.Sobieski, Properties of concrete with fly ash addition from sewage sludge thermal treatment, *Cement Wapno Beton*, **84** , 113-119 (2017).
3. F.S.Umrigar, J. Pitroda, L.B.Zala, Innovative use of paper industry waste (hypo sludge) in design mix concrete" *IJAET Vol. IV(I)*, 31-35 (2013).
4. 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**, 542-549 (2007).
5. IS 10262-2009, Concrete Mix Proportioning- Guidelines, Bureau of Indian Standards. New Delhi, India.
6. IS 12269-1987, Specifications for 53 grade ordinary Portland cement, Bureau of Indian Standards. New Delhi, India.
7. IS 383-1970 (Reaffirmed 2002), Specification for coarse and fine aggregates from natural sources for concrete, Bureau of Indian Standards. New Delhi, India.
8. IS 516-1959 (Reaffirmed 1999), Method of test for strength of concrete, Bureau of Indian Standards. New Delhi, India.
9. M. Singh, M. Garg, Cementitious binder from fly ash and other industrial wastes. *Cem. Concr. Res.*, **29**, 309-314 (1999)
10. J. H. Tay, K.Y. Show, The use of lime-blended sludge for production of cementitious material, *Water Environment Research*, **64**, 6-12 (1992).



Rys. 12. Wytrzymałość na zginanie betonu M35 po 28 dniach

Fig. 12. Variation of flexural strength for M35 grade concrete after 28 days

when the percentage of replacement of cement by lime sludge is increased up to 20% .

5. From the results of the present investigation, the paper industry waste [lime sludge] can be used to replace cement up to 20% to achieve the strength equal to or even higher than the ordinary concrete, without lime sludge addition.
6. Usage of lime sludge will avoid the problem of industrial waste disposal and pollution problem and helps to maintain sustainability.