

Badanie betonu geopolimerowego z kruszywem z żużla żelazochromowego na działanie podwyższonej temperatury

Elevated temperature study on geopolymer concrete with ferrochrome slag aggregates

P. Indu*, S. Greeshma

Department of Civil Engineering, College of Engineering Guindy, Anna University, Chennai, India

*Corresponding author: Indu P., e-mail: indu.somesh@gmail.com

Streszczenie

Niniejszy artykuł dotyczy wytrzymałości i ubytku masy betonu geopolimerowego w porównaniu z konwencjonalnym betonem cementowym, po ekspozycji w podwyższonej temperaturze. W niniejszej pracy kruszywo grube konwencjonalnego betonu geopolimerowego zostało częściowo (40%) zastąpione kruszywem z żużla żelazochromowego w celu uzyskania mieszanki zastępczej betonu geopolimerowego. Omówiono również mikrostrukturę betonu geopolimerowego na podstawie badań XRD, SEM i tomografii rentgenowskiej. W wyniku badań stwierdzono, że po ekspozycji w podwyższonej temperaturze, konwencjonalny beton cementowy wykazuje spadek wytrzymałości większy o 17,65% od konwencjonalnego betonu geopolimerowego. Zauważono również, że zastępcza mieszanka geopolimerowa wykazuje utratę wytrzymałości o 24,4% większą i utratę masy o 1,35% większą niż konwencjonalna mieszanka geopolimerowa. Jednak w większości zakresów temperatur miała ona większą wytrzymałość od konwencjonalnej mieszanki geopolimerowej. Tak więc mieszanka zastępcza betonu geopolimerowego zachowuje się lepiej niż konwencjonalny beton geopolimerowy i konwencjonalny beton cementowy zarówno w warunkach otoczenia, jak i w podwyższonej temperaturze.

Słowa kluczowe: beton geopolimerowy, ekspozycja w podwyższonej temperaturze, kruszywo z żużla żelazochromowego, tomografia rentgenowska

Summary

This paper deals with the strength and mass loss of geopolymer concrete in comparison with conventional cement concrete after elevated temperature exposure. In this study, the coarse aggregates of the conventional geopolymer concrete are replaced partially (40%) with ferrochrome slag aggregates, to obtain the replacement mix of geopolymer concrete. The microstructure of geopolymer concrete was examined by XRD, X-ray tomography, and SEM and also discussed in this paper. The results concluded that after exposure at elevated temperature, the conventional cement concrete has a strength loss of about 18% higher than the geopolymer concrete. It was also noted that though replacement geopolymer mix exhibited the strength loss of 24.4% and mass loss of 1.35% higher than the conventional geopolymer mix, it had greater strength than conventional geopolymer mix, for most of the temperature ranges. Thus the replacement mix of geopolymer concrete behaves better than conventional geopolymer concrete, both at ambient and elevated temperature conditions.

Keywords: geopolymer concrete, elevated temperature exposure, ferrochrome slag aggregates, XRD, X-ray tomography

1. Wprowadzenie

Dawidowicz, francuski chemik, wprowadził termin „geopolimery”, aby sklasyfikować nieorganiczną sieć polimerową spoiw glinokrzemianowych (1, 2). Jest to grupa alkalicznie aktywowanych materiałów glinokrzemianowych bogatych w krzemionkę, które

1. Introduction

The term ‘geopolymer’ was first used by Davidovits to classify the inorganic polymeric network of aluminosilicate binders (1, 2). It is a group of alkali-activated alumina silica-rich materials that can replace cement fully for building green civil infrastructure (3). The

mogą całkowicie zastąpić cement w budowie ekologicznej infrastruktury lądowej (3). Technologia geopolimerowa spowodowała zmianę paradygmatu w przemyśle budowlanym w kierunku rozwoju wysoce zrównoważonego i trwałego spoiwa cementowego z nieznacznym śladem węglowym. Geopolimery są uznawane za materiały budowlane przyjazne środowisku¹ pod dwoma względami - 1) zastępują cement, zmniejszając tym samym emisję CO₂ oraz 2) wykorzystują produkty spalania węgla (popiół lotny) i inne przemysłowe produkty uboczne, minimalizując w ten sposób zapotrzebowanie na składowiska odpadów i zakłady utylizacyjne (4). Ponadto, geopolimery są również w stanie stabilizować metale ciężkie i inne zanieczyszczenia zawarte w popiele lotnym (5). W ten sposób ta innowacyjna technologia może stymulować zrównoważony rozwój społeczeństw miejskich w nadchodzących dekadach.

Zachowanie betonu w warunkach otoczenia różni się od jego zachowania w warunkach podwyższonej temperatury. Ważne jest, aby zrozumieć zachowanie betonu w warunkach podwyższonej temperatury, ponieważ dobre parametry użytkowe są stosowane w takich zastosowaniach jak elektrownie jądrowe i ciepłowne. Badania wykazują, że w konwencjonalnym betonie cementowym następuje obniżenie wytrzymałości w podwyższonej temperaturze na skutek zmian fizyko-chemicznych, jak również zachodzi wykruszanie się betonu. To powoduje utratę otuliny betonowej narażając zbrojenie na działanie ognia. (6,7) Mechanizmy uszkodzeń powodujące pogorszenie właściwości betonu to przede wszystkim przemiany fazowe w zaczynie cementowym i kruszywie, niekompatybilność termiczna kruszywa z zaczynem oraz wykruszanie się betonu (8,9).

Badania betonu geopolimerowego w warunkach podwyższonej temperatury mają duże znaczenie, ponieważ geopolimery są uważane za alternatywny materiał dla betonu cementowego. Zauważono, że geopolimery wykazują dobrą odporność na ogień w podwyższonej temperaturze, ze względu na silnie rozproszenie nanoporów w mikrostrukturze, przypominającej ceramikę. Pory te umożliwiają odparowanie związanej fizycznie i chemicznie wody, bez uszkodzania mikrostruktury glinokrzemianowej.

Innym poważnym problemem jest wyczerpywanie się naturalnych minerałów, przede wszystkim piasku i żwiru z powodu ich dużego wykorzystania w różnych procesach budowlanych. Wraz z rosnącym stosowaniem różnych materiałów alternatywnych, żużel żelazochromowy, produkt uboczny przemysłu żelazochromowego, odgrywa ważną rolę ze względu na problemy z jego przechowywaniem i usuwaniem, w procesie ługowania. Badania

¹ Emisja spowodowana aktywatorami czyli wodorotlenkiem sodu wynosi 1,92 kg CO₂emisji/kg i krzemianem sodu 1,51 kg CO₂emisji/kg (13). Jest ona większa niż emisja cementu portlandzkiego – 0,82 kg CO₂emisji/kg, ponieważ produkcja tych aktywatorów obejmuje różne skomplikowane procesy. Należy jednak zauważyć, że emisja jako ekwiwalent CO₂ dla 1 m³ betonu geopolimerowego klasy M30 wynosi około 337 kg, a dla konwencjonalnego betonu cementowego emisja jako ekwiwalent CO₂ wynosi 384 kg (13,14). Tym samym emisja CO₂ z betonu geopolimerowego jest prawie o 14% mniejsza niż w przypadku konwencjonalnego betonu cementowego. Mniejszą emisję betonu geopolimerowego przypisuje się głównie przemysłowym produktom ubocznym stosowanym jako surowce, których emisja jest pomijalnie mała, w porównaniu z cementem portlandzkim.

technology of geopolimer has brought about a paradigm shift in the construction industry towards the development of highly sustainable and durable cementitious binder with lower carbon footprints, than Portland cement. Geopolymers are considered green¹ construction in two aspects: 1) it substitutes the cement thereby reducing CO₂ emission and 2) it utilises the coal combustion products - fly ashes, and other industrial by-products, thereby minimizing the landfills and disposal facility requirement (4). Moreover, the geopolymers are also capable of stabilising the heavy metals and other impurities present in fly ash (5). Thus this innovative technology can stimulate the sustainable development of urban societies, in the coming decades.

The behaviour of concrete at ambient conditions differs from its behaviour at elevated temperature exposure. It is important to understand the behaviour of concrete under elevated temperature exposure as good performance will find it in applications like nuclear and thermal power plants. Research shows that in conventional cement concrete the strength reduction at elevated temperature occurs due to physical and chemical changes as well as spalling of concrete, resulting in the loss of concrete cover, exposing the reinforcement to fire (6,7). The damage mechanisms that result in the deterioration of the properties of concrete is mainly the phase transformations in cement paste, thermal incompatibility between the aggregates and the paste as well as the spalling of concrete (8,9).

Studies on geopolimer concrete under elevated temperature exposure are vital as geopolymers have been considered as an alternative material for cement concrete. It is noted that geopolymers present good fire resistance at elevated temperatures because of the presence of uniformly distributed nano-pores in the ceramic-like microstructure. These pores allow the physically bonded water to evaporate, without damaging the alumina-silