

## Wpływ popiołu lotnego i popiołu z wytłoczyn z trzciny cukrowej na właściwości mechaniczne betonu lekkiego

### Effect of fly ash and bagasse ash on the mechanical properties of light weight concrete

M. Gunasekaran<sup>1,\*</sup>, T. Palanisamy<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Department of Civil Engineering, K.S.R.College of Engineering, Tiruchengode–638215, Tamilnadu, India

<sup>2</sup>Department of Civil Engineering, National Institute of Technology Karnataka (NITK), Surathkal, Mangalore – 575025, Karnataka, India

\*Corresponding author: M. Gunasekaran, e-mail: 1\*gunasanjay07@gmail.com

#### Streszczenie

Beton lekki jest ważną częścią technologii betonu. Zastosowanie dodatków mineralnych zastępujących kruszywa drobne, takich jak popiół lotny i popiół z wytłoczyny z trzciny cukrowej, pozwala na zmniejszenie zawartości cementu. Prezentowane badania miały na celu uzyskanie lekkiego betonu dzięki dodatkowi popiołu lotnego i popiołu z wytłoczyny z trzciny cukrowej, jako drobnego kruszywa. Wytrzymałość na ścislenie kostek, i walców oraz wytrzymałość na rozciąganie przy rozłupywaniu były badane po różnych okresach, aby znaleźć optymalny poziom wspomnianych dodatków mineralnych w betonie. Porównano wytrzymałość i ustalono optymalny dodatek popiołu lotnego i popiołu z wytłoczyny z trzciny cukrowej. Wytrzymałość na ścislenie walca i wytrzymałość na rozciąganie przy rozłupywaniu betonu lekkiego, uzyskano przy tych samych poziomach zastąpienia dodatków mineralnych po 28 dniach. Zaproponowano równania matematyczne pozwalające na obliczenie wytrzymałości na ścislenie i rozciąganie kostki oraz walca oraz te same właściwości, w zakresie typowej wytrzymałości.

**Słowa kluczowe:** beton, beton lekki, popiół lotny, popiół z wytłoczyny z trzciny cukrowej, wytrzymałość na ścislenie kostek i walców, wytrzymałość na rozciąganie przy rozłupywaniu

#### Summary

Light weight concrete is an important part in the concrete technology. The use of mineral additives in light-weight concrete, to replace fine aggregate with fly ash and bagasse ash, helps to reduce the cement content. The present investigation aims to meet the performance of light weight concrete, by adding fly ash and bagasse ash, as fine aggregate replacement additives. The strength properties such as cube compressive strength, cylinder compressive strength and split tensile strength were investigated after different ages, to find the optimum addition of mineral additives such as fly ash and bagasse ash, in concrete. The strengths were compared and the optimal replacement level of cement with fly ash and bagasse ash was found. The cylinder compressive strength and split tensile strength of light weight concrete were measured, at the same replacement levels of mineral additives, at the age of 28 days curing. The mathematical equations were proposed to achieve cube compressive and tensile strengths, cylinder compressive and tensile strength and cube compressive and cylinder compressive strengths, concerning typical strength.

**Keywords:** concrete, light weight concrete, fly ash, bagasse ash, cube compressive strength, cylinder compressive strength, split tensile strength

#### 1. Wprowadzenie

Współczesny przemysł budowlany stara się zmniejszyć obciążenie własne budynków, w celu opracowania efektywnych kosztowo konstrukcji (1). Rozwiązaniem pozwalającym na zmniejszenie obciążenia własnego jest beton lekki [BL], który opracowano

#### 1. Introduction

Recent construction industry intended to reduce the dead load of the building to develop cost effective construction (1). The instantaneous choice to reduce the dead load is light weight concrete [LWC] which has been created by introducing large air voids into

wprowadzając dużo pustek powietrznych do betonu cementowego, w celu wytworzenia porowatej matrycy. Pory powietrzne powstały chemicznie w wyniku reakcji proszku aluminiowego z wodorotlenkiem wapnia i innymi zasadami, uwalnianymi w procesie hydratacji cementu (3). Zawartość powietrza w betonie wynosi zazwyczaj 50 % lub nieco więcej, w stosunku do całkowitej objętości betonu, a wielkość pęcherzyków powietrza waha się od 0,1 do 1,5 mm.

W przypadku stosowania BL w prefabrykacjach, przy dodatku sproszkowanego aluminium do zaczynu, który jest zasadowy w przypadku cementu portlandzkiego lub wapna, uwalniany jest wodór (3). Stwierdza się, że lekki beton spieniony jest coraz częściej stosowany w budownictwie ze względu na niższe koszty, lekkość i łatwość obróbki (4). BL nazywany jest również betonem spienionym, który jest lekkim materiałem powstałym w wyniku uwięzienia lub wytworzenia małych pęcherzyków powietrza w matrycy cementu portlandzkiego, dzięki procesom mechanicznym lub reakcjom chemicznym.

W podstawowej formie beton spieniony jest mieszaniną piasku, cementu, wody i wstępnie uformowanej piany, która sama jest mieszaniną środka spieniającego – syntetycznego lub białkowego, wody i powietrza (6). Właściwości lekkiego betonu spienionego zależą głównie od składu mieszanki, jednak niektóre ogólne właściwości, które są stałe w całym szeregu mieszanek: duży stosunek wytrzymałości do masy, mały współczynnik przepuszczalności, i mała absorpcja wody oraz odporność ogniowa (7). Ze względu na to, że wyczerpywanie się piasku rzeczno-głazowego jest palącym problemem w dzisiejszych czasach, badacze szukają alternatywnego materiału do zastąpienia piasku w BL (8).

Aby uzyskać dużą urabialność, niezbędne jest zastosowanie superplastyfikatora, zwiększającego jednak koszty produkcji. Możliwym tanim dodatkiem do betonu jest popiół z wylłocznym z trzciny cukrowej [PTC]. Koszt produkcji popiołu z wylłocznym jest przynajmniej umiarkowany (9). Biorąc pod uwagę podane ograniczenia w stosowaniu popiołu lotnego i popiołu z wylłocznym z trzciny cukrowej, podjęto próbę zbadania wytrzymałości różnych mieszanek w różnym wieku z popiołem lotnym i popiołem z wylłocznym, a wyniki porównywano (10). Zbadano również wytrzymałość na rozciąganie mieszanek BL i opracowano równania do obliczeń wytrzymałości na ściskanie i rozciąganie mieszanek zawierających popiół lotny i popiół z wylłocznym, z trzciny cukrowej.

Podjęte badania mają na celu sprawdzenie właściwości betonu lekkiego przy zastosowaniu popiołu lotnego i popiołu z wylłocznym, jako zamiennika piasku o różnej zawartości masowej (11). Właściwości mechaniczne zostały ustalone, w zależności od wpływu różnych frakcji popiołu lotnego i popiołu z wylłocznym z trzciny cukrowej, stosowanych do zastępowania piasku (12). Stosowanie popiołu lotnego i popiołu z wylłocznym, jako zamiennika piasku w betonie lekkim, poprawia wytrzymałość, trwałość i pomaga w ochronie środowiska. Dlatego też produkcja betonów lekkich z zastosowaniem tych dodatków mineralnych, jest zalecana przez badaczy (5, 13). Udział każdego dodatku ma inny wpływ na wytrzymałość betonu. Spośród tych dwóch dodatków mineralnych, popiół lotny w więk-

the cement concrete, to produce the mass with large porosity. The air entrainment has been chemically formed by the reaction of aluminium powder with calcium hydroxide and other alkalis, released by the cement hydration (3). The air content is usually 50% and above by the total volume of concrete and the size of the air bubbles varied from 0.1 to 1.5 mm, in diameter.

In the LWC usage of the precast application, the entrained gases are produced by the generation of hydrogen gas using powdered aluminium in a paste mix which is alkaline by the usage of Portland cement and sometimes the addition of lime (3). It is declared that light weight foamed concrete is in more widespread usage in the construction field due to the reduced cost, lightness and easy to work in this area (4). LWC is also known as foamed concrete which is light weight material formed by entrapping or generating small bubbles of air into Portland cement mix, by mechanical or chemical reaction.

In the basic form, foamed concrete is a blend of sand, cement, water and pre-formed foam, which in itself is a mixture of foaming agent – either synthetic or protein based, water and air (6). Properties of lightweight foamed concrete mainly depend on the mix design and, however, some general properties which are constant across a range of mix designs are the high strength, low coefficient of permeability, low water absorption and fire resistance (7). Since the depletion of river sand is a burning problem in today's scenario, the researchers are obliged to find the alternative material for the sand replacement in LWC (8).

To obtain good workability, the superplasticizer is essential, but that will increase the cost of production, then the possible source is bagasse ash. The cost of production of bagasse ash is also moderate (9). By considering the above said limitations in using fly ash and bagasse ash, an attempt is made to study the strength development of different mixtures at different ages, with fly ash and bagasse ash and the results were compared (10). The tensile strength of LWC mixtures is also studied and the equations are developed of the compressive and tensile strength, of the mixtures containing fly ash and bagasse ash.

The present investigations are undertaken to check the performance of lightweight concrete by using fly ash and bagasse ash as the sand replacement, by different mass fractions (11). The mechanical properties have been resolute according to the effects of different fractions of fly ash and bagasse ash, used in the sand replacement (12). Make use of fly ash and bagasse ash as the sand replacement in light weight concrete improves the strength, durability and helps in protecting the environment. Thus, the production of light weight concrete with these supplementary materials or some replacement material, is highly recommended by the researchers (5, 13). The contribution of each admixture towards the improvement in strength of concrete is different. Among the two mineral admixtures, fly ash contributes more in the strength development and performs well in aggressive environment (14). Hence in this assessment, an effort is made to make use of the bagasse ash and fly ash, for the replacement of fine aggregate for good mechanical properties of concrete.

szym stopniu przyczynia się do wzrostu wytrzymałości i dobrze sprawdza się w środowisku agresywnym (14). W związku z tym w niniejszej pracy podjęto próbę wykorzystania popiołu z wycłoczyn i popiołu lotnego, zastępujących drobne kruszywa, w celu sprawdzenia ich wpływu na właściwości mechaniczne betonu.

## 2. Przegląd literatury

Rattanashotinunt i in. (15) zastosowali jako zamiennik cementu w betonie wapno pokarbidowe [WP], będącego produktem ubocznym w produkcji gazu acetylenowego oraz popiół z wycłoczyn z trzciny cukrowej [PWTC], uzyskiwany ze spalania wycłoczyn w produkcji energii elektrycznej, w przemyśle cukrowniczym. Wyniki badań wykazują, że beton wykonany z mieszanki WP i popiołu z wycłoczyn z trzciny cukrowej [PWTC] z cementem portlandzkim, wykazał większą wytrzymałość na ściskanie po 28 dniach. Wyniki te pokazują również, że zastosowanie kombinacji WP i PWTC jako spoiwa, może zmniejszyć zużycie cementu portlandzkiego nawet o 70%, w porównaniu z betonem konwencjonalnym. Również właściwości mechaniczne takiego betonu, w tym wytrzymałość na ściskanie i na rozciąganie przy rozłupywaniu oraz moduł sprężystości, były takie same jak w przypadku betonu konwencjonalnego.

Somna i in. (16) wykazali, że popiół z wycłoczyn z trzciny cukrowej, stanowiący odpad hałdowany przez przemysł cukrowniczy, może być wykorzystany jako spoiwo pucolanowe do poprawy właściwości mechanicznych i trwałości betonu, z kruszywem z recyklingu. W badaniach określono wytrzymałość na ściskanie, moduł sprężystości, wodoprzepuszczalność i głębokość penetracji chlorków, dla takiego betonu. Wyniki badań wykazały, że moduł sprężystości betonu z kruszywem z recyklingu, z dodatkiem i bez dodatku PWTC, był mniejszy niż betonu konwencjonalnego. W pracy podkreślono również, że popiół z WTC można wykorzystać do zmniejszenia przepuszczalności wody przez beton z kruszywem z recyklingu. Ponadto, stwierdzono, że dodatek 20% popiołu z WTC do cementu w mieszankach betonowych, poprawia właściwości mechaniczne i trwałość betonu, z kruszywem z recyklingu.

Cordeiro i in. (17) stwierdzili, że popiół z WTC, będący produktem ubocznym w produkcji cukru i alkoholu, ma doskonałe właściwości pucolanowe. Jednak jego użyteczne zastosowanie w zaprawach i betonie wymaga najpierw kontrolowanego przeprowadzenia procesów mielenia i klasyfikacji, aby zapewnić uzyskanie odpowiedniej mianości i jednorodności. W pracy opisano aktywność pucolanową zmielonego popiołu. Zastosowanie drobno zmielonego popiołu w betonie wysokowartościowym, częściowo zastępującego cement portlandzki, nie spowodowało wymiernych zmian we właściwościach mechanicznych, natomiast poprawiło reologię i odporność na penetrację jonów chlorkowych.

Cordeiro i in. (18) podjęli próbę porównania właściwości mechanicznych i cieplnych lekkiego betonu z dwoma rodzajami kruszywa lekkich: wermikulitem i polistyrenem ekspandowanym [PE], z zastosowaniem środka napowietrzającego w betonie. Na podstawie przeprowadzonych badań stwierdzono, że dodatek środka napowietrzającego spowodował, że betony lekkie stały się jeszcze

## 2. Literature survey

Rattanashotinunt et al. (15) used calcium carbide residue [CCR], which was the by-product of the acetylene gas production and bagasse ash [BA] obtained from the burning of bagasse for electricity generation in the sugar industry, for the substitution of cement in concrete. The result shows that the concrete made with CCR and bagasse ash mixtures gave the high compressive strength at the age of 28 days. These results show also that the use of CCR and BA combinations as a binder, could reduce the Portland cement content by up to 70 %, compared to conventional concrete. Also, the mechanical properties of the alternative concrete including compressive strength, splitting tensile strength, and elastic modulus were recorded the same, to that of conventional concrete.

Somna et al. (16) pointed that the bagasse ash, which is a large landfill waste from sugar industries, is utilized as a pozzolanic material to improve the mechanical properties and durability of recycled aggregate concrete. Compressive strength, modulus of elasticity, water permeability, and chloride penetration depth of the concretes were determined in this study. The results showed that the modulus of elasticity of recycled aggregate concrete with bagasse ash [BA], was lower than that of conventional concrete. This paper also highlighted that the BA could be used effectively to reduce the water permeability of recycled aggregate concrete. Besides, the mechanical properties and durability of recycled aggregate concrete were efficiently improved by adding 20 % of BA to cement, in the concrete mixtures.

Cordeiro et al. (17) stated that bagasse ash, a byproduct of sugar and alcohol production, is excellent pozzolana. However, its useful application in mortar and concrete first requires the control of grinding and classification processes, to allow it to achieve the fineness and homogeneity. This paper describes the pozzolanic activity of the ground ash. Incorporation of a finely-ground ash in a high-performance concrete partially replacing Portland cement, didn't give measurable change of mechanical properties, but improved the rheology and resistance of chloride ions penetration.

Cordeiro et al. (18) aimed to compare the mechanical and the thermal properties of lightweight aggregate concrete with two kinds of light aggregates such as vermiculite and expanded polystyrene [EPS], using air-entraining agent. From their study, it was concluded that the addition of air-entraining agent left the lightweight concretes even lighter, but less durable. EPS lightweight concrete has higher strength and is lighter than with vermiculite. Vermiculite lightweight concrete had lower thermal conductivity than with EPS.

Yew et al. (19) determined the effects of oil palm shell [OPS] coarse aggregates in high strength lightweight concrete. OPS coarse aggregates are subjected to heat treatment in this work. The test results revealed that the workability of the OPS coarse aggregate increases with an increase in temperature. The compressive strength of the concrete was recorded as noticeable one. Furthermore, the ultrasonic pulse velocity is examined and the results showed that the good condition is achieved for the oil palm shell high strength of the lightweight concrete.

lżejsze, jednak mniej wytrzymałe. Lekki beton z dodatkiem PE ma większą wytrzymałość i jest lżejszy niż beton z wermikulitem. Beton lekki z wermikulitem miał natomiast mniejszą przewodność cieplną niż z PE.

Yew i in. (19) określili wpływ zastosowania kruszyw grubych z łupin z palmy olejowej [ŁPO] w betonie lekkim, o dużej wytrzymałości. W niniejszej pracy kruszywa grube z ŁPO poddawane są obróbce cieplnej. Wyniki badań wykazały, że urabialność betonu z kruszywem grubym z ŁPO wzrasta, wraz ze wzrostem temperatury. Stwierdzili ponadto, że wytrzymałość na ściskanie tego betonu była stosunkowo dobra. Badali także prędkość przejścia FAI ultradźwiękowej, a wyniki wykazały, że osiągnięto dobry wynik dla lekkiego betonu o wysokiej wytrzymałości, z dodatkiem kruszywa z ŁPO (19).

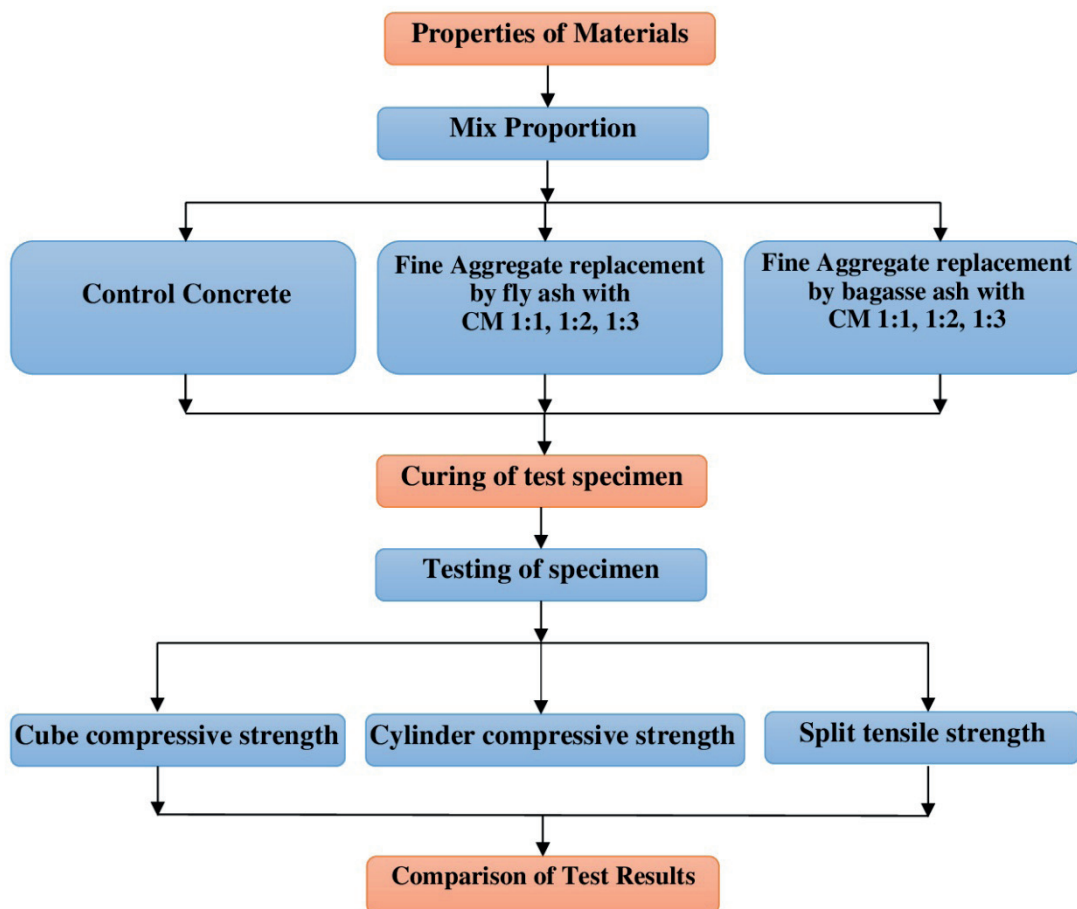
Ahmmad i in. (20) przeprowadzili badania mające na celu określenie wytrzymałości, plastyczności i ciągliwości skrętnej elementu z betonu lekkiego, zawierającego dużą zawartość składników odpadowych. Rozdrobnione ŁPO zastosowano jako kruszywo grube, a klinkier, w przypadku którego zastosowano do produkcji łupiny palmowe, był kruszywem drobnym, zastępującym piasek. Zbadano moduł sprężystości, reakcję podłoża, moduł sprężystości odporność na odkształcenia, szczególnie na skrętność betonu klinkierowego z dodatkiem łupin palmowych i porównano te właściwości z betonem normalnym i lekkim, z dodatkiem łupin z pal-

Ahmmad et al. (20) conducted the study to find out the displacement, ductility and torsional ductility of the lightweight concrete element, containing the high volume of waste materials. Crushed oil palm shell was used as coarse aggregate and palm oil clinker as fine aggregate, for sand replacement. Palm shell clinker has been produced by using those waste materials. The elasticity modulus, modulus of resilience, modulus of toughness, stress-strain relationship and torsional behaviour of palm shell concrete are obtained and compared with normal weight concrete and palm oil lightweight concrete. This test result shows that the torsional ductility of palm shell clinker concrete is higher than displacement and ductility, because of good interlocking properties.

