



## Utilization of waste glass and ceramic tiles in concrete as aggregate

### Wykorzystanie odpadowego szkła i płytek ceramicznych w betonie jako kruszywa

**Abubaker M. Almaleeh<sup>1\*</sup>, Stanley M. Shitote<sup>2</sup>, Timothy Nyomboi<sup>1</sup>**

<sup>1</sup> Structural Engineering Department, Pan African University, Institute for Basic Sciences, Technology and Innovation, at Jomo Kenyatta

University of Agriculture and Technology (JKUAT), Juja, Kenya

<sup>2</sup> Moi University, Department of Civil and Structural Engineering, Kesses, Kenya

\*e-mail: bakrealmaleeh@gmail.com

#### ABSTRACT

Due to high generation of solid waste materials around the world, the reuse of solid waste becomes indispensable in order to make them environmentally friendly. Therefore, the utilization of solid waste minimizes the amount of disposal, the solid waste management cost, and natural resource consumption. In this study, waste glass and ceramic tiles were used in concrete instead of conventional aggregates. Experiment was conducted in three stages. The first and second stages focused on the glass-concrete and ceramic-concrete respectively. Meanwhile, the third stage consists blend of glass and ceramic tiles together. These concretes were compared to conventional concrete. The results showed that blending of waste glass and ceramic tiles aggregates can be utilized partially. Improvement in the mechanical characteristics of the non-conventional concrete was observed.

**KEYWORDS:** Glass, Ceramic tiles, Compressive strength, Splitting tensile strength, Flexural strength

#### STRESZCZENIE

Ze względu na wysoki poziom wytwarzania odpadów stałych na całym świecie ponowne ich wykorzystanie staje się niezbędne, aby uczynić je przyjaznymi dla środowiska. Dlatego wykorzystanie odpadów stałych minimalizuje zarówno dostępną ich ilość, koszty gospodarki odpadami stałymi, jak i zużycie zasobów naturalnych. Odpady szklane i płytki ceramiczne zastosowano w niniejszym badaniu zamiast zwykłych kruszyw w betonie. Eksperyment przeprowadzono w trzech etapach. Pierwszy i drugi etap dotyczyły odpowiednio betonu ze szkłem i betonu z ceramiką. Podczas gdy trzeci etap polegał na połączeniu szkła i płytek ceramicznych. Otrzymane betony porównano z betonem konwencjonalnym. Wyniki pokazały, że częściowo można wykorzystać mieszanie kruszywa szklanego i płytek ceramicznych. Zaobserwowano poprawę właściwości mechanicznych betonu niekonwencjonalnego.

**SŁOWA KLUCZOWE:** szkło, płytki ceramiczne, wytrzymałość na ściskanie, wytrzymałość na rozciąganie przy rozłupywaniu, wytrzymałość na zginanie

#### 1. Introduction

Currently, world cities generate about 1.3 billion tonnes of solid waste per year. This amount is expected to increase to 2.2 billion tonnes by 2025. In addition, Construction and Demolition (C&D) wastes contribute the highest percentage of wastes worldwide (75%), out of which 54% is Ceramic materials. Globally, the production of ceramic tiles during 2011–12 was about 11,166 mil-

#### 1. Wstęp

Miasta na świecie wytwarzają obecnie około 1,3 miliarda ton odpadów stałych rocznie. Oczekuje się, że do 2025 roku ilość ta wzrośnie do 2,2 miliarda ton. Ponadto odpady budowlane i rozbiórkowe (C&D) stanowią największy odsetek odpadów na świecie (75%), z czego 54% to materiały ceramiczne. Globalnie produkcja płytek ceramicznych w latach 2011–12 wyniosła około

lion square meters. This high amount of production led to high amount of waste [1, 2].

In 1994, approximately 9.2 million metric tons of waste glass was discharged in the United States. About 8.1 million metric tons approximately or 80% of this waste glass was container glass [3], and approximately 20% of the building construction waste around the world consists of glass, plastic, and concrete [4].

Furthermore, the cost of solid waste management globally will increase to about \$375.5 billion annually in 2025 [5]. Due to this high cost and amount of waste glass and ceramic tiles, the reuse of waste glass and ceramic tiles in different ways is highly required. Glass and ceramic tiles have been studied recently by many researchers in this context. In concrete, glass and ceramic showed a good behaviour, when used to replace sand and gravel.

In this research, glass and ceramic were used as fine and coarse aggregate in concrete instead of sand and gravel. This paper therefore examines the answer to the question, what is the effect of using solid waste glass and ceramic tiles combined on the strengths of concrete?

### 1.1. Ceramic tiles

Ceramic tiles originally are manufactured from natural clay. ASTM classifies the ceramic tiles into categories depending on the water absorption. These categories are Impervious, Vitreous, Semi-vitreous, and Non-vitreous with water absorption of 0.5 % or less, 0.5% – 3%, 3.0% – 7.0%, and more than 7.0 % respectively [6, 7].

García-González et al. [8], compared ceramic tiles with normal aggregates, and the density and resistance of fragmentation of the ceramic tiles aggregate were close to the normal aggregates [8]. Moreover, results showed that the ceramic tiles are suitable to be used as gravel in concrete [8, 9].

Poon and Chan [10] summarized the details of a building called Wetland Park in Hong Kong. Wetland Park was constructed from concrete made from recycled brick and ceramic tiles. The building consumed approximately 14,300 m<sup>3</sup> of the concrete. A study was needed to determine the possibility of using this waste in concrete. Natural sand was replaced by 20% to 100% depending on the class of concrete. Results showed that there was slight decrease in the density, compressive strength, and modulus of elasticity of hardened concrete at high replacement.

11166 milionów metrów kwadratowych. Tak wysoka produkcja prowadzi do powstania dużej ilości odpadów [1, 2].

W 1994 roku w Stanach Zjednoczonych wypuszczono około 9,2 miliona ton odpadów szklanych. W przybliżeniu 8,1 miliona ton metrycznych lub 80% tego szkła odpadowego stanowiło szkło opakowaniowe [3], a około 20% odpadów budowlanych z całego świata składa się ze szkła, plastiku i betonu [4].

Ponadto globalny koszt gospodarki odpadami stałymi wzrośnie w roku 2025 do około 375,5 mld USD rocznie [5]. Ze względu na ten wysoki koszt i ilość szkła odpadowego i płytek ceramicznych ponowne użycie szkła odpadowego i płytek ceramicznych na różne sposoby jest bardzo pożądane. Wielu badaczy badało ostatnio płytki szklane i ceramiczne w tym kontekście. Szkło i ceramika wykazały dobre zachowanie w betonie, gdy zastępowały piasek i żwir.

W niniejszych badaniach zastosowano szkło i ceramikę jako drobne i gruboziarniste kruszywo w betonie zamiast piasku i żwiru. W tym artykule zbadano zatem odpowiedź na pytanie, jaki jest wpływ jednoczesnego stosowania szkła odpadowego i płytek ceramicznych na wytrzymałość betonu?

### 1.1. Płytki ceramiczne

Płytki ceramiczne pierwotnie produkowane są z naturalnej gliny. Klasyfikacja płytek ceramicznych przez ASTM na kategorie zależy od nasiąkliwości. Kategorie te są następujące: płytki nienasiąkliwe, szkliste, półszkliste i nieszkliste o nasiąkliwości odpowiednio 0,5% lub mniejszej, 0,5% – 3%, 3,0% – 7,0% i więcej niż 7,0% [6, 7].

García-González i wsp. [8] porównali płytki ceramiczne z normalnymi kruszywami i stwierdzili, że gęstość i odporność na fragmentację kruszywa z płytek ceramicznych były zbliżone do normalnych kruszyw. Ponadto wyniki wykazały, że płytki ceramiczne nadają się do stosowania jako żwir w betonie [8, 9].

Poon i Chan [10] podsumowali szczegóły budynku zwanego Wetland Park w Hongkongu. Wetland Park został zbudowany z betonu wykonanego z cegieł i płytek ceramicznych z recyklingu. Budynek zużył około 14 300 m<sup>3</sup> betonu. Potrzebne były badania w celu określenia możliwości wykorzystania tych odpadów w betonie. Naturalny piasek został zastąpiony w ilości od 20% do 100% w zależności od klasy betonu. Wyniki wykazały niewielki spadek gęstości, wytrzymałości na ścislenie i modułu sprężystości stwardniałego betonu przy wysokim stopniu wymiany.

### 1.1.1. Ceramic as coarse aggregates

Generally, the mechanical properties of concrete do not change, when the waste ceramic tiles are used as gravel in concrete [11–14]. At lower replacement, the strength does not change, but it begins to reduce gradually with increase in the ceramic tile aggregate amount [15].

Normal gravel could be replaced up to 30% – 40% by coarse ceramic tiles without any change in concrete characteristics. At very high replacement, the strengths of the concrete reduced [1, 16–19].

Some researchers used the waste ceramic tiles with another type of waste as fine aggregates. Copper slag and waste foundry sand were used as normal sand in concrete. Using copper slag as sand with coarse ceramic tiles in concrete gave similar properties to conventional concrete [20]. Also, when 20% of sand and gravel was replaced by waste foundry sand and coarse ceramic tiles, the compressive and split tensile strength increased [21].

Fathi bin Asrul [11] replaced partially the gravel by ceramic tiles. Results showed that at 15% replacement, the highest strength was found compare to control better specimen. Addition of 15% ceramic material has led to compaction of concrete, which exhibited a low water absorption rate. Thus, the optimum replacement of gravel by ceramic tiles changes depending on the conditions and the assumptions of the experiment. This research emphasized the ideal replacement percentage of gravel by coarse aggregates that could be done.

Gomes and de Brito [22] studied the durability performance of concrete, which contained coarse aggregates from demolition concrete and waste ceramic concrete. The presented results showed that it is possible to use the recycled aggregates and waste ceramic tiles, but only by the partial substitution of the coarse fraction.

In addition, Qadir [23] used the waste ceramic tiles partially as coarse aggregates in self-compacting concrete. His research was about the effect of high-temperature (room temperature to 400 °C) on the strength of this type of concrete. The research findings were that waste ceramic tiles can be used in the production of self-compacting concrete. But at high-temperature, the strength of concrete decreased, especially when the amount of crushed ceramic tiles increased.

### 1.1.2. Ceramic as fine aggregates

In addition, the ceramic tiles were used as sand in concrete. Hemanth Kumar et al. [19] examined it as sand, and the replacement of sand was done partially by 10%, 20%, 30%, 40%, and 50%. Results showed that

### 1.1.1. Ceramika jako gruboziarniste kruszywo

Zasadniczo właściwości mechaniczne betonu nie zmieniają się, gdy zużyte płytki ceramiczne stosuje się jako żwir w betonie [11–14]. Przy niższej wymianie wytrzymałość nie ulega zmianie, ale zaczyna się stopniowo zmniejszać wraz ze wzrostem ilości kruszywa z płytek ceramicznych [15].

Zwykły żwir można zastąpić w ilości od 30% do 40% gruboziarnistymi płytkami ceramicznymi bez zmiany właściwości betonu. Wytrzymałości betonu zmniejszyły się przy bardzo wysokiej wymianie [1, 16–19].

Niektórzy badacze używali odpadowych płytek ceramicznych z innym rodzajem odpadu w roli drobnego kruszywa. Żużel miedziany i odpadowy piasek odlewniczy zastosowano jako zwykły piasek w betonie. Zastosowanie żużla miedzianego jako piasku z gruboziarnistymi płytkami ceramicznymi w betonie dało podobne właściwości do konwencjonalnego betonu [20]. Ponadto, gdy 20% piasku i żwiru zastąpiono odpadowym piaskiem odlewniczym i gruboziarnistymi płytkami ceramicznymi, wzrosła wytrzymałość na ściskanie i na rozciąganie przy rozłupywaniu [21].

Fathi bin Asrul [11] zastąpił częściowo żwir płytkami ceramicznymi. Wyniki wykazały, że przy 15% zamianie stwierdzono najwyższą wytrzymałość w porównaniu z próbką kontrolną. Dodatek 15% materiału ceramicznego doprowadził do lepszego zagęszczenia betonu, który wykazał małą szybkość absorpcji wody. Zatem optymalne zastąpienie żwiru płytkami ceramicznymi zmienia się w zależności od warunków i założeń eksperymentu. W badaniach położono nacisk na określenie najlepszego procentu zastąpienia żwiru gruboziarnistym kruszywem, jaki można wykonać.

Gomes i de Brito [22] badali osiągi odnośnie trwałości betonu, który zawierał gruboziarniste kruszywa z betonu wyburzeniowego i odpadowego betonu ceramicznego. Przedstawione wyniki pokazały, że możliwe jest użycie odzyskanych kruszyw i odpadowych płytek ceramicznych, ale tylko poprzez częściowe zastąpienie gruboziarnistej frakcji.

Ponadto Qadir [23] wykorzystał częściowo zużyte płytki ceramiczne jako gruboziarniste kruszywa w betonie samozagęszczalnym. Jego badania dotyczyły wpływu wysokiej temperatury (temperatura pokojowa do 400 °C) na wytrzymałość tego rodzaju betonu. Wyniki badań wykazały, że zużyte płytki ceramiczne można wykorzystać do produkcji betonu samozagęszczalnego. Ale w wysokiej temperaturze wytrzymałość betonu zmniejszyła się, zwłaszcza gdy wzrosła ilość pokruszonych płytek ceramicznych.

waste ceramic tiles can be used effectively, and improvement in strength was observed. Also, Azeez et al. [24] replaced sand and cement by waste ceramic tiles. Their research recommended that the replacement of sand could be up to 25%, and cement up to 5%. There are not that much literature on the use of ceramic tiles as fine aggregate. Thus, this paper provides additional experimental study of the ceramic tiles as sand in concrete.

### *1.1.3. Ceramic as fine and coarse aggregates*

Waste ceramic tiles also were used partially as both fine and coarse aggregate. From the research results, the strengths of concrete increased [25]. Hemanth Kumar et al. [19] replaced partially the sand and gravel by 10% and 20% fine and coarse ceramic tiles respectively. Aggregates tests proved that coarse ceramic tiles have more impact factor, but less specific gravity than the gravel. Meanwhile, fine ceramic tiles are almost the same specific gravity as the sand. Increase in the strengths and workability was observed, when the waste ceramic tiles were used.

### *1.1.4. Other uses of ceramic*

Portland cement was replaced by ceramic tiles to assess the material's pozzolanic behaviour. Percentages of ceramic waste from 15 wt% to 50 wt% were substituted, and results emphasize that mortars with up to 35 wt% of waste ceramic tiles comply with the requirements established for fly ash pozzolanic materials [26]. In addition, chemical, physical, and pozzolanic properties of the ceramic tiles powder are similar to cement standard up to the addition of 35% waste tiles.

Generally, ceramic tiles have been employed consequently in architecture finishing throughout history: The Great Wall of China, the dome of Florence Cathedral and the Chrysler building in New York are just some examples. Furthermore, due to their many aesthetic possibilities, ceramic materials also have been frequently used for surfacing, whether on walls (cladding) or floors (flooring), and both outdoors (walls, roofs and paths) and indoors (kitchens and bathrooms).

Koyuncu et al. [27] used the waste ceramic in the backfill material as a road sub-base material. Swelling pressure was tested, and the experimental results showed that the ceramic wastes can be reused as an alternative construction material with replacement percentage up to 40%.

### *1.1.2. Ceramika w postaci drobnych kruszyw*

Płytki ceramiczne zastosowano ponadto jako piasek w betonie. Hemanth Kumar i in. [19] zbadali je jako piasek, a podmiany piasku dokonano częściowo w ilości 10%, 20%, 30%, 40% i 50%. Wyniki wykazały, że odpadowe płytki ceramiczne można skutecznie wykorzystać i zaobserwowano poprawę wytrzymałości. Również Azeez i in. [24] zastąpili piasek i cement odpadowymi płytkami ceramicznymi. Ich badania wskazują, że podmiana piasku może wynosić do 25%, a cementu do 5%. Niewiele jest literatury na temat stosowania płytek ceramicznych jako drobnego kruszywa. W związku z tym w niniejszym artykule przedstawiono dodatkowe badania eksperymentalne płytek ceramicznych jako piasku w betonie.

### *1.1.3. Ceramika w postaci drobnych i grubych kruszyw*

Zużyte płytki ceramiczne zastosowano również częściowo jako drobne i gruboziarniste kruszywo. Z wyników badań wynika, że wzrosła wytrzymałość betonu [25]. Hemanth Kumar i in. [19] częściowo zastąpili piasek i żwir odpowiednio drobnymi i grubymi płytkami ceramicznymi w ilości odpowiednio 10% i 20%. Testy kruszyw wykazały, że gruboziarniste płytki ceramiczne mają większy współczynnik wpływu, ale mniejszą gęstość właściwą niż żwir. Tymczasem drobnoziarniste płytki ceramiczne mają prawie taki sam ciężar właściwy jak piasek. Przy zastosowaniu odpadowych płytek ceramicznych zaobserwowano wzrost wytrzymałości i urabialności.

### *1.1.4. Inne zastosowania ceramiki*

Cement portlandzki zastąpiono płytkami ceramicznymi, aby ocenić zachowanie pucolanowe materiału. Procenty odpadów ceramicznych od 15% wag. do 50% wag. zostały podstawione, a wyniki podkreślają, że zaprawy zawierające do 35% wag. odpadów płytek ceramicznych spełniają wymagania ustalone dla materiałów pucolanowych z popiołu lotnego [26]. Ponadto właściwości chemiczne, fizyczne i pucolanowe proszku płytek ceramicznych są podobne do wzorca cementu z dodatkiem 35% odpadów.

Generalnie w całej historii płytki ceramiczne konsekwentnie stosowano do wykończenia architektury: Wielki Mur Chiński, kopia katedry we Florencji i budynek Chryslera w Nowym Jorku to tylko niektóre przykłady. Ponadto ze względu na wiele możliwości estetycznych materiały ceramiczne były również często stosowane do wykończenia powierzchni, czy to na ścianach (okładziny) lub podłogach (pokrycie podłogi), i zarówno na zewnątrz (ściany, dachy i ścieżki), jak i wewnątrz (kuchnie i łazienki).



## 1.2. Glass

Mechanically, the density of glass is  $2500 \text{ kg/m}^3$ , with compressive strength of  $1000 \text{ N/mm}^2$ . Lateral contraction coefficient is 0.22 with Young' modulus of 70 GPa. The linear thermal expansion is  $9 \cdot 10^{-6} \text{ m/K}$ .

Researchers have conducted many studies on glass as aggregate. The potential applications of glass concrete are limitless. The problem of Alkali-silica reaction (ASR) was raised, and using silica fume and different additives controlled the expansion of ASR [28].

Also, the fine glass powder used as sand has been investigated. It is possible to use crushed glass as sand with replacement from 10% to 20% [29]. Arnold [30] found that the performance of the aggregate was not affected for percentages of fine crushed glass up to 30% by mass of aggregate or 23% of the total amount of aggregate.

The utilization of waste glass as aggregate facilitates the development of concrete towards a high architectural level besides its high performances [31]. But glass is inappropriate for the alkali-silica reaction. As a result, the cement can be replaced by the pulverizing glass up to 30%, and it gives compressive strength more than the normal concrete [32].

**Both fine and coarse** – In addition, fine and coarse glass were used instead of sand and gravel, and sometimes glass was mixed with another waste materials. Siam [33] summarized that when the waste glass was used as coarse and fine aggregate, the compressive strength was  $385 \text{ kg/cm}^2$  and  $400 \text{ kg/cm}^2$  for coarse and fine glass replacement respectively compared to  $300 \text{ kg/cm}^2$  for normal concrete. The flexural strength was enhanced, and a slight reduction in the splitting tensile strength appeared.

Batayneh et al. [4] studied the use of glass, demolished concrete, and ground plastic in concrete. Sand and gravel were replaced by 20%. Mix design proportions indicated that when the waste materials increased, the density and workability decreased. Compressive strength improved, when the fine glass was used. But the concrete contained ground plastic gave less compressive and splitting tensile strengths.

**As sand** – Hongjian Du et al. [34] replaced the sand alone by fine glass aggregates. Replacement percentages were 0%, 25%, 50%, 75%, and 100%. Results illustrated that glass does not cause obvious, fresh concrete expected, slight reduction in concrete density. Up to 100% replacement ratio, glass sand did not reduce the mechanical properties of concrete. On the contrary, it led to increase in compressive strength, splitting tensile strength, and flexural strength. While Malik et al. [35] replaced the sand by fine glass weight at 10%, 20%, 30% and 40%. Results demonstrated that permissibility

Koyuncu i in. [27] wykorzystali odpadową ceramikę w materiale zasyпки jako materiał podłoża drogowego. Testowano ciśnienie pęcznienia, a wyniki eksperymentów wykazały, że odpady ceramiczne można ponownie wykorzystać jako alternatywny materiał budowlany z procentem wymiany do 40%.

## 1.2. Szkło

Mechanicznie, gęstość szkła wynosi  $2500 \text{ kg/m}^3$  przy wytrzymałości na ściskanie  $1000 \text{ N/mm}^2$ . Współczynnik skurczu poprzecznego wynosi 0,22 przy module Younga 70 GPa. Liniowa rozszerzalność cieplna wynosi  $9 \cdot 10^{-6} \text{ m/K}$ .

Badacze przeprowadzili wiele badań szkła jako kruszywa. Potencjalne zastosowania szklanego betonu są nieograniczone. Podniesiono problem reakcji alkaliczno-krzemionkowej (ASR), a stosowanie krzemionki koloidalnej i różnych dodatków kontrolowało postęp ASR [28].

Zbadano również drobnoziarnisty proszek szklany używany jako piasek. Możliwe jest użycie pokruszonego szkła jako piasku z wymianą od 10% do 20% [29]. Arnold [30] stwierdził, że nie było wpływu na wydajność kruszywa w przypadku udziału drobno zmiażdżonego szkła do 30% masy kruszywa lub 23% całkowitej ilości kruszywa.

Wykorzystanie szkła odpadowego jako kruszywa sprzyja rozwojowi betonu na wysokim poziomie architektonicznym oprócz jego wysokich właściwości [31]. Ale szkło nie nadaje się do reakcji alkalia-krzemionka. W rezultacie cement można zastąpić szkłem proszkowym do 30% i daje to wytrzymałość na ściskanie większą niż w przypadku zwykłego betonu [32].

**Zarówno drobny, jak i gruboziarnisty** – Ponadto drobno- i gruboziarniste szkło było używane zamiast piasku i żwiru, a czasami szkło było mieszane z innymi odpadami. Siam [33] podsumował, że gdy szkło odpadowe zastosowano jako grubo- i drobnoziarniste kruszywo, wytrzymałość na ściskanie wynosiła odpowiednio  $385 \text{ kg/cm}^2$  i  $400 \text{ kg/cm}^2$  dla wymiany grubo- i drobnoziarnistego szkła w porównaniu do  $300 \text{ kg/cm}^2$  dla zwykłego betonu. Wytrzymałość na zginanie została zwiększona, i pojawiło się nieznaczne zmniejszenie wytrzymałości na rozciąganie przy rozłupywaniu.

Batayneh i in. [4] badali użycie szkła, betonu z rozbiórki i zmielonego plastiku w betonie. Piasek i żwir zostały zastąpione w 20%. Proporcje mieszanki wskazały, że wraz ze wzrostem ilości odpadów zmniejsza się gęstość i urabialność. Wytrzymałość na ściskanie poprawiła się, gdy użyto drobnego szkła. Ale beton zawierający zmielony plastik dawał mniejsze wytrzymałości na ściskanie i rozciąganie przy rozłupywaniu.

**Jak piasek** – Hongjian Du i in. [34] zastąpili tylko piasek drobnymi kruszywami szklanymi. Procent wymiany

of using waste glass powder as partial replacement of the sand is up to 30% by weight.

**Cement** – Vijayakumar [36] used glass powder as cement in concrete at replacement percentages of 10%, 20%, 30% and 40%. As a result, glass powder can be used as cement. This study establishes the technical viability of utilising composite waste materials consisting of a combination of glass and ceramic tiles as a potential eco-concrete material.

Many of the studies aforementioned did not investigate on the performance of glass and ceramic tiles used together. This research therefore intends to further establish the performance of a composite of waste glass and ceramic tiles as coarse and fine aggregates in concrete. In addition, this paper established the priority of using fine and coarse glass and ceramic tiles aggregate in concrete. As a result, the combination of waste materials influences the mix design proportions, and the concrete properties as well. The design mix of concrete was done according to both the British Department of Environment (DOE) and the American Concrete Institute (ACI) methods, and concrete tests were carried out according to BS and ACI, especially the compressive strength of concrete. Thus, the comparison between the two methods for these types of concrete is covered in the study.

## 2. Materials and method

Concrete class 25 prepared using cement CEM I 32.5 was targeted. River sand and crushed stone were used as normal aggregate. Waste glass and ceramic tiles were used replacing the conventional aggregate. Glass and ceramic tiles were crushed manually to form as fine and coarse aggregate. Particles size distribution of the normal sand, fine waste glass, and fine waste ceramic tiles were determined according to BS 812–103.1/2 and ASTM C33–03. Table 1 summarized the tests results for both normal and waste materials aggregate.

ASTM C294 specified a recommended value of the dry-rodded density (Bulk density), and it was ranged between  $\gamma_b = 1500 - 1680 \text{ kg/m}^3$ . Dry-rodded densities as in Table 1 were found to be  $1521 \text{ kg/m}^3$ ,  $1578 \text{ kg/m}^3$ ,  $1457 \text{ kg/m}^3$ ,  $1479 \text{ kg/m}^3$ ,  $1482 \text{ kg/m}^3$ , and  $1508 \text{ kg/m}^3$  for sand, gravel, fine glass (FG), coarse glass (CG), fine ceramic (FC), and coarse ceramic (CC), respectively.

The values of dry-rodded density of the gravel, sand, coarse glass, coarse ceramic, fine glass, and fine ceramic are acceptable. Although, the dry-rodded of fine glass, fine ceramic tiles, and coarse glass are less than  $1500 \text{ kg/m}^3$ , but it is still comparable with the conventional aggregate. Generally, dry-rodded density value

wynosił 0%, 25%, 50%, 75% i 100%. Wyniki pokazały, że szkło nie wywołuje wyraźnego, oczekiwanego dla świeżego betonu, niewielkiego zmniejszenia gęstości betonu. Do 100% stosunku wymiany piasek szklany nie zmniejszał właściwości mechanicznych betonu. Przeciwnie, pozwolił na zwiększenie wytrzymałości na ściskanie, rozciąganie przy rozłupywaniu i zginanie. Wtedy gdy Malik i in. [35] zastąpili piasek drobną masą szkła przy 10%, 20%, 30% i 40%, wyniki pokazały, że dopuszczalność stosowania odpadowego proszku szklanego jako częściowego zamiennika piasku wynosi do 30% wagowych.

**Cement** – Vijayakumar [36] zastosował proszek szklany jako cement w betonie przy procentach wymiany wynoszących 10%, 20%, 30% i 40%. Jako rezultat stwierdził, że proszek szklany może być stosowany jako cement. Badanie to potwierdza techniczną wykonalność wykorzystania złożonych odpadów, składających się z kombinacji szkła i płytek ceramicznych jako potencjalnego materiału eko-betonowego.

W wielu wyżej wspomnianych badaniach nie badano osiągnięć szkła i płytek ceramicznych użytych jednocześnie. Dlatego niniejsze badania mają na celu dalsze określenie osiągnięć połączenia szkła odpadowego i płytek ceramicznych jako grubo- i drobnoziarnistych kruszyw w betonie. Ponadto w niniejszym artykule ustalono priorytet stosowania drobnego i grubego kruszywa szklanego i płytek ceramicznych w betonie. W rezultacie połączenie materiałów odpadowych wpływa na proporcje projektowe mieszanki, a także na właściwości betonu. Mieszankę obliczeniową betonu wykonano zgodnie z metodami DOE (the British Department of Environment) i ACI (the American Concrete Institute), a testy betonu przeprowadzono zgodnie z BS (British Standard) i ACI, zwłaszcza wytrzymałość betonu na ściskanie. Tak więc porównanie dwóch metod dla tego rodzaju betonu jest uwzględnione w badaniu.

## 2. Materiały i metody

Celem był beton klasy 25, przygotowany przy użyciu cementu portlandzkiego CEM I 32.5. Piasek rzeczny i kruszony kamień zastosowano jako normalne kruszywo. Zastępując konwencjonalne kruszywo użyto szkła odpadowe i płytki ceramiczne. Szkło i płytki ceramiczne kruszono ręcznie, wytwarzając kruszywo drobno- i gruboziarniste. Rozkład wielkości cząstek zwykłego piasku, drobnego szkła odpadowego i drobnych odpadów płytek ceramicznych określono zgodnie z BS 812–103.1/2 i ASTM C33–03. Tabela 1 podsumowuje wyniki badań zarówno dla kruszywa zwykłego, jak i odpadowego.

Norma ASTM C294 określa zalecaną wartość gęstości nasypowej przy ubijaniu prętem na sucho (gęstość

indicates that the weight of coarse glass and ceramic aggregate are almost the same as gravel.

In addition, the fineness modulus (FM) of sand, fine glass, fine ceramic was found to be 2.88, 3.14, and 3.22, respectively. ACI 211.1–91 required the FM to determine the amount of fine aggregate. Typical values of FM ranged between 2.3–3.0, and it has an effect on the workability [37].

The Aggregate Crushing Value (ACV) and the Aggregate Impact Value (AIV) of coarse aggregate are varying from one type of aggregate to another. BS 812–112 stated that if the AIV is more than 30%, the results should be treated with caution. The AIV of gravel and ceramic tiles satisfied the requirements, but the AIV of glass is more than 30.1% which is undesirable. Therefore, we will see how this has an effect on the strengths of concrete.

According to IS: 2386 (Part IV) – 1963, if the ACV is more than 30%, aggregate should classify as weak aggregate. ACV of the gravel and coarse ceramic tiles was less than 30% which is acceptable, but the ACV of the glass aggregate was more than 30%. AIV and ACV gave advantage for the coarse ceramic aggregate than coarse glass aggregate. In other words, coarse ceramic tiles aggregates are significantly similar to the gravel than coarse glass aggregates.

Normally, specific gravity of the fine and coarse aggregates range between 2.4–3.0 kg/m<sup>3</sup>. Sand, gravel, glass

objętościowa) i mieści się w zakresie od  $\gamma_b = 1500$ –1680 kg/m<sup>3</sup>. Stwierdzono, że gęstości nasypowe jak w Tabeli 1 wynosiły 1521 kg/m<sup>3</sup>, 1578 kg/m<sup>3</sup>, 1457 kg/m<sup>3</sup>, 1479 kg/m<sup>3</sup>, 1482 kg/m<sup>3</sup> i 1508 kg/m<sup>3</sup> odpowiednio dla piasku, żwiru, drobnego szkła (FG), grubego szkła (CG), drobnej ceramiki (FC) i grubej ceramiki (CC).

Wartości gęstości nasypowe przy ubijaniu prętem na sucho żwiru, piasku, grubego szkła, grubej ceramiki, drobnego szkła i drobnej ceramiki są dopuszczalne. Choć gęstości nasypowe drobnego szkła, drobnych płytek ceramicznych i grubego szkła są mniejsze niż 1500 kg/m<sup>3</sup>, to nadal są porównywalne z konwencjonalnym kruszywem. Zasadniczo wartość gęstości nasypowej przy ubijaniu prętem na sucho wskazuje, że masa grubego szkła i kruszywa ceramicznego jest prawie taka sama jak żwiru.

Ponadto stwierdzono, że moduł rozdrobnienia (FM) piasku, drobnego szkła i drobnej ceramiki wynosi odpowiednio 2,88, 3,14 i 3,22. ACI 211.1–91 wymagała od FM ustalenia ilości drobnego kruszywa. Typowe wartości FM wahały się między 2,3–3,0 i mają wpływ na urabialność [37].

Wskaźniki rozkruszenia (ACV – Aggregate Crushing Value) i udarności (AIV – Aggregate Impact Value) kruszywa gruboziarnistego różnią się w zależności od rodzaju kruszywa. Norma BS 812–112 stwierdziła, że jeśli AIV jest większy niż 30%, wyniki należy traktować ostrożnie. AIV żwiru i płytek ceramicznych spełniały to wymaganie, ale AIV szkła wynosi ponad 30,1%, co jest

Table 1. Summarized of the aggregates properties.

Tabela 1. Podsumowane właściwości agregatów.

Tests / Badania	Sand / Piasek	Gravel / Żwir	FG	CG	FC	CC
Dry-rodded density / Gęstość nasypowa przy ubijaniu prętem na sucho [kg/m <sup>3</sup> ]	1521	1578	1457	1479	1482	1508
Dry-loss density / Gęstość nasypowa na sucho bez usadu [kg/m <sup>3</sup> ]	1504	1545	1417	1447	1464	1450
Fineness modulus / Moduł rozdrobnienia [%]	2.88	–	3.41	–	3.22	–
Crushing value / Wskaźnik rozkruszenia [%]	–	28.4	–	42.3	–	21.0
Impact value / Wskaźnik udarności [%]	–	10.27	–	31.0	–	11.1
Specific gravity / Ciężar właściwy [kg/m <sup>3</sup> ]	2.4	2.68	2.54	2.72	2.16	2.53
Water absorption / Nasiąkliwość [%]	1.7	1.47	1.64	1.44	0.86	0.55
Sieve analysis, 600 $\mu$ m passing percentage / Analiza sitowa przepad 600 $\mu$ m [%]	45.3	–	37.5	–	39.9	–

aggregates, and ceramic tile aggregates have suitable values of specific gravity. Normal and glass aggregates have almost the same value of water absorption, while ceramic tiles aggregates have less value of water absorption in compare to glass and normal aggregate.

### 2.1. Mix design

In this study, the mix design methods which were applied are DOE method and the ACI 211.1–91 (1997) [38]. Concrete mix was designed for four main components; cement, water, sand, and gravel. Thus, no admixtures or cementitious materials were utilized. ACI 211.1–91 recommended that trial batches in the laboratory should be conducted for checking the preliminary proportions.

Trail samples were cast to control the  $w/c$  ratio and materials proportions. Adjustment needed to be done according to the preliminary results. Mix design was conducted for glass and ceramic tiles individually as illustrated in Table 2. The  $w/c$  ratio for both DOE and ACI methods was 0.58, and the maximum coarse aggregates size was 20.0 mm. The slump was assumed to be between 30–60 mm and between 25–100 mm for DOE and ACI methods respectively.

From the results above, it is obvious that the DOE method gave less quantity of water than the ACI method, although both methods have the same  $w/c$  ratio. The quantity of water affected the amount of cement, and it was adjusted based on water absorption and moisture content of various aggregates. Moreover, sand and gravel proportions of DOE method are more than the ACI method, because, each method has its own way to determine the aggregate proportions.

In DOE method, mix design of glass concrete and ceramic concrete is different. Glass aggregates properties influenced the proportions of the mix, and waste ceramic aggregates as well. Glass concrete needs more water than both ceramic concrete and normal concrete.

The difference in the amount of aggregate proportions was mainly due to the factors which determine the quantity e.g. specific gravity, fineness modulus, and passing percentage of sieve No. 600  $\mu\text{m}$ . Usually, DOE method uses the passing percentage of sieve No. 600  $\mu\text{m}$ , while ACI method uses the fineness modulus of the fine aggregates. The coarse aggregates quantity was determined according to the amount of fine aggregates in both methods. Mix design proportions of glass concrete and ceramic concrete did not differ in ACI method.

niepożądane. Dlatego zobaczymy, jak wpłynie to na wytrzymałość betonu.

Zgodnie z IS: 2386 (część IV) – 1963, jeśli ACV wynosi więcej niż 30%, kruszywo powinno zostać sklasyfikowane jako kruszywo słabe. ACV żwiru i grubych płytek ceramicznych wynosiło mniej niż 30%, co jest dopuszczalne, ale ACV kruszywa szklanego było większe niż 30%. AIV i ACV dały przewagę gruboziarnistemu kruszywu ceramicznemu nad gruboziarnistym kruszywem szklanym. Innymi słowy, gruboziarniste kruszywo z płytek ceramicznych są znacznie bardziej podobne do żwiru niż gruboziarniste kruszywo szklane.

Zwykle ciężar właściwy drobnych i grubych kruszyw wynosi 2,4–3,0  $\text{kg}/\text{m}^3$ . Piasek, żwir, kruszywa szklane i ceramiczne mają odpowiednie wartości ciężaru właściwego. Kruszywa zwykłe i szklane mają prawie taką samą wartość nasiąkliwości, podczas gdy kruszywo z płytek ceramicznych ma mniejszą wartość nasiąkliwości w porównaniu z kruszywem szklanym i zwykłym.

### 2.1. Projekt mieszanki

W niniejszym badaniu zastosowane metody projektowania mieszank to DOE i ACI 211.1–91 (1997) [38]. Mieszanka betonowa została zaprojektowana dla czterech głównych elementów: cement, woda, piasek i żwir. Zatem nie użyto żadnych domieszek ani materiałów cementowych. Norma ACI 211.1–91 zaleciła wykonanie serii próbnych w laboratorium w celu sprawdzenia wstępnych proporcji.

Próbki testowe odlano, aby kontrolować stosunek wagowy i proporcje materiałów. Konieczne było dostosowanie zgodnie ze wstępnymi wynikami. Projekt mieszanki przeprowadzono indywidualnie dla szkła i płytek ceramicznych, jak pokazano w Tabeli 2. Stosunek  $w/c$  w przypadku metod DOE i ACI wynosił 0,58, a maksymalny rozmiar gruboziarnistych kruszyw wynosił 20,0 mm. Założono, że opad wyniesie między 30–60 mm i między 25–100 mm odpowiednio dla metod DOE i ACI.

Z powyższych wyników wynika w sposób oczywisty, że metoda DOE dała mniej wody niż metoda ACI, chociaż obie metody mają ten sam stosunek  $w/c$ . Ilość wody wpływała na ilość cementu i została dobrana na podstawie nasiąkliwości i zawartości wilgoci różnych kruszyw. Ponadto proporcje piasku i żwiru z metody DOE są większe niż metody ACI, ponieważ każda metoda ma swój własny sposób określania udziałów kruszywa.

W metodzie DOE projekty mieszank betonów ze szkłem i ceramiką różnią się. Właściwości kruszyw szklanych, a także kruszyw z odpadów ceramicznych, wpłynęły na proporcje mieszank. Beton ze szkłem potrzebuje więcej wody niż beton z ceramiką i zwykły beton.



Table 2. Mix design proportions for different types of concrete by DOE and ACI methods.

Tabela 2. Proporcje mieszanek różnych rodzajów betonu zaprojektowanych metodami DOE i ACI.

Normal concrete / Beton zwykły [kg/m <sup>3</sup> ]				
Method / Metoda	Water / Woda	Cement / Cement	Fine aggregates / Drobne kruszywo	Coarse aggregates / Grube kruszywo
DOE	178	403	754	1138
Mix Ratios / Proporcje mieszania	0.45	1	2	3
ACI	200	440	685	960
Mix Ratios / Proporcje mieszania	0.45	1	1.6	2.2
Glass concrete / Beton ze szkłem [kg/m <sup>3</sup> ]				
Method / Metoda	Water / Woda	Cement / Cement	Fine aggregates / Drobne kruszywo	Coarse aggregates / Grube kruszywo
DOE	245	441	953	855
Mix ratios / Proporcje mieszania	0.6	1	2.2	2
ACI	215	430	520	890
Mix ratios / Proporcje mieszania	0.5	1	1.21	2.1
Ceramic tiles concrete / Beton z płytkami ceramicznymi [kg/m <sup>3</sup> ]				
Method / Metoda	Water / Woda	Cement / Cement	Fine aggregates / Drobne kruszywo	Coarse aggregates / Grube kruszywo
DOE	207	357	955	785
Mix ratios / Proporcje mieszania	0.6	1	2.7	2.2
ACI	215	430	520	890
Mix ratios / Proporcje mieszania	0.5	1	1.21	2.1

## 2.2. Experimental program

The experimental program was settled into three main stages. First and second stages focused on the utilization of waste glass and ceramic tiles separately as fine and coarse aggregates. The third stage, the optimum percentage that gave the best strength was determined

Różnica w ilości udziału kruszywa wynikała głównie z czynników, które określają ilość, np. ciężar właściwy, moduł rozdrobnienia i przepad na sicie nr 600  $\mu\text{m}$ . Zazwyczaj metoda DOE wykorzystuje przepad na sicie nr 600  $\mu\text{m}$ , podczas gdy metoda ACI wykorzystuje moduł rozdrobnienia drobnoziarnistych kruszyw. Ilość gruboziarnistych kruszyw określono w zależności od ilości

Table 3. Summarized the results of the first and second stages.  
Tabela 3. Podsumowanie wyników pierwszego i drugiego etapu.

Concrete type / Rodzaj betonu	Test / Badanie	Cubes / Kostki		Cylinders / Cylindry	
		50 %(S)	50 %(B)	50 %(S)	50 %(B)
Control / Beton kontrolny	Density / Gęstość [kg/m <sup>3</sup> ]	23.3		23.6	
	Slump / Opad [mm]	27.8		65	
	Compressive strength / Wytrzymałość na ściskanie [MPa]	25.42		25.14	
GC	Density / Gęstość [kg/m <sup>3</sup> ]	23.62	23.85	23.29	23.29
	Slump / Opad [mm]	51	45	85	81
	Compressive strength / Wytrzymałość na ściskanie [MPa]	14.02	11.77	13	10.5
CC	Density / Gęstość [kg/m <sup>3</sup> ]	23.96	25.46	23.46	23.15
	Slump / Opad [mm]	45	57	67	71
	Compressive strength / Wytrzymałość na ściskanie [MPa]	19.65	16.62	17.05	14.78

from the first and second stages to make concrete containing both waste glass and ceramic tiles.

### 2.2.1. First stage

This stage comprises three steps. First step investigated the replacement of the sand alone by 50% of fine glass aggregate. Thus, the effect of fine glass on the strength can be known. Second step, the coarse glass aggregates were used for 50% substitution, and in the third step, both fine and coarse aggregates were used for this purpose in different percentages; 25%, 50%, 75%, and 100%.

### 2.2.2. Second stage

Ceramic tiles aggregates were used in this stage, and it comprises three steps. First step, sand was replaced alone by 50% of fine ceramic tiles aggregates. Second step, 50% of gravel was replaced, and the third step, both fine and coarse aggregates were replaced in different percentages; 25%, 50%, 75%, and 100%.

Table 3 illustrates the density, slump, and compressive strength of different concrete for both BS and ACI method. The density of glass concrete and ceramic concrete did not vary significantly compare to the con-

drobnoziarnistych kruszyw w obu metodach. Proporcje mieszanek betonów ze szkłem betonu i ceramiką nie różniły się w metodzie ACI.

## 2.2. Program doświadczalny

Program eksperymentalny został podzielony na trzy główne etapy. Pierwszy i drugi etap koncentrowały się na wykorzystaniu oddzielnie szkła odpadowego i płytek ceramicznych jako drobnych i grubych kruszyw. Trzeci etap, optymalny udział, który dał najlepszą wytrzymałość, został określony z pierwszego i drugiego etapu, aby otrzymać beton zawierający zarówno odpady szklane, jak i płytki ceramiczne.

### 2.2.1. Pierwszy etap

Ten etap składa się z trzech kroków. W pierwszym kroku zbadano zastąpienie samego piasku 50% drobnoziarnistego kruszywa szklanego. W ten sposób można poznać wpływ drobnoziarnistego szkła na wytrzymałość. W drugim kroku gruboziarniste kruszywo szklane użyto do podmiany w 50%, a w trzecim kroku zarówno drobnoziarniste, jak i gruboziarniste kruszywo użyto w tym celu w różnych proporcjach: 25%, 50%, 75% i 100%.

tol. While, the glass concrete slump increased from 27.8 mm to 51 mm and 45 mm in BS method, and from 65 mm to 85 mm and 81 mm in ACI method. It increased by approximately 50% in BS method, and increased by 20% in ACI method. Fine glass aggregates affected the slump more than the coarse glass aggregates in both BS and ACI. Fig. 1 demonstrated the steps of the three tests: compressive strength, splitting tensile strength, and flexural strength.

### 2.2.2. Drugi etap

Na tym etapie zastosowano kruszywa z płytek ceramicznych i składał się on z trzech etapów. Pierwszy krok – sam piasek został zastąpiony przez 50% drobnoziarnistego kruszywa z płytek ceramicznych. W drugim kroku wymieniono 50% żwiru, a w trzecim kroku wymieniono zarówno drobnoziarniste, jak i gruboziarniste kruszywo w różnych proporcjach: 25%, 50%, 75% i 100%.



a)



b)



c)

Fig. 1. Concrete tests: a) compressive strength, b) splitting tensile strength, and c) flexural strength.

Rys. 1. Badania betonu: a) wytrzymałość na ściskanie, b) wytrzymałość na rozciąganie przy rozrywaniu i c) wytrzymałość na zginanie.

Compressive strength of glass concrete decreased from 19.03 MPa to 14.02 MPa and 11.77 MPa in BS method, and it decreased from 18.03 MPa to 13 MPa and 10.5 MPa in ACI method. These values of strength are not sufficient in comparison with the control. When the fine glass aggregates were used for replacement, the strength dropped by nearly 25% in BS and ACI methods. But when coarse glass aggregates were used, it decreased by approximately 40%. As a result, the fine glass aggregates have more ability to give better strength than the coarse glass aggregates, which consistent with previous research as discussed earlier.

In addition, the ceramic concrete gave very good results of density, slump, and compressive strength. The density of the ceramic concrete increased slightly. The slump increased from 27.9 mm to 45 mm and 57 mm in BS method, and it increased from 65 mm to 67 mm and 71 mm in ACI. The slump generally did not increase significantly as long as it is still within the assumed range of the slump.

The strength of the ceramic concrete increased slightly from 19.03 MPa to 19.65 MPa, when fine ceramic aggregates were utilized. It decreased from 19.03 MPa to 16.62 MPa, when coarse ceramic aggregates were used in cubes. While, in the ACI method, the strength decreased from 18.03 MPa to 17.05 MPa, when fine ceramic aggregates were used. But when the coarse ceramic aggregates were used, it dropped from 18.03 MPa to 14.78 MPa. However, the strength achieved the requirements of BS and ACI codes, and it is satisfactory.

Step three in this stage investigates the replacement of both fine and coarse aggregates in different percent-

Tabela 3 ilustruje gęstość, opad i wytrzymałość na ściskanie różnych betonów zarówno dla metody BS, jak i ACI. Gęstość betonów ze szkłem i z ceramiką nie różniła się znacząco w porównaniu do betonu kontrolnego. Natomiast opad betonu ze szkłem zwiększył się z 27,8 mm do 51 mm i 45 mm w metodzie BS oraz z 65 mm do 85 mm i 81 mm w metodzie ACI. Wzrósł o około 50% w metodzie BS i wzrósł o 20% w metodzie ACI. Kruszywo z drobnoziarnistego szkła wpływało na spadek bardziej niż gruboziarniste kruszywo szklane zarówno w BS, jak i ACI. Rys. 1 pokazuje działanie trzech testów: wytrzymałości na ściskanie, wytrzymałości na rozciąganie przy rozłupywaniu i wytrzymałości na zginanie.

Wytrzymałość na ściskanie betonu ze szkłem spadała z 19,03 MPa do 14,02 MPa i 11,77 MPa w metodzie BS, a zmniejszyła się z 18,03 MPa do 13 MPa i 10,5 MPa w metodzie ACI. Te wartości wytrzymałości nie są wystarczające w porównaniu z betonem kontrolnym. Po wymianie z użyciem drobnoziarnistego kruszywa szklanego wytrzymałość spadła o prawie 25% w metodach BS i ACI. Ale gdy zastosowano gruboziarniste kruszywo szklane, zmniejszyła się ona o około 40%. W rezultacie drobnoziarniste kruszywo szklane mają większą zdolność do nadawania lepszej wytrzymałości niż gruboziarniste kruszywo szklane, które są zgodne z poprzednimi badaniami, jak omówiono wcześniej.

Ponadto beton z ceramiką dawał bardzo dobre wyniki w zakresie gęstości, opadu i wytrzymałości na ściskanie. Gęstość betonu z ceramiką nieznacznie wzrosła. Opad wzrósł z 27,9 mm do 45 mm i 57 mm w metodzie BS oraz wzrósł z 65 mm do 67 mm i 71 mm w ACI. Opad zasadniczo nie wzrósł znacząco i nadal mieści się w zakładanym zakresie opadu.

Table 4. The density, slump, and compressive strength results of the cylinders.

Tabela 4. Wyniki gęstości, opadu i wytrzymałości na ściskanie cylindrów.

Concrete type / Rodzaj betonu	Test / Badanie	Replaced percentages / Procenty podmiany				
		0%	25%	50%	75%	100%
GC	Density / Gęstość [kg/m <sup>3</sup> ]	23.6	23.10	23.20	23.07	22.83
	Slump / Opad [mm]	65	71	75	81	88
	Compressive strength / Wytrzymałość na ściskanie [MPa]	18.03	16.4	12.03	10.70	8.26
CC	Density / Gęstość [kg/m <sup>3</sup> ]	23.6	23.12	22.44	22.44	22.18
	Slump / Opad [mm]	65	29	54	57	61
	Compressive strength / Wytrzymałość na ściskanie [MPa]	18.03	17.6	14.75	13.54	12.72



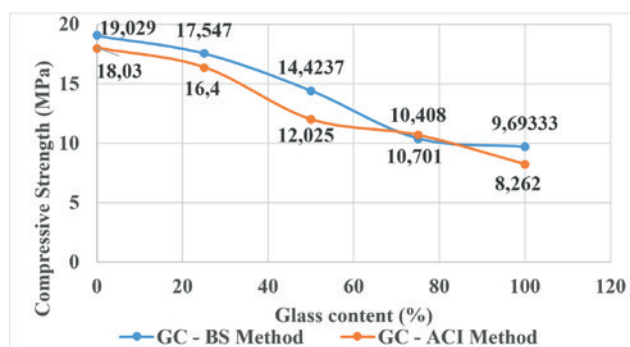


Fig. 2. Compressive strength of glass concrete for BS and ACI method.  
Rys. 2. Wytrzymałość na ściskanie betonu ze szkłem dla metody BS i ACI.

ages as was described earlier. Table 4 illustrates the results of the density, slump, and compressive strength of the cubes and cylinders correspondingly.

The density of glass concrete did not vary significantly in both BS and ACI method. Slump of glass concrete is increasing with increase in the glass aggregates. In BS method, slump increased slightly, but in ACI method, it increased by approximately 10%.

Compressive strength decreased with increase the amount of the glass aggregates in concrete in both BS and ACI method. The strength decreased from 19.03 MPa to 17.55 MPa, 14.42 MPa, 10.41 MPa, and 9.7 MPa, at replacement percentage 25%, 50%, 75%, and 100% respectively for BS method. The cylinders gave strengths; 16.4 MPa, 12.03 MPa, 10.70 MPa, and 8.26 MPa at replacement percentages 25%, 50%, 75%, and 100%. Fig. 2 shows how the strength of the glass concrete decreased, and when the waste glass aggregates replaced more than 50% of the normal aggregates, the strength decreased significantly. Up to 25%, the glass concrete gave suitable strength. But with increase of the glass aggregates, the strength was affected considerably.

The strength of ceramic concrete was more than the control strength by between 5% to 25%, and then started decreasing with increase in the replacement percentage as illustrates in Fig. 3.

### 2.2.3. Third stage

From the previous two stages results, the replacement percentages for blending the waste glass and ceramic tiles aggregates together were determined. Results showed that when coarse glass aggregate were used instead of the gravel, the strength is weak. Therefore, it was dropped in this phase. Coarse ceramic aggregate gave a good strength, and it can be better at lower replacing percentage. Fine glass and fine ceramic ag-

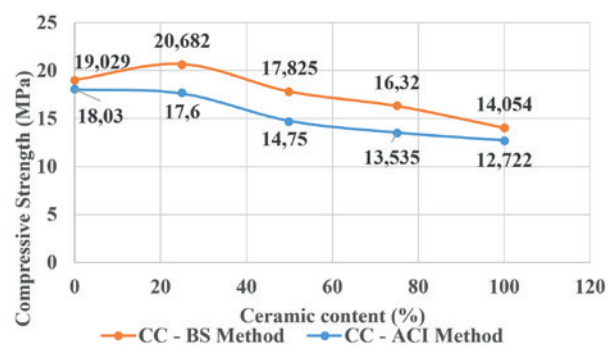


Fig. 3. Compressive strength of ceramic concrete for BS and ACI method.

Rys. 3. Wytrzymałość na ściskanie betonu z ceramiką dla metody BS i ACI.

Wytrzymałość betonu ceramicznego nieznacznie wzrosła z 19,03 MPa do 19,65 MPa, gdy zastosowano drobnoziarniste kruszywo ceramiczne. Zmniejszyła się z 19,03 MPa do 16,62 MPa, gdy w kostkach zastosowano gruboziarniste kruszywo ceramiczne. Natomiast w metodzie ACI wytrzymałość zmniejszyła się z 18,03 MPa do 17,05 MPa, gdy zastosowano drobnoziarniste kruszywo ceramiczne. Ale gdy zastosowano gruboziarniste kruszywo ceramiczne spadła ona z 18,03 MPa do 14,78 MPa. Jednak wytrzymałość spełniła wymagania kodów BS i ACI i jest zadowalająca.

Krok trzeci na tym etapie bada wymianę zarówno drobnoziarnistych, jak i gruboziarnistych kruszyw przy różnych udziałach procentowych, jak opisano wcześniej. Tabela 4 ilustruje odpowiednio wyniki gęstości, opadu i wytrzymałości na ściskanie kostek i cylindrów.

Gęstość betonu ze szkłem nie różniła się znacząco zarówno w metodzie BS, jak i ACI. Opad betonu ze szkłem rośnie wraz ze wzrostem ilości kruszywa szklanego. W metodzie BS opad nieznacznie wzrósł, ale w metodzie ACI wzrósł o około 10%.

Wytrzymałość na ściskanie zmniejszała się wraz ze wzrostem ilości kruszywa szklanego w betonie, zarówno przy metodzie BS, jak i ACI. Wytrzymałość spadła z 19,03 MPa do 17,55 MPa, 14,42 MPa, 10,41 MPa i 9,7 MPa, przy procentach zastąpienia odpowiednio 25%, 50%, 75% i 100% dla metody BS. Cylindry dawały wytrzymałość: 16,4 MPa, 12,03 MPa, 10,70 MPa i 8,26 MPa przy procentach zastąpienia 25%, 50%, 75% i 100%. Rys. 2 pokazuje w jaki sposób zmniejszyła się wytrzymałość betonu ze szkłem, a gdy kruszywo ze szkła odpadowego zastąpiło ponad 50% zwykłego kruszywa wytrzymałość znacznie spadła. Do 25% beton ze szkłem dawał odpowiednią wytrzymałość. Ale wraz ze wzrostem kruszywa szklanego wytrzymałość znacznie się pogorszyła.

Wytrzymałość betonu z ceramiką była większa niż wytrzymałość kontrolna między 5% a 25%, a następnie

Table 5. Results of different types of concrete.

Tabela 5. Wyniki dla różnych rodzajów betonu.

Type A / Typ A		
Test / Badanie	7 days / 7 dni	28 days / 28 dni
Compressive strength / Wytrzymałość na ściskanie [MPa]	18.86 (19.029)	24.611(25.421)
Splitting tensile strength / Wytrzymałość na rozciąganie przy rozłupywaniu [MPa]	1.671(1.7)	2.51 (2.65)
Flexural strength / Wytrzymałość na zginanie [MPa]	3.56 (2.6)	4.303 (3.87)
Type B / Typ B		
Test / Badanie	7 days / 7 dni	28 days / 28 dni
Compressive strength / Wytrzymałość na ściskanie [MPa]	17.657(19.029)	25.28(25.421)
Splitting tensile strength / Wytrzymałość na rozciąganie przy rozłupywaniu [MPa]	1.63 (1.7)	2.43 (2.65)
Flexural strength / Wytrzymałość na zginanie [MPa]	3.119 (2.6)	4.012 (3.87)
Type C / Typ C		
Test / Badanie	7 days / 7 dni	28 days / 28 dni
Compressive strength / Wytrzymałość na ściskanie [MPa]	17.867 (19.029)	24.55(25.421)
Splitting tensile strength / Wytrzymałość na rozciąganie przy rozłupywaniu [MPa]	1.6 (1.7)	3 (2.65)
Flexural strength / Wytrzymałość na zginanie [MPa]	2.594 (2.6)	3.98 (3.87)

gregates can be used as sand, as they gave better results. Thus, the blending percentages were settled on these results to replace the sand and the gravel and are as follow;

- Type A: 25% F Glass + 25% F Ceramic + 50% Sand + 100% Ballast,
- Type B: 25% F Glass + 25% F Ceramic + 50% Sand + 25% C Ceramic + 75% Ballast,
- Type C: 50% F Ceramic + 25% C Ceramic + 50% Sand + 75% Ballast.

Three types of concrete were assumed as shown in Table 5. Compressive, splitting tensile, and flexural strengths tests were conducted at 7 days and 28 days. Normal concrete results were indicated in brackets for comparison purpose.

Compressive strength of the three types of concrete satisfied the requirements, and the results are

zaczęła spadać wraz ze wzrostem procentu wymiany, jak pokazano na Rys. 3.

### 2.2.3. Trzeci etap

Na podstawie wyników dwóch poprzednich etapów określono zastępcze wartości procentowe dla zmieszania ze sobą kruszywa szklanego i płytek ceramicznych. Wyniki pokazały, że gdy zamiast żwiru zastosowano gruboziarniste kruszywo szklane, jego wytrzymałość była słaba. Dlatego zostało to odrzucone na tym etapie. Gruboziarniste kruszywo ceramiczne dawało dobrą wytrzymałość i może być lepsze przy niższym procencie zastępowania. Drobnziarniste kruszywa szklane i ceramiczne mogą być użyte jako piasek, ponieważ dają lepsze wyniki. Tak więc procenty mieszania zostały ustalone na podstawie tych wyników w celu zastąpienia



Fig. 4. Failure pattern of specimens: a) Beam Failure under Flexural Test, b) Cube Failure under compressive strength test.

Rys. 4. Sposób zniszczenia próbek: a) zniszczenie belki podczas próby zginania, b) zniszczenie kostki podczas próby wytrzymałości na ściskanie.

acceptable at 7 days and 28 days. Splitting tensile strength for the three types of concrete are adequate and comparable. Splitting strengths were 1.67 MPa, 1.63 MPa, and 1.6 MPa for type A, type B, and type C respectively at 7 days. Splitting strength of modified concrete slightly less than the control, but their values are still satisfactory. Concrete type C achieved splitting strength of 3 MPa which is more than the control at 28 days. Flexural strength of the three types of the concrete were higher in comparison with the control. Fig. 4 illustrates the failure patterns of a cube and beam under compressive strength and flexure strength tests.

### 3. Conclusions

Many tests were conducted for the properties of waste glass and ceramic tiles as aggregates, for the purpose of using them in concrete. Particles size distribution, dry-rodded, loss-rodded density, aggregate crushing value, aggregate impact value, water absorption, and specific gravity were tested. These tests were conducted for conventional aggregates, glass aggregates, and ceramic tiles aggregates as well. The following conclusions were draw;

i. Ceramic tile aggregates can be applied as either fine or coarse aggregates. Fine glass aggregates also have suitable behaviour. But coarse glass aggregates showed poor performance especially on ACV and AIV. ACV of the coarse glass was 42.3%, and AIV was 31.0% which are both more than 30%. Therefore, fine glass, fine ceramic tiles, and coarse ceramic tiles could behave better as normal aggregates under mentioned conditions.

ii. Concrete made from the waste glass and ceramic tiles was found to have compressive strength of 17.55 MPa and 20.7 MPa for glass concrete and ceramic

piasku i żwiru i są następujące:

- Typ A: 25% F Szkło + 25% F Ceramika + 50% Piasek + 100% Balast,
- Typ B: 25% F Szkło + 25% F Ceramika + 50% Piasek + 25% C Ceramika + 75% Balast,
- Typ C: 50% F Ceramika + 25% C Ceramika + 50% Piasek + 75% Balast.

Przyjęto trzy typy betonu, jak pokazano w Tabeli 5. Badania wytrzymałości na ściskanie, rozciąganie przy rozłupywaniu i na zginanie przeprowadzono w 7 dniu i 28 dniu. Wyniki dla betonu zwykłego podano w nawiasach dla celów porównawczych.

Wytrzymałość na ściskanie trzech rodzajów betonu spełniała wymagania, a wyniki są akceptowalne po 7 i 28 dniach. Wytrzymałość na rozciąganie trzech rodzajów betonu jest odpowiednia i porównywalna. Wytrzymałości przy rozłupywaniu wynosiły 1,67 MPa, 1,63 MPa i 1,6 MPa odpowiednio dla typu A, typu B i typu C po 7 dniach. Wytrzymałość przy rozłupywaniu modyfikowanego betonu jest nieco mniejsza niż w przypadku betonu kontrolnego, ale ich wartości są nadal zadowalające. Beton typu C osiągnął wytrzymałość przy rozłupywaniu 3 MPa, co jest wartością większą niż dla betonu kontrolnego w 28 dniu. Wytrzymałość na zginanie trzech rodzajów betonu była większa w porównaniu z betonem kontrolnym. Rys. 4 ilustruje sposoby niszczenia próbek w kształcie kostki i belki w testach wytrzymałości na ściskanie i zginanie.

### 3. Wnioski

Przeprowadzono wiele badań właściwości szkła odpadowego i płytek ceramicznych jako kruszyw w celu zastosowania ich w betonie. Badano rozkład wielkości cząstek, gęstość nasypową bez usadu na sucho, gęstość nasypową przy ubijaniu prętem na sucho, wskaźnik rozkruszenia, wskaźnik udarność, nasiąkliwość i ciężar właściwy. Badania te przeprowadzono

concrete at 25% replacement. It was concluded that normal sand should not be replaced by either fine glass or fine ceramic tiles aggregates more than 50%. Also, the gravel should not be replaced more than 25% by coarse ceramic tiles aggregate. For these replacements, the strength of concrete was not much affected.

iii. Fine glass, fine ceramic tiles, and coarse ceramic tiles aggregates were blended up to 50% and 25% replacement for fine and coarse aggregates respectively. Based on the results, it was established that the fine glass, fine ceramic tiles, and coarse ceramic tiles aggregates can be blended and used in concrete manufacture.

iv. The splitting tensile strength is comparable to concrete made from waste glass and ceramic tiles under the specified replacement percentages. The suggested concrete gave splitting tensile strength of 2.51 MPa, 2.43 MPa, and 3 MPa for Type A, Type B, and Type C concretes respectively, while the tensile strength of the normal concrete was 2.65 MPa. Therefore, the splitting tensile strength of the non-conventional concrete is reasonable.

v. The flexural strength of the non-conventional concretes was 4.303 MPa, 4.012 MPa, and 3.98 MPa for Type A, Type B, and Type C respectively, meanwhile the control was 3.87 MPa. Thus, the suggested concretes have better curvature and bending resistance than the normal concrete.

### Acknowledgement

We thank the Structural Engineering Laboratory at Jomo Kenyatta University of Agriculture and Technology where all tests described in this paper were conducted. We also thank the Management of Pan African University, Institute for Basic Sciences, Technology and Innovation.

---

### Podziękowanie

Dziękujemy Laboratorium Inżynierii Strukturalnej na Uniwersytecie Rolnictwa i Technologii im. Jomo Kenyatty, gdzie przeprowadzono wszystkie testy opisane w tym artykule. Dziękujemy również Zarządowi Pan African University, Institute for Basic Sciences, Technology and Innovation.

dla kruszyw konwencjonalnych, kruszyw szklanych, a także kruszyw z płytek ceramicznych. Wyciągnięto następujące wnioski:

1. Kruszywo z płytek ceramicznych można stosować jako kruszywo drobnoziarniste lub gruboziarniste. Kruszywo z drobnoziarnistego szkła ma również odpowiednie zachowanie. Ale gruboziarniste kruszywa szklane pokazały słabe osiągi, szczególnie w przypadku ACV i AIV. ACV gruboziarnistego szkła wyniosło 42,3%, a AIV 31,0%, które są większe niż 30%. Dlatego drobnoziarniste szkło, drobnoziarniste płytki ceramiczne i gruboziarniste płytki ceramiczne mogą zachowywać się lepiej niż normalne kruszywa w wymienionych warunkach.

2. Stwierdzono, że beton wykonany z szkła odpadowego i płytek ceramicznych ma wytrzymałość na ściskanie wynoszącą 17,55 MPa i 20,7 MPa odpowiednio dla betonu ze szkłem i ceramiką przy 25% wymianie. Stwierdzono, że zwykły piasek nie powinien być zastępowany przez ani drobne szkło ani drobne płytki ceramiczne w ilości większej niż 50%. Ponadto żwir nie powinien być zastępowany gruboziarnistym kruszywem z płytek ceramicznych w ilości większej niż 25%. W przypadku takich poziomów zastąpienia wytrzymałość betonu nie uległa znacznym zmianom.

3. Kruszywo ze szkła drobnoziarnistego, drobnoziarnistych i gruboziarnistych płytek ceramicznych zmieszano do 50% i 25% zamiennie odpowiednio dla drobnych i grubych kruszyw. Na podstawie wyników stwierdzono, że kruszywa ze szkła drobnoziarnistego, drobnoziarnistych i gruboziarnistych płytek ceramicznych można mieszać i stosować do wytwarzania betonu.

4. Wytrzymałość na rozciąganie przy rozłupywaniu jest porównywalna do betonu wykonanego ze szkła odpadowego i płytek ceramicznych przy określonych procentach wymiany. Sugerowany beton dał wytrzymałość na rozciąganie przy rozłupywaniu wynoszącą 2,51 MPa, 2,43 MPa i 3 MPa odpowiednio dla betonów Typu A, Typu B i Typu C, podczas gdy wytrzymałość na rozciąganie normalnego betonu wynosiła 2,65 MPa. Dlatego wytrzymałość na rozciąganie niekonwencjonalnego betonu jest rozsądna.

5. Wytrzymałość na zginanie tych niekonwencjonalnych betonów wynosiła odpowiednio 4,303 MPa, 4,012 MPa i 3,98 MPa odpowiednio dla typu A, typu B i typu C, zaś betonu kontrolnego wyniosła 3,87 MPa. Tak więc sugerowane betony mają lepszą odporność na zakrzywienie i zginanie niż zwykły beton.



## References / Bibliografia

- [1] Daniyal, M., Ahmad, S.: Application of Waste Ceramic Tile Aggregates in Concrete, *Int. Innovat. Res. Sci. Eng. Techn.*, 4, 12, (2015), 12808–12815, DOI: 10.15680/IJRSET.2015.0412128.
- [2] Zimbili, O., Salim, W., Ndambuki, M.: A Review on the Usage of Ceramic Wastes in Concrete Production, *Civil Environ. Eng.*, 8, 1, (2014), 91–95.
- [3] Chesner, W. H., Collins, R. J., MacKay, M. H.: *User Guidelines for Waste and By-product Materials in Pavement Construction*, Publication No. FHWA-RD-97-148, US Department of Transportation, Federal Highway Administration, 1998.
- [4] Batayneh, M., Marie, I., Asi, I.: Use of Selected waste materials in concrete mixes, *Waste Manag.*, 27, (2007), 1870–1876.
- [5] Dahlén, L., Lagerkvist, A.: Pay as you throw: strengths and weaknesses of weightbased billing in household waste collection systems in Sweden, *Waste Manag.*, 30, 1, (2010), 23–31, DOI: 10.1016/j.wasman.2009.09.022
- [6] ASTM C373–88(2006), *Standard Test Method for Water Absorption, Bulk Density, Apparent Porosity, and Apparent Specific Gravity of Fired Whiteware Products*.
- [7] ASTM C650–04(2004), *Standard Test Method for Resistance of Ceramic Tile to Chemical Substances*.
- [8] García-González, J., Rodríguez-Robles, D., Juan-Valdés, A., Morán-del Pozo, J. M., Guerra-Romero, M. I.: Ceramic ware waste as coarse aggregate for structural concrete production, *Environ. Technol.*, 36(23), (2015), 3050–3059, DOI: 10.1080/09593330.2014.951076.
- [9] Tabak, Y., Kara, M., Günay, E., Yildirim, S. T., Yilmazo, Ş.: Ceramic Tile Waste As a Waste Management Solution for Concrete, 3rd International Conference on Industrial and Hazardous Waste Management, Chania (Crete, GR), September 12–14th, (2012).
- [10] Poon, C., Chan, D.: The use of recycled aggregate in concrete in Hong Kong, *Res. Con. Rec.*, 50, (2007). 293–305, DOI: 10.1016/j.resconrec.2006.06.005.
- [11] Fathi bin Asrul, M.: *Ceramic Tiles Waste as Coarse Aggregates Partial Replacement for Concrete Production*, Project Report submitted as partial fulfilment of the requirements for the award of the degree of B. Eng (Hons) Civil Engineering, Faculty of Civil Engineering & Earth Resources, University Malaysia Pahang.
- [12] Senthamarai, R. M., Devadas Manoharan, P.: Concrete with ceramic waste aggregate, *Cem. Conc. Comp.*, 27(9–10), (2005), 910–913, DOI: 10.1016/j.cemconcomp.2005.04.003.
- [13] Wu, S., Zhong, J., Zhu, J., Wang, D.: Influence of demolition waste used as recycled aggregate on performance of asphalt mixture, *Road Mater. Pav. Des.*, 14, 3, (2013) 679–688, DOI: 10.1080/14680629.2013.779304.
- [14] Sekar, T., Ganesan, N., Nampoothiri, NVN.: Studies on Strength Characteristics on Utilization of Waste Materials as Coarse Aggregate in Concrete, *Int. J. Eng. Sci. Techn. (IJEST)*, 3, 7, (2011), 5436–5440.
- [15] Singh, P., Singla, R. K.: Utilization of Waste Ceramic Tiles as Coarse Aggregate in Concrete, *J. Multidis. Eng. Sci. Techn. (JMEST)*, 2, 11, (2015), 3294–3300.
- [16] Marwein, B. M. R., Sneha, M., Bharathidasan, I.: A review paper on utilisation of ceramic waste in concrete, *Int. J. Sci. Eng. Res. (IJSER)*, 7, 4, (2016), 247–250.
- [17] Shruthi, H. G., Gowtham Prasad, M. E., Taj, S., Pasha, S. R.: Reuse of Ceramic Waste as Aggregate in Concrete, *Int. Res. J. Eng. Techn. (IRJET)*, 3, 7, (2016), 115–119.
- [18] Mashitah, M. D., Kin, C. C., Badorul, A. H.: Recycling of homogenous ceramic tiles for the production of concrete block, *International Symposium on Environmental Management: Hazardous-Environmental Management toward Sustainability*, 22–23 September 2008, Thailand, 60–62.
- [19] Hemanth Kumar, Ch, Ananda Ramakrishna, K., Sateesh Babu, K., Guravaiah, T., Naveen, N., Sk, J.: Effect of Waste Ceramic Tiles in Partial Replacement of Coarse and Fine Aggregate of Concrete, *Int. Adv. Res. J. Sci. Eng. Techn. (IARJSET)*, 2, 6, (2015), 13–16, DOI: 10.17148/IARJSET.2015.2604.
- [20] Swathi, J., Gnanadevi, V.: An Experimental Investigation on Concrete by Partial Replacement of Copper Slag for Fine Aggregate and Ceramic Waste with Coarse Aggregate, *Int. J. Em. Techn. Comp. Sci. Electr. (IETCSE)*, 13(4), (2015), 137–142.
- [21] Ahire, A. V, Pawar, L. D., Patil, R. N.: Mechanical Properties of Concrete Incorporating Waste Ce-

- ramic Tiles and Waste Foundry Sand, *Int. J. Cur. Tr. Eng. Res. (IJCTER)*, 2, 3, (2016), 96–102.
- [22] Gomes, M., de Brito, J.: Structural Concrete with Incorporation of Coarse Recycled Concrete and Ceramic Aggregates : Durability Performance, *Mater. Struct.*, 42, 5, (2009), 663–675, DOI: 10.1617/s11527-008-9411-9.
- [23] Qadir, S. S.: Strength and Behavior of Self Compacting Concrete with Crushed Ceramic Tiles as Partial Replacement for Coarse Aggregate and Subjected to Elevated Temperature, *Int. J. Eng. Techn. Manag. Appl. Sci. (IJETMAS)*, 3, 4, (2015), 278–286.
- [24] Azeez, S., Raju, R., Sreemahadevan Pillai, P. R.: Partial Replacement of Fine Aggregate & Cement in Concrete with Ceramic Rejects, *Int. J. Eng. Tr. Techn. (IJETT)*, 28, 5, (2015), 243–247.
- [25] Rajora, V., Bansal, H., Singh Sidhu, G.: Effect of Partial Replacement of Fine and Coarse Aggregate (10mm ) with Ceramic Waste on the Properties of Concrete, *Int. J. Sci. Res. (IJSR)*, 5, 8, (2016), 2015–2017.
- [26] Mas, M. A., Monzó, J., Payá, J., Reig, L., Borrachero, M. V.: Ceramic tiles waste as replacement material in Portland cement, *Adv. Cem. Res.*, 28, 4, (2016), 221–232, DOI: 10.1680/jadcr.15.00021.
- [27] Koyuncu, H., Guney, Y., Yilmaz, G., Koyuncu, S., Bakis, R.: Utilization of Ceramic Wastes in the Construction Sector, *Key Eng. Mater.*, 264–268, (2004), 2509–2512, DOI: 10.4028/www.scientific.net/KEM.264–268.2509.
- [28] Meyer, C.: The greening of the concrete industry, *Cem. Concr. Comp.*, 31, 8, (2009). 601–605, DOI: 10.1016/j.cemconcomp.2008.12.010.
- [29] Zubaidah Abdullateef M. A. Al-Bayati: Mechanical Properties and Behavior of Sustainable Concrete, *J. Eng. Develop.*, 17, 2, (2013), 19–33.
- [30] Arnold, G., Werkmeister, S., Alabaster, D.: The effect of adding recycled glass on the performance of basecourse aggregate, *NZ Transport Agency Research Report 351*, 2008.
- [31] Liang, Hong, Zhu, Huiying, Byars, Ewan A.: Use of waste glass as aggregate in concrete, (September), 7th UK CARE Annual General Meeting, UK Chinese Association of Resources and Environment, Greenwich 2007, 1–7.
- [32] Shayan, A.: Value-added Utilisation of Waste Glass in Concrete, IABSE Symposium Report, 2002, 1–11.
- [33] Siam, A. A.: *Properties of Concrete Mixes with Waste Glass*, A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirement for the Degree of Master of Science in Civil Engineering Rehabilitation and Design of Structures, Faculty of Engineering, The Islamic University of Gaza, 2007.
- [34] Du, H., Tan, K. H.: Concrete with recycled glass as fine aggregates, *ACI Mater. J.*, 111, 1, (2014), 47–57.
- [35] Malik, M. I., Bashir, M., Ahmad, S., Tariq, T., Chowdhary, U.: Study of Concrete Involving Use of Waste Glass as Partial Replacement of Fine Aggregates, *IOSR J Eng. (IOSRJEN)*, 3, 7, (2013), 2278–8719.
- [36] Vijayakumar, G., Vishaliny, H., Govindarajulu, D.: Studies on Glass Powder as Partial Replacement of Cement in Concrete Production, *Int. J. Emer. Techn. Adv. Eng. (IJETAE)*, 3, 2, (2013), 153–157.
- [37] Neville, A. M.: *Properties of Concrete*, *Journal of General Microbiology*, (Vol. Fourth), (2011), DOI: 10.4135/9781412975704.n88
- [38] ACI 211.1–91, (1997), *Standard Practice for Selecting Proportions for Normal Heavyweight, and Mass Concrete*, ACI 211.1–91. Manual of Concrete Practice, (Reapproved 2002), 1–38.

---

Otrzymano 20 marca 2019, zaakceptowano 3 kwietnia 2019.  
Received on March 20, 2019, accepted on April 3, 2019.