

Wpływ popiołu lotnego i popiołu z wytłoczyn z trzciny cukrowej na trwałość betonu lekkiego w badaniach doświadczalnych

Impact of fly ash and bagasse ash on durability performance of lightweight concrete with the experimental study

M. Gunasekaran^{1,*}, T. Palanisamy²

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

²Department of Civil Engineering, National Institute of Technology Karnataka (NITK) Surathkal, Mangalore – 575025. Karnataka, India

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

Streszczenie

Beton lekki szybko uzyskuje uznanie w szerokim zakresie zastosowań w budowie konstrukcji betonowych. Jest to materiał dostosowany do konkretnych zastosowań, posiadający korzystne właściwości. W artykule przeprowadzono doświadczalną analizę i badanie wpływu popiołu lotnego i popiołu z wytłoczyn z trzciny cukrowej na wytrzymałość i trwałość betonu lekkiego. Trwałość może być zdefiniowana jako zdolność materiału do wytrzymania wpływu jego otoczenia, które działa na pogorszenie jakości betonu. Nasiąkliwość i podciąganie kapilarne badano dla betonów o zróżnicowanej procentowej zawartości popiołu lotnego i popiołu z wytłoczyn, z trzciny cukrowej. Zarówno w przypadku popiołu lotnego, jak i popiołu z wytłoczyn z trzciny cukrowej stwierdzono, że zwiększenie procentowego udziału zamiennika prowadzi do zwiększenia nasiąkliwości betonu lekkiego. Wyniki są rozpatrywane i przedstawione na podstawie przeprowadzonych badań. Wykazano, że zwiększenie dodatku popiołu powoduje większą wytrzymałość.

Słowa kluczowe: trwałość, beton lekki, popiół lotny, popiół z wytłoczyn z trzciny cukrowej, gęstość, sorpcyjność, nasiąkliwość

Summary

Lightweight concrete [LWC] is rapidly reaching its full potential for a broad range of applications in the construction of concrete structures. It is tailor-made material for specific applications having beneficial properties. Therefore, the paper is devoted to the experimental analysis and study of fly ash and bagasse ash on the durability properties of lightweight concrete. Durability can be defined as the ability of the material to withstand the effects of its environment which are influencing the deterioration of concrete. The saturated water absorption and sorptivity was studied through experimental investigations, by varying the percentage of fly ash and bagasse ash content. Both fly ash and bagasse ash shows that the increase in the percentage of replacement leads to the more absorption of lightweight concrete. The results are investigated and presented on the studies conducted as follows, showing that the increases in the percentage of replacement, strength also increased.

Keywords: durability, light weight concrete, fly ash, bagasse ash, density, sorptivity, water absorption

1. Wprowadzenie

Beton lekki [LWC] jest ważną częścią technologii betonu. Został opracowany w Szwecji w latach 20. ubiegłego wieku, w odpowiedzi na rosnące zapotrzebowanie na dostawy drewna (1). LWC jest używany w szerokim zakresie zastosowań komercyjnych, przemysłowych i mieszkaniowych i jest stosowany w Europie od ponad 70 lat, na Bliskim Wschodzie od 40 lat, a w Ameryce Południowej i Australii od około dwóch dekad. (2). Procesy produkcji

1. Introduction

Lightweight concrete [LWC] is an important part of concrete technology. It was developed in Sweden in the 1920s in response to increasing demands on timber supplies (1). The LWC is used in a wide range of commercial, industrial and residential applications and has been used in Europe for over 70 years. In the Middle East for the past 40 years, and South America and Australia, for approximately two decades (2). The current processes for the

LWC opierają się na wielu patentach, które zostały przyznane od początku XX wieku. Pierwszy amerykański patent na zastosowanie sproszkowanego glinu i wodorotlenku wapnia, jako czynników porotwórczy w mieszance cementowej został przyznany w 1914 roku. W 1929 roku przyznano amerykańskie patenty na zastosowanie nadtlenu wodoru oraz podchlorynu sodu lub wapnia jako środków gazotwórczych. Pierwszy patent na produkcję LWC został przyznany w 1923 roku szwedzkiemu architektowi Johannowi Ericksonowi. Jego patenty obejmowały zastosowanie proszku aluminiowego w betonach twardniejących na mokro i autoklawizowanych. Fabryczna produkcja LWC rozpoczęła się w Szwecji w 1924 roku i wkrótce potem rozszerzyła się na inne części Europy Zachodniej. Z biegiem lat, gdy zalety produktu były dostrzegane przez innych, producenci zaczęli dostarczać licencjonowaną technologię i know-how do innych krajów.

W Stanach Zjednoczonych większość miast metropolitalnych zdecydowała się na zastosowanie LWC w budowie wieżowców. W wielu budynkach wielokondygnacyjnych zastosowali oni LWC w górnych kondygnacjach i beton konwencjonalny w dolnych (3). Badania przeprowadzone w krajach rozwiniętych wykazały, że zastosowanie LWC do wielkich i ważnych konstrukcji jest ostatecznie opłacalne, choć początkowe reakcje mogą wskazywać inaczej.

Sam beton lekki nie sprawdza się dobrze w agresywnym środowisku. Dlatego też produkcja LWC wymaga odpowiedniego doboru i proporcji składników w celu wytworzenia kompozytu charakteryzującego się przede wszystkim niską porowatością i małymi średnicami porów. Te z kolei poprawiają odporność betonu na przenikanie szkodliwych substancji, a co za tym idzie poprawiają wytrzymałość (4). Poprawę struktury porów LWC uzyskuje się głównie dzięki zastosowaniu dodatków chemicznych i mineralnych. Dodatki mineralne dodatkowo zmniejszają porowatość matrycy zaprawy oraz poprawiają oddziaływanie z kruszywem (5).

Wśród czynników wpływających na degradację betonu bada się nasiąkliwość. Najważniejszym czynnikiem decydującym o trwałości betonu jest nasiąkliwość, która zależy od mikrostruktury i porowatości, a przede wszystkim od przepuszczalności zaczynu cementowego. W niniejszej pracy zbadano zatem wpływ popiołów lotnych i popiołów z trzciny cukrowej na trwałość betonu w stosunku do wyżej wymienionych czynników.

2. Przegląd literatury

Kockal i in. (6) przedstawili wpływ właściwości kruszywa, a mianowicie: wytrzymałość, nasiąkliwość, gęstość nasypowa i ciężar właściwy na wytrzymałość i trwałość lekkiego betonu z kruszywem z popiołu lotnego. Uwzględniono udział kruszyw takich jak kruszywo spiekane, kruszywo lekkie z popiołów lotnych wiązane na zimno oraz kruszywo o normalnej masie. Wyniki badań wykazały, że przy użyciu spiekanych lub wiązanych na zimno kruszyw z lekkich popiołów lotnych można uzyskać napowietrzone betony lekkie o wysokiej wytrzymałości, które mają porównywalne właściwości z betonami o normalnej masie.

manufacture of LWC are based on many patents that have been granted since the early 1900's. The earliest U.S. patent for the use of powdered aluminum and calcium hydroxide as gas-forming agents in a cementations mixture was granted in 1914. In 1929, U.S. patents were granted to the use of hydrogen peroxide and sodium or calcium hypochlorite as the gas-forming agents (3).

The first patent for the manufacture of LWC was granted in 1923 to a Swedish architect, Johann Erickson. His patents included the use of aluminum powder is moist cured and autoclaved concretes. The factory production of LWC began in Sweden in 1924 and expanded to other parts of Western Europe soon after. Over the years, as the merits of the product were realized by others, the manufacturers began providing licensing technology and know-how to other countries.

In the United States, most of the metropolitan cities have gone in for the use of LWC in the construction of high-rise buildings. In many multi-storeyed buildings, they have used LWC in upper floors and conventional concrete in lower floors (3). The studies in these advanced countries have shown that the use of LWC in great and important structures is ultimately cost-effective though the initial reaction may indicate otherwise.

Lightweight concrete alone cannot perform well in aggressive environments. Hence, the production of LWC involves appropriate selection and proportioning of the constituents to produce a composite mainly characterized by its low porosity and the fine pore structure. These in turn, improve the resistance of concrete to the penetration of harmful substances and hence they enhance durability performance (4). The improved pore structure of LWC is mainly achieved by the use of chemical and mineral admixtures. The mineral admixtures provide additional reduction to the porosity of the mortar matrix and improve the interaction with the aggregate (5).

Among the factors that influence the deterioration of concrete, the saturated water absorption and sorptivity are studied. The most essential factor governing the durability of concrete is the water absorption, which depends on the microstructure and porosity and, above all, on the permeability of the cement paste. The effect of the fly ash and bagasse ash on the durability of concrete against the aforementioned factors has thus been studied in this paper.

2. Literature survey

Kockal et al. (6) presented the effects of aggregate properties such as strength, water absorption, bulk density, and specific gravity on the strength and durability of lightweight fly ash aggregate concrete. The contribution of aggregates such as sintered, cold-bonded lightweight fly ash aggregate, and normal weight aggregate was considered. The test results revealed that high-strength air-entrained lightweight concretes could be produced by using sintered or cold-bonded lightweight fly ash aggregates, which have comparable performance with the normal weight concretes.

Ramamurthy i in. (7) porównywali, że pianobeton był początkowo przewidziany jako wypełnienie pustek i materiał izolacyjny, o mniejszej gęstości, zapewniający oszczędności materiału i potencjał do wykorzystania na dużą skalę odpadów, takich jak popiół lotny. W pracy skupiono się na klasyfikacji literatury dotyczącej pianobetonu w zakresie materiałów składowych [zastosowany środek spieniający, cement i inne wypełniacze], proporcji mieszanki, metod produkcji, właściwości świeżego i stwardniałego pianobetonu. Na podstawie tej pracy, Autorzy zasugerowali potrzebę badań nad pianobetonem w obszarach, takich jak opracowanie niedrogiego środka spieniającego i agregatu pianotwórczego, badanie kompatybilności środka spieniającego z domieszkami chemicznymi, wykorzystanie lekkiego kruszywa grubego i zbrojenia, w tym włókien, badania trwałości i czynników wpływających na produkcję pianobetonu.

Hossain i in. (8) przedstawili rozwój lekkiego betonu pumekowego [LBP] z wykorzystaniem mieszanki cementu i kruszywa na bazie pumeksu. Opisano właściwości mechaniczne mieszanek VPC, takie jak: opad stożka, zawartość powietrza, wytrzymałość na ściskanie, wytrzymałość na rozciąganie, gęstość i moduł sprężystości. Przeprowadzono badania cech wytrzymałościowych, takich jak skurcz przy wysychaniu, przepuszczalność wody, skaningowa kalorymetria różnicowa oraz badania mikrotwardości. Wyniki sugerują, że dla zastosowań konstrukcyjnych lekki beton z pumeksu wykazuje odpowiednią wytrzymałość i trwałość, a także badania te ujawniają, że rozwój niedrogiego i przyjaznego dla środowiska LBP może być niezwykle pomocny w zrównoważonym budownictwie i odbudowie obszarów klęsk wulkanicznych na całym świecie.