From the literature review, it was found that numerous researches were carried out to standardize the light-weight concrete. The mineral additions, such as fly ash and bagasse ash, are used to increasing volume in the light weight concrete due to their long-term performance, by replacing cement.

### 3. Mechanical properties of light weight concrete

To formulate light weight concrete, a considerable reduction in water - cement ratio is essential. The decrease in the water-cement ratio significantly improves the properties of the transition zone to give the inherent qualities that are expected to be satisfied by LWC.



Rys. 1. Diagram metod badawczych

Fig. 1. Diagram of research methods

my olejowej. Wynik badania pokazuje, że plastyczność skrętna betonu z dodatkiem klinkieru z łupin palmowych jest większa niż odkształcalność i plastyczność, z powodu dobrych właściwości blokujących (20).

Z przeglądu literatury wynika, że przeprowadzono wiele badań mających na celu normalizację betonu lekkiego. Dodatki mineralne, do których należały popioły: lotny i z wycłocznym z trzciny cukrowej, są stosowane w betonie lekkim jako zamienniki cementu, ze względu na ich wpływ na właściwości betonu w długim okresie.

### 3. Właściwości mechaniczne betonu lekkiego

W celu uzyskania betonu lekkiego, konieczne jest znaczne zmniejszenie stosunku wody do cementu. Zmniejszenie stosunku w/c znacznie poprawia właściwości strefy przejściowej, nadając jej właściwości, które powinny być spełnione przez beton lekki. Aby uzyskać te właściwości, można stosować dodatki pucolanowe, w tym mineralne, a szczególnie popiół lotny i z WTC, jako częściowe zamienniki cementu i kruszywa drobnego oraz dodawać domieszki chemiczne.

Metody przyjęte w niniejszych badaniach przedstawiono na rys. 1. Na wstępie podano szczegółowe właściwości wszystkich materiałów użytych w pracy, zarówno w zakresie właściwości fizycznych jak i chemicznych. Następnie w składzie mieszanki przeprowadzono wymianę popiołu lotnego i popiołu z wycłocznym z trzciny cukrowej. Po stwardnieniu próbek przygotowano je do badania wytrzymałości na ściskanie kostek i walców, a następnie na rozciąganie przy rozłupywaniu. Na koniec porównano zależności między tymi próbkami, pod względem właściwości mechanicznych. W kolejnych punktach opisano szczegółowy przebieg doświadczeń wymiany popiołu lotnego i popiołu z wycłocznym z WTC w betonie lekkim, z punktu widzenia właściwości mechanicznych.

#### 3.1. Właściwości materiałów

W tym punkcie przedstawiono szczegóły dotyczące właściwości fizycznych i chemicznych materiałów, obejmujące cement, kruszywo drobne, popiół lotny, popiół z wycłocznym z trzciny cukrowej, wodę, wapno w proszku, proszek aluminiowy i metody spieniania.

##### 3.1.1. Cement

W badaniach zastosowano cement portlandzki klasy 53 zgodny z IS: 12269 - 2013. Cement badano zgodnie z podanymi metodami w normach indyjskich IS: 4031 - 1988. Jego ciężar właściwy wynosi 3,14. Właściwości fizyczne i skład chemiczny cementu podano w tablicy 1.

##### 3.1.2. Kruszywo drobne

Zastosowano naturalny piasek rzeczny, o frakcji przechodzącej przez sito 4,75 mm i pozostającej na sicie 0,6 mm, który poddano badaniom wg IS: 2386 - 1963. Wskaźnik miąłkości zastosowane-

To develop such qualities, pozzolanic materials or mineral additions such as fly ash and bagasse ash, as partial replacement of cement and or fine aggregate and chemical admixtures may be used.

The methodology adopted for this research work is shown in Fig. 1. Initially it gives the detailed properties of all the materials in both physical and chemical properties, used in this study. Then in mix proportion carried out the replacement of fly ash and bagasse ash. After curing the specimens samples were prepared for testing the specimen for cube compressive strength test, cylinder compressive strength test and split tensile strength test. Finally it compares the relationship between these specimens of their mechanical properties. The detailed experimental procedure of fly ash and bagasse ash replacement in light weight concrete with mechanical properties are described in upcoming sections.

#### 3.1. Properties of materials

In this section the details about the physical and chemical properties of materials such as cement, fine aggregate, fly ash, bagasse ash, water, lime powder, aluminum powder and foaming method are presented.

##### 3.1.1. Cement

Ordinary Portland cement of 53 grade conforming with IS: 12269 - 2013, was used for the present experimental investigation. The cement was tested as per the procedure given in Indian Standards IS: 4031 - 1988. Its specific gravity is 3.14. The physical properties and chemical composition of 53 grade cement are given in Table 1.

##### 3.1.2. Fine aggregate

Natural river sand with fraction passing through 4.75 mm sieve and retained on 600 µm sieve, was used and tested as per IS: 2386 - 1963. The fineness modulus of sand used was 2.96, with a specific gravity of 2.60. The sieve analysis of fine aggregate, are presented in Table 2 and it conforms to grading zone II of IS: 383 - 1970. Figure 2 shows the sample of fine aggregate used for this investigation.

##### 3.1.3. Fly ash

Fly ash is one of the residues generated in combustion, and comprises the fine particles, that rise with the flue gases. The Mettur

Tablica 1 / Table 1

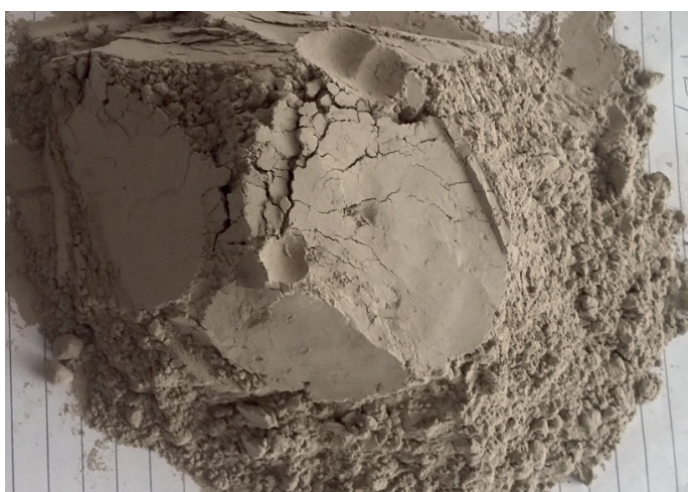
WŁAŚCIWOŚCI FIZYCZNE I SKŁAD CHEMICZNY CEMENTU KLASY 53  
PHYSICAL PROPERTIES AND CHEMICAL COMPOSITION OF 53 GRADE CEMENT

Property / Właściwości	Value Wartość	Compound Składnik	Content Zawartość
Fineness / Powierzchnia właściwa, m <sup>2</sup> /kg	320	SiO <sub>2</sub>	23.80
Normal consistency / Wodozadržność, %	26.4	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	5.86
Initial setting time / Początek czasu wiązania, min	135	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	5.47
Final setting time / Koniec czasu wiązania, min	325	CaO	63.30
Soundness / Stałość objętości, mm	1.00	Na <sub>2</sub> O	0.71
Density / Gęstość, g/cm <sup>3</sup>	3.14	K <sub>2</sub> O	0.86



Rys. 2. Próbkę kruszywa drobnego

Fig. 2. Sample of fine aggregate



Rys. 3. Próbkę popiołu lotnego

Fig. 3. Sample of fly ash

go piasku wynosi 2,96, a gęstość 2,60. Analizę sitową kruszywa drobnego przedstawiono w tabelicy 2; jest ona zgodna z II strefą klasyfikacji IS: 383 - 1970. Rys. 2 przedstawia próbkę drobnego kruszywa, użytego w tych badaniach.

### 3.1.3. Popiół lotny

Popiół lotny [Fa] składa się z drobnych cząstek, które są unoszone przez gazy spalinowe. W badaniach wykorzystano popiół lotny z elektrociepłowni Mettur, który ma małą zawartość tlenku wapnia, stosunek molowy Si do Al wynosi 3, a w składzie dominuje  $\text{SiO}_2$ . Właściwości fizyczne i chemiczne popiołu lotnego przedstawiono odpowiednio w tablicach 3 i 4, a próbkę popiołu lotnego pokazano na rysunku 3.

### 3.1.4. Popiół z wytłocznin z trzciny cukrowej

Popiół z wytłocznin z trzciny cukrowej [PWTC], spalanych w zakładzie przemysłowym, pochodził z Sakthi Sugars, Sakthi nagar, Tamil Nadu, Indie. Popiół z niekontrolowanego kotła miał czarną barwę, ze względu na zawartość węgla, wynoszącą 12,50%. Popiół z wytłocznin z trzciny cukrowej spalanych w zakładzie przemysłowym

Tablica 2 / Table 2

#### ANALIZA SITOWA KRUSZYWA DROBNEGO

#### SIEVE ANALYSIS OF FINE AGGREGATE

Sample No. Nr próbki	IS Sieve Size Wielkość oczka sita	Passing Przepad, %
1	4.75 mm	100.00
2	2.36 mm	90.91
3	1.18 mm	67.74
4	600 $\mu\text{m}$	45.15
5	300 $\mu\text{m}$	15.30
6	150 $\mu\text{m}$	0.00



Rys. 4. Próbkę popiołu z wytłocznin z trzciny cukrowej

Fig. 4. Sample of bagasse ash

thermal power plant available fly ash has been used in the study which contains low calcium oxide; the molar ratio of Si to Al is 3 and the major part of the composition was dominated by  $\text{SiO}_2$ . The physical and chemical properties of fly ash are represented in Table 3 and Table 4 respectively and the sample of fly ash is shown in Figure 3.

### 3.1.4. Bagasse ash

Mill-fired bagasse ash was collected from Sakthi Sugars, Sakthi nagar, Tamil Nadu, India. The uncontrolled boiler fired ash was black in colour due to 12.50% carbon content. The mill fired bagasse ash was further burnt under control temperature at  $700^\circ\text{C}$  for one hour. This burning process brought down the carbon content to 5.20%. After cooling the ash was ground to 5.9  $\mu\text{m}$  mean grain size before it was used as a replacement material for the sand. The waste obtained after combustion contains mainly silicon dioxide. The physical and chemical properties of bagasse ash are

Tablica 3 / Table 3

#### WŁAŚCIWOŚCI FIZYCZNE POPIOŁU LOTNEGO

#### PHYSICAL PROPERTIES OF FLY ASH

Density / Gęstość, $\text{g/cm}^3$	2.30
Bulk density / Gęstość nasypowa, $\text{kg/m}^3$	1070
Fineness Modulus / Wskaźnik mialkości, -	1.15

wym, był powtórnie spalany w temperaturze kontrolnej wynoszącej 700°C, przez jedną godzinę. Ten proces spalania zmniejszył zawartość węgla do 5,20%. Po ochłodzeniu popiół zmielono do średniej wielkości ziarna wynoszącej 5,9 µm, a następnie zastosowano jako materiał zastępczy dla piasku. W składzie chemicznym odpadów, otrzymanych po spalaniu dominuje dwutlenek krzemu – SiO<sub>2</sub>. Właściwości fizyczne i chemiczne popiołu z wyłoczyn z trzciny cukrowej przedstawiono odpowiednio w tablicach 5 i 6, a próbkę popiołu z wyłoczyn pokazano na rysunku 4.

### 3.1.5. Woda

W laboratorium dostępna jest woda pitna, z kranu o wartości pH 7,0 ± 1, spełniająca wymagania IS: 456 – 2000. Stosowano ją do przygotowania i pielęgnacji próbek.

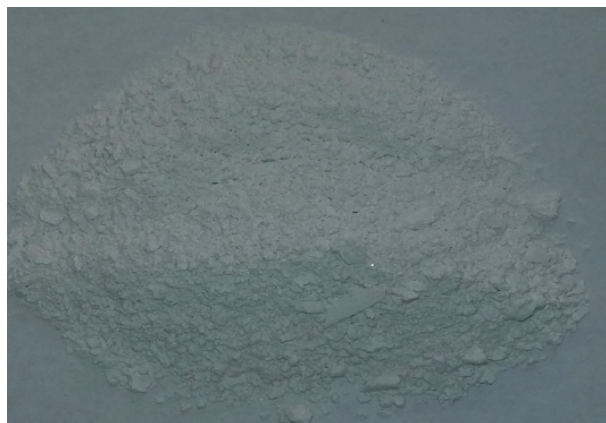
### 3.1.6. Wapno

W doświadczeniach stosowano lokalnie dostępne wapno mielone, które zapewnia dobrą wytrzymałość i twardość mieszanek. Do próbek dodawano 3% masy wapna, w stosunku do cementu. Główną zaletą wapna jest duża plastyczność, a także wzrost wytrzymałości próbek. W temperaturze pokojowej wapno reaguje z popiołem lotnym i przechodzi w fazę o właściwościach wiążących. Jest to faza uwodnionego krzemianu wapnia – C-S-H, powstająca w wyniku reakcji wapna z popiołem lotnym. To właśnie ta faza odpowiada za wzrost wytrzymałości próbek. Rys. 5 przedstawia próbkę proszku wapnia, użytego w badaniach.

### 3.1.7. Proszek aluminiowy i metoda spieniania

Drobny proszek aluminiowy reaguje z wodorotlenkiem wapnia z wydzieleniem wodoru, który zwiększa zawartość porów w mieszance, powodując powstawanie bardzo licznych, mikroskopijnych, niepołączonych ze sobą mikroporów. Inną, mniej powszechnie stosowaną metodą otrzymywania gazu, stosowaną przez Comite Euro-International du Beton – CEB, jest dodawanie piany lub ubijanie mieszaniny, aż do uzyskania wymaganej konsystencji. Tak przygotowaną masę wlewa się do naoliwionych form i pozostawia do wyrośnięcia i związania, na około cztery godziny.

Zachodzi następująca reakcja chemiczna:



Rys. 5. Próbką wapna

Fig. 5. Sample of lime powder

Tablica 4 / Table 4

SKŁAD CHEMICZNY POPIOŁU LOTNEGO

CHEMICAL PROPERTIES OF FLY ASH

Compound / Składnik	Content / Zawartość, %
SiO <sub>2</sub>	65.93
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	23.69
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	2.82
CaO	3.93
Na <sub>2</sub> O	0.86
K <sub>2</sub> O	2.77

presented in Table 5 and Table 6 respectively and the sample of bagasse ash is shown in Figure 4.

### 3.1.5. Water

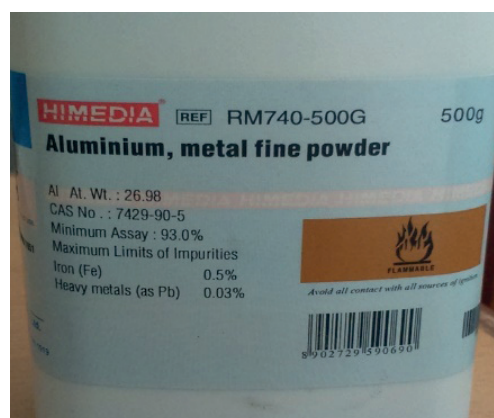
Potable tap water is available in the laboratory with pH value of 7.0 ± 1 and conforming to the requirements of IS: 456 - 2000 was used for mixing and curing the specimens as well.

### 3.1.6. Lime powder

The locally available lime powder is used for this experimental investigation. It contributes to obtaining strength and hardness of the mixtures. It is to note that 3 % weight of cement of lime was used to cast the specimen. The main advantage of lime is to propagate high degree of plasticity and contributes the major part of the strength. At room temperature, lime reacts with fly ash and forms a compound possessing cementations properties. Calcium Silicate Hydrates (C-S-H) were formed due to the reaction between the lime and fly ash. It is the responsible for the increase in the strength. Figure 5 shows the sample of lime powder, which is used for the investigation.

### 3.1.7. Aluminum powder and foaming method

The aluminum metal fine powder react with calcium hydroxide and produce hydrogen gas which aerates the mixture producing millions of microscopic non-connecting cells; another less commonly used method for the formation of gas according to the Comite Euro-In-



Rys. 6. Próbką ze specyfikacją proszku aluminiowego

Fig. 6. Sample and specification of aluminium powder

Tablica 5 / Table 5

## WŁAŚCIWOŚCI FIZYCZNE POPIOŁU Z WYTŁOCZYN Z TRZCINY CUKROWEJ

## PHYSICAL PROPERTIES OF BAGASSE ASH

Specific Gravity / Ciężar właściwy, g/cm <sup>3</sup>	2.12
Bulk density / Gęstość nasypowa, kg/m <sup>3</sup>	837

Tablica 6 / Table 6

## SKŁAD CHEMICZNY POPIOŁU Z WYTŁOCZYN Z TRZCINY CUKROWEJ

## CHEMICAL PROPERTIES OF BAGASSE ASH

Compound / Składnik	Content / Zawartość, %
SiO <sub>2</sub>	80.76
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	8.55
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	3.76
CaO	2.73
Na <sub>2</sub> O	0.74
K <sub>2</sub> O	3.46



Proszek aluminiowy reaguje z wodorotlenkiem wapnia, dając uwodniony glinian trójwapniowy oraz wodór.

Po zastygnięciu masa jest wyjmowana z form, a następnie krojona w plastry, przycinana i profilowana do wymaganego rozmiaru i kształtu, za pomocą precyzyjnej maszyny tnącej. W wyniku procesu cięcia uzyskuje się produkt o dużej dokładności wymiarowej. Po pocięciu mieszanka twardnieje, w przewidywanym okresie. W tabeli 7 podano skład chemiczny proszku aluminiowego.

Beton lekki [BL] otrzymano przez zmieszanie cementu, piasku, wapna, wody i środka spieniającego, który reaguje z matrycą cementową i tworzy większą zawartość porów w mikrostrukturze, a więc zapewnia powstanie bardzo porowatej mikrostruktury betonu.

Piana powinna być trwała, aby nie ulegała ciśnieniu zaprawy, aż do momentu, gdy cement zacznie wiązać i wokół pustek wypełnionych powietrzem, powstaje mocny szkielet z matrycy cementowej. Reakcja chemiczna zachodząca w spienionym betonie, po dodaniu proszku glinowego i wapna, jest podana w równaniu [1]. Rys. 6 przedstawia próbkę proszku aluminiowego, stosowanego w doświadczeniach.

### 3.2. Skład mieszanki

Badania doświadczalne przeprowadzono na trzech różnych seriach po trzy identyczne próbki, w formie kostek z zaprawy. W proporcjach mieszanki stosunek wody do FAzy stałej i środka spieniającego – proszku glinowego, utrzymywano na stałym poziomie, dla wszystkich serii wynoszący 0,45% i 0,30%, a stosunek cementu do piasku zmieniał się w zakresie 1/1, 1/2 i 1/3.

Tablica 7 / Table 7

## SKŁAD CHEMICZNY PRÓBKII PROSZKU GLINOWEGO

## CHEMICAL COMPOSITION OF ALUMINIUM POWDER

Compound / Składnik	Content / Zawartość, %
Aluminium / Glin	93.00
Silicon / Krzem	0.19
Copper / Miedź	0.67
Iron / Żelazo	3.78
Titanium / Tytan	1.65
Manganese / Mangan	0.71

ternational du Beton (CEB), is the adding of foam or whipping the mixture up to the required consistency, is achieved. This mixture is then poured into oiled moulds and allowed to rise and set, for approximately four hours. The chemical reaction that occurs is:



After the mixture has set, it is removed from the moulds and sliced, trimmed and profiled to prescribed size and shape using a precision cutting machine. The cutting process yields a product with high dimensional accuracy. After cutting, the material is cured in required ages. Table 7 represents the chemical properties of aluminium powder.

LWC was produced by mixing cement, sand, lime, water and the foaming agent which reacts with the aggregates and form a larger amount of porous in the microstructure and produce the cellular structure in concrete. The foam must be firm and stable so that it resists the pressure of the mortar until the cement takes its initial set and a strong skeleton of concrete is built up around the void filled with air. The chemical reaction which takes places under the foaming concrete after the addition of aluminium powder and lime is given in equation [1]. Figure 6, shows the specification and sample of aluminium powder used for the study.

### 3.2. Mix proportioning

The experimental study was carried out with three different series of mortar cube specimens with three identical specimens. In the mix ratio water to solid ratio and foaming agent [aluminum powder] were kept as constants for all the series as 0.45 % and 0.30 % and cement to sand ratio varied from 1:1, 1:2 and 1:3. The fly ash was replaced with 25% to 100% with the increment of 25 % and the bagasse ash was replaced with 10% to 50% with an increment of 10% in the sand fractions. The lime powder was kept constant in 3 % for all the different grades of the mix.

The cement and fine aggregate [or] the fly ash and bagasse ash were mixed in dry condition depending on the ratio. Water and aluminium powder were added together to make the slurry which was poured and placed in mortar cube mould. After their enlarged surface being cut to flat, the samples were remoulded and cured to required ages. Figure 7, reveals the construction sequences of LWC and its testing methods. The mix proportion and quantity





Rys. 7. Przygotowanie, formowanie i twardnienie próbek

Fig. 7. Preparation, cast and curing of specimens

Popiół lotny stosowano do zastępowania piasku w ilości od 25% do 100%, z przyrostem co 25%, a popiół z WTC w ilości od 10% do 50% z przyrostem 10%, w zastępowaniu frakcji piaskowych. Zawartość wapna w proszku utrzymywano na stałym poziomie wynoszącym 3%, dla wszystkich rodzajów mieszanki.

Cement i kruszywo drobne lub popiół lotny i popiół z wyłoczyn z trzciny cukrowej, mieszano w stanie suchym. Z wody i proszku aluminiowego sporządzano zawiesinę, którą wlewano do form, o kształcie kostki. Po przycięciu powiększonej powierzchni na płasko, próbki były ponownie formowane i twardniały, przez wymagany okres. Rys. 7 przedstawia sekwencje sporządzania BL i metody jej badania, a także proces przygotowania, odlewania i twardnienia próbek.

Składy mieszanek i ilość materiałów użytych do badań, podano w tabeli 8. Szczegóły dotyczące badań doświadczalnych przedstawiono w tabeli 9.

Mieszanki FA25, FA50, FA75 i FA100 reprezentują zastąpienie 25%, 50%, 75% i 100% masy kruszywa drobnego, popiołem lotnym. Mieszanki, w których 10%, 20%, 30%, 40% i 50% kruszywa drobnego zastąpiono popiołem z wyłoczyn z trzciny cukrowej [WTC], oznaczono odpowiednio WTC10, WTC20, WTC30, WTC40 i WTC50.

### 3.3. Przygotowanie i badanie próbek

W tym punkcie opisano przygotowanie i badanie wytrzymałości na ściskanie kostek, próby ściskania walców oraz badanie wytrzymałości na rozciąganie przy rozłupywaniu.

of materials taken for this study is given in Table 8. The details of experimental investigations are presented in Table 9. Figure 7 represent the preparation, cast and curing of specimens.

The mixtures Fa25, Fa50, Fa75 and Fa100 represents the replacement of 25%, 50%, 75% and 100% of the mass of the fine aggregate by fly ash, respectively. The mixtures with 10%, 20%, 30%, 40% and 50% fine aggregate replaced by bagasse ash are identified as BA10, BA20, BA30, BA40 and BA50 respectively.

### 3.3. Preparation and testing of specimen

In this section describes the preparation and testing of specimen with cube compression strength test, cylinder compression test and split tensile strength test.

#### 3.3.1. Cube compressive strength test

The compressive strength test was carried out with specimen size of 70.6 mm × 70.6 mm × 70.6 mm as per IS:10080 - 1982. All the specimens were tested in saturated surface dry condition, after wiping out the surface moisture. For each mix combination, three identical specimens were tested at the age of 1 day, 3 days, 7 days, 14 days, 28 days and 56 days using compression testing machine of 2000 kN capacity as per IS: 516-1959. The tests were carried out at a uniform stress of 149 kg/cm<sup>2</sup>/minute after the specimen had been centered in the testing machine. Loading was continued till the failure of the specimen. The dial reading at that instant was noted, which is the ultimate load. The ultimate load divided by the cross sectional area of the specimen is equal to the cube compressive strength. Figure 8 represent the experimental setup for the cube compressive strength.

Tablica 8 / Table 8

SKŁADY MIESZANEK ZAPRAW 1:1, 1:2 I 1:3, %

MIX PROPORTIONS FOR CM 1:1, CM 1:2 AND CM 1:3, %

S.No. Nr próbki	Mix ID ID mieszanki	Cement Fly ash / Popiół lotny	Fine Aggregate Kruszywo drobne Bagasse Ash Popiół z wytłocznin z trzciny cukrowej	Replacements Zastępowanie		Water Woda	Aluminium powder, % by the mass of solid matter Proszek glinowy w masie suchej substancji stałej	Lime powder, % by the mass of cement Wapno palone, % masy cementu
1	Control	100	100	0	0	100	0.3	3
2	FA25	100	75	25	0	100	0.3	3
3	FA50	100	50	50	0	100	0.3	3
4	FA75	100	25	75	0	100	0.3	3
5	FA100	100	0	100	0	100	0.3	3
6	BA10	100	90	0	10	100	0.3	3
7	BA20	100	80	0	20	100	0.3	3
8	BA30	100	70	0	30	100	0.3	3
9	BA40	100	60	0	40	100	0.3	3
10	BA50	100	50	0	50	100	0.3	3
Where,								
FA25	- 25 %	fine aggregate replaced by fly ash / kruszywo drobne zastąpione popiołem lotnym						
FA50	- 50 %							
FA75	- 75 %							
FA100	- 100 %							
BA10	- 10 %	fine aggregate replaced by bagasse ash / kruszywo drobne zastąpione popiołem z WTC						
BA20	- 20 %							
BA30	- 30 %							
BA40	- 40 %							
BA50	- 50 %							

### 3.3.1. Badanie wytrzymałości na ściskanie kostek

Badanie wytrzymałości na ściskanie przeprowadzono na kostkach o wymiarach 70,6 mm × 70,6 mm × 70,6 mm, zgodnie z normą IS:10080 - 1982. Wszystkie próbki badano w stanie nasyconym wodą i powierzchniowo suchym, po uprzednim usunięciu wilgoci z powierzchni. Dla każdego składu mieszanki wykonano badania trzech identycznych próbek po 1, 3, 7, 14, 28 i 56 dniach, przy użyciu maszyny wytrzymałościowej do ściskania, o obciążeniu 2000 kN, zgodnie z normą IS: 516-1959. Próby przeprowadzono przy równomiernym naprężeniu 149 kg/cm<sup>2</sup>/minutę, po centrycznym ustawieniu próbki w maszynie wytrzymałościowej. Obciążenie stosowano do momentu zniszczenia próbki. Notowano odczyt na tarczy w momencie osiągnięcia obciążenia granicznego. Obciążenie niszczące podzielone przez pole przekroju poprzecznego próbki, jest równe wytrzymałości na ściskanie kostki. Rys. 8 przedstawia stanowisko doświadczalne do badania wytrzymałości kostek na ściskanie.



Rys. 8. Stanowisko do badania wytrzymałości na ściskanie kostek

Fig. 8: Experimental set up for cube compressive strength

### 3.3.2. Badanie wytrzymałości na ściskanie walców

Próby wytrzymałości na ściskanie walca przeprowadzono po 28 dniach, w przypadku próbek walcowych o średnicy 60 mm i wy-

### 3.3.2. Cylinder compressive strength test

The cylinder compressive strength test was carried out at the age of 28 days for the 60 mm diameter and 120 high cylinder specimen

Tablica 9 / Table 9

## SZCZEGÓŁY BADAŃ DOŚWIADCZALNYCH

## DETAILS OF EXPERIMENTAL INVESTIGATIONS

Sl.No Nr próbki	Mix Mieszanka	Mix ID Oznaczenie mieszanki	Number of specimens cast for given number of days of curing Liczba próbek zaformowanych do badania po poszczególnych dniach dojrzewania							
			Cu						C	ST
			1	3	7	14	28	56	28	28
1	CM1:1		3	3	3	3	3	3	3	3
2	CM1:2		3	3	3	3	3	3	3	3
3	CM1:3		3	3	3	3	3	3	3	3
4	CM 1:1	FA25	3	3	3	3	3	3	3	3
5	CM1:2		3	3	3	3	3	3	3	3
6	CM1:3		3	3	3	3	3	3	3	3
7	CM 1:1	FA50	3	3	3	3	3	3	3	3
8	CM1:2		3	3	3	3	3	3	3	3
9	CM1:3		3	3	3	3	3	3	3	3
10	CM 1:1	FA75	3	3	3	3	3	3	3	3
11	CM1:2		3	3	3	3	3	3	3	3
12	CM1:3		3	3	3	3	3	3	3	3
13	CM 1:1	FA100	3	3	3	3	3	3	3	3
14	CM1:2		3	3	3	3	3	3	3	3
15	CM1:3		3	3	3	3	3	3	3	3
16	CM 1:1	BA10	3	3	3	3	3	3	3	3
17	CM1:2		3	3	3	3	3	3	3	3
18	CM1:3		3	3	3	3	3	3	3	3
19	CM 1:1	BA20	3	3	3	3	3	3	3	3
20	CM1:2		3	3	3	3	3	3	3	3
21	CM1:3		3	3	3	3	3	3	3	3
22	CM 1:1	BA30	3	3	3	3	3	3	3	3
23	CM1:2		3	3	3	3	3	3	3	3
24	CM1:3		3	3	3	3	3	3	3	3
25	CM 1:1	BA40	3	3	3	3	3	3	3	3
26	CM1:2		3	3	3	3	3	3	3	3
27	CM1:3		3	3	3	3	3	3	3	3
28	CM 1:1	BA50	3	3	3	3	3	3	3	3
29	CM1:2		3	3	3	3	3	3	3	3
30	CM1:3		3	3	3	3	3	3	3	3
No. of Specimens Liczba próbek			90	90	90	90	90	90	90	90
			990							

Cu-Cube / Kostki ; C-Cylinder / Cylindry ; ST-Split Tensile / Badanie wytrzymałości na rozciąganie przy rozłupywaniu, PTC-popiół z trzciny cukrowej

sokości 120. Stosowano maszynę wytrzymałościową do ściskania o obciążeniu do 2000 kN, zgodnie z normą IS:516-1959. Rys. 9 przedstawia stanowisko doświadczalne, do pomiaru wytrzymałości na ściskanie walca.

### 3.3.3. Badanie wytrzymałości na rozciąganie przy rozłupywaniu

Jest to metoda wyznaczania wytrzymałości na rozciąganie próbek walcowych. Próbkę wytrzymałości na rozciąganie przy rozłupywaniu przeprowadzono na próbkach w kształcie walców o wymiarach 60

using 2000 kN capacity compression testing machine according to IS:516-1959. Figure 9 shows the experimental set up of cylinder compressive strength.

### 3.3.3. Split tensile strength test

This is an indirect test to determine the tensile strength of cylindrical specimens. The split tensile strength test has been carried out using 60 mm × 120 mm cylinder specimen placed diagonally in the compressive strength tester of 2000 kN capacity as per IS: 5816-1970. The load was applied gradually till the specimen split



Rys. 9. Stanowisko doświadczalne do pomiaru wytrzymałości na ściskanie walca

Fig. 9. Experimental set up for cylinder compressive strength



Rys. 10. Stanowisko doświadczalne do pomiaru wytrzymałości na rozciąganie przy rozłupywaniu

Fig. 10. Experimental set up for split tensile strength

mm × 120 mm, umieszczonych ukośnie w urządzeniu do badania wytrzymałości na ściskanie, w prasie o obciążeniu maksymalnym 2000 kN, zgodnie z normą IS: 5816-1970. Obciążenie zwiększano stopniowo, aż do zniszczenia próbki i notowano odczyty. Wytrzymałość na rozciąganie przy rozłupywaniu badano po 28 dniach. Rys. 10 przedstawia stanowisko doświadczalne do pomiaru wytrzymałości na rozciąganie przy rozłupywaniu.

Równanie do obliczenia wytrzymałości na rozciąganie przy rozłupywaniu, w N/mm<sup>2</sup> :

$$f_t = \frac{2P}{\pi DL}$$

gdzie: P obciążenie w momencie zniszczenia próbki, D średnica walca, L wysokość walca

## 4. Wyniki i dyskusja

W tym punkcie szczegółowo przeanalizowano wpływ popiołu lotnego i popiołu z wycieczyn z trzciny cukrowej, badanych na kostkach oraz walcach i wytrzymałości na rozciąganie w betonie lekkim, z dodatkami mineralnymi.

### 4.1. Analiza właściwości użytkowych

Opisano szczegółowo doświadczenia przeprowadzone w celu zbadania właściwości mechanicznych betonu lekkiego, zawiera-

and readings were noted. The splitting tensile strength has been estimated after 28 days. Figure 10, shows the experimental set up for split tensile strength.

The equation of split tensile strength is

$$f_t = \frac{2P}{\pi DL}$$

where:

$f_t$  = Splitting Tensile Strength of Concrete in N/mm<sup>2</sup>

P = Load at Failure

D = Diameter of Cylinder

L = Height of Cylinder

## 4. Results and discussion

In this section, elaborately described the experimental analysis of fly ash and bagasse ash effect in cube, cylinder and split tensile with light weight concrete of mineral admixtures.

### 4.1. Performance analysis

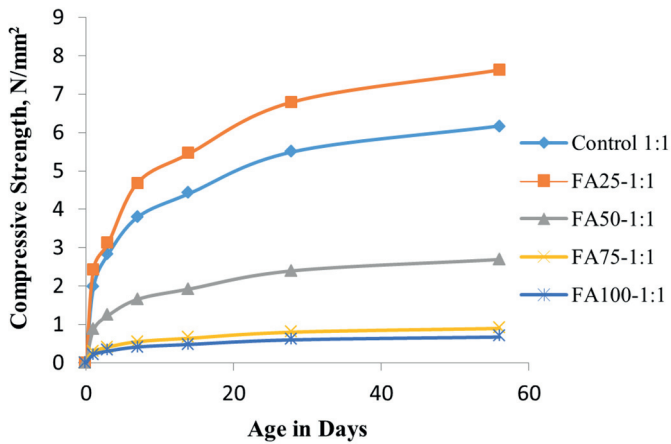
It details the experiments carried out to study the mechanical characteristics of light weight concrete with fly ash and bagasse ash as replacement of fine aggregate. The optimum replacement of fine aggregate by fly ash and bagasse ash with different replacement levels was found from experimental results. The cube compressive strength, cylinder compressive strength, split tensile strength and their relative compressive and tensile strengths of cement mortar mix with CM 1:1, CM 1:2, CM 1:3 were studied after the age of 28 days.

#### 4.1.1. Cube compressive strength

The development of cube compressive strength at different ages and different levels of replacement are shown in the Figs. 11 to 16. The percentage change in compressive strength of light weight concrete mixtures compared to control mix are tabulated in Table 10.

The replacement of 25 % of fly ash in CM 1:1 shows higher strength of all ages of 23.86%, 10.25%, 23.68%, 23.81%, 23.64% and 23.66% of ages 1 day, 3 days, 7 days, 14 days, 28 days and 56 days respectively compared to control mix. In CM 1:2, the replacement of 25% fly ash shows 10.06%, 23.04%, 10.14%, 23.81%, 10% and 9.98% elevated strength than that of conventional mortar mix in all different ages from 1 day to 56 days respectively. The replacement of 100% fly ash in all mixes such as CM 1:1, CM 1:2 and CM 1:3 recorded show a drastic reduction in strength compared to control mortar mix.

The replacement of 30% bagasse ash shows increase in strength compared to all control mortar mix of CM 1:1, CM 1:2 and CM 1:3. In mortar mix CM 1:2 at the age of 14 days shows a high increase in strength of 59.44% compared to control mix. At the age of 3



Rys. 11. Wytrzymałość na ściskanie mieszanki zaprawy 1:1

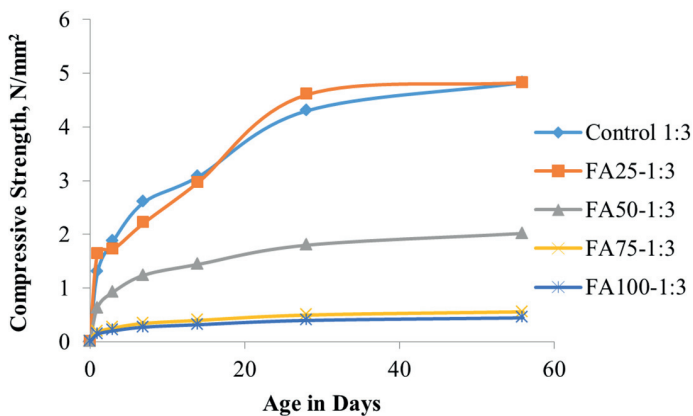
Fig. 11. Compressive strength of mortar mix 1:1

jącego popiołu lotny i popiołu z wyłoczyn z trzciny cukrowej, jako zamienniki kruszywa drobnego. Na podstawie wyników doświadczalnych ustalono optymalne proporcje zastępowania kruszywa drobnego popiołem lotnym i popiołem z wyłoczyn, z trzciny cukrowej. Zbadano wytrzymałość na ściskanie kostek oraz walców, wytrzymałość na rozciąganie przy rozłupywaniu oraz względną wytrzymałość na ściskanie i rozciąganie mieszanki z zaprawy cementowej, o składzie CM 1:1, CM 1:2, CM 1:3, po 28 dniach.

#### 4.1.1. Wytrzymałość kostek na ściskanie

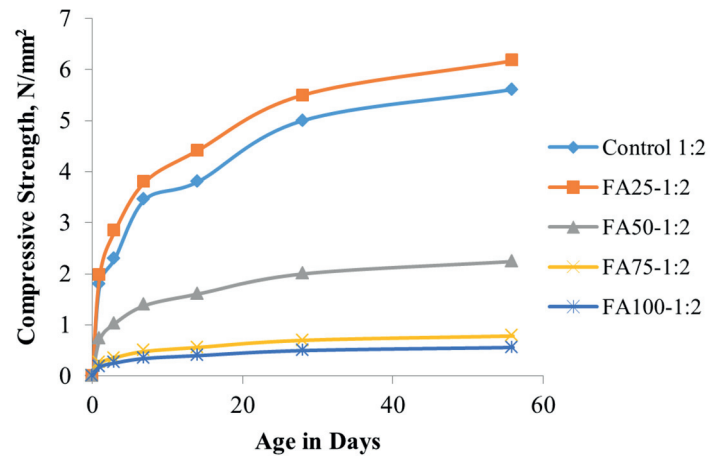
Wzrost wytrzymałości na ściskanie kostek w różnym wieku i o różnych poziomach, zastąpienia kruszywa drobnego popiołem lotnym, przedstawiono na rysunkach od 11 do 16. Procentową zmianę wytrzymałości na ściskanie mieszanek w przypadku betonów lekkich, w stosunku do mieszanki kontrolnej zestawiono w tabeli 10.

Zastąpienie 25 % kruszywa drobnego popiołem lotnym w CM 1:1 powoduje większą wytrzymałość materiału po wszystkich czasach dojrzewania, odpowiednio o 23,86%, 10,25%, 23,68%, 23,81%, 23,64% i 23,66%, po 1, 3, 7, 14, 28 i 56 dniach, w porównaniu do mieszanki kontrolnej. W CM 1:2 zastąpienie 25% kruszywa drobnego popiołem lotnym wykazuje o 10,06%, 23,04%, 10,14%, 23,81%, 10% i 9,98% większą wytrzymałość od konwencjonalnej mieszanki



Rys. 13. Wytrzymałość na ściskanie zaprawy 1:3

Fig. 13. Compressive strength of mortar mix 1:3



Rys. 12. Wytrzymałość na ściskanie zaprawy 1:2

Fig. 12. Compressive strength of mortar mix 1:2

days, the mortar mix CM 1:2 and CM 1:1 it shows an increased strength of 56.86% and 53.49% respectively. The 50% replacement of bagasse ash in CM 1:1 shows a reduction in strength of 9.12%, 9.10%, 9.08%, 7.09%, 9.10% and 9.09% respectively at the age of 1day to 56 days. In CM 1:2 and CM 1:3 of 50% replacement of fly ash the maximum reduction in strength compared to conventional mix is observed at the age of 7 days of 16.01% and 18.62% respectively

Figure 11 shows the compressive strength development of mortar mix 1:1 with 25%, 50%, 75% and 100% replacement of fly ash with fine aggregate and control mortar

Figure 12 shows the Compressive strength development of mortar mix 1:2 with 25%, 50%, 75% and 100% replacement of fly ash with fine aggregate and control mortar

Figure 13 shows the compressive strength development of mortar mix 1:3 with 25%, 50%, 75% and 100 % replacement of fly ash with fine aggregate and control mortar

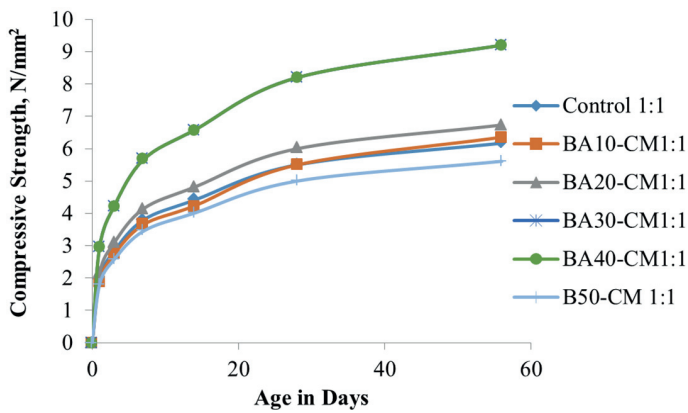
Figure 14 shows the compressive strength development of cement mortar 1:1, with 10%, 20%, 30%, 40% and 50% replacement of bagasse ash with fine aggregate and control mortar.

Figure 15 shows the compressive strength development of cement mortar 1:2 with 10%, 20%, 30%, 40% and 50% replacement of bagasse ash with fine aggregate and control mortar.

Figure 16 shows the compressive strength development of cement mortar 1:3 with 10%, 20%, 30%, 40% and 50% replacement of bagasse ash with fine aggregate and control mortar.

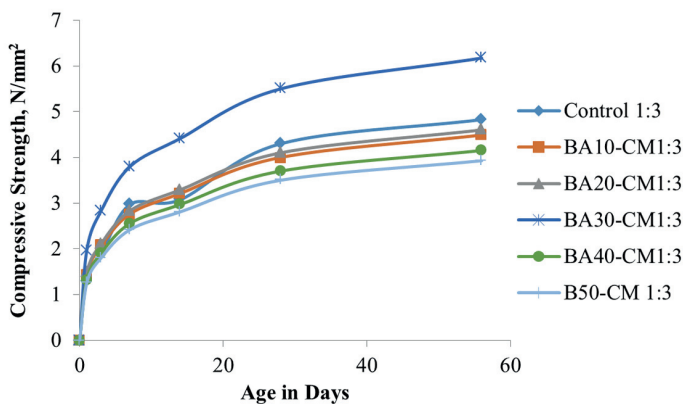
#### 4.1.1.1. Development of compressive strength compared to respective 28 days compressive strength

The strength development of control mortar of CM 1:1 compared to its corresponding 28 days strength are 35.87%, 51.52%, 69.07%, 80.24% and 112.23% at the age of 1day, 3 days, 7 days, 14 days and 56 days respectively. By the addition of 25%, 50%, 75% and 100% fly ash as a fine aggregate replacement material, the com-



Rys. 14. wytrzymałość na ściskanie zaprawy cementowej 1:1

Fig. 14. Compressive strength of cement mortar 1:1



Rys. 16. Wytrzymałość na ściskanie zaprawy cementowej 1:3

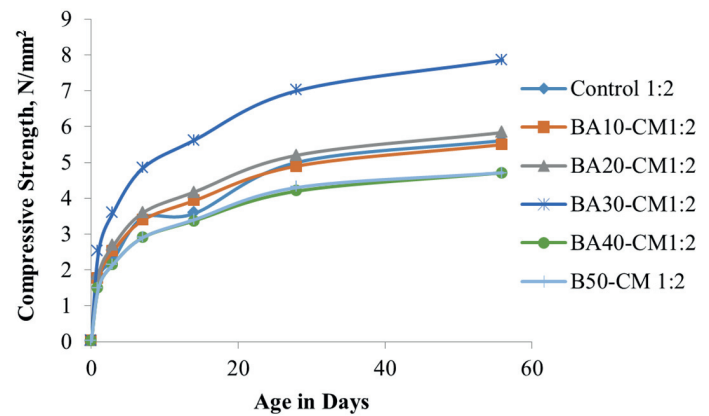
Fig. 16. Compressive strength of cement mortar 1:3

z zaprawy w różnym wieku, odpowiednio po 1 do 56.-dniach. Zastąpienie tego kruszywa w 100% popiołem lotnym we wszystkich mieszankach: CM 1:1, CM 1:2 i CM 1:3, spowodowało duże zmniejszenie wytrzymałości, w porównaniu do zaprawy kontrolnej.

Zastąpienie 30% kruszywa drobnego popiołem z wycłoczyn z trzciny cukrowej, powoduje wzrost wytrzymałości, w porównaniu do wszystkich kontrolnych mieszank z zapraw: CM 1:1, CM 1:2 i CM 1:3. W mieszance zaprawy CM 1:2 uzyskano duży wzrost wytrzymałości wynoszący po 14 dniach 59,44%, w stosunku do mieszanki kontrolnej. Po 3 dniach zaprawy CM 1:2 i CM 1:1 wykazują wzrost wytrzymałości wynoszący 56,86% i 53,49%.

Zastąpienie 50% kruszywa drobnego popiołem z wycłoczyn z trzciny cukrowej w CM 1:1, powoduje spadek wytrzymałości odpowiednio o 9,12%, 9,10%, 9,08%, 7,09%, 9,10% i 9,09% po okresach od 1.-dnia do 56.-dni. W mieszance CM 1:2 i CM 1:3 z 50% dodatkiem popiołów lotnych maksymalne zmniejszenie wytrzymałości, w porównaniu do mieszanki konwencjonalnej, stwierdzono po 7 dniach, odpowiednio o 16,01% i 18,62%.

Rys. 11. pokazuje zmiany wytrzymałości na ściskanie zaprawy 1:1, z 25%, 50%, 75% i 100% dodatkiem popiołu lotnego, w miejsce kruszywa drobnego oraz zaprawy kontrolnej.



Rys. 15. Wytrzymałość na ściskanie zaprawy cementowej 1:2

Fig. 15. Compressive strength of cement mortar 1:2

pressive strength developments are 45.90%, 51.52%, 52.50%, and 53.33% respectively at the age of 3 days.

Figs. 17 to 22 show the relative compressive strength of light weight concrete mixtures of CM 1:1 of various ages from 1 day, 3 days, 7 days, 14 days, 28 days and 56 days respectively. The relative compressive strength of light weight concrete mixtures of CM 1:2 of various ages from 1 day, 3 days, 7 days, 14 days, 28 days and 56 days respectively are shown in Figs. 23 to 28. Figs. 29 to 34 show the relative compressive strength of light weight concrete mixtures of CM 1:3 of various ages.

The rate of compressive strength development of mixtures corresponds to their respective 28 days compressive strength of fly ash replacement in fine aggregate are tabulated in Table 10. Table 11, represents the rates of compressive strength development of mixtures correspond to their respective 28 days compressive strength of bagasse ash replacement in fine aggregate.

Figure 17, shows the relative compressive strength of CM 1:1 at the age of 1 day. The increase in fly ash percentage replacement gives very lower compressive strength, whereas the increase in Bagasse ash percentage replacement gives higher compressive strength up to 30% replacement and after that the strength decreases. Bagasse ash of 30% replacement gives 47% higher compressive strength comparing to the control cement mortar mix CM 1:1.

The relative compressive strength of CM 1:1 at the age of 3 days is shown in Fig. 18. The increase in FA percentage replacement gives very lower compressive strength, whereas the increase in BA percentage replacement gives higher compressive strength up to 30% replacement and after that the strength decreases. BA30 gives 53% higher compressive strength comparing to the control mix.

Figure 19 shows the relative compressive strength of CM 1:1 at the age of 7 days. FA25 gives 23.6% and BA30 gives 47.40% higher compressive strength comparing to the control mix.

The relative compressive strength of CM 1:1 at the age of 14 days is shown in Figure 20. FA25 gives 23.60% and BA30 gives 47.40% higher compressive strength comparing to the control mix.

Tablica 10 / Table 10

PRĘDKOŚĆ PRZYROSTU WYTRZYMAŁOŚCI NA ŚCISKANIE MIESZANEK ODPOWIADAJĄCA ICH 28 DNIOWEJ WYTRZYMAŁOŚCI NA ŚCISKANIE, W PRZYPADKU ZASTĄPIENIU KRUSZYWA DROBNEGO POPIOŁEM LOTNYM

RATE OF COMPRESSIVE STRENGTH DEVELOPMENT OF MIXTURES CORRESPOND TO THEIR RESPECTIVE 28 DAYS COMPRESSIVE STRENGTH OF FLY ASH REPLACEMENT OF FINE AGGREGATE

S.No. Nr próbki	Mix / Mieszanka	Mix ID Oznaczenie mieszanki	Strength development of mixes compared to control mixes at 28 days Zmiana wytrzymałości mieszank w porównaniu z mieszankami kontrolnymi po 28 dniach, %					
			Age in days / Wiek w dniach					
			1	3	7	14	28	56
1	CM 1:1	Control Próbka kontrolna	35.87	51.52	69.07	80.24	100.00	112.18
2	CM1:2		35.87	45.90	69.07	71.50	100.00	112.20
3	CM1:3		30.22	43.61	69.30	71.50	100.00	112.23
4	CM 1:1	FA25	35.87	45.90	69.07	80.24	100.00	112.21
5	CM1:2		35.87	51.52	69.07	80.36	100.00	112.23
6	CM1:3		35.87	33.53	48.16	64.57	100.00	104.91
7	CM 1:1	FA50	36.25	51.52	69.07	80.83	100.00	112.08
8	CM1:2		35.87	51.52	69.07	80.24	100.00	112.00
9	CM1:3		36.67	51.52	69.07	80.56	100.00	112.23
10	CM 1:1	FA75	35.87	52.50	67.50	81.25	100.00	112.23
11	CM1:2		38.57	50.00	69.07	80.24	100.00	112.14
12	CM1:3		35.87	54.00	71.20	84.00	100.00	112.23
13	CM 1:1	FA100	38.33	53.33	70.00	81.67	100.00	112.23
14	CM1:2		37.00	52.40	72.00	84.00	100.00	112.00
15	CM1:3		35.75	51.52	69.07	80.24	100.00	110.00

Tablica 11 / Table 11

SZYBKOŚĆ WZROSTU WYTRZYMAŁOŚCI NA ŚCISKANIE MIESZANEK, ODPOWIADAJĄCA ICH 28 DNIOWEJ WYTRZYMAŁOŚCI NA ŚCISKANIE, W PRZYPADKU ZASTĄPIENIA KRUSZYWA DROBNEGO POPIOŁEM Z WYTŁOCZYN Z TRZCINY CUKROWEJ

RATE OF COMPRESSIVE STRENGTH DEVELOPMENT OF MIXTURES CORRESPOND TO THEIR RESPECTIVE 28 DAYS COMPRESSIVE STRENGTH OF BAGASSE ASH REPLACEMENT OF FINE AGGREGATE

S.No. Nr próbki	Mix / Mieszanka	Mix ID Oznaczenie mieszanki	Strength development of mixes compared to control mixes at 28 days Zmiana wytrzymałości mieszank w porównaniu z mieszankami kontrolnymi po 28 dniach, %					
			Age in days / Wiek w dniach					
			1	3	7	14	28	56
1	CM 1:1	Control	35.87	51.52	69.07	80.24	100.00	112.23
2	CM1:2		35.80	45.90	69.07	71.50	100.00	112.00
3	CM1:3		30.22	43.61	69.07	71.50	100.00	112.09
4	CM 1:1	BA10	35.87	51.52	69.07	80.24	100.00	112.18
5	CM1:2		36.73	53.06	69.39	79.59	100.00	112.24
6	CM1:3		35.75	50.50	68.00	82.50	100.00	112.00
7	CM 1:1	BA20	35.00	51.33	68.67	80.00	100.00	112.17
8	CM1:2		35.58	50.00	69.23	80.24	100.00	111.54
9	CM1:3		35.87	51.52	69.07	80.49	100.00	112.20
10	CM 1:1	BA30	35.37	53.05	68.29	79.27	100.00	112.20
11	CM1:2		36.00	51.43	69.07	81.43	100.00	112.14
12	CM1:3		36.18	51.52	69.07	80.24	100.00	110.91
13	CM 1:1	BA40	35.77	51.92	69.07	80.77	100.00	112.54
14	CM1:2		35.95	52.38	69.07	80.95	100.00	112.90
15	CM1:3		35.95	51.89	69.07	81.35	100.00	112.16
16	CM 1:1	BA50	35.87	51.52	69.07	82.00	100.00	112.20
17	CM1:2		35.95	51.52	69.07	80.48	100.00	112.21
18	CM1:3		36.29	51.52	69.07	80.24	100.00	112.43

Rys. 12. przedstawia zmiany wytrzymałości na ściskanie zaprawy 1:2, z 25%, 50%, 75% i 100%, z dodatkiem popiołu lotnego, zamiast kruszywa drobnego, a także zaprawy kontrolnej.

Rys. 13. przedstawia zmiany wytrzymałości na ściskanie zaprawy 1:3 z 25%, 50%, 75% i 100% dodatkiem popiołu lotnego, w miejsce kruszywa drobnego i dla porównania, zaprawy kontrolnej.

Rys. 14. przedstawia zmiany wytrzymałości na ściskanie zaprawy 1:1, zawierającej 10%, 20%, 30%, 40% i 50% popiołu z WTC, zastępującego kruszywo drobne oraz dla porównania zaprawy kontrolnej.

Rys. 15. przedstawia zmiany wytrzymałość na ściskanie zaprawy 1:2, z 10%, 20%, 30%, 40% i 50% dodatkiem popiołu z wycieczyn z trzciny cukrowej, zastępującego kruszywo drobne oraz dla porównania zaprawy kontrolnej.

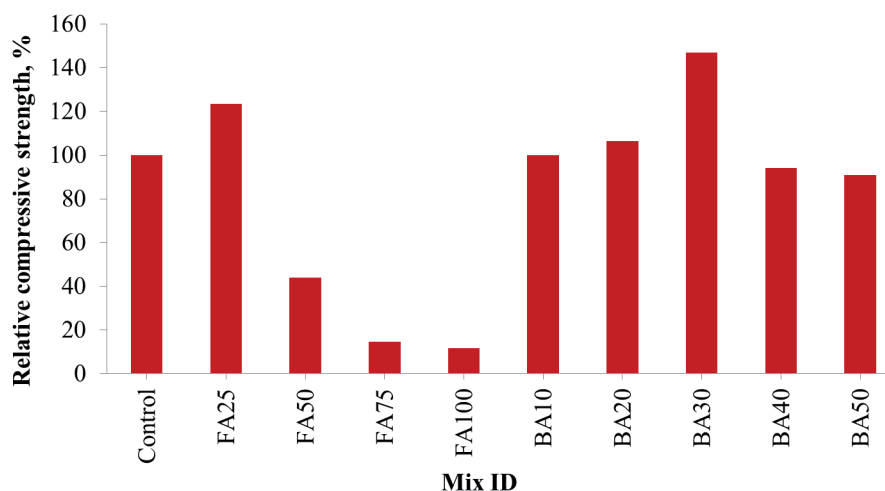
Rys. 16. przedstawia zmiany wytrzymałości na ściskanie zaprawy 1:3, z 10%, 20%, 30%, 40% i 50% dodatkiem popiołu z wycieczyn z trzciny cukrowej, zastępującego kruszywo drobne oraz dla porównania zaprawy kontrolnej.

#### 4.1.1.1. Zmiana wytrzymałości na ściskanie w stosunku do odpowiedniej 28.-dniowej wytrzymałości

Zmiany wytrzymałości zaprawy kontrolnej CM 1:1, w stosunku do odpowiadającej jej wytrzymałości 28.-dniowej wynoszą odpowiednio 35,87%, 51,52%, 69,07%, 80,24% i 112,23% po 1, 3, 7, 14 i 56 dniach. Po dodaniu 25%, 50%, 75% i 100% popiołu lotnego zastępującego kruszywo drobne, zmiany wytrzymałości na ściskanie wynoszą odpowiednio po 3 dniach 45,90%, 51,52%, 52,50% i 53,33%.

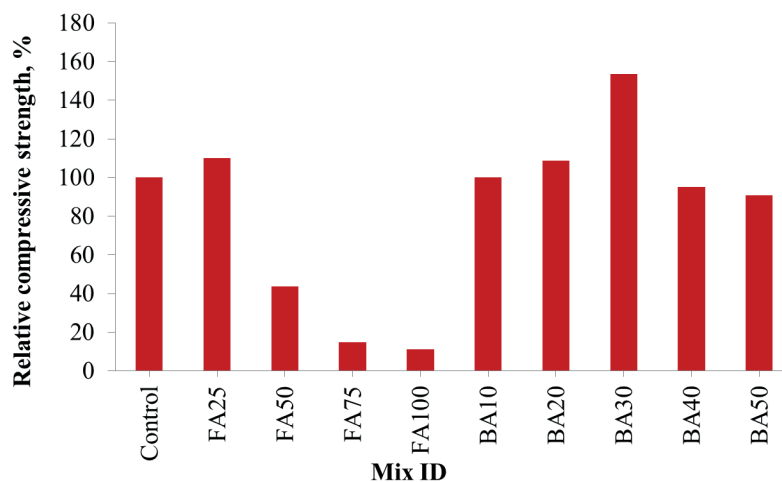
Rysunki od 17 do 22 przedstawiają względną wytrzymałość na ściskanie mieszanek betonu lekkiego CM 1:1 po różnym okresie, wynoszącym odpowiednio 1, 3, 7, 14, 28 i 56.-dni. Względna wytrzymałość na ściskanie lekkich mieszanek betonowych CM 1:2, po różnych okresach, wynoszących odpowiednio: 1, 3, 7, 14, 28 i 56 dni, przedstawiono na rys. 23-28. Na rys. od 29 do 34 przedstawiono względną wytrzymałość na ściskanie mieszanek BL z CM 1:3, w różnym wieku.

Szybkość wzrostu wytrzymałości na ściskanie mieszanek, odpowiadająca ich 28.-dniowej wytrzymałości na ściskanie, w zależności od zawartości popiołu lotnego zastępującego kruszywo drobne, podano w tabeli 10.



Rys. 17. Względna wytrzymałość na ściskanie CM 1:1, po jednym dniu

Fig. 17. Relative compressive strength of CM 1:1 at the age of 1 day



Rys. 18. Względna wytrzymałość na ściskanie CM 1:1, po 3 dniach

Fig. 18. Relative compressive strength of CM 1:1 at the age of 3 days

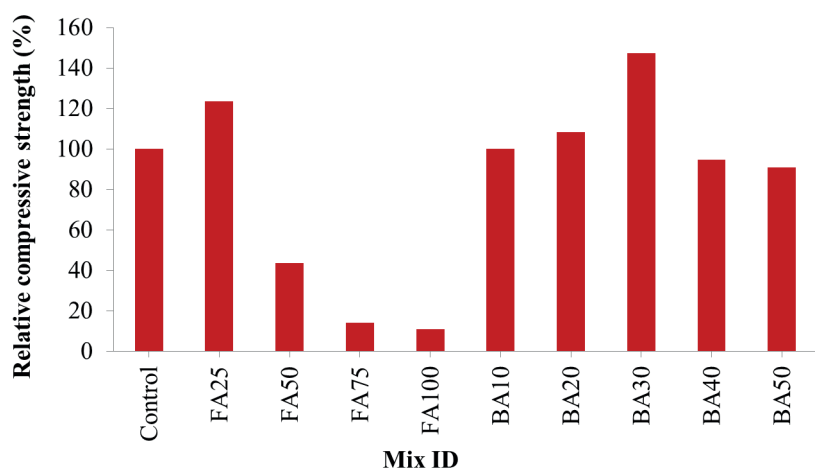
Fig. 21, shows the relative compressive strength of CM 1:1 at the age of 28 days. BA percentage replacement gives higher compressive strength up to 30% replacement and after that the strength decreases. Comparing to the control mix, FA25 gives 23.60% and BA30 gives 49.10% higher compressive strength.

The relative compressive strength of CM 1:1 at the age of 56 days is shown in Fig. 22. The increase in FA percentage replacement gives very lower compressive strength. Comparing to the control mix, FA25 gives 23.60% and BA30 gives 49.10% higher compressive strength. The values are exactly same with 28 days compressive strength.

Fig. 23, shows the relative compressive strength of CM 1:2 at the age of 1 day. Comparing to the control mix, FA25 gives 10.21% and BA30 gives 40.78% higher compressive strength.

The relative compressive strength of CM 1:2 at the age of 3 days is shown in Fig. 24. The increase in FA percentage replacement gives very lower compressive strength. Comparing to the control





Rys. 19. Względna wytrzymałość na ściskanie CM 1:1, po 7 dniach

Fig. 19. Relative compressive strength of CM 1:1 at the age of 7 days

Tabela 11 przedstawia szybkość wzrostu wytrzymałości na ściskanie mieszanek, odpowiadającej ich 28.-dniowej wytrzymałości na ściskanie, w przypadku zastąpienia kruszywa drobnego popiołem z wyłoczyn z trzciny cukrowej.

Rys. 17 przedstawia względną wytrzymałość na ściskanie CM 1:1, po 1. dniu. Zwiększenie zawartości popiołu lotnego daje bardzo małą wytrzymałość na ściskanie, podczas gdy wzrost udziału popiołu z wyłoczyn z trzciny cukrowej, zapewnia większą wytrzymałość na ściskanie, w zakresie do 30 %, a następnie wytrzymałość spada. Dodatek 30% popiołu z wyłoczyn z trzciny cukrowej daje o 47% większą wytrzymałość na ściskanie, w porównaniu z kontrolną mieszanką zaprawy cementowej CM 1:1.

Względna wytrzymałość na ściskanie CM 1:1 po 3 dniach przedstawiono na rys. 18. Wzrost udziału FA daje bardzo małą wytrzymałość na ściskanie, podczas gdy wzrost dodatku PWTC [popiół z trzciny cukrowej] zapewnia większą wytrzymałość na ściskanie, w zakresie do 30% udziału, a następnie wytrzymałość spada. BA30 daje o 53% większą wytrzymałość na ściskanie, w porównaniu z mieszanką kontrolną.

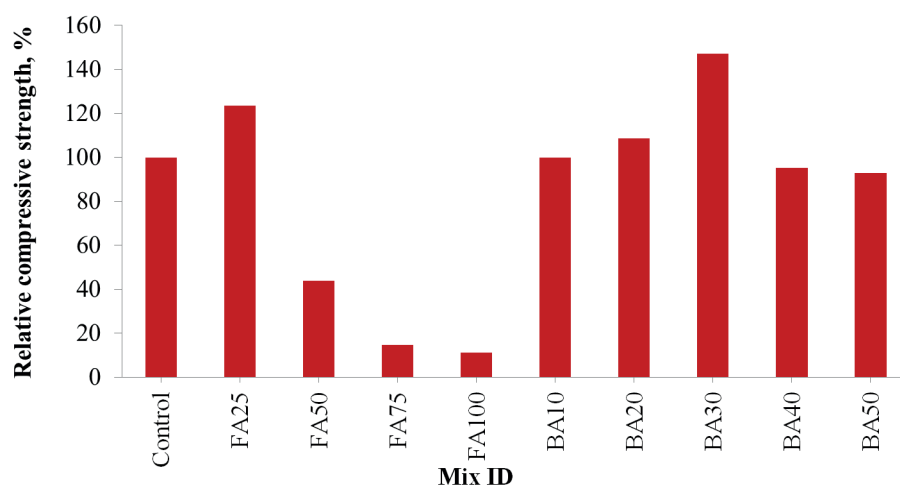
Rys. 19. przedstawia względną wytrzymałość na ściskanie CM 1:1, po 7.-dniach. FA25 zapewnia 23,6% a BA30 47,40% większą wytrzymałość na ściskanie, w porównaniu z mieszanką kontrolną.

Względna wytrzymałość na ściskanie CM 1:1 po 14.-dniach przedstawiono na rys. 20.

mix, FA25 gives 23.46% and BA30 gives 56.85% higher compressive strength.

Fig. 25 shows the relative compressive strength of CM 1:2 at the age of 7 days. The increase in BA percentage replacement gives little higher compressive strength up to 30% replacement and after that the strength gets reduced. The replacement of BA10 and BA20 produces relatively equal strength. Comparing to the control mix, FA25 gives 10% and BA30 gives 40% higher compressive strength.

The relative compressive strength of CM 1:2 at the age of 14 days is shown in Fig. 26. The 100 percentage replacement of fly ash gives very least compressive strength when compared to all mixes. Comparing to the control mix, FA25 gives 23.64% and BA30 gives 59.45% higher compressive strength.



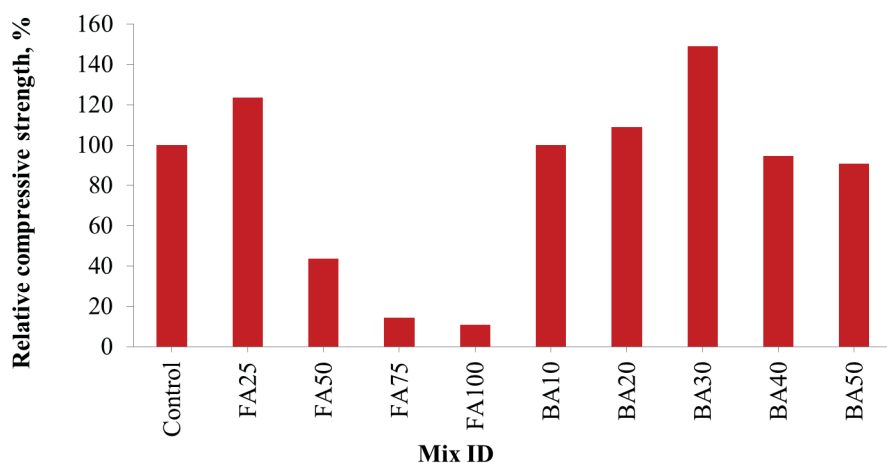
Rys. 20. Względna wytrzymałość na ściskanie CM 1:1, po 14 dniach

Fig. 20. Relative compressive strength of CM 1:1 at the age of 14 days



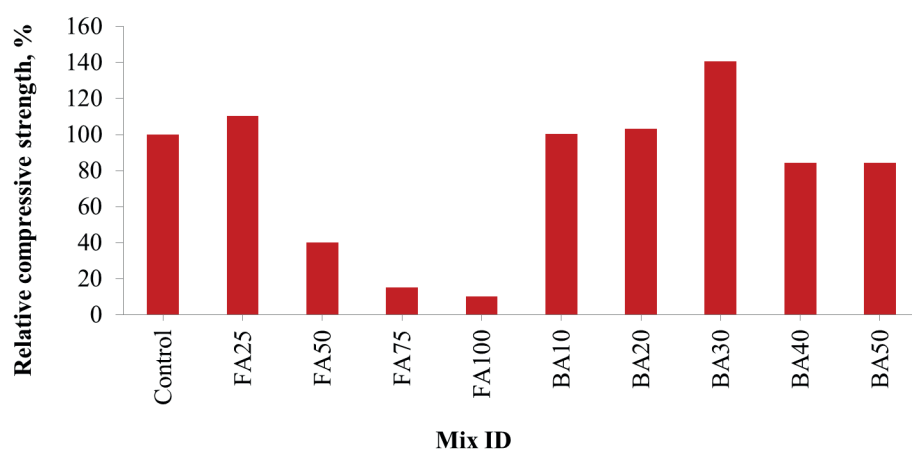
Rys. 21. Względna wytrzymałość na ściskanie CM 1:1 po 28 dniach

Fig. 21. Relative compressive strength of CM 1:1 at the age of 28 days



Rys. 22. Względna wytrzymałość na ściskanie CM 1:1, po 56 dniach

Fig. 22. Relative compressive strength of CM 1:1 at the age of 56 days



Rys. 23. Względna wytrzymałość na ściskanie CM 1:2 po pierwszym dniu

Fig. 23. Relative compressive strength of CM 1:2 at the age of 1 day

FA25 daje 23,60%, a BA30 47,40% większą wytrzymałość na ściskanie, w porównaniu z mieszanką kontrolną.

Rys. 21. przedstawia względną wytrzymałość na ściskanie CM 1:1, po 28 dniach. Procentowe zastąpienie PWTC daje większą wytrzymałość na ściskanie w zakresie dodatku do 30%, a następnie wytrzymałość spada. W porównaniu z mieszanką kontrolną, FA25 daje 23,60%, a BA30 49,10% większą wytrzymałość na ściskanie.

Względna wytrzymałość na ściskanie CM 1:1 po 56 dniach pokazano na rys. 22. Wraz ze wzrostem procentowej zamiany FA uzyskuje się bardzo małą wytrzymałość na ściskanie. W porównaniu z mieszanką kontrolną, FA25 daje 23,60%, a BA30 49,10% większą wytrzymałość na ściskanie. Wielkości te są dokładnie takie same jak w przypadku 28.-dniowej wytrzymałości na ściskanie.

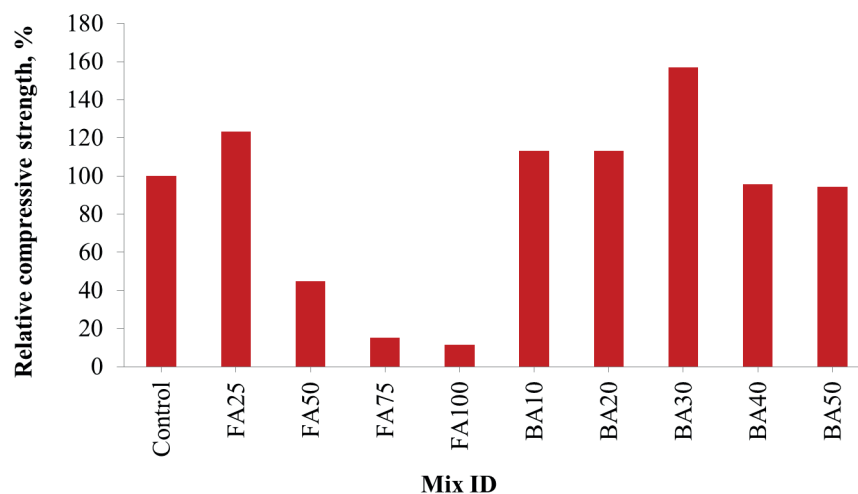
Rys. 23 przedstawia względną wytrzymałość na ściskanie CM 1:2 po 1.-ym dniu. W porównaniu

The increase in FA percentage replacement gives very lower compressive strength after FA25, whereas the increase in BA percentage replacement gives little higher compressive strength up to 30% replacement and after that the strength decreases. Comparing to the control mix, FA25 gives 10% and BA 30 gives 40% higher compressive strength. The relative compressive strength of CM 1:2 at the age of 28 days is shown in Fig. 27.

The relative compressive strength of CM 1:2 at the age of 56 days is shown in Fig. 28. The increase in FA percentage replacement gives very lower compressive strength, whereas the increase in BA percentage replacement gives little higher compressive strength up to 30% replacement and after that the strength decreases. Comparing to the control mix, FA 25 gives 10% and BA30 gives 40% higher compressive strength.

The relative compressive strength of CM 1:3 at the age of 1 day is shown in Fig. 29. The increase in FA percentage replacement gives increase in compressive strength up to FA75 and the strength gets decreased. Whereas the increase in BA percentage replacement gives little higher compressive strength up to 20% replacement and after that the strength decreases. Comparing to the control mix, FA25 gives 26.99% and BA30 gives 53.16% higher compressive strength.

Fig. 30, shows the relative compressive strength of CM 1:3 at the age of 3 days. The FA75 percentage replacement gives increased compressive strength, whereas the increase in BA percentage



Rys. 24. Względna wytrzymałość na ściskanie CM 1:2, po 3 dniach

Fig. 24. Relative compressive strength of CM 1:2 at the age of 3 days

z mieszanką kontrolną, FA25 daje 10,21%, a BA30 o 40,78% większą wytrzymałość na ściskanie.

Względną wytrzymałość na ściskanie CM 1:2 po 3.-dniach przedstawiono na rys. 24. Wraz ze wzrostem zamiany FA uzyskuje się bardzo małą wytrzymałość na ściskanie. W porównaniu z mieszanką kontrolną, FA25 daje 23,46%, a BA30 56,85% większą wytrzymałość na ściskanie.

Rys. 25 przedstawia względną wytrzymałość na ściskanie CM 1:2, po 7.-dniach. Wzrost zawartości PWTC daje nieco większą wytrzymałość na ściskanie do 30% dodatku, a następnie wytrzymałość ulega zmniejszeniu. Zamiana BA10 i BA20 daje stosunkowo równą wytrzymałość. W porównaniu z mieszanką kontrolną, FA25 daje 10 %, a BA30 do 40 % większą wytrzymałość na ściskanie.

Względną wytrzymałość na ściskanie CM 1:2 po 14 dniach przedstawiono na rys. 26. 100% zastąpienie popiołem lotnym daje bardzo małą wytrzymałość na ściskanie, w porównaniu do wszystkich mieszanek. W porównaniu z mieszanką kontrolną, FA25 daje 23,64%, a BA30 o 59,45% większą wytrzymałość na ściskanie.

Wzrost udziału FA daje bardzo małą wytrzymałość na ściskanie po dodatku przekraczającego 25% zawartości FA25, podczas gdy wzrost procentowego udziału PWTC daje nieco większą wytrzymałość na ściskanie do 30% udziału, a następnie wytrzymałość spada. W porównaniu z mieszanką kontrolną, FA25 daje 10%, a BA 30%, daje 40% większą wytrzymałość na ściskanie. Względną



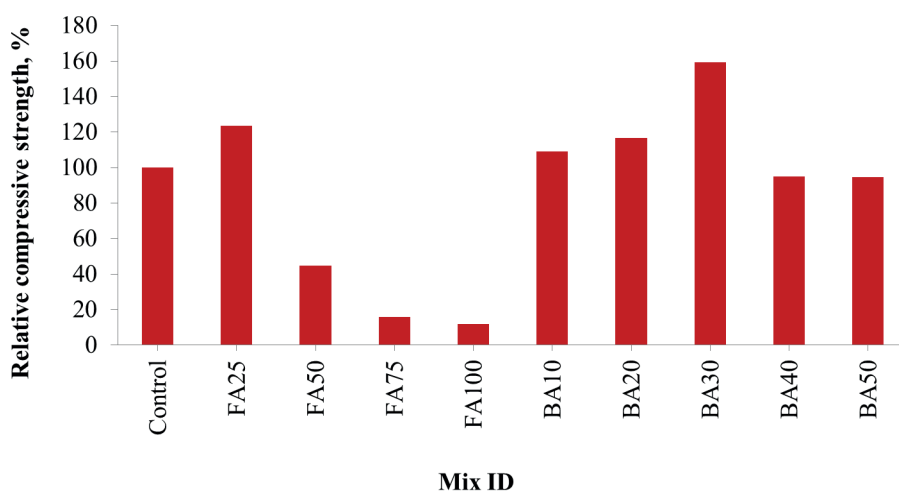
Rys. 27. Względna wytrzymałość na ściskanie CM 1:2, po 28 dniach

Fig. 27. Relative compressive strength of CM 1:2 at the age of 28 days



Rys. 25. Względna wytrzymałość na ściskanie CM 1:2, po 7 dniach

Fig. 25. Relative compressive strength of CM 1:2 at the age of 7 days



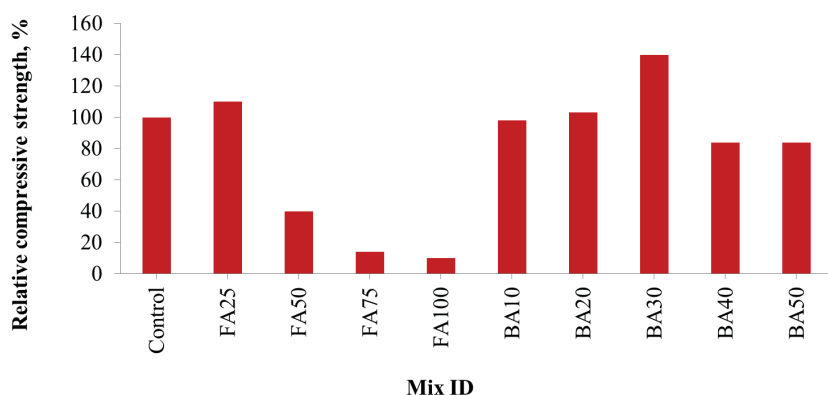
Rys. 26. Względna wytrzymałość na ściskanie CM 1:2, po 14 dniach

Fig. 26. Relative compressive strength of CM 1:2 at the age of 14 days

replacement gives little higher compressive strength up to 10% replacement and after that the strength decreases. Comparing to the control mix, BA30 gives 51.09% lower compressive strength.

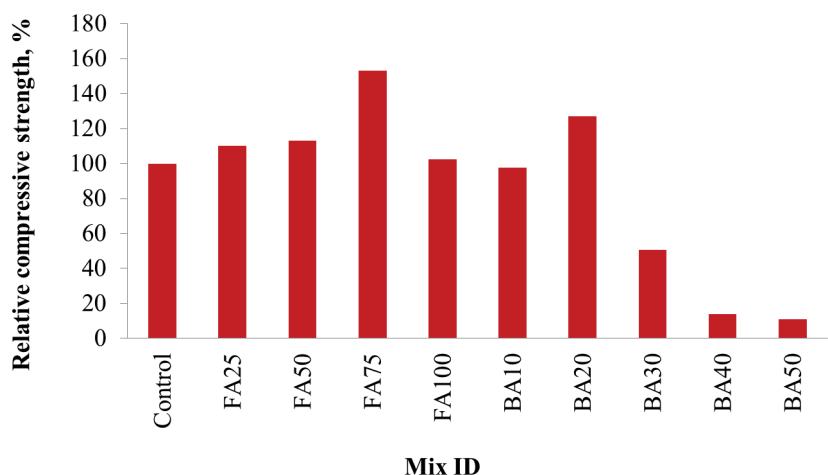
Fig. 31, shows the relative compressive strength of CM 1:3 at the age of 7 days. The FA75 percentage replacement gives increased compressive strength, whereas the increase in BA percentage replacement gives lower compressive strength in all the mixes compared to control. Comparing to the control mix, BA30 gives 27.91% lower compressive strength.

Fig. 32, shows the relative compressive strength of CM 1:3 at the age of 14 days. Considering all the mixes FA75 produces higher compressive strength and BA50 produces very low compressive strength. Comparing to the



Rys. 28. Względna wytrzymałość na ściskanie CM 1:2, po 56 dniach

Fig. 28. Relative compressive strength of CM 1:2 at the age of 56 days



Rys. 29. Względna wytrzymałość na ściskanie CM 1:3, po pierwszym dniu

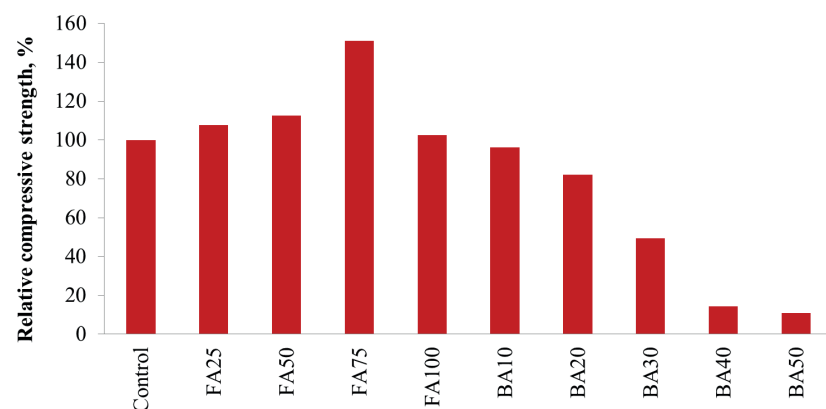
Fig. 29. Relative compressive strength of CM 1:3 at the age of 1 day

wytrzymałość na ściskanie CM 1:2, po 28 dniach przedstawiono na rys. 27.

Względną wytrzymałość na ściskanie CM 1:2, po 56.-dniach przedstawiono na rys. 28. Wzrost udziału FA daje bardzo małą wytrzymałość na ściskanie, podczas gdy wzrost zawartości PWTC zapewnia nieco większą tę wytrzymałość do 30 % jego dodatku, a następnie wytrzymałość spada. W porównaniu z mieszanką kontrolną, FA25 daje 10%, a BA30 daje 40% większą wytrzymałość na ściskanie.

Względną wytrzymałość na ściskanie CM 1:3 po 1.-dniu przedstawiono na rys. 29. Zwiększenie udziału FA powoduje wzrost wytrzymałości na ściskanie do składu FA75, po czym wytrzymałość maleje. Natomiast wzrost zawartości PWTC daje nieco większą wytrzymałość na ściskanie do 20% jego zawartości, a następnie wytrzymałość maleje. W porównaniu z mieszanką kontrolną, FA25 daje 26,99%, a BA30 53,16% większą wytrzymałość na ściskanie.

Rys. 30. przedstawia względną wytrzymałość na ściskanie CM 1:3 po 3.-dniach. Zamiana FA75 powoduje wzrost wytrzymałości na ściskanie, nato-



Rys. 30. Względna wytrzymałość na ściskanie CM 1:3, po 3 dniach

Fig. 30. Relative compressive strength of CM 1:3 at the age of 3 days

control mix, BA30 gives 43.56% lower compressive strength.

Fig. 33, shows the relative compressive strength of CM 1:3 at the age of 28 days. Considering all the mixes FA75 and BA20 produces higher compressive strength values and BA50 produces very low compressive strength. Comparing to the control mix, BA30 gives 27.91% lower compressive strength.

Fig. 34, shows the relative compressive strength of CM 1:3 at the age of 56 days. The increase in FA percentage replacement gives increase in compressive strength up to FA75, whereas the increase in BA percentage replacement gives little higher compressive strength up to 20% replacement and after that the strength decreases. Comparing to the control mix, BA30 gives 27.91% lower compressive strength. The strength at the age of 1 day, 3 days, 7 days, 14 days, 28 days and 56 days in the 30% replacement of bagasse ash are 47%, 53.51%, 47.41%, 47.28% and 49.09% respectively.

#### 4.1.2. Cylinders Compressive Strength

The cylinder compressive strength of light weight concrete mixtures at the age of 28 days is given in Table 12. The relative cylinder compressive strength of light weight concrete mixtures at the age of 28 days are tabulated in Table 13 and shown in Figs. 35-37, for CM 1:1, 1:2 and 1:3 respectively. The addition of 30% of bagasse ash and 25% of fly ash as a fine aggregate replacement material in control concrete mixtures in cement mortar 1:1 increases the cylinder compressive strength by 49.09% and 23.63%, respectively, compared to control concrete. The addition of 50%, 75% and 100% fly ash shows the reduction in strength of 58.13%, 88.37% and 90.69% in CM 1:3 and 56.3%, 85% and 89% in CM 1:1 respectively.

Fig. 35, shows the relative cylinder compressive strength of CM 1:1 at the age of 28 days. The increase in FA percentage repla-

miast wzrost procentowej zamiany PWTC powoduje niewielki wzrost wytrzymałości na ściskanie do 10% jego zawartości, a następnie wytrzymałość maleje. W porównaniu do mieszanki kontrolnej BA30 daje o 51,09 % mniejszą wytrzymałość na ściskanie.

Rys. 31 przedstawia względną wytrzymałość na ściskanie CM 1:3 po 7.-dniach. Zamiana FA75 powoduje wzrost wytrzymałości na ściskanie, natomiast wzrost zamiany PWTC powoduje spadek wytrzymałości na ściskanie we wszystkich mieszankach, w porównaniu do próbki kontrolnej. W porównaniu z mieszanką kontrolną BA30 daje o 27,91% mniejszą wytrzymałość na ściskanie.

Rys. 32 przedstawia względną wytrzymałość na ściskanie CM 1:3, po 14.-dniach. Biorąc pod uwagę wszystkie mieszanki, FA75 uzyskuje większą wytrzymałość na ściskanie, a BA50 bardzo małą wytrzymałość na ściskanie. W porównaniu do mieszanki kontrolnej BA30 daje o 43,56 % mniejszą wytrzymałość na ściskanie.

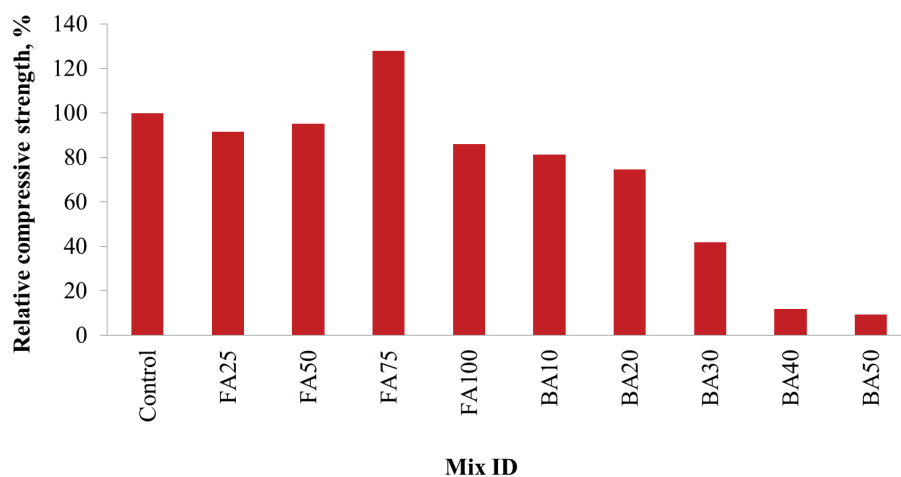
Rys. 33 przedstawia względną wytrzymałość na ściskanie CM 1:3 po 28.-dniach twardnienia. Biorąc pod uwagę wszystkie mieszanki FA75 i BA20 wykazują większą wytrzymałość na ściskanie, natomiast BA50 ma bardzo małą wytrzymałość na ściskanie. W porównaniu do mieszanki kontrolnej BA30 daje o 27,91% mniejszą wytrzymałość na ściskanie.

Rys. 34 przedstawia względną wytrzymałość na ściskanie CM 1:3 po 56.-dniach. Wzrost zawartości FA powoduje przyrost wytrzymałości na ściskanie aż do FA75, natomiast wzrost procentowego udziału PWTC powoduje niewielki wzrost wytrzymałości na śc-



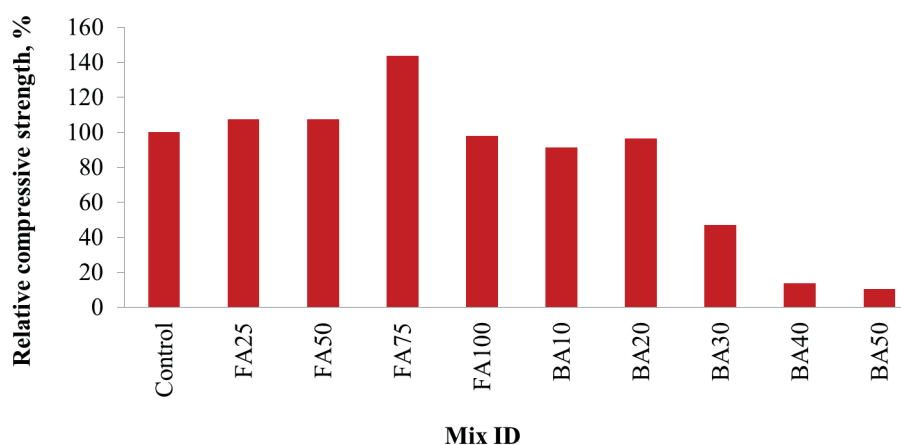
Rys. 33. Względna wytrzymałość na ściskanie CM 1:3, po 28 dniach

Fig. 33. Relative compressive strength of CM 1:3 at the age of 28 days



Rys. 31. Względna wytrzymałość na ściskanie CM 1:3, po 7 dniach

Fig. 31. Relative compressive strength of CM 1:3 at the age of 7 days



Rys. 32. Względna wytrzymałość na ściskanie CM 1:3, po 14 dniach

Fig. 32. Relative compressive strength of CM 1:3 at the age of 14 days

cement gives very lower cylinder compressive strength, whereas the increase in BA percentage replacement gives higher cylinder compressive strength up to 30% replacement and after that the strength decreases. Comparing to the control mix, FA25 gives 23.60%, BA30 gives 49.10% higher cylinder compressive strength.

The relative cylinder compressive strength of CM 1:2 at the age of 28 days is shown in Fig. 36. The increase in FA percentage replacement gives very lower cylinder compressive strength, whereas the increase in BA percentage replacement gives little higher cylinder compressive strength up to 30% replacement and after that the strength decreases. FA25 gives 10%, BA30 gives 40% higher cylinder compressive strength comparing to the control mix.

The increase in FA percentage replacement gives lower cylinder compressive strength when compared to control mix except FA25, whereas the increase in BA percentage repla-

Tablica 12 / Table 12

WYTRZYMAŁOŚĆ NA ŚCISKANIE WALCÓW Z MIESZANEK BETONÓW LEKKICH, PO 28 DNIACH

CYLINDER COMPRESSIVE STRENGTH OF LIGHT WEIGHT CONCRETE MIXTURES AT THE AGE OF 28 DAYS

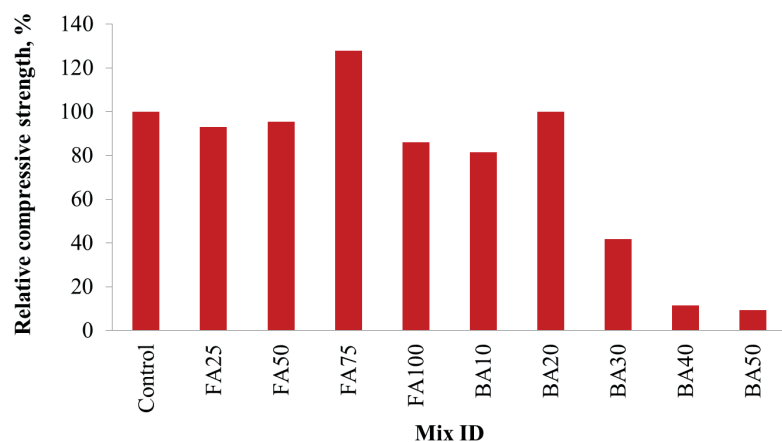
Cylinder compressive strength Wytrzymałość na ściskanie walca, MPa				
S.No. Nr próbki	Mix ID ID mieszanki	CM 1:1	CM 1:2	CM 1:3
1	Control Próbka kontrolna	4.345	3.950	3.397
2	FA25	5.372	4.345	3.634
3	FA50	1.896	1.580	1.422
4	FA75	0.632	0.553	0.395
5	FA100	0.474	0.395	0.316
6	BA10	4.345	3.871	3.160
7	BA20	4.740	4.108	3.239
8	BA30	6.478	5.530	4.345
9	BA40	4.108	3.318	2.923
10	BA50	3.950	3.318	2.765

Tablica 13 / Table 13

WZGLĘDNA WYTRZYMAŁOŚĆ NA ŚCISKANIE WALCÓW Z MIESZANEK BETONÓW LEKKICH W WIEKU 28 DNI

RELATIVE CYLINDER COMPRESSIVE STRENGTH OF LIGHT WEIGHT CONCRETE MIXTURES AT THE AGE OF 28 DAYS

Relative cylinder compressive strength Względna wytrzymałość na ściskanie walca, MPa				
S.No. Nr próbki	Mix ID ID mieszanki	CM 1:1	CM 1:2	CM 1:3
1	Control Próbka kontrolna	100.00	100.00	100.00
2	FA25	123.64	110.00	106.98
3	FA50	43.64	40.00	41.86
4	FA75	14.55	14.00	11.63
5	FA100	10.91	10.00	9.30
6	BA10	100.00	98.00	93.02
7	BA20	109.09	104.00	95.35
8	BA30	149.09	140.00	127.91
9	BA40	94.55	84.00	86.05
10	BA50	90.91	84.00	81.40



Rys. 34. Względna wytrzymałość na ściskanie CM 1:3, po 56 dniach twardnienia

Fig. 34. Relative compressive strength of CM 1:3 at the age of 56 days

skanie do 20% tego dodatku, a następnie wytrzymałość maleje. W porównaniu do mieszanki kontrolnej BA30 daje o 27,9% mniejszą wytrzymałość na ściskanie. Wytrzymałość po 1, 3, 7, 14, 28 i 56 dniach w przypadku 30% zastąpienia popiołem z wycłoczyn z trzciny cukrowej, wynosi odpowiednio 47%, 53,51%, 47,41%, 47,28% i 49,09%.

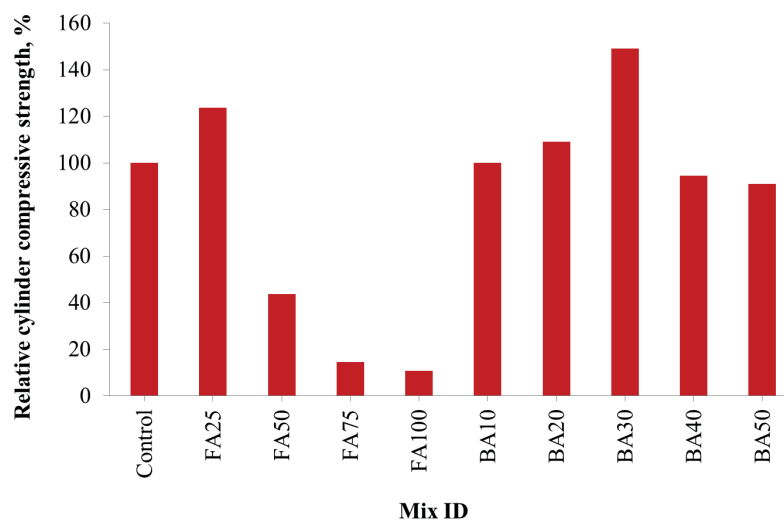
#### 4.1.2. Wytrzymałość walców na ściskanie

Wytrzymałość na ściskanie walców z mieszanki betonu lekkiego po 28.-dniach twardnienia, podano w tablicy 12. W tablicy 13 zestawiono względną wytrzymałość na ściskanie walców z mieszanki betonu lekkiego [BL] po 28 dniach twardnienia, a na rysunkach od 35 do 37 przedstawiono tę wytrzymałość odpowiednio dla CM 1:1, 1:2 i 1:3. Dodatek 30% popiołu z wycłoczyn z

cement gives I higher cylinder compressive strength up to 30 % replacement and after that the strength decreases. FA25 gives 7%, BA30 gives 27.90 % higher cylinder compressive strength comparing to the control mix. The relative cylinder compressive strength of CM 1:3 at the age of 28 days is shown in Fig. 37.

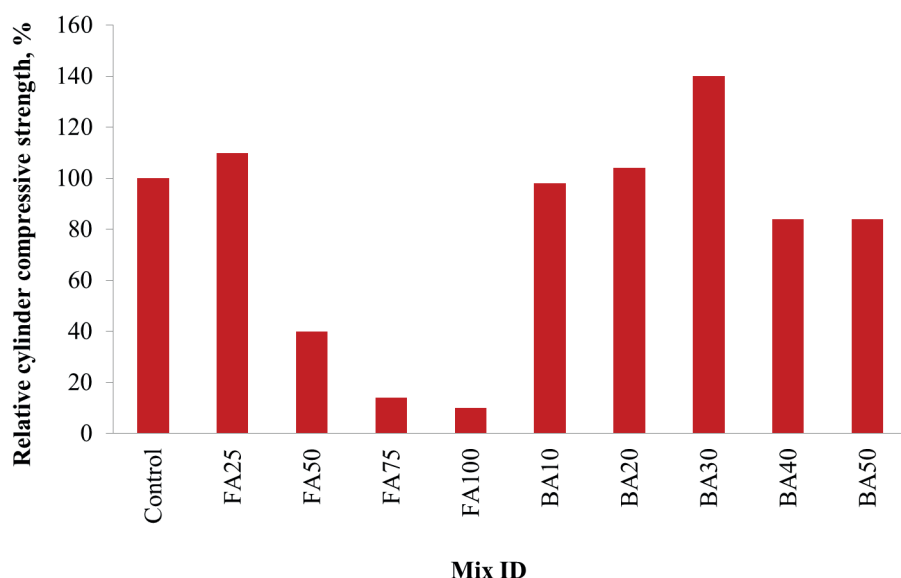
#### 4.1.3. Split tensile strength

The splitting tensile strength of light weight concrete mixtures at the age of 28 days are given in Table 14. The relative split tensile strength of light weight concrete mixtures at the age of 28 days are tabulated in Table 15 and shown in Fig. 38 - 40, for CM 1:1, CM 1:2 and CM 1:3 respectively. The addition of fly ash and bagasse ash in



Rys. 35. Względna wytrzymałość na ściskanie walca z betonu lekkiego CM 1:1, po 28 dniach

Fig. 35. Relative cylinder compressive strength of light weight concrete with CM 1:1 at the age of 28 days



Rys. 36. Względna wytrzymałość na ściskanie walca z betonu lekkiego CM 1:2, po 28 dniach

Fig. 36. Relative cylinder compressive strength of light weight concrete with CM 1:2 at the age of 28 days

trzciny cukrowej i 25% popiołu lotnego, jako dodatki mineralne zastępujące kruszywo drobne w mieszankach betonu kontrolnego w zaprawie cementowej 1:1, zwiększa wytrzymałość na ściskanie walca odpowiednio o 49,09% i 23,63%, w porównaniu z betonem kontrolnym. Dodatek 50%, 75% i 100% popiołu lotnego powoduje zmniejszenie wytrzymałości o 58,13%, 88,37% i 90,69% w CM 1:3 oraz odpowiednio o 56,3%, 85% i 89% w CM 1:1.

Rys. 35. przedstawia względną wytrzymałość na ściskanie walca z CM 1:1, po 28.-dniach. Wzrost procentowego udziału FA daje bardzo małą wytrzymałość na ściskanie walców, podczas gdy wzrost procentowego udziału PWTC daje większą wytrzymałość na ściskanie walca do 30% udziału, a następnie wytrzymałość spada. W porównaniu z mieszanką kontrolną, FA25 daje o 23,60%, a BA30 o 49,10% większą wytrzymałość na ściskanie walców.

Względna wytrzymałość na ściskanie walców z CM 1:2 po 28.-dniach przedstawiono na rysunku 36. Wzrost zawartości FA zapewnia bardzo małą wytrzymałość na ściskanie walców, podczas gdy wzrost udziału PWTC daje nieco większą wytrzymałość, do 30% jego zawartości, a następnie wytrzymałość spada. FA25 daje 10%, a BA30 40% większą wytrzymałość na ściskanie walców, w porównaniu z mieszanką kontrolną.

Wzrost zawartości FA powoduje zmniejszenie wytrzymałości na ściskanie walców w porównaniu z mieszanką kontrolną, z wyjątkiem FA25, natomiast wzrost procentowego udziału BP powoduje wzrost wytrzymałości na ściskanie walców do 30% jego dodatku, a następnie spadek wytrzymałości. FA25 daje 7%, BA30 27,90% większą wytrzymałość na ściskanie walców, w porównaniu z mieszanką kontrolną.



Rys. 37. Względna wytrzymałość na ściskanie walca z betonu lekkiego CM 1:3, po 28 dniach

Fig. 37. Relative cylinder compressive strength of light weight concrete with CM 1:3 at the age of 28 days

CM 1:1 shows reduction in strength in almost all the different percentage of replacements such as BA10, BA20, BA30, BA40, BA50 and FA25, FA50, FA75 and FA100. Bagasse ash of 10%, 20%, 30%, 40% and 50% replacement shows a reduction in strength of 18.37%, 33.67%, 36.73%, 40.82% and 48.98% and the replacement of fly ash with fine aggregate shows 36.73%, 67.5%, 69.39% and 84.69% respectively in case of FA 25, FA50, FA75 and FA100.

The relative split tensile strength of CM 1:1 at the age of 28 days is shown in Fig. 38. The increase in FA, BA percentage replacement gives very lower split tensile strength. All the combinations give lower split tensile strength than the control mix.

The relative split tensile strength of CM 1:2 at the age of 28 days is shown in Fig. 39. The increase in FA, BA percentage replacement gives very lower split tensile strength. FA25 and BA30 possessed 9.09% and 7.27% higher split tensile strength comparing to the control mix. BA40 possess equal compressive strength compared to control mix. FA75 and FA100 produce less split tensile strength when compare to control concrete.

The relative split tensile strength of CM 1:3 at the age of 28 days are shown in Fig. 40. The increase in FA content in mix decreasing split tensile strength. BA30 gives 22.22% higher split tensile strength comparing to the control mix.

Tablica 14 / Table 14

WYTRZYMAŁOŚĆ NA ROZCIĄGANIE PRZY ROZŁUPYWANIU, MIESZANEK BL PO 28.-DNIACH, MPa

SPLIT TENSILE STRENGTH OF LIGHT WEIGHT CONCRETE MIXTURES AT THE AGE OF 28 DAYS, MPa

Split Tensile strength Wytrzymałość na rozciąganie przy rozłupywaniu, MPa				
S.No. Nr próbki	Mix ID ID mieszanki	CM 1:1	CM 1:2	CM 1:3
1	Control	0.98	0.55	0.45
2	FA25	0.62	0.60	0.42
3	FA50	0.32	0.30	0.23
4	FA75	0.30	0.20	0.17
5	FA100	0.15	0.18	0.12
6	BA10	0.80	0.72	0.70
7	BA20	0.65	0.62	0.60
8	BA30	0.62	0.59	0.55
9	BA40	0.58	0.55	0.53
10	BA50	0.50	0.47	0.44

Tablica 15 / Table 15

WZGLĘDNA WYTRZYMAŁOŚĆ NA ROZCIĄGANIE PRZY ROZŁUPYWANIU W % MIESZANEK BETONÓW LEKKICH PO 28 DNIACH

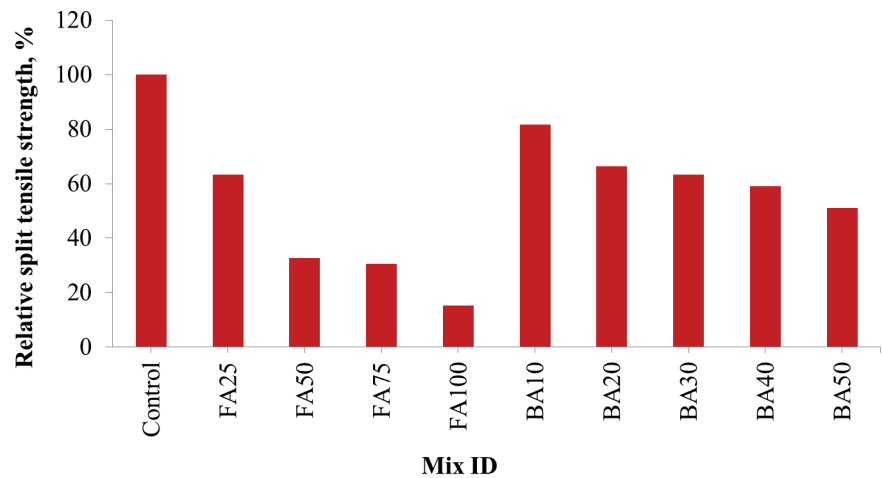
RELATIVE SPLIT TENSILE STRENGTH OF LIGHT WEIGHT CONCRETE MIXTURES AT THE AGE OF 28 DAYS

Relative split tensile strength Względna wytrzymałość na rozciąganie przy rozłupywaniu, MPa				
S.No. Nr próbki	Mix ID ID mieszanki	CM 1:1	CM 1:2	CM 1:3
1	Control	100.00	100.00	100.00
2	FA25	63.27	109.09	93.33
3	FA50	32.65	54.55	51.11
4	FA75	30.61	36.36	37.78
5	FA100	15.31	32.73	26.67
6	BA10	81.63	130.91	155.56
7	BA20	66.33	112.73	133.33
8	BA30	63.27	107.27	122.22
9	BA40	59.18	100.00	117.78
10	BA50	51.02	85.45	97.78

Względną wytrzymałość na ściskanie walców z CM 1:3 po 28.-dniach pokazano na rys. 37.

#### 4.1.3. Wytrzymałość na rozciąganie przy rozłupywaniu

Wytrzymałość na rozciąganie przy rozłupywaniu mieszanek z betonu lekkiego po 28.-dniach podano w tablicy 14. W tablicy 15 zestawiono względną wytrzymałość na rozciąganie przy rozłupywaniu mieszanek BL po 28.-dniach, a na rys. od 38 do 40 przedstawiono ją odpowiednio dla CM 1:1, CM 1:2 i CM 1:3. Dodatek popiołu lotnego i popiołu z wyłoczyn z trzciny cukrowej w CM 1:1 powoduje zmniejszenie wytrzymałości w prawie wszystkich próbkach i różnej zawartości, a mianowicie BA10, BA20, BA30, BA40, BA50 i



Rys 38. Względna wytrzymałość na rozciąganie przy rozłupywaniu CM 1:1 po 28 dniach

Fig. 38. Relative split tensile strength of CM 1:1 at the age of 28 days



Rys. 39. Względna wytrzymałość na rozciąganie przy rozłupywaniu CM 1:2 po 28 dniach

Fig. 39. Relative split tensile strength of CM 1:2 at the age of 28 days

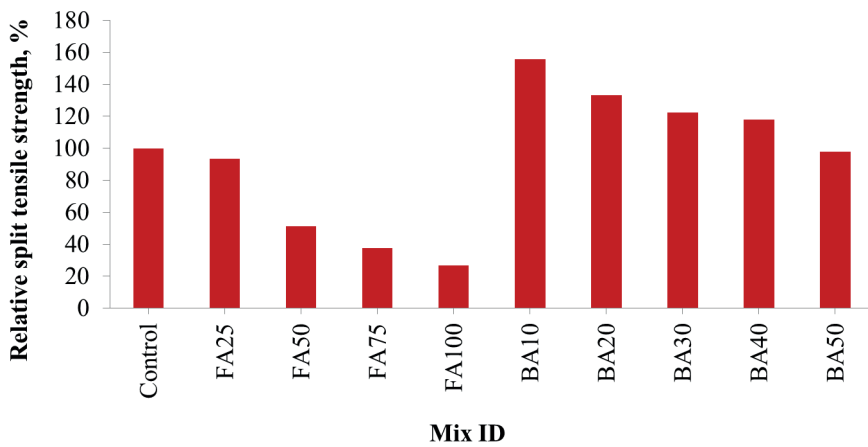
## 4.2. Relationship between the mechanical properties of light weight concrete mixtures

This section describes the relationship between the mechanical properties of cube compressive strength, cylinder compressive strength and split tensile strength.

### 4.2.1. Relationship between cube compressive strength and split tensile strength

The relationship between cube compressive strength and split tensile strength of all mix combinations is shown in the Figs. 41 to 43, for the different mortar mix such as CM 1:1, CM 1:2 and CM 1:3. The





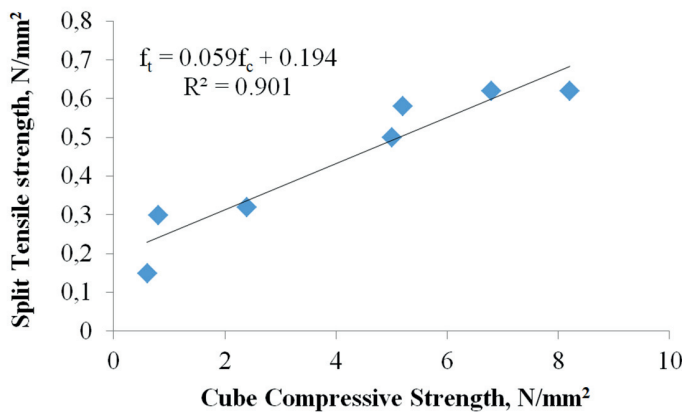
Rys. 40. Względna wytrzymałość na rozciąganie przy rozłupywaniu CM 1:3, po 28 dniach

Fig. 40. Relative split tensile strength of CM 1:3 at the age of 28 days

FA25, FA50, FA75 i FA100. Zastępowanie popiołem z wytloczyn w ilości 10%, 20%, 30%, 40% i 50% wykazuje zmniejszenie wytrzymałości odpowiednio o 18,37%, 33,67%, 36,73%, 40,82% i 48,98%, a zastąpienie popiołem lotnym kruszywa drobnego zmniejsza wytrzymałość o 36,73%, 67,5%, 69,39% i 84,69% odpowiednio w przypadku FA25, FA50, FA75 i FA100.

Względną wytrzymałość na rozciąganie przy rozłupywaniu CM 1:1 po 28.-dniach przedstawiono na rys. 38. Wzrost zawartości FA i PWTC daje bardzo małą wytrzymałość na rozciąganie przy rozłupywaniu. Wszystkie kombinacje dają mniejszą wytrzymałość na rozciąganie przy rozłupywaniu od mieszanki kontrolnej.

Względną wytrzymałość na rozciąganie przy rozłupywaniu CM 1:2 po 28.-dniach pokazano na rys. 39. Wzrost zawartości FA i PWTC zapewnia bardzo małą wytrzymałość na rozciąganie przy rozłupywaniu. FA25 i BA30 dawały odpowiednio o 9,09% i 7,27%



gdzie:  $f_t$  – oznacza wytrzymałość na rozciąganie przy rozłupywaniu,  $N/mm^2$ ,  $f_c$  – oznacza wytrzymałość zaprawy na ściskanie,  $N/mm^2$   
 where,  $f_t$  – indicated the split tensile strength in  $N/mm^2$ ,  $f_c$  – indicated the compressive strength of mortar in  $N/mm^2$

Rys. 41. Zależność wytrzymałości kostek na ściskanie od wytrzymałości na rozciąganie przy rozłupywaniu CM 1:1

Fig. 41. Relationship between cube compressive strength and split tensile strength of CM 1:1

equation of the linear trend line in the graph represents the equation for compressive strength values of the mortar specimens. These equations have been arrived by plotting the data of the mortar specimens and finding out the linear equation [Trend analysis].

Fig. 41, shows the relationship between cube compressive strength and split tensile strength of CM 1:1. The cube compressive strength and split tensile strength are directly proportional to each other.

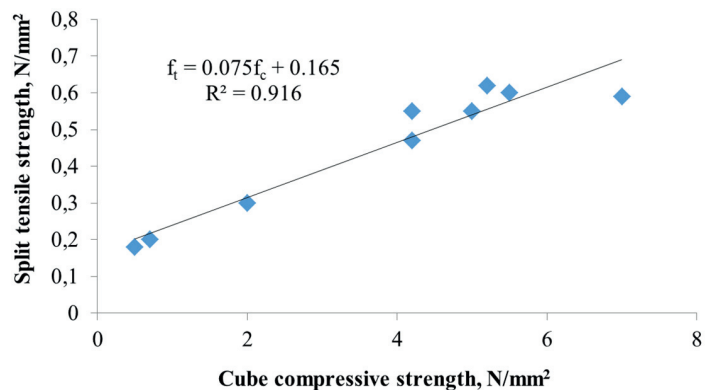
Fig. 42, shows the relationship between cube compressive strength and split tensile strength of CM 1:2. The cube compressive strength and split tensile strength are directly proportional to each other.

Fig. 43, shows the relationships between cube compressive strength and split tensile strength of CM 1:3. The cube compressive strength and split tensile strength are directly proportional to each other.

Table 16, gives the relationship between cube compressive strength and split tensile strength and is highly associated with  $R^2$  values. The mix CM 1:1 and CM 1:2 have  $R^2$  value greater than 0.9. Hence the relationship exists between cube compressive strength and split tensile strength.

#### 4.2.2. Relationship between cylinder compressive strength and split tensile strength

The relationship between cylinder compressive strength and split tensile strength are graphically presented in Figs. 44 - 46 for the cement mortar mix of CM 1:1, 1:2, and CM 1:3 respectively. It was observed that the split tensile strength increases when the cylinder compressive strength increases, and also it was observed that in the CM 1:2 and CM 1:3 both the strength of concrete in compression and tension are closely related. The equation obtained from the trend analysis are tabulated in Table 17.



Rys. 42. Zależność wytrzymałości kostek na ściskanie od wytrzymałości na rozciąganie przy rozłupywaniu CM 1:2

Fig. 42. Relationship between cube compressive strength and split tensile strength of CM 1:2

większą wytrzymałość na rozciąganie przy rozłupywaniu, w porównaniu z mieszanką kontrolną. BA40 ma taką samą wytrzymałość na ściskanie, w porównaniu z mieszanką kontrolną. FA75 i FA100 mają mniejszą wytrzymałość na rozciąganie przy rozłupywaniu, w porównaniu do betonu kontrolnego.

Względną wytrzymałość na rozciąganie przy rozłupywaniu CM 1:3 po 28.-dniach pokazano na rysunku 40. Wzrost zawartości FA w mieszance powoduje zmniejszenie wytrzymałości na rozciąganie przy rozłupywaniu. BA30 daje o 22,22% większą wytrzymałość na rozciąganie przy rozłupywaniu, w porównaniu z mieszanką kontrolną.

#### 4.2. Zależność między właściwościami mechanicznymi mieszanek betonów lekkich

W tym punkcie opisano związek między właściwościami mechanicznymi: wytrzymałością na ściskanie kostek i walców oraz wytrzymałością na rozciąganie przy rozłupywaniu.

##### 4.2.1. Zależność wytrzymałości na ściskanie kostek a wytrzymałością na rozciąganie przy rozłupywaniu

Zależność wytrzymałości na ściskanie kostek a wytrzymałością na rozciąganie przy rozłupywaniu, dla wszystkich kombinacji mieszanek, przedstawiono na rys. od 41 do 43, dla różnych mieszanek zaprawy, a mianowicie CM 1:1, CM 1:2 i CM 1:3. Równanie linii tendencji liniowej na wykresie, przedstawiają równania wytrzymałości na ściskanie próbek zaprawy. Równania te otrzymano wykreślając dane dla próbek zaprawy i znalezienie równania liniowego – analiza tendencji:

rys. 41. przedstawia zależność wytrzymałości na ściskanie kostek od wytrzymałości na rozciąganie przy rozłupywaniu CM 1:1. Wytrzymałość na ściskanie kostek i wytrzymałość na rozciąganie przy rozłupywaniu, są do siebie wprost proporcjonalne;

rys. 42. przedstawia zależność wytrzymałości na ściskanie kostek od wytrzymałości na rozciąganie przy rozłupywaniu CM 1:2. Wytrzymałość na ściskanie kostek i wytrzymałość na rozciąganie przy rozłupywaniu, są do siebie wprost proporcjonalne;

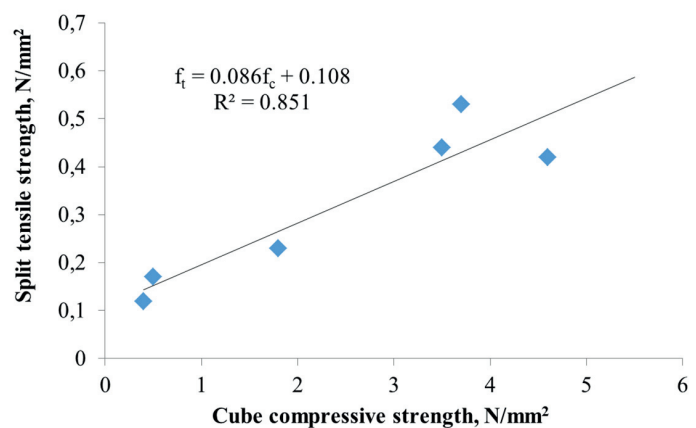
rys. 43. przedstawia zależność wytrzymałości na ściskanie kostek od wytrzymałości na rozciąganie przy rozłupywaniu CM 1:3. Wytrzymałość na ściskanie kostek i wytrzymałość na rozciąganie przy rozłupywaniu, są do siebie wprost proporcjonalne.

Tablica 16 / Table 16

ZALEŻNOŚĆ WYTRZYMAŁOŚCI NA ŚCISKANIE KOSTEK OD WYTRZYMAŁOŚCI NA ROZCIĄGANIE PRZY ROZŁUPYWANIU – ANALIZA TENDENCJI

RELATIONSHIP BETWEEN CUBE COMPRESSIVE STRENGTH AND SPLIT TENSILE STRENGTH (TREND ANALYSIS)

Mix / Mieszanka	Equation / Równanie	R <sup>2</sup>
CM 1:1	$f_t = 0.059 f_c + 0.194$	0.901
CM 1:2	$f_t = 0.075 f_c + 0.165$	0.916
CM 1:3	$f_t = 0.086 f_c + 0.108$	0.851



Rys. 43. Zależność wytrzymałości kostek na ściskanie od wytrzymałości na rozciąganie przy rozłupywaniu CM 1:3

Fig. 43. Relationship between cube compressive strength and split tensile strength of CM 1:3

Fig. 44 shows the relationship between cylinder compressive strength and split tensile strength of CM 1:1.

Figs. 45 and 46, shows the relationship between cylinder compressive strength and split tensile strength of CM 1:2 and CM 1:3. The cylinder compressive strength and split tensile strength are directly proportional to each other.

##### 4.2.3. Relation between cylinder compressive strength and cube compressive strength

The mathematical equations obtained from the trend analysis using MS Excel are tabulated in Table 18. It was observed from the result that the cube compressive and cylinder compressive strength are having a close relationship. Figs. 47 to 49 show the relationship between cylinder compressive strength and cube compressive strength.

Fig. 47 shows the relationships between cylinder compressive strength and cube compressive strength of CM 1:1. The cylinder compressive strength and split tensile strength are directly proportional to each other.

Fig. 48 shows the relationship between cylinder compressive strength and cube compressive strength of CM 1:2.

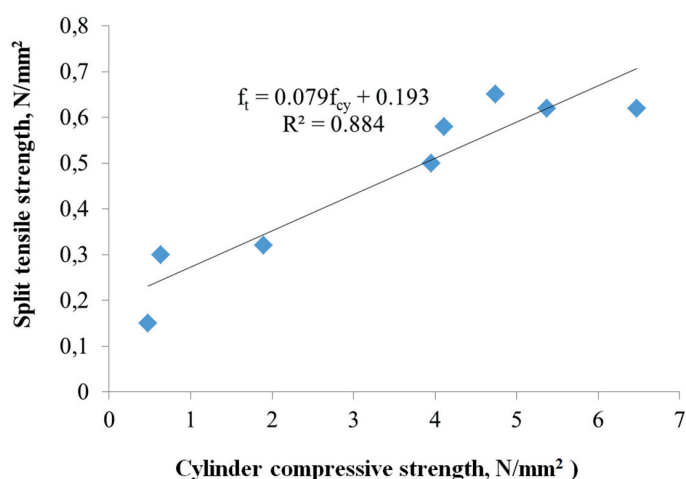
Fig. 49 shows the relationship between cylinder compressive strength and cube compressive strength of CM 1:3. The co-efficient

Tablica 17 / Table 17

ZALEŻNOŚĆ MIĘDZY WYTRZYMAŁOŚCIĄ WALCA NA ŚCISKANIE A WYTRZYMAŁOŚCIĄ NA ROZCIĄGANIE PRZY ROZŁUPYWANIU – ANALIZA TENDENCJI

RELATIONSHIP BETWEEN CYLINDER COMPRESSIVE STRENGTH AND SPLIT TENSILE STRENGTH (TREND ANALYSIS)

Mix / Mieszanka	Equation / Równanie	R <sup>2</sup>
CM 1:1	$f_t = 0.079 f_{cy} + 0.193$	0.884
CM 1:2	$f_t = 0.095 f_{cy} + 0.165$	0.916
CM 1:3	$f_t = 0.118 f_{cy} + 0.156$	0.934



Rys. 44. Zależność wytrzymałości na ściskanie walców od wytrzymałości na rozciąganie przy rozłupywaniu CM 1:1

Fig. 44. Relationship between cylinder compressive strength and split tensile strength of CM 1:1

W tabeli 16 podano zależność wytrzymałości na ściskanie kostek od wytrzymałości na rozciąganie przy rozłupywaniu, która ma duży współczynnik  $R^2$ . Mieszanki CM 1:1 i CM 1:2 mają  $R^2$  większy od 0,9. Stąd istnieje zależność wytrzymałości na ściskanie kostek od wytrzymałości na rozciąganie przy rozłupywaniu.

#### 4.2.2. Zależność wytrzymałości na ściskanie walców od wytrzymałości na rozciąganie przy rozłupywaniu

Zależność wytrzymałości na ściskanie walców od wytrzymałości na rozciąganie przy rozłupywaniu, przedstawiono na rysunkach 44, 45 i 46 dla mieszanki zaprawy cementowej CM 1:1, 1:2 i CM 1:3. Stwierdzono, że wytrzymałość na rozciąganie przy rozłupywaniu wzrasta wraz ze wzrostem wytrzymałości na ściskanie walców, a także ustalono, że w CM 1:2 i CM 1:3 obie wytrzymałości betonu na ściskanie i na rozciąganie są ze sobą ściśle powiązane. Równania uzyskane, w wyniku analizy tendencji zestawiono w tabeli 17.

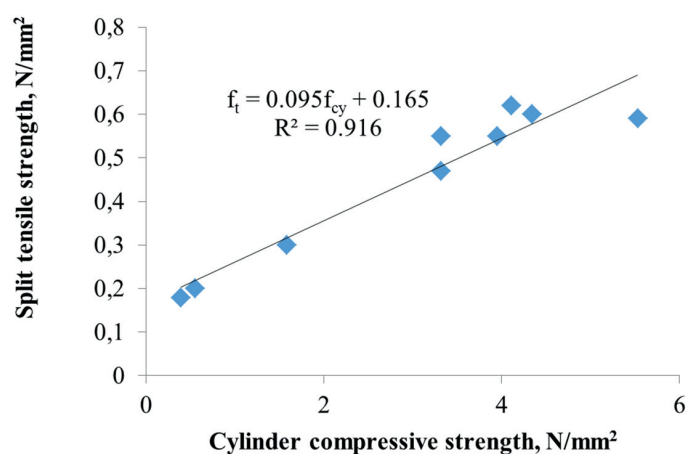
Rys. 44 przedstawia zależność wytrzymałości na ściskanie walców od wytrzymałości na rozciąganie przy rozłupywaniu, CM 1:1.

Rysunki 45 i 46 przedstawiają zależność wytrzymałości na ściskanie walców od wytrzymałości na rozciąganie przy rozłupywaniu CM 1:2 i CM 1:3. Wytrzymałość na ściskanie walców i wytrzymałość na rozciąganie przy rozłupywaniu są do siebie wprost proporcjonalne.

#### 4.2.3. Zależność między wytrzymałością na ściskanie walca, a wytrzymałością na ściskanie sześcianu

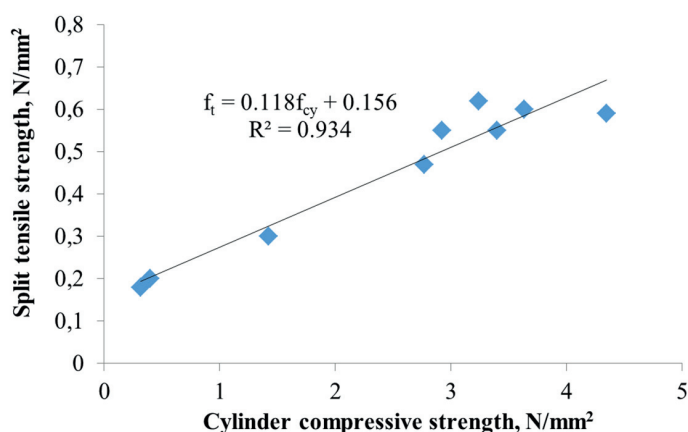
Równania matematyczne uzyskane w wyniku analizy tendencji, przy wykorzystaniu programu MS Excel, zestawiono w tabeli 18. Stwierdzono, że wytrzymałość na ściskanie kostek i walców, są ze sobą ściśle powiązane. Na rysunkach 47-49 przedstawiono zależność wytrzymałości na ściskanie walców od tej samej dla kostek.

Na rys. 47 przedstawiono zależności wytrzymałości na ściskanie walców od wytrzymałości na ściskanie kostek z CM 1:1. Wytrzy-



Rys. 45. Zależność wytrzymałości na ściskanie walców od wytrzymałości na rozciąganie przy rozłupywaniu, CM 1:2

Fig. 45. Relationship between cylinder compressive strength and split tensile strength of CM 1:2



Rys. 46. Zależność wytrzymałości na ściskanie walców od wytrzymałości na rozciąganie przy rozłupywaniu CM 1:3

Fig. 46. Relationship between cylinder compressive strength and split tensile strength of CM 1:3

of regression values very close to 1. The equation possessed very good relationship.

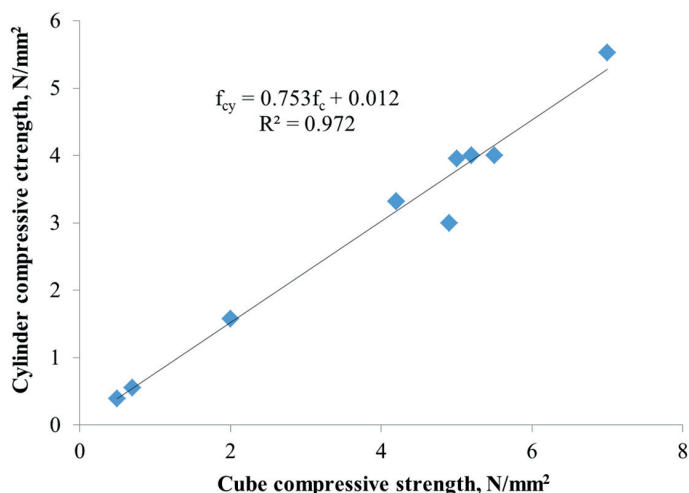
The mathematical relationship between cube compressive strength and split tensile strength of CM 1: 1, CM 1:2 and CM 1:3 was obtained as  $f_t = 0.059 f_c + 0.194$ ,  $f_t = 0.075 f_c + 0.165$  and  $f_t = 0.086 f_c + 0.108$  respectively and the corresponding  $R^2$  values of CM 1: 1, CM 1:2 and CM 1:3 are 0.901, 0.916 and 0.851 respectively. The relationship between cylinder compressive strength and split tensile strength of CM 1:1, CM 1:2 and CM 1:3 was obtained as  $f_t = 0.079 f_{cy} + 0.193$ ,  $f_t = 0.095 f_{cy} + 0.165$  and  $f_t = 0.118 f_{cy} + 0.156$  respectively and the corresponding  $R^2$  values of CM 1: 1, CM 1:2 and CM 1:3 are 0.884, 0.916 and 0.934 respectively. The relationship between cylinder compressive strength and cube compressive strength of CM 1:1, CM 1:2 and CM 1:3 was obtained as  $f_{cy} = 0.750 f_c + 0.083$ ,  $f_{cy} = 0.753 f_c + 0.012$  and  $f_{cy} = 0.761 f_c + 0.058$  respectively and the corresponding  $R^2$  values of CM 1: 1, CM 1:2 and CM 1:3 are 0.994, 0.972 and 0.994 respectively.

Tablica 18 / Table 18

ZALEŻNOŚĆ WYTRZYMAŁOŚCI NA ŚCISKANIE KOSTEK OD WYTRZYMAŁOŚCI NA ŚCISKANIE WALCÓW, ANALIZA TENDENCJI

RELATIONSHIP BETWEEN CUBE COMPRESSIVE STRENGTH AND CYLINDER COMPRESSIVE STRENGTH (TREND ANALYSIS)

Mix / Mieszanka	Equation / Równanie	R <sup>2</sup>
CM 1:1	$f_{cy} = 0.750f_c + 0.083$	0.994
CM 1:2	$f_{cy} = 0.753 f_c + 0.012$	0.972
CM 1:3	$f_{cy} = 0.761 f_c + 0.058$	0.994



Rys. 48. Zależność wytrzymałości na ściskanie walców od wytrzymałości na ściskanie kostek z CM 1:2

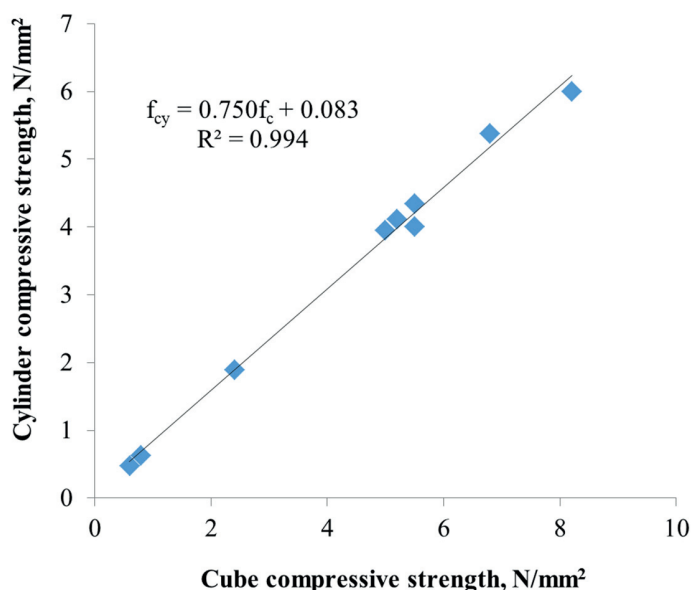
Fig. 48. Relationship between cylinder compressive strength and cube compressive strength of CM 1:2

małość na ściskanie walców i wytrzymałość na rozciąganie przy rozłupywaniu, są do siebie wprost proporcjonalne.

Rys. 48 przedstawia zależność wytrzymałości na ściskanie walców od wytrzymałości na ściskanie kostek z CM 1:2.

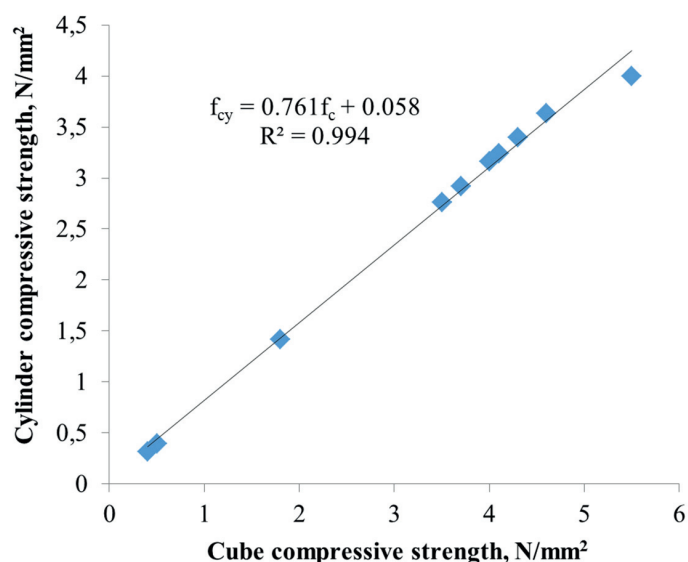
Rys. 49 przedstawia zależność wytrzymałości na ściskanie walców od wytrzymałości na ściskanie kostek z CM 1:3. Współczynnik regresji ma wartości bardzo bliskie 1. Równanie wykazywało bardzo dobrą korelację.

Zależność matematyczna wytrzymałości na ściskanie kostek od wytrzymałości na rozciąganie przy rozłupywaniu CM 1: 1, CM 1:2 i CM 1:3 uzyskano odpowiednio jako  $f_t = 0,059f_c + 0,194$ ,  $f_t = 0,075f_c + 0,165$  i  $f_t = 0,086f_c + 0,108$  oraz odpowiadające im wartości R<sup>2</sup> dla CM 1: 1, CM 1:2 i CM 1:3, które wynoszą 0,901, 0,916 oraz 0,851. Zależność wytrzymałości na ściskanie walców od wytrzymałości na rozciąganie przy rozłupywaniu próbek CM 1:1, CM 1:2 i CM 1:3 uzyskano odpowiednio jako  $f_t = 0,079f_{cy} + 0,193$ ,  $f_t = 0,095f_{cy} + 0,165$  i  $f_t = 0,118f_{cy} + 0,156$  oraz odpowiadające im wartości R<sup>2</sup> dla CM 1: 1, CM 1:2 i CM 1:3, które wynoszą 0,884, 0,916 i 0,934. Zależność wytrzymałości na ściskanie walców od wytrzymałości na ściskanie kostek z CM 1:1, CM 1:2 i CM 1:3 uzyskano odpowiednio jako  $f_{cy} = 0,750f_c + 0,083$ ,  $f_{cy} = 0,753f_c + 0,012$  i  $f_{cy} = 0,761f_c + 0,058$



Rys. 47. Zależność wytrzymałości na ściskanie walców od wytrzymałości na ściskanie kostek z CM 1:1

Fig. 47. Relationship between cylinder compressive strength and cube compressive strength of CM 1:1



Rys. 49. Zależność wytrzymałości na ściskanie walców od wytrzymałości na ściskanie kostek z CM 1:3

Fig. 49. Relationship between cylinder compressive strength and cube compressive strength of CM 1:3

## 5. Conclusions

The conclusions from the experimental investigations give 25% fly ash replacement in the sand content that increase in compressive strength than that of the control specimen in all cement-mortar replacement. Strength decreased significantly after every 25% replacement of fly ash. A 57 to 90% reduction in compressive strength was identified in a 25% increase in fly ash replacement.

C.M with 25% fly ash and 30% bagasse ash gives better strength at all ages. The fly ash and bagasse ash replacement of sand is

oraz odpowiadające im wartości  $R^2$  dla CM 1: 1, CM 1:2 i CM 1:3, wynoszące 0,994, 0,972 i 0,994.

## 5. Wnioski

Wyniki z badań doświadczalnych wykazują, że zastąpienie 25% zawartości piasku popiołem lotnym powoduje wzrost wytrzymałości na ściskanie, w porównaniu z próbką kontrolną, we wszystkich przypadkach zastąpienia zaprawy cementowej. Wytrzymałość znacznie spadała po każdym zastąpieniu większej od 25% popiołu lotnego. Stwierdzono zmniejszenie wytrzymałości na ściskanie od 57% do 90%, przy zwiększeniu zawartości popiołu lotnego przekraczające 25%.

Zaprawy z 25% popiołu lotnego i 30% popiołu z wycłoczyn z trzciny cukrowej mają lepszą wytrzymałość po każdym okresie dojrzewania. Wymiana popiołu lotnego i popiołu z wycłoczyn z trzciny cukrowej ma na celu zwiększenie wytrzymałości stwardniałego betonu. Na podstawie wyników stwierdzono, że optymalne zastąpienie popiołem lotnym i popiołem z wycłoczyn z trzciny cukrowej, wynosi odpowiednio 25% i 30%.

Dodatek popiołu z wycłoczyn z trzciny cukrowej przekraczający 30% powoduje zmniejszenie wytrzymałości po 1.-dniu, 3.-dniach, 7. i 28.-dniach. Osiągnięta wytrzymałość jest mniejsza od betonu kontrolnego. Wytrzymałość na ściskanie zależy głównie od zawartości popiołu lotnego, ze względu na jego dużą właściwość pucolanową, co powoduje powstawanie bardziej gęstego żelu C-S-H.

Wytrzymałość na rozciąganie wzrasta wraz ze wzrostem wytrzymałości na ściskanie. Stosunek zaprawy cementowej odgrywał istotną rolę w wytrzymałości na rozciąganie przy rozłupywaniu, ponieważ matryca cementowa była jedynym czynnikiem odpowiedzialnym za przyrost wytrzymałości na rozciąganie przy rozłupywaniu.

## Literatura / References

1. P. Chindaprasirt, W. Kroehong, N. Damrongwiriyanupap, W. Suriyo, C. Jaturapitakkul, Mechanical properties, chloride resistance and microstructure of Portland fly ash cement concrete containing high volume bagasse ash..J. Build. Eng. **31**, 101415 (2020).
2. A. Sudhakar PK, Babu A, Investigation Of Effect On Various Fibres On The Mechanical Properties Of Bagasse Ash Blended With High Performance Concrete. IRJET **4**, 1756-1759 (2017).
3. P. Chindaprasirt, P. Sujumnongtokul, P. Posi, Durability and Mechanical Properties of Pavement Concrete Containing Bagasse Ash. Mater. Today **17**, 1612-1626 (2019).
4. S.A. Zareei, F. Ameri, N. Bahrami, Microstructure, strength, and durability of eco-friendly concretes containing sugarcane bagasse ash. Constr. Build. Mater. **184**, 258-268 (2018).
5. S. Praveenkumar, J. Shanmugasundaram, B. Samynathan, Effect of Bagasse Ash in Properties of Cement Paste and Mortar. Int. J. Chem. Tech. Res. **10**, 219-225 (2017).

to increase strength of the hardened concrete. From the results, it was found that the optimum replacement of fly ash and bagasse ash are 25%, and 30%, respectively.

Adding bagasse ash above 30% leads to the reduction in strength at the age of 1 day, 3 days, 7 days and 28 days and the strength is less than that of control concrete. The compressive strength mainly depends on the percentage of fly ash because of its high pozzolanic nature to form more densely packed C-S-H gel.

The tensile strength increase when increase in compressive strength. The cement mortar ratio played the vital role in the split tensile strength since the cement matrix was the only factor responsible for the increment in split tensile strength.

6. P. Rattanachu, W. Tangchirapat, C. Jaturapitakkul, P. Chindaprasirt, Strength, Elastic Modulus, and Creep of High-Strength Concrete Produced with Bagasse Ash and Recycled Concrete Aggregate. *J. Test. Evaluation* **49**(2) (2019).
7. S. Ramjan, W. Tangchirapat, C. Jaturapitakkul, Influence of bagasse ash with different fineness on alkali-silica reactivity of mortar. *Mater. Constr.* **68**(332), 169 (2018).
8. J. Naveen, K. Veeranjanyulu, Production and Analysis of Composite Construction Materials with Admixture of Coal-Bagasse Based Fly Ash and Perlite by ANSYS Approach. *IRJET* **5**(08) (2018).
9. S. Singh, D. Shintre, G.D. Ransinchung, P. Kumar, Performance of fine RAP concrete containing fly ash, silica fume, and bagasse ash. *J. Mater. Civ. Eng.* **30**(10): 04018233 (2018).
10. S. Praveenkumar, G. Sankarasubramanian, Mechanical and durability properties of bagasse ash-blended high-performance concrete. *SN Appl. Sci.* **1**(12): 1664 (2019).
11. M. Gunasekaran, T. Palanisamy, The Effect of Fly Ash and Bagasse Ash in the Properties of Light Weight Concrete. *Asian J. Res. Soc. Sci. Human.* **6**(9): 1614-1623 (2016).
12. A. Joshaghani, M.A. Moeini, Evaluating the effects of sugar cane bagasse ash (SCBA) and nanosilica on the mechanical and durability properties of mortar. *Constr. Build. Mater.* **152**, 818-831 (2017).
13. J.L. Wei, Y.H. Wang, Y.M. Wang, F.W. Zhong, H.L. Hu, Ch. Zheng, Mechanical Properties of Sugarcane Bagasse Ash (SCBA) Concrete and Its Influence Factors. *DEStech Trans. Eng. Techn. Res.* (2019).
14. A. Wongsu, V. Sata, B. Nematollahi, J. Sanjayan, P. Chindaprasirt, Mechanical and thermal properties of lightweight geopolymer mortar incorporating crumb rubber. *J. Clean. Prod.* **195**: 1069-1080 (2018).
15. Ch. Rattanashotinunt, P. Thairit, W. Tangchirapat, Ch. Jaturapitakkul, Use of calcium carbide residue and bagasse ash mixtures as a new cementitious material in concrete. *Mater. Des.* **46**: 106-111 (2013).
16. R. Somna, Ch. Jaturapitakkul, P. Rattanachu, W. Chalee, Effect of ground bagasse ash on mechanical and durability properties of recycled aggregate concrete. *Mater. Des.* **36**, 597-603 (2012).
17. G. C. Cordeiro, R. D. T. Filho, L. M. Tavares, E. Moraes Rego FAirbairn, Ultrafine grinding of sugar cane bagasse ash for application as pozzolanic admixture in concrete. *Cem. Concr. Res.* **39**, 110-115 (2009).
18. A. Schackow, C. Effting, M. Folgueras V, S. Güths, G. Mendes, Mechanical and thermal properties of lightweight concretes with vermiculite and EPS using air-entraining agent. *Constr. Build. Mater.* **57**, 190-197 (2014).
19. M. K. Yew, H. B. Mahmud, B. C. Ang, M. C. Yew, Effects of heat treatment on oil palm shell coarse aggregates for high strength lightweight concrete. *Mater. Des.* **54**, 702-707 (2014).
20. A. Rasel, M. Jumaat, Z. Syamsul Bahri, A.B.M. Saiful Islam, Ductility performance of lightweight concrete element containing massive palm shell clinker. *Constr. Build. Mater.* **63**: 234-241 (2014).