Bahurudeen i in. (9) podali informację o wykorzystaniu popiołu z wylłocznym z trzciny cukrowej jako materiału pucolanowego w betonie, co może znacznie poprawić jego właściwości użytkowe. Surowy popiół z wylłocznym z trzciny cukrowej został zmielony do rozdrobnienia cementu i użyty do betonu w celu oceny właściwości użytkowych. W pracy przedstawiono opracowanie mieszanki cementowej z popiołem z wylłocznym z trzciny cukrowej oraz jego wpływ na wytrzymałość betonu. Wykonano badania trwałości, takie jak szybkie badanie penetracji chlorków, przewodności chlorków, podciągania kapilarnego wody i przepuszczalności powietrza metodą Torrenta. Z badań wynika, że zastosowanie popiołu z wylłocznym z trzciny cukrowej w betonie znacznie poprawia jego trwałość.

Rattapon i in. (10) badali wpływ mielonego popiołu lotnego [MFa] i mielonego popiołu z wylłocznym z trzciny cukrowej [MFAWTC] na trwałość betonu z kruszywem z recyklingu. Beton z kruszywem z recyklingu został w tym opracowaniu wyprodukowany z dodatkiem kruszywa z recyklingu zamiast kruszywa grubego. Zbadano wytrzymałość na ściskanie, przepuszczalność wody, głębokość penetracji chlorków oraz wydłużenie pod wpływem korozji siarczanowej. Wyniki badań wykazały, że zastosowanie MFa i MFAWTC do częściowego zastąpienia cementu w betonie z kruszywem z recyklingu było skuteczne w poprawie trwałości betonu z kruszywem z recyklingu. Odpowiednie zastąpienie MFa lub MFAWTC w betonie z kruszywem z recyklingu w celu uzyskania odpowiedniej wytrzymałości na ściskanie, małej przepuszczalności wody, dużej

Ramamurthy et al (7) deliberated that foam concrete was initially envisaged as a void filling and insulation material, lighter weight, savings in material, and potential for large-scale utilization of wastes like fly ash. The focus of this paper was to classify literature on foam concrete regarding constituent materials [foaming agent, cement, and other fillers used], mix proportioning, production methods, fresh and hardened properties of foam concrete. Based on this article, they suggested the need for research in foamed concrete in areas such as developing affordable foaming agent and foam generator, investigation on compatibility between the foaming agent and chemical admixtures, use of lightweight coarse aggregate and reinforcement, including fibers, durability studies and factors influencing foam concrete production.

Hossain et al. (8) presented the development of lightweight Volcanic Pumice Concrete [VPC] using pumice-based blended cement and aggregates. Mechanical properties of VPC mixtures such as slump, air content, compressive strength, tensile strength, density, and modulus of elasticity were described. Durability characteristics such as drying shrinkage, water permeability, differential scanning calorimetry, and microhardness tests were conducted. The experimental results suggest that for the structural applications lightweight volcanic pumice concrete gives adequate strength and durability properties, and also this study reveals that the development of nonexpensive and environmentally friendly VPCs can be extremely helpful for the sustainable construction and rehabilitation of volcanic disaster areas around the world.

Bahurudeen et al. (9) reported of the utilization of sugarcane bagasse ash as the pozzolanic material in concrete, which can significantly improve its performance. Raw bagasse ash was ground up to cement fineness and used in the concrete for the performance evaluation. The development of Portland pozzolanic cement based on sugarcane bagasse ash and its influence on the durability performance of concrete are presented in this work. Durability performance such as rapid chloride penetration test, chloride conductivity test, water sorptivity test, and torrent air permeability test were evaluated. The study shows that the use of sugarcane bagasse ash in concrete significantly enhances its durability performance.

Rattapon et al. (10) studied the effect of ground fly ash [GFA] and ground bagasse ash [GBA] on the durability of recycled aggregate concrete. Recycled aggregate concrete was produced with the addition of recycled aggregate instead of coarse aggregate in this study. Compressive strength, water permeability, chloride penetration depth, and expansion by sulfate attack on concretes were investigated. The results revealed that the use of GFa and GBA to partially replace cement in recycled aggregate concrete was highly effective in improving the durability of recycled aggregate concrete. The suitable replacement of GFA or GBA in recycled aggregate concrete was derived to obtain adequate compressive strength, low water permeability, high penetration resistance to chloride, and high sulfate resistance as 20% mass of the binder.

odporności na przenikanie chlorków i znacznej odporności na siarczany określono jako 20% masy spoiwa.

Wykorzystanie tych odpadów jest korzystne z punktu widzenia gospodarki odpadami stałymi. W związku z tym, w niniejszej ocenie podjęto próbę wykorzystania popiołu z wycłoczyn z trzciny cukrowej i popiołu lotnego do zastąpienia kruszywa drobnego przez badania trwałości.

3. Program doświadczalny dotyczący trwałości

Podobnie jak w przypadku betonu o standardowej gęstości, właściwości użytkowe betonu lekkiego kruszywowego w warunkach zamrażania/rozmrażania, zależą przede wszystkim od proporcji mieszanki, rodzaju kruszywa i jego zawartości wilgoci oraz ilości wprowadzonego powietrza. Na rysunku 1 przedstawiono schemat prowadzenia badań, w niniejszej pracy.

3.1. Materiały

Informacje dotyczące właściwości materiałów, a mianowicie: popiół lotny, popiół z trzciny cukrowej, proszek aluminiowy przedstawiono w tym rozdziale, a dalsze szczegóły można znaleźć w Gunasekaran i Palanisamy (11).

3.1.1. Popiół lotny

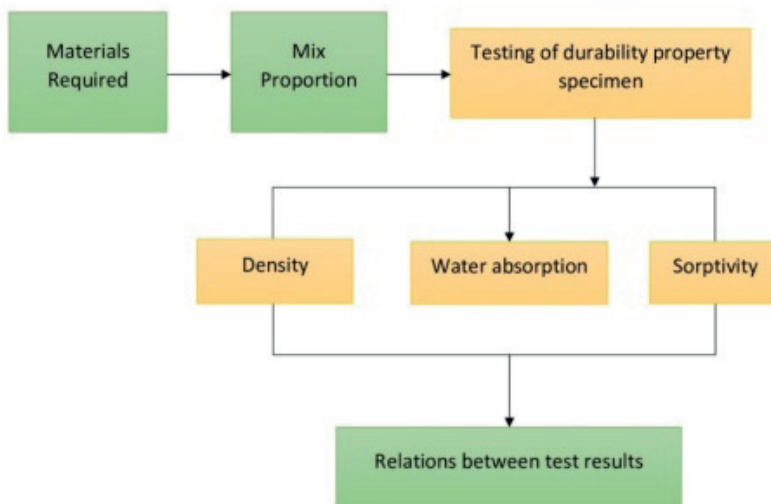
Popiół lotny użyto w celu identyfikacji problemów i możliwości badawczych związanych z wykorzystaniem popiołu lotnego w betonie z cementu portlandzkiego. Nacisk w tych badaniach kładziony był na ocenę interakcji cementów portlandzkich popiołami lotnymi w świeżych i stwardniałych mieszankach oraz w jaki sposób właściwości popiołów lotnych wpływają na te interakcje.

3.1.2. Popiół z wycłoczyn z trzciny cukrowej

Wycłoczyny z trzciny cukrowej, wraz z oparami etanolu, są produktami odpadowymi przemysłu cukrowniczego. Ten produkt odpadowy [popiół z wycłoczyn z trzciny cukrowej] już powoduje poważne zanieczyszczenie środowiska, co wymaga pilnych metod postępowania z odpadami. Popiół z wycłoczyn z trzciny cukrowej zawiera głównie tlenek glinu i krzemionkę. W niniejszej pracy popiół z wycłoczyn z trzciny cukrowej użyto jako częściowy zamiennik kruszywa drobnego.

3.1.3. Proszek aluminiowy

Drobny proszek aluminiowy reaguje z wodorotlenkiem wapnia i tworzy gazowy wodór, który powoduje, że w mieszaniu powstają miliony niepołączonych ze sobą mikroskopijnych porów. Następnie masę tę wlewa się do naoliwionych form i pozostawia do wyrośnięcia i wstępnego związania na około cztery godziny.



Rys. 1. Schemat procesu badawczego

Fig. 1. Process flow diagram

The utilization of these admixtures is beneficial from a solid waste management point of view. Consequently, an attempt is made in this evaluation to make use of bagasse ash and fly ash to replace fine aggregate through studies of durability.

3. Experimental program on durability properties

As for standard weight concrete, the performance of lightweight aggregate concrete under freeze / thaw conditions depends primarily on the proportions of the mix, the type of aggregate, its content of moisture, and the content of the air intake. Figure 1 shows the process flow diagram of the research work.

3.1. Materials

The information regarding the properties of materials such as fly ash, bagasse ash, aluminum powder are presented in this section and details can be found in Gunasekaran and Palanisamy (11).

3.1.1. Fly ash

Fly ash has been used to identify problems and research opportunities related to the use of fly ash for Portland cement concrete. The emphasis of this research was to assess the interactions between Portland cements and fly ashes in fresh and hardened mixes and how the properties of fly ashes influence those interactions.

3.1.2. Bagasse ash

Sugarcane bagasse, along with ethanol vapor, is a fibrous waste product of the sugar processing industry. This waste product [sugarcane bagasse ash] already causes severe environmental pollution which requires the urgent methods of handling the waste. Bagasse ash includes predominantly alumina and silica. In this paper, bagasse ash has been a partial substitution of fine aggregate.

3.2. Projektowanie mieszanki

Proporcje mieszanki, przyjęte do określenia cech mechanicznych, wykorzystano do badania wytrzymałości mieszanek betonu lekkiego. W zależności od proporcji, cement i kruszywo drobne lub popiół lotny i popiół z wycłoczyn z trzciny cukrowej miesza się w stanie suchym. Aby przygotować zawiesinę, którą wylewano i umieszczano w formach do kostek, dodawano razem wodę i proszek aluminiowy. Po przycięciu próbek płaskich na ich wierzchniej

Tablica 1 / Table 1

SZCZEGÓŁY PLANU BADAŃ

DETAILS OF EXPERIMENTAL INVESTIGATIONS

Numer próbki Sample No.	Mieszanka Mix	Oznaczenie mieszanki Mix ID	D	WA	S
			Liczba próbek na termin Number of specimens cast in the age of days		
			28	28	28
1	CM1:1	Control	3	3	3
2	CM1:2		3	3	3
3	CM1:3		3	3	3
4	CM 1:1	FA25	3	3	3
5	CM1:2		3	3	3
6	CM1:3		3	3	3
7	CM 1:1	FA50	3	3	3
8	CM1:2		3	3	3
9	CM1:3		3	3	3
10	CM 1:1	FA75	3	3	3
11	CM1:2		3	3	3
12	CM1:3		3	3	3
13	CM 1:1	FA100	3	3	3
14	CM1:2		3	3	3
15	CM1:3		3	3	3
16	CM 1:1	BA10	3	3	3
17	CM1:2		3	3	3
18	CM1:3		3	3	3
19	CM 1:1	BA20	3	3	3
20	CM1:2		3	3	3
21	CM1:3		3	3	3
22	CM 1:1	BA30	3	3	3
23	CM1:2		3	3	3
24	CM1:3		3	3	3
25	CM 1:1	BA40	3	3	3
26	CM1:2		3	3	3
27	CM1:3		3	3	3
28	CM 1:1	BA50	3	3	3
29	CM1:2		3	3	3
30	CM1:3		3	3	3
No. of Speci- mens			90	90	90
	270				

D - **Gęstość** / Density; WA – **Nasiąkliwość** / Water absorption ; S – **Podciąganie kapilarne** / Sorptivity; CM – **Cement/Agggregate ratio** / CM- **stosunek cement/kruszywo**.

3.1.3. Aluminium powder

The aluminum metal fine powder reacts with calcium hydroxide and produces hydrogen gas which aerates the mixture creating millions of non-connecting microscopic cells. Then, this mixture is poured into oiled molds and allowed to rise and set for about four hours.

3.2. Mix proportioning

The mix proportions adopted for the determination of mechanical properties were used to study the durability characteristics of lightweight concrete mixtures. Mixes with different ratio of the cement [or cement with the fly ash / bagasse ash] and fine aggregate [CM 1:1, CM 1:2 and CM 1:3] were blended in dry condition. To make the slurry that was poured and placed in mortar cube mold, water and aluminum powder were added together. After the samples were cut to flat on their expanded surface, they were demolded and cured to the necessary ages. Table 1 describes the proportion of the mixture and the descriptions of the experimental investigations.

3.3. Methods

3.3.1. Density

The densities of LWC were calculated by measuring the mass and volume of each sample. The 60 mm diameter and 120 mm height specimens were oven-dried up to $103 \pm 2^\circ\text{C}$ to reach the constant mass. The mass of each sample was obtained by calculating the arithmetic mean of the mass of three test samples.



Rys. 2. Suszenie próbek do badań

Fig. 2. Oven-dried specimens

powierzchni, zostały one rozformowane oraz pozostawione do twardnienia przez odpowiedni czas. W tabeli 1 przedstawiono proporcje mieszanki oraz opisy badań doświadczalnych.

3.3. Metody

3.3.1. Badanie gęstości

Gęstość LWC obliczono przez pomiar masy i objętości każdej próbki. Próbki o średnicy 60 mm i długości 120 mm suszono w piecu w temperaturze $103 \pm 2^\circ\text{C}$ do uzyskania stałej masy. Masę każdej próbki otrzymano przez obliczenie średniej arytmetycznej z masy wszystkich badanych próbek.

3.3.2. Badanie nasiąkliwości

Badanie nasiąkliwości przeprowadzono w oparciu o normę ASTM C642. Próbki sześciennie zostały zanurzone w wodzie i utrzymane w temperaturze 25°C , przez 24 godziny. Zanurzone kostki wyjęto po 24 godzinach i wytarto za pomocą czystych tkanin, aby usunąć nadmiar wody. Nasiąkliwość określono poprzez pomiar przyrostu masy podczas zanurzenia, który przedstawiono w procentach.

Różnica między masą po nasyceniu wodą a masą po wysuszeniu, wyrażoną jako procent masy suchej próbki to nasiąkliwość. Rys. 2 i 3 przedstawiają próbkę trzymaną w suszarce i stan nasycenia pod wodą.

$$\text{Procent nasyconej wody absorpcyjnej (\%)} = \frac{W_2 - W_1}{W_1} \times 100$$

gdzie:

W1 - masa próbki po wysuszeniu w gorącym piecu,

W2 - masa próbki w warunkach nasycenia.

3.3.3. Badanie sorpcyjności

Sorpcyjność mierzy szybkość wnikania wody w pory betonu dzięki nasiąkliwości kapilarnej. Skumulowana objętość wody wnikającej na jednostkę powierzchni ekspozycji jest wykreślana w stosunku do pierwiastka kwadratowego z czasu ekspozycji „t”. Powstały wykres, który może być przybliżony linią prostą, jest uważany za miarę szybkości przemieszczania się wody przez pory kapilarne i nazywany jest sorpcyjnością. Badanie sorpcyjności przeprowadzono przez zanurzenie próbek w wodzie i pomiar przyrostu masy w regularnych odstępach czasu trwających 30 minut w ciągu 2 godzin.

4. Wyniki i dyskusja

4.1. Analiza doświadczalna

Doświadczenia przeprowadzono na dwóch zamiennikach kruszywa drobnego, a mianowicie na popiele lotnym i popiele z wyłoczyn z trzciny cukrowej. Badano wytrzymałość lekkiego betonu z różnymi poziomami zastąpienia dwoma powyższymi materiałami zastępczymi w różnym przedziale czasowym. Chociaż stosowanie

3.3.2. Saturated water absorption

The water absorption test was performed on ASTM C642 standard. Cube specimens were immersed in water and kept at 25°C for 24 hours. The immersed cubes were removed after 24 hours and drained using clean clothes to remove excess water. The water absorption was determined by measuring the mass increase during immersion, which is represented in percentage.

The difference between the water-saturated mass and oven-dry mass expressed as a percentage of the oven dry mass gives the saturated water absorption. Figs. 2 and 3 show the sample kept in the oven and saturated condition underwater.

$$\text{Percentage of saturated water absorption (\%)} = \frac{W_2 - W_1}{W_1} \times 100$$

where:

W1 - mass of specimen after drying at an oven temperature

W2 - mass of specimen at saturated condition

3.3.3. Sorptivity

Sorptivity measures the rate of penetration of water into the pores of the concrete by capillary suction. The cumulative volume of water that has penetrated per unit of exposed surface area was plotted against the square root of time of exposure. The resulting graph that could be approximated by a straight line is considered as a measure of the rate of movement of water through the capillary pores and is called sorptivity. The sorptivity test was conducted by immersing the specimens in water and measuring the gain in mass at regular intervals of 30 minutes duration over 2 hours.

4. Results and discussion

4.1. Experimental analysis

Experiments were conducted with two replacements, namely fly ash and bagasse ash for fine aggregate. The strength properties of LWC with different replacement levels of the above two replacement materials were studied at different ages. Though the use of these replacements are not much appreciable for durability, these are effective in improving the strength of LWC concrete. The conclusions from the different experimental studies, such as strength, durability, are summarized below.



Rys. 3. Próbki w stanie nasycenia wodą

Fig. 3. Specimen at the saturated condition

tych zamienników nie mają dużego wpływu chodzi o trwałość, to są one skuteczne w poprawie wytrzymałości lekkiego betonu. Wnioski z doświadczeń, a mianowicie badania wytrzymałości i trwałości, zostały podsumowane poniżej.

4.1.1. Gęstość

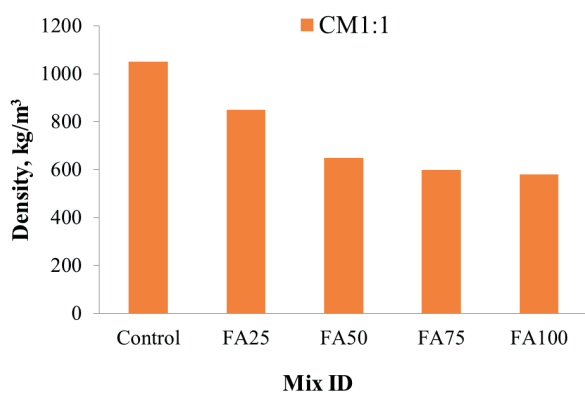
W tym badaniu określono gęstość wszystkich mieszanek LWC w stanie suchym i przedstawiono w tabeli 2. Na podstawie uzyskanych wyników stwierdzono, że zastąpienie popiołem z wyłoczyn z trzciny cukrowej w ilości 10% oraz zastąpienie popiołem lotnym w ilości 100% wykazuje wyższe i niższe wartości gęstości odpowiednio 1320 kg/m³ i 540 kg/m³ w porównaniu z gęstością mieszanki kontrolnej.

Zastąpienie popiołu lotnego wykazuje większy wpływ na zmniejszenie gęstości niż popiół z trzciny cukrowej. Wyniki badań pokazują zależność wymiany popiołu lotnego z gęstością. Wprowadzenie popiołu z trzciny cukrowej dało większą gęstość niż beton kontrolny.

Gęstość mieszanek z 25%, 50%, 75% i 100% zamianą kruszywa drobnego popiołem lotnym dla stosunku cement:piasek 1:1, 1:2 i 1:3 przedstawiono na rys. 4-6. Gęstość zmniejsza się wraz ze wzrostem procentowej zawartości popiołu lotnego. FA25 daje większą gęstość niż inne proporcje procentowe wymiany, z wyjątkiem kontroli.

Gęstość mieszanek z 25%, 50%, 75% i 100% zamiennikiem kruszywa drobnego popiołem z wyłoczyn z trzciny cukrowej dla stosunków cement:piasek 1:1, 1:2 i 1:3 przedstawiono na rys. 7-9. Gęstość mieszanek z popiołem z trzciny cukrowej jest większa w porównaniu z betonem kontrolnym. Beton BA10 ma największą gęstość w porównaniu do betonów o innych proporcjach zastąpienia kruszywa popiołem.

Rysunek 10 pokazuje porównanie gęstości wszystkich badanych betonów. Ogólnie rzecz biorąc, mieszanka BA10 z CM 1:3 ma największą gęstość. Betony BA10 z CM1:1 i CM 1:2 wykazują wartości mniejsze odpowiednio o 1,52% i 0,72%. W porównaniu z mieszanką kontrolną, BA10 z CM 1:3 wykazuje o 32% większą



Rys. 4. Gęstość betonu o stosunku cementu do piasku 1:1 i zastąpieniu 25%, 50%, 75% i 100% piasku popiołem lotnym

Fig. 4. Density of concrete with cement:sand ratio 1:1 and replacement of 25 %, 50 %, 75 %, and 100 % sand by fly ash

Tablica 2 / Table 2

GĘSTOŚĆ BETONÓW

DENSITY OF CONCRETES

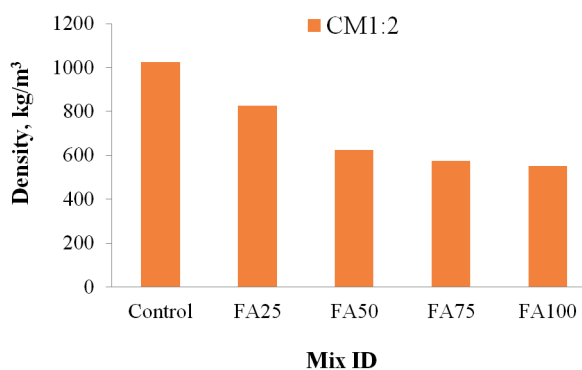
Gęstość betonów / Density of concretes, kg/m ³				
Próbka / S.No.	Mix ID	CM 1:1	CM 1:2	CM1:3
1	Kontrolna / Control	1050	1025	1000
2	FA25	850	825	800
3	FA50	650	625	610
4	FA75	600	575	575
5	FA100	580	550	540
6	BA10	1300	1310	1320
7	BA20	1250	1260	1270
8	BA30	1220	1230	1240
9	BA40	1080	1100	1110
10	BA50	1150	1160	1150

4.1.1. Density

In this investigation, oven-dried densities of all the LWC mixes were determined and presented in Table 2. From the results, it was found that the 10% replacement by bagasse ash and 100% replacement by fly ash show the highest and lowest density values of magnitude 1320 kg/m³ and 540 kg/m³ respectively when compared to control mix density values.

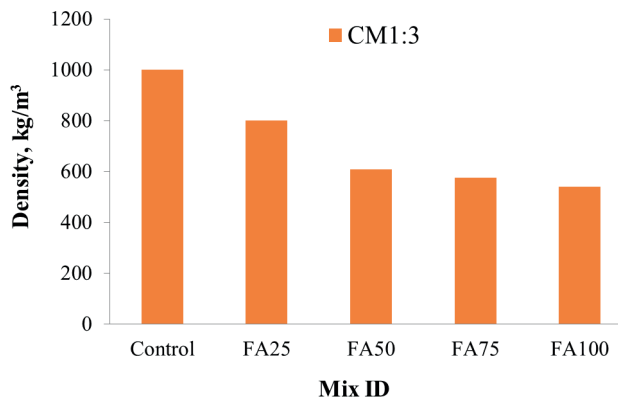
Based on the experimental investigations, the fly ash replacement shows a greater impact on the density reduction than the bagasse ash. The test results show the relationship between fly ash replacement and density. Bagasse ash replacement produced higher density than the control concrete.

The density of mixes with 25 %, 50 %, 75 %, and 100 % fine aggregate replacement with fly ash for cement:sand ratio of 1:1, 1:2 and 1:3, are presented in Figs. 4-6 respectively. The density decrease when the percentage of replacement of fly ash gets increased. FA25 gives more density than the other replacement percentage proportions except for the control sample.



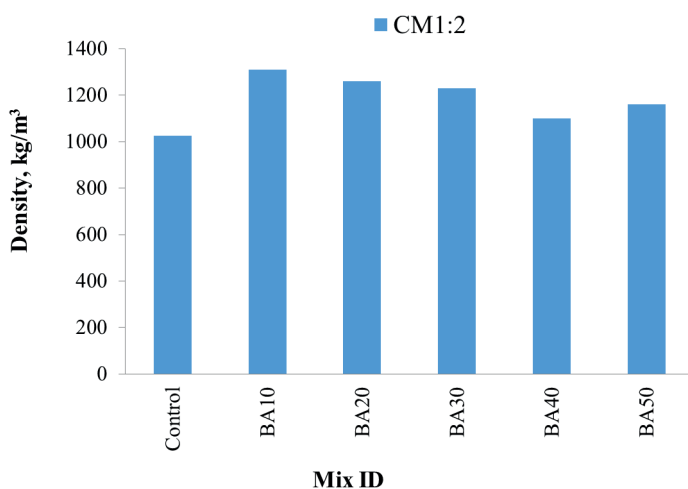
Rys. 5. Gęstość betonu przy stosunku cementu do piasku 1:2 i zastąpieniu 25%, 50%, 75% i 100% piasku popiołem lotnym

Fig. 5. Density of concrete with cement:sand ratio 1:2 and replacement of 25 %, 50 %, 75 %, and 100 % sand by fly ash



Rys. 6. Gęstość betonu przy stosunku cementu do piasku 1:3 i zastąpieniu 25%, 50%, 75% i 100% piasku popiołem lotnym

Fig. 6. Density of concrete with cement:sand ratio 1:3 and replacement of 25 %, 50 %, 75 %, and 100 % sand by fly ash



Rys. 8. Gęstość betonu przy stosunku cementu do piasku 1:2 i zastąpieniu 25%, 50%, 75% i 100% piasku popiołem z wyłoczyn z trzciny cukrowej

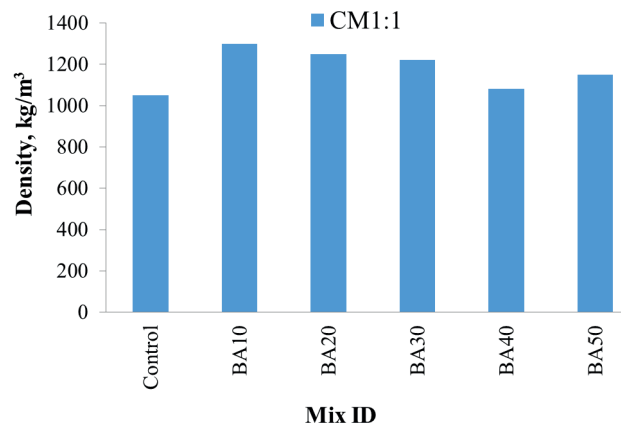
Fig. 8. Density of concrete with cement:sand ratio 1:2 and replacement of 25 %, 50 %, 75 %, and 100 % sand by bagasse ash

gęstość. W związku z tym w każdych warunkach, 10% zastąpienie popiołem z wyłoczyn z trzciny cukrowej daje większą wartość niż pozostałe mieszanki.

4.1.2. Nasiąkliwość

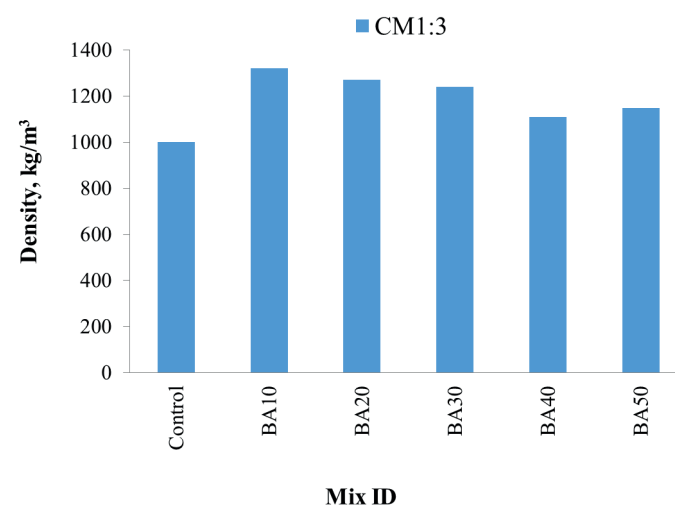
W przypadku nasiąkliwości, stwierdzono, że zastąpienie kruszywa drobnego popiołem lotnym wykazuje większą nasiąkliwość w porównaniu z zastąpieniem popiołem z wyłoczyn z trzciny cukrowej. Na podstawie wyników stwierdzono, że zastąpienie popiołem lotnym w ilości 25% spowodowało mniejszą nasiąkliwość niż w przypadku próbki kontrolnej, a zastąpienie popiołem z wyłoczyn z trzciny cukrowej do 30% wykazuje mniejszą nasiąkliwość, równą próbce kontrolnej.

Pozostałe wartości zastąpienia popiołem lotnym [50% do 100%] oraz 50% zastąpienie popiołem z wyłoczyn z trzciny cukrowej wykazały większą nasiąkliwość niż próbka kontrolna i może to być przyczyną mniejszego związania kruszywa z matrycą cemen-



Rys. 7. Gęstość betonu przy stosunku cementu do piasku 1:1 i zastąpieniu 25%, 50%, 75% i 100% piasku popiołem z wyłoczyn z trzciny cukrowej

Fig. 7. Density of concrete with cement:sand ratio 1:1 and replacement of 25 %, 50 %, 75 %, and 100 % sand by bagasse ash



Rys. 9. Gęstość betonu przy stosunku cementu do piasku 1:3 i zastąpieniu 25%, 50%, 75% i 100% piasku popiołem z wyłoczyn z trzciny cukrowej

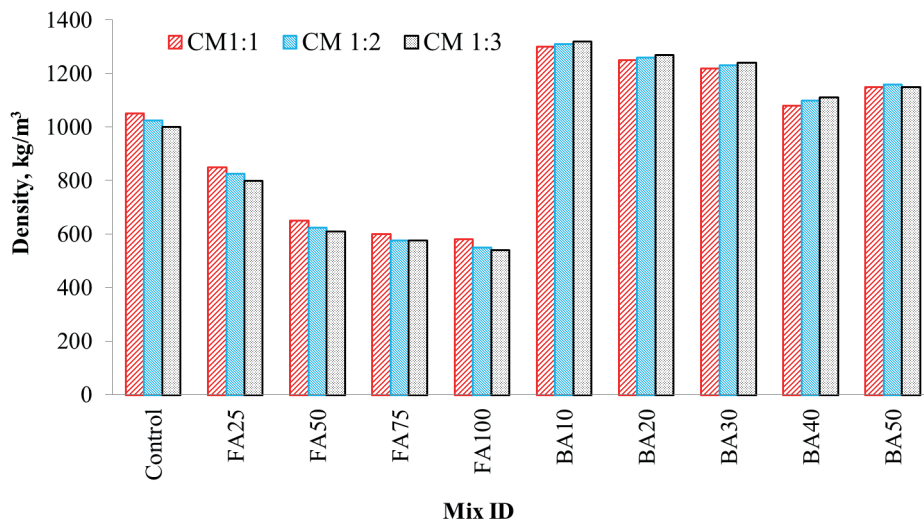
Fig. 9. Density of concrete with cement:sand ratio 1:3 and replacement of 25 %, 50 %, 75 %, and 100 % sand by bagasse ash

The density of mixes with 10%, 20%, 30%, 40% and 50 % fine aggregate replacement with bagasse ash for cement:sand ratio of 1:1, 1:2 and 1:3 are presented in Figs. 7-9 respectively. The density of mixes with bagasse ash is increased comparing to control concrete. BA10 gives the highest density comparing to other replacement percentage proportions.

Figure 10, shows the density comparison of all concrete. Over all, the percentage replacements BA10 of CM 1:3 gives the greater value. Comparing to BA10 of CM 1:3, BA10 of CM1:1 and BA10 of CM 1:2 give 1.52% and 0.72% lesser values respectively. Comparing with the control mix, BA10 of CM 1:3 give 32% greater density. Hence in over all conditions, the 10 % replacement of bagasse ash gives higher value than all.

4.1.2. Water absorption

It was found that the saturated water absorption of concrete containing fly ash replacement exhibits the higher absorption value

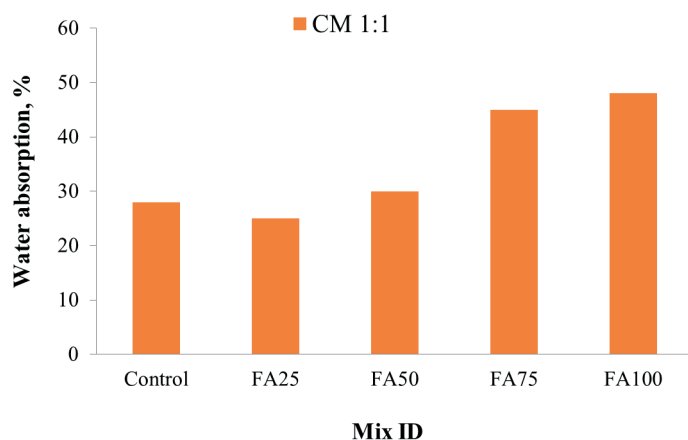


Rys. 10. Porównanie gęstości betonu kontrolnego o CM 1:1 CM 1:2 i CM 1:3 oraz betonów z 10%, 20%, 30%, 40%, 50% zamianą kruszywa na popiół z trzciny cukrowej oraz 25%, 50%, 75% i 100% zamianą kruszywa na popiół lotny

Fig. 10. Density comparison of control mortar mix of CM 1:1 CM 1:2 and CM 1:3 of bagasse ash replacement of 10%, 20%, 30%, 40%, 50% and fly ash replacement of 25%, 50%, 75% and 100%

ową. Idąc dalej, dostępność wody biernej w matrycy, która była główną przyczyną zmniejszenia gęstości, może tworzyć wiele otwartych porów, które powodują wzrost nasiąkliwości. Na ten sam scenariusz wykazuje hiperboliczną właściwość wymienionego kruszywa, które osiągnęło większą nasiąkliwość. Tutaj stosunek zaprawy cementowej nie wykazał żadnego szczególnego wpływu na nasiąkliwość. Stopniowy przyrost nasiąkliwości, w zależności od przyrostu zaprawy, był wynikiem prawie wszystkich wartości zastąpienia. Rysunki od 13 do 21 pokazują wyniki nasiąkliwości dla mieszanek zaprawowych: CM 1:1, CM 1:2 i CM 1:3. W tabeli 3 przedstawiono wartości nasiąkliwości w procentach. Wyniki zostały szczegółowo omówione poniżej.

Nasiąkliwość mieszanek z 25%, 50%, 75% i 100% zamianą kruszywa drobnego popiołem lotnym dla cementu o stosunku piasku 1:1,



Rys. 11. Nasiąkliwość betonu przy stosunku cementu do piasku 1:1 i zastąpieniu 25%, 50%, 75% i 100% piasku popiołem lotnym

Fig. 11. Water absorption of concrete with cement:sand ratio 1:1 and replacement of 25%, 50%, 75%, and 100% sand by fly ash

than that of concrete with the bagasse ash replacement. Based on the results, 25% replacement of fly ash was found to have caused a lower water absorption than for the control specimen and the replacement by bagasse ash by up to 30% shows a lower absorption and is equal to the control specimen.

The other replacements levels of fine aggregates by fly ash [50% to 100%] and 50% replacement by bagasse ash have shown the higher water absorption than the control specimen. Figs. 11 to 19, show the results of saturated water absorption for the different mortar mix: CM 1:1, CM 1:2 and CM 1:3. Table 3, shows the values of saturated water absorption in percentage. The results are discussed in detail as below.

The water absorption of mixes with 25%, 50%, 75%, and 100% fine aggregate replacement with fly ash for cement:sand ratio of 1:1, 1:2 and 1:3 are presented in Figs. 11-13, respectively. The water absorption of investigated concretes increase when the percentage of replacement of sand with fly ash gets increased. 100% replacement results in highest water absorption. The only dosage which results in reduction of water absorption was 25%.

The water absorption of mixes with 10%, 30%, 40%, and 50% fine aggregate replacement with bagasse ash for cement:sand ratio of 1:1, 1:2 and 1:3 are presented in Figs. 14-16 respectively. The water sorption of mixes with bagasse ash is increased comparing to control concrete. BA10 gives the lowest water absorption comparing to other replacement percentage proportions.

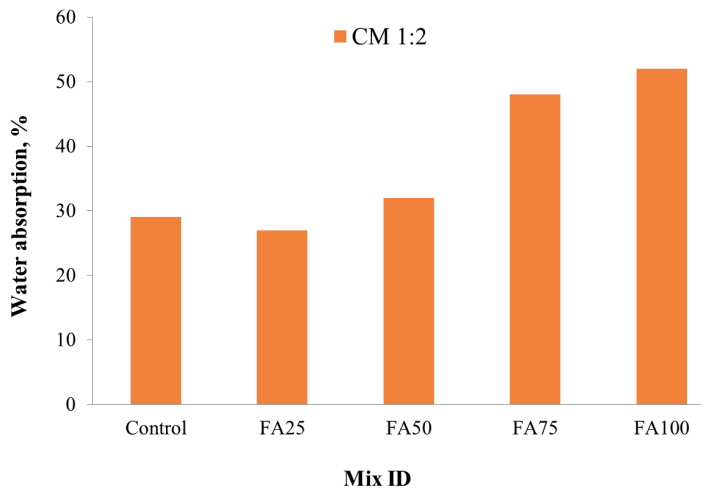
Figure 17 shows the water absorption comparison of control mixes of CM 1:1, CM 1:2 and CM 1:3 ratios with concrete containing ba-

Tablica 3 / Table 3

NASIĄKLIWOŚĆ BADANYCH BETONÓW

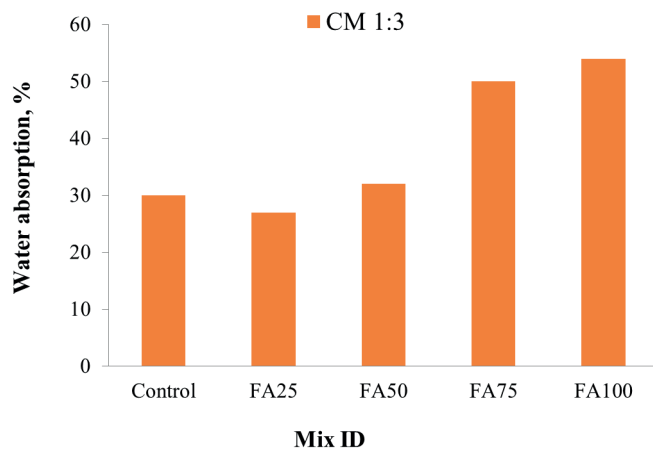
WATER ABSORPTION OF INVESTIGATED CONCRETES

Nasiąkliwość / Water absorption, %				
Próbka / S.No.	Mix ID	CM 1:1	CM 1:2	CM1:3
1	Kontrolna / Control	28	29	30
2	FA25	25	27	27
3	FA50	30	32	32
4	FA75	45	48	50
5	FA100	48	52	54
6	BA10	15	17	18
7	BA20	23	22	24
8	BA30	27	29	29
9	BA40	28	30	32
10	BA50	30	34	34



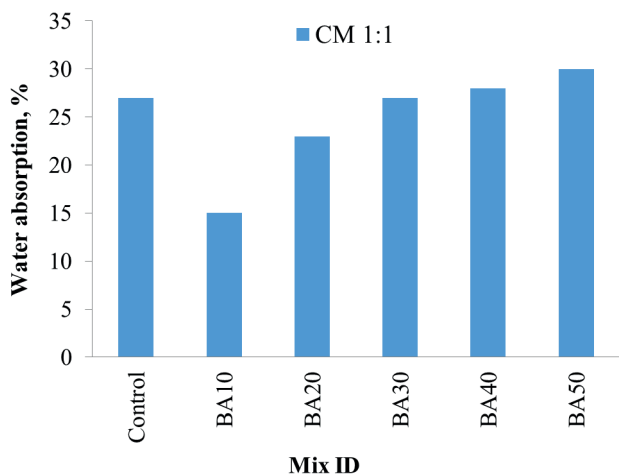
Rys. 12. Nasiąkliwość betonu przy stosunku cementu do piasku 1:2 i zastąpieniu 25%, 50%, 75% i 100% piasku popiołem lotnym

Fig. 12. Water absorption of concrete with cement:sand ratio 1:2 and replacement of 25 %, 50 %, 75 %, and 100 % sand by fly ash



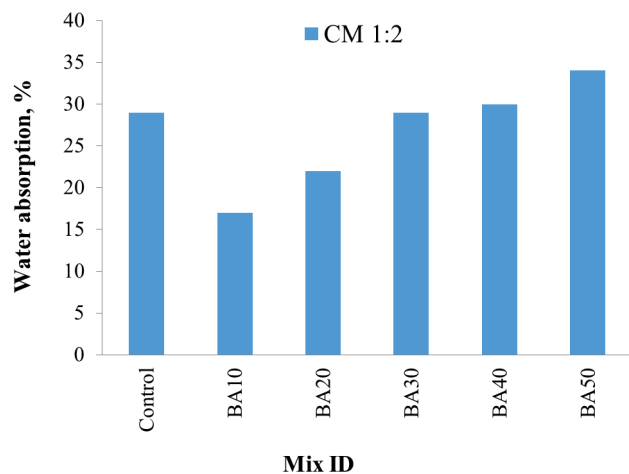
Rys. 13. Nasiąkliwość betonu przy stosunku cementu do piasku 1:3 i zastąpieniu 25%, 50%, 75% i 100% piasku popiołem lotnym

Fig. 13. Water absorption of concrete with cement:sand ratio 1:3 and replacement of 25 %, 50 %, 75 %, and 100 % sand by fly ash



Rys. 14. Nasiąkliwość betonu przy stosunku cementu do piasku 1:1 i zastąpieniu 25%, 50%, 75% i 100% piasku popiołem z trzciny cukrowej

Fig. 14. Water absorption of concrete with cement:sand ratio 1:1 and replacement of 25 %, 50 %, 75 %, and 100 % sand by bagasse ash



Rys. 15. Nasiąkliwość betonu przy stosunku cementu do piasku 1:2 i zastąpieniu 25%, 50%, 75% i 100% piasku popiołem z trzciny cukrowej

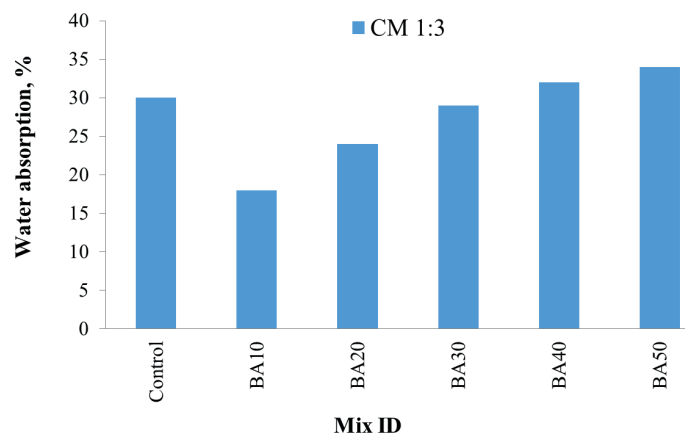
Fig. 15. Water absorption of concrete with cement:sand ratio 1:2 and replacement of 25 %, 50 %, 75 %, and 100 % sand by bagasse ash

gasse ash replacement [10%, 20%, 30%, 40%, 50%] and fly ash replacement [25%, 50%, 75% and 100%]. In overall comparison, FA75 and FA100 give the highest water absorption values.

4.1.3. Sorptivity

The sorptivity and relative sorptivity of lightweight concrete at the age of 28 days are presented in Table 4. Figs. 17 to 19 show the relative sorptivity of lightweight concrete at the age of 28 days. The sorptivity of fly ash replacement of 25%, 50%, 75% and 100% show very high sorptivity values when compared to control mortar. The 25% bagasse ash replacement gives comparatively lower sorptivity than all other combinations.

Figure 18, shows the relative sorptivity of mortar mix CM 1:1 replacement of 10%, 20%, 30%, 40%, 50% of sand by bagasse ash and 25%, 50%, 75% and 100% sand replacement by fly ash. The sorptivity increases slightly if the percentage of bagasse ash increases up to 40% replacement of BA and after that the sorpti-



Rys. 16. Nasiąkliwość betonu przy stosunku cementu do piasku 1:3 i zastąpieniu 25%, 50%, 75% i 100% piasku popiołem z trzciny cukrowej

Fig. 16. Water absorption of concrete with cement:sand ratio 1:3 and replacement of 25 %, 50 %, 75 %, and 100 % sand by bagasse ash

1:2 i 1:3 przedstawiono na rys. 11-13. Nasiąkliwość badanych betonów zwiększa się wraz ze wzrostem procentowej wymiany piasku na popiół lotny. 100%-owa wymiana daje największą nasiąkliwość. Jedynym dodatkiem, który spowodował zmniejszenie nasiąkliwości było 25% FA.

Nasiąkliwość mieszanek z 10%, 30%, 40% i 50% zamiłą kruszywa drobnego popiołem z trzciny cukrowej dla stosunku cement:piasek 1:1, 1:2 i 1:3 przedstawiono na rys. 14-16. Nasiąkliwość mieszanek z popiołem z trzciny cukrowej jest większa w porównaniu z betonem kontrolnym. BA10 daje najmniejszą nasiąkliwość w stosunku do innych zawartości popiołu.

Rys. 17 przedstawia porównanie nasiąkliwości mieszanek kontrolnych o stosunkach CM 1:1, CM 1:2 i CM 1:3 z betonem zawierającym dodatek popiołu z trzciny cukrowej [10%, 20%, 30%, 40%, 50%] i popiołu lotnego [25%, 50%, 75% i 100%]. W ogólnym porównaniu FA75 i FA100 dają największą absorpcję wody.

4.1.3. Absorpcja kapilarna

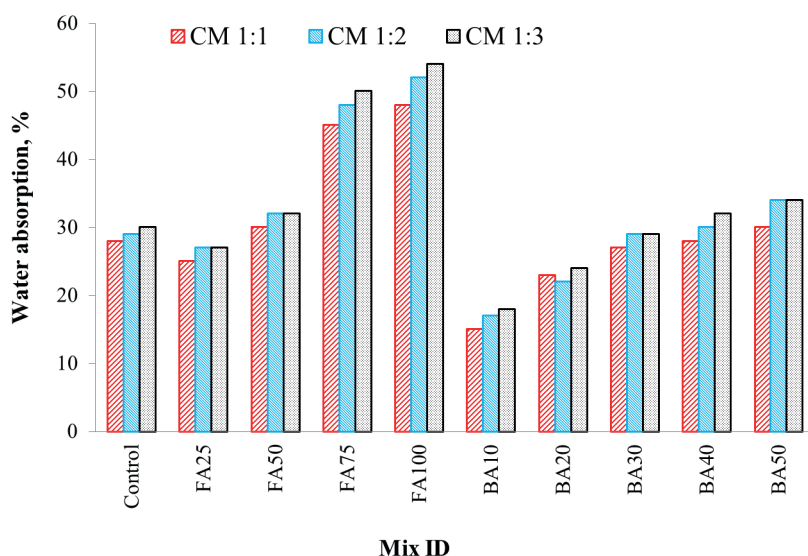
Wartości absorpcji kapilarnej oraz względnej absorpcji kapilarnej próbek betonu lekkiego po 28 dniach przedstawiono w tabelicy 4. Na rysunkach od 18 do 20 przedstawiono sorpcyjność względną betonu lekkiego po 28 dniach. Sorpcyjność zaprawy z 25%, 50%, 75% i 100% udziałem popiołu lotnego wykazuje bardzo wysokie wartości w porównaniu z zaprawą kontrolną. 25% zastąpienie piasku popiołem z wyłoczyn z trzciny cukrowej powoduje porównywalnie mniejszą absorpcją kapilarną w porównaniu z pozostałymi składami betonów.

Rysunek 18 pokazuje absorpcję kapilarną betonów o stosunku spoiwo:piasek CM 1:1 z zastąpieniem piasku popiołem z wyłoczyn z trzciny cukrowej

Tabela 4 / Table 4

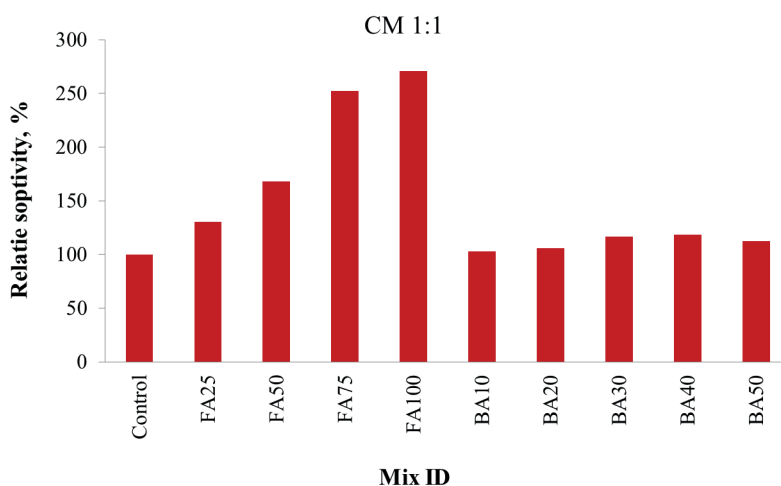
PODCIĄGANIE KAPILARNE BETONÓW LEKKICH SORPTIVITY LIGHTWEIGHT CONCRETE

Próbka / S.No.	Mix ID	Absorpcja kapilarna / Sorptivity, cm/sec ^{1/2}			Względna absorpcja kapilarna / Relative sorptivity, %		
		CM 1:1	CM 1:2	CM 1:3	CM 1:1	CM 1:2	CM 1:3
1	Kontrolna / Control	1.07	1.37	1.53	100.0	100.00	100.00
2	FA25	1.40	1.84	2.01	130.7	134.3	131.4
3	FA50	1.80	2.52	2.71	168.1	183.0	177.1
4	FA75	2.70	3.51	3.78	252.1	255.3	247.1
5	FA100	2.90	3.70	4.10	270.8	268.7	268.0
6	BA10	1.10	1.43	1.55	102.7	103.8	101.3
7	BA20	1.13	1.50	1.62	105.9	109.4	105.9
8	BA30	1.25	1.59	1.70	116.7	116.0	111.1
9	BA40	1.27	1.68	1.80	118.6	122.2	117.6
10	BA50	1.20	1.59	1.72	112.4	116.2	112.4



Rys. 17: Porównanie nasiąkliwości betonów o stosunkach spoiwo: kruszywo CM 1:1, CM 1:2 i CM 1:3 z betonem zawierającym dodatek popiołu z trzciny cukrowej w ilości 10%, 20%, 30%, 40%, 50% i popiołu lotnego 25%, 50%, 75% i 100%

Fig. 17. Water absorption comparison of control mortar mix of CM 1:1, CM 1:2 and CM 1:3 of bagasse ash replacement of 10 %, 20 %, 30 %, 40 %, 50 % and fly ash replacement of 25 %, 50 %, 75 % and 100 %



Rys. 18. Względna absorpcja kapilarna betonów lekkich o stosunku CM 1:1

Fig. 18. Relative sorptivity of lightweight concrete of CM 1:1

w ilości 10%, 20%, 30%, 40%, 50% oraz popiołem lotnym w ilości 25%, 50%, 75% i 100%. Sorpcyjność nieznacznie wzrasta przy zwiększeniu procentowego udziału popiołu z wytloczyn z trzciny cukrowej do 40% dodatku popiołu, a następnie dla 50% nieznacznie maleje. W przypadku zamiany piasku popiołem lotnym, sorpcyjność rośnie gwałtownie, gdy zwiększa się jego procentowy udział. W porównaniu z betonem kontrolnym, mieszanki BA10, BA20, BA30, BA40 i BA50 wykazują odpowiednio 2,7%, 5,9%, 16,7%, 18,6% i 12,4% większe wartości absorpcji kapilarnej. Mieszanki FA25, FA50, FA75 i FA100 wykazują odpowiednio 30,7%, 68,1%, 152,1%, 170,8% większe wartości absorpcji kapilarnej niż mieszanka kontrolna.

Rysunek 19 pokazuje względną absorpcję kapilarną betonów o CM 1:2. Absorpcja kapilarna nieznacznie wzrasta przy zwiększeniu procentowego udziału popiołu z wytloczyn z trzciny cukrowej do 40% zastąpienia piasku, a następnie sorpcyjność maleje. Absorpcja kapilarna wzrasta gwałtownie, gdy zwiększa się procentowy udział popiołu lotnego. W porównaniu z mieszanką kontrolną, mieszanki BA10, BA20, BA30, BA40 i BA50 wykazują odpowiednio 3,89%, 9,4%, 16,1%, 22,2% i 16,2% większe wartości sorpcyjności. Mieszanki FA25, FA50, FA75 i FA100 wykazują odpowiednio 34,3%, 83,0%, 155,3%, 168,7% większe wartości sorpcyjności niż mieszanka kontrolna.

Sorpcyjność względną betonów o stosunku spoiwa do piasku CM 1:3 przedstawia rys. 20. Wpływ obu popiołów na absorpcję kapilarną jest podobny do wpływu na betony o stosunku CM 1:1 oraz CM 1:2.

4.2. Zależność między własnościami trwałości

W tym rozdziale opisano związki gęstości, nasiąkliwości i sorpcyjności.

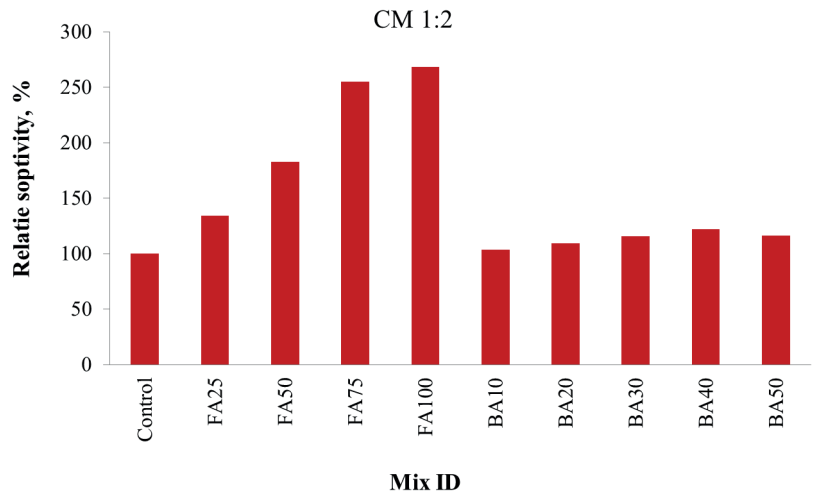
4.2.1. Zależność gęstości z absorpcją kapilarną

Zależność absorpcji kapilarnej z gęstością wszystkich kombinacji mieszanek dla różnych mieszanek zapraw, a mianowicie: CM 1:1, CM 1:2 i CM 1:3, przedstawiono na rysunkach od 21 do 23. Równanie linii tendencji liniowej na wykresie przedstawia równanie dla zależności nasiąkliwości próbek betonu od jego gęstości, gdzie:

Tablica 5 / Table 5

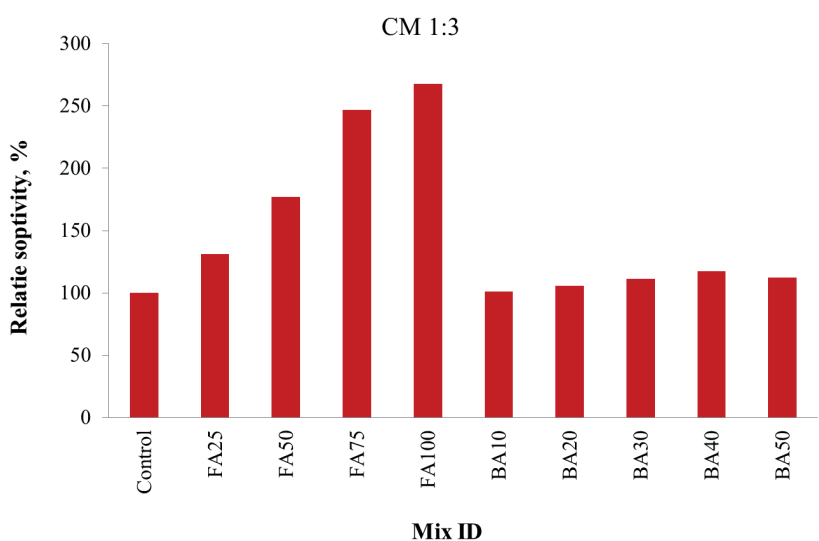
ZALEŻNOŚĆ POMIĘDZY GĘSTOŚCIĄ A ABSORPCJĄ KAPILARNĄ
RELATIONSHIP BETWEEN DENSITY AND SORPTIVITY

Próbka / S.No.	Beton / Mix	Równanie / Equation	R ²
1	CM 1:1	$f_s = -0.002fd + 4.208$	0.911
2	CM 1:2	$f_s = -0.003fd + 5.289$	0.980
3	CM 1:3	$f_s = -0.002fd + 5.103$	0.823



Rys. 19. Względna absorpcja kapilarna betonów lekkich o stosunku CM 1:2

Fig. 19. Relative sorptivity of lightweight concrete of CM 1:2



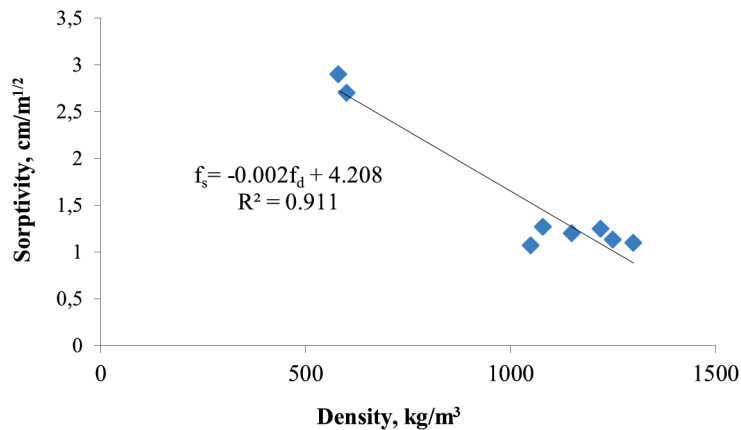
Rys. 20. Względna absorpcja kapilarna betonów lekkich o stosunku CM 1:3

Fig. 20. Relative sorptivity of lightweight concrete of CM 1:3

vity decreases. The sorptivity increases rapidly if the percentage of sand replacement by fly ash increases. To compare the control mix, BA10, BA20, BA30, BA40 and BA50 give 2.7%, 5.9%, 16.7%, 18.6% and 12.4% higher values of sorptivity respectively. The mix FA25, FA50, FA75 and FA100 give 30.7%, 68.1%, 152.1%, 170.8% higher sorptivity values comparing to the control mix.

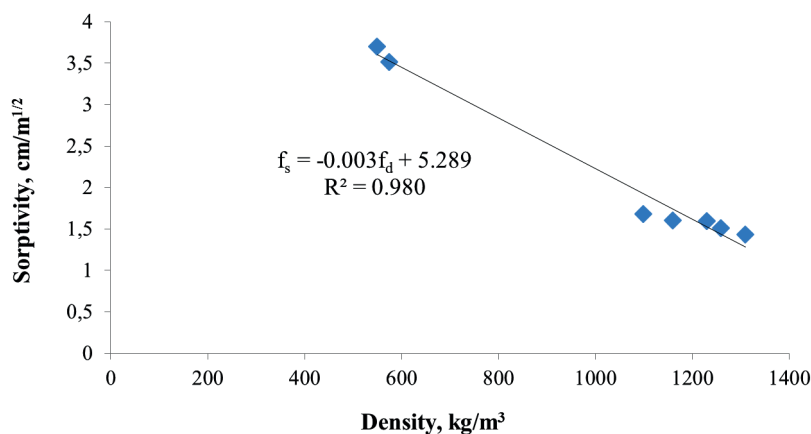
Fig. 19 shows the relative sorptivity of CM 1:2 concretes. The sorptivity increases slightly if the percentage of bagasse ash increases up to 40% replacement of BA and after that the sorptivity decreases. The sorptivity increases rapidly if the percentage of fly ash increases. Comparing to control mix, BA10, BA20, BA30, BA40 and BA50 give 3.9%, 9.4%, 16.1%, 22.2% and 16.2% higher values of sorptivity respectively. FA25, FA50, FA75 and FA100 give 34.3%, 83.0%, 155.3%, 168.7% higher sorptivity values comparing to the control mix.

The relative sorptivity of the mortar mix CM1:3 is shown in Fig. 20. The effect of sand replacement by both ashes is similar as in the case of concretes CM 1:1 and CM 1:2.



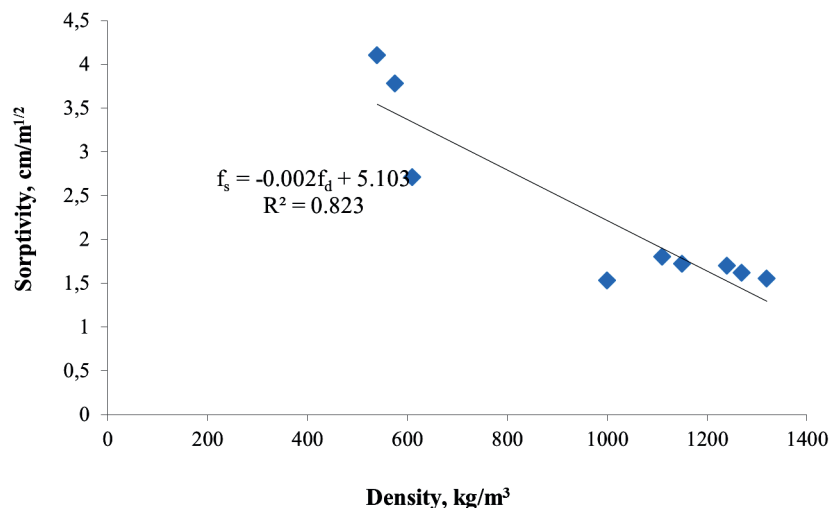
Rys. 21. Zależność absorpcji kapilarnej od gęstości betonów o CM 1:1

Fig. 21. Relationship between sorptivity and density for concretes of CM 1:1



Rys. 22. Zależność absorpcji kapilarnej od gęstości betonów o CM 1:2

Fig. 22. Relationship between sorptivity and density for concretes of CM 1:2



Rys. 23. Zależność absorpcji kapilarnej od gęstości betonów o CM 1:3

Fig. 23. Relationship between sorptivity and density for concretes of CM 1:3

f_s – absorpcja kapilarna, cm/s^{1/2}

f_d – gęstość, kg/m³.

Wartość R^2 jest większa od 0,9 dla mieszanek o stosunkach CM 1:1, CM 1:2. Stąd też istnieje zależność między sorpcyjnością

4.2. Relationship between durability indicators

This section describes the relationship between the density, water absorption and sorptivity.

4.2.1. Relationship between density and sorptivity

The relationship between sorptivity and density of all mix combinations for the different mortar mixes such as CM 1:1, CM 1:2 and CM 1:3 are shown in Figs. 21 to 23. The equation of the linear trend line in the graph represents the equation for water absorption values of the mortar specimens, where

f_s – sorptivity, cm/s^{1/2}

f_d – density, kg/m³

The value of R^2 is greater than 0.9 for the mixes CM 1:1 and CM 1:2. Hence, the relationship exists between the sorptivity and density. Table 5 gives the detailed data on the relationship between density and sorptivity.

4.2.2. Relationship between sorptivity and water absorption

Figures 24 to 26 show the graphical relationship between sorptivity and water absorption of all mix combinations for the different mortar mix such as CM 1:1, CM 1:2 and CM 1:3. The equation of the linear trend line in the graph represents the empirical relationship between sorptivity and water absorption, where

f_s – sorptivity, cm/s^{1/2}

f_w – water absorption, %.

The value of R^2 is greater than 0.9 again for concretes CM 1:1, CM 1:2. Hence, the relationship exists between the sorptivity and water absorption. It was observed that with sorptivity decrease, saturated water absorption also decreased. Table 6 gives the relationship between sorptivity and water absorption.

4.2.3. Relationship between density and water absorption

The relationship between density and water absorption of all concretes is shown in Figs. 27 to 29 and presented in Table 7. The equation of the linear trend line in the graph represents the empirical equation between water absorption and density, where

f_w – water absorption, %

f_d – density, kg/m³.

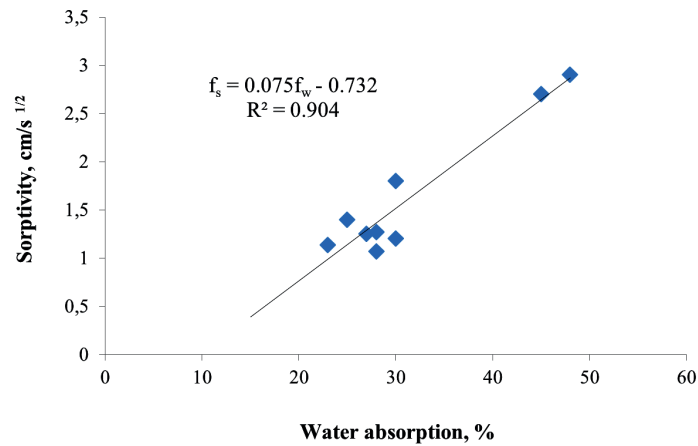
The density value increases and the corresponding percentage of water absorption value decreases.

Here both the fly ash and bagasse ash show, that the increase in the percentage of replacement leads to more absorption characteristics of LWC. The raw bagasse ash contains coarser, unburnt

Tablica 6 / Table 6

ZALEŻNOŚĆ NASIĄKLIWOŚCI OD ABSORPCJI KAPILARNEJ
RELATIONSHIP BETWEEN SORPTIVITY AND WATER ABSORPTION

Próbka / S.No.	Beton / Mix	Równanie / Equation	R ²
1	CM 1:1	$f_s = 0.075f_w - 0.732$	0.904
2	CM 1:2	$f_s = 0.072 f_w - 0.111$	0.912
3	CM 1:3	$f_s = 0.079 f_w - 0.294$	0.858



Rys. 24. Zależność absorpcji kapilarnej od nasiąkliwości betonów o CM 1:1
Fig. 24. Relationship between sorptivity and water absorption for concretes of CM 1:1

a gęstością. W tablicy 5 podano parametry równań regresji zależność między gęstością a adsorpcją kapilarną.

4.2.2. Zależność między absorpcją kapilarną a nasiąkliwością

Na rysunkach od 28 do 30 przedstawiono zależność absorpcji kapilarnej od nasiąkliwości wszystkich betonów lekkich. Równanie linii tendencji liniowej na wykresie przedstawia równanie empiryczne dla zależności absorpcji kapilarnej i nasiąkliwości,

gdzie:

f_s – absorpcja kapilarna, $\text{cm/s}^{1/2}$

f_w – nasiąkliwość, %.

Wartość R² jest większa od 0,9 dla betonów CM 1:1, CM 1:2. Stąd też istnieje zależność między sorpcyjnością a nasiąkliwością. Znotowano, że wraz ze spadkiem absorpcji kapilarnej zmniejsza się również nasiąkliwość. W tablicy 6 podano parametry równań regresji dla zależności adsorpcji kapilarnej od nasiąkliwości.

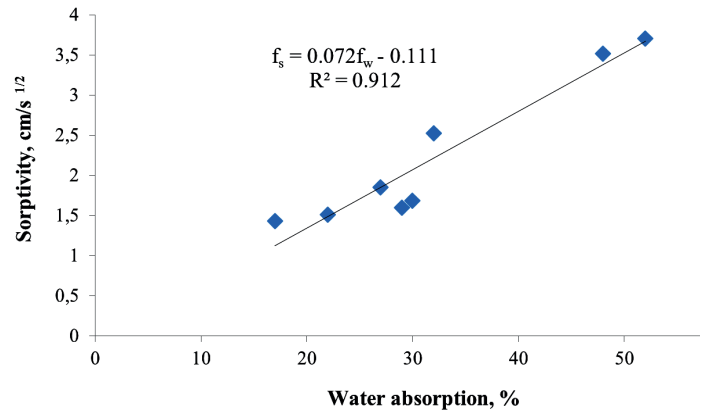
4.2.3. Zależność gęstości od nasiąkliwości

Zależność między gęstością a nasiąkliwością wszystkich betonów pokazano na rysunkach 27-29 i przedstawiono w tablicy 7. Równanie liniowe na wykresie przedstawia równanie empiryczne dla gęstości próbek zaprawy. Wraz ze wzrostem gęstości maleje

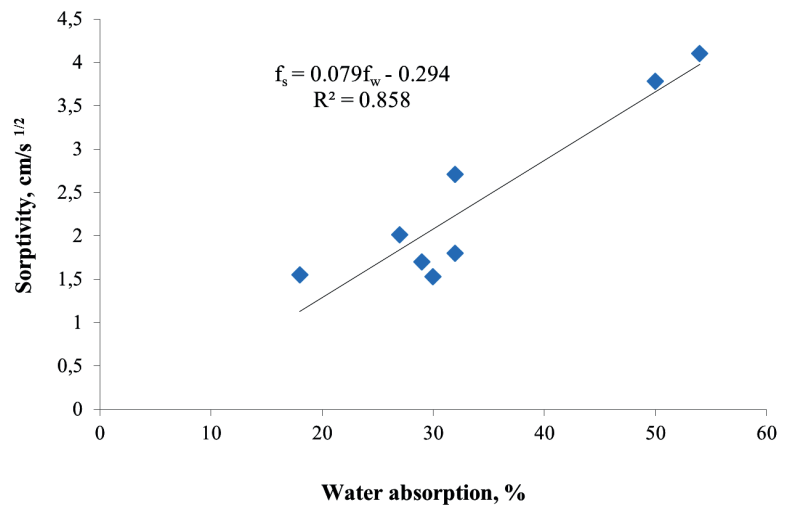
Tablica 7 / Table 7

ZALEŻNOŚĆ GĘSTOŚCI OD NASIĄKLIWOŚCI
RELATIONSHIP BETWEEN DENSITY AND WATER ABSORPTION

Próbka / S.No.	Beton / Mix	Równanie / Equation	R ²
1	CM 1:1	$f_w = -0.040fd + 70.48$	0.973
2	CM 1:2	$f_w = -0.041 fd + 73.66$	0.982
3	CM 1:3	$f_w = -0.038 fd + 73.38$	0.919



Rys. 25. Zależność absorpcji kapilarnej od nasiąkliwości betonów o CM 1:2
Fig. 25. Relationship between sorptivity and water absorption for concretes of CM 1:2

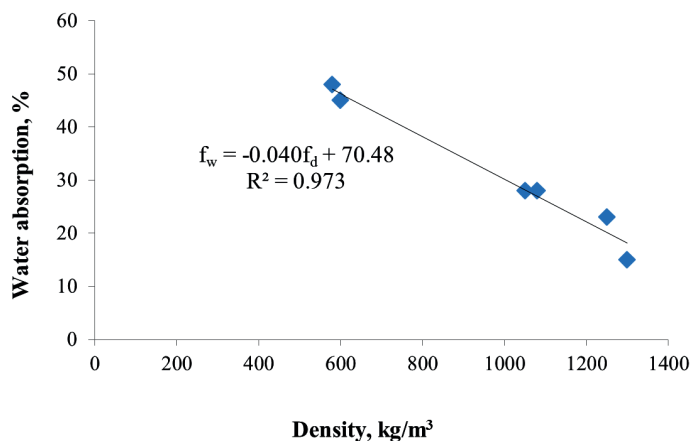


Rys. 26. Zależność absorpcji kapilarnej od nasiąkliwości betonów o CM 1:3
Fig. 26. Relationship between sorptivity and water absorption for concretes of CM 1:3

and half burnt particles which are porous and hence absorb more water. It is reflected in the increase in the sorptivity with the increase in the percentage of bagasse ash. In its purest form the bagasse ash can prove to be a potential ingredient of concrete since it can be an effective replacement to fine aggregate.

5. Conclusions

The general conclusions drawn from the above studies are following.



Rys. 27. Zależność gęstości od nasiąkliwości dla betonów o CM 1:1

Fig. 27. Relationship between density and water absorption for concretes of CM 1:1

odpowiadająca jej wartość nasiąkliwości.

Zarówno w przypadku popiołu lotnego, jak i popiołu z wytłocznin z trzciny cukrowej widać, że zwiększenie procentowego udziału zamiennika prowadzi do zwiększenia nasiąkliwości betonu. Surowy popiół z wytłocznin z trzciny cukrowej zawiera grubsze, niespalone i na pół spalone cząstki, które są porowate, a więc wchłaniają więcej wody. Świadczy o tym wzrost absorpcji kapilarnej wraz ze wzrostem procentowego udziału popiołu z wytłocznin z trzciny cukrowej. W swojej najczystszej postaci popiół z wytłocznin z trzciny cukrowej może okazać się potencjalnym składnikiem betonu, ponieważ może być skutecznym zamiennikiem drobnego kruszywa.

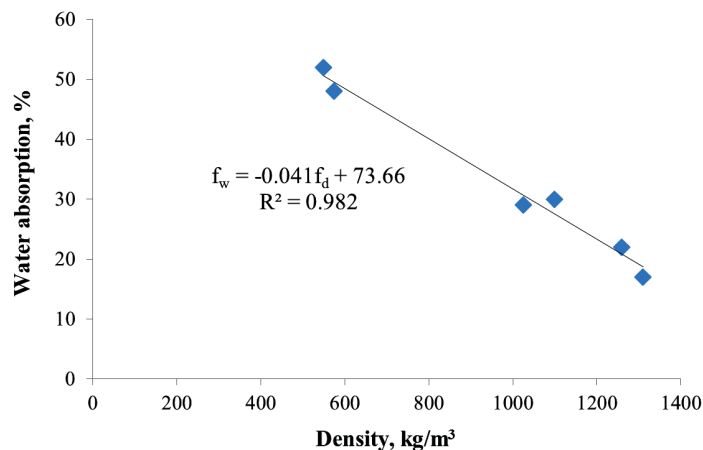
5. Wnioski

Ogólne wnioski z powyższych badań są jak następujące.

- Dodatek popiołu z trzciny cukrowej zwiększa gęstość, a dodatek popiołu lotnego znacznie zmniejsza gęstość betonu lekkiego.
- Dodatek popiołu lotnego i popiołu z trzciny cukrowej zwiększają absorpcję kapilarną betonu lekkiego.
- Zastosowanie popiołu lotnego i popiołu z trzciny cukrowej ogólnie zwiększa nasiąkliwość betonu lekkiego. Wyjątkiem jest LWC z 10% popiołem z trzciny cukrowej, który ma mniejszą nasiąkliwość niż inne betony.
- Dodatek popiołu lotnego i popiołu z trzciny cukrowej zwiększa absorpcję kapilarną betonu i czyni go bardziej przepuszczalnym. Sorpcyjność jest najmniejsza, gdy procentowa wymiana piasku na popiół z trzciny cukrowej wynosi 10%.

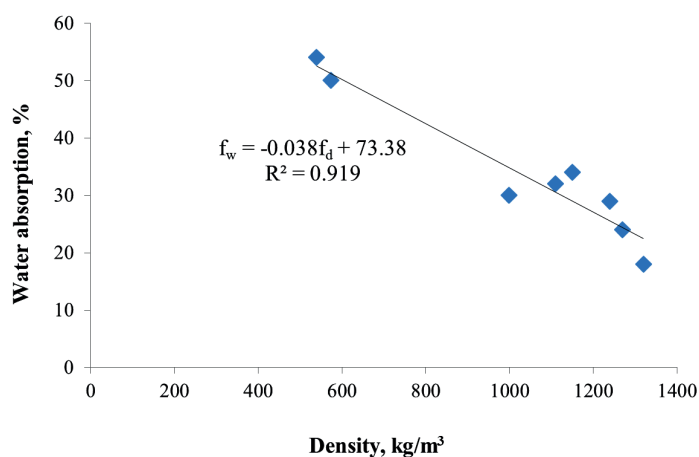
Literatura / References

1. 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). <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.06.153>



Rys. 28. Zależność gęstości od nasiąkliwości dla betonów o CM 1:2

Fig. 28. Relationship between density and water absorption for concretes of CM 1:2



Rys. 29. Zależność gęstości od nasiąkliwości dla betonów o CM 1:3

Fig. 29. Relationship between density and water absorption for concretes of CM 1:3

- The addition of bagasse ash increases the density and the addition of fly ash decreases the density significantly.
- The addition of fly ash and bagasse ash increases the sorptivity of lightweight concrete.
- The use of fly ash and bagasse ash in general increases the water absorption of the lightweight concrete. The exception is LWC with 10 % bagasse ash, which exhibits lower water absorption than other concrete mixtures.
- The addition of fly ash and bagasse ash increases the sorptivity of concrete and makes the concrete more permeable. The sorptivity is the lowest, when the percentage of replacement of sand with bagasse ash is 10%.

2. A. Rajasekar, K. Arunachalam, M. Kottaisamy, V. Saraswathy, Durability characteristics of Ultra High Strength Concrete with treated sugarcane bagasse ash. *Constr. Build. Mater.* **171**,350-356 (2018). <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.03.140>
3. K.H. Mo, T.C. Ling, U.J. Alengaram, S.P. Yap, C.W. Yuen, Overview of supplementary cementitious materials usage in lightweight aggregate concrete. *Constr. Build. Mater.* **139**, 403-418 (2017). <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.02.081>
4. 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). <https://doi.org/10.1016/j.job.2020.101415>
5. P. Rattanachu, W. Tangchirapat, C. Jaturapitakkul, Water Permeability and Sulfate Resistance of Eco-Friendly High-Strength Concrete Composed of Ground Bagasse Ash and Recycled Concrete Aggregate. *J. Mater. Civil Eng.* **31**(6), 04019093 (2019). [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)MT.1943-5533.0002740](https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0002740)
6. N.U. Kockal, T. Ozturan, Durability of lightweight concretes with lightweight fly ash aggregates. *Constr. Build. Mater.* **25**, 1430-1438 (2011). <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2010.09.022>
7. K. Ramamurthy, E.K. Kunhanandan, G. Indu Siva Ranjani, A classification of studies on properties of foam concrete. *Cem. Concr. Comp.* **31**, 388-396 (2009). <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2009.04.006>
8. K.M.A. Hossain, S. Ahmed, M. Lachemi, Lightweight concrete incorporating pumice based blended cement and aggregate: Mechanical and durability characteristics. *Constr. Build. Mater.* **25**,1186-1195 (2011). <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2010.09.036>
9. A. Bahurudeen, M. Santhanam, Performance Evaluation of Sugarcane Bagasse Ash-Based Cement for Durable Concrete", 4th Int. Conf. Durability of Concrete Structures, Purdue Univ. W. Lafayette, 2014.
10. R. Somna, C. Jaturapitakkul, M. Made, Effect of ground fly ash and ground bagasse ash on the durability of recycled aggregate concrete. **34**, 848-854 (2012). <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2012.03.003>
11. M. Gunasekaran, T. Palanisamy, Effect of fly ash and bagasse ash on the mechanical properties of light weight concrete. *Cem. Wapno Beton*, 27(2) 72-101 (2022). <https://doi.org/10.32047/cwb.2022.27.2.1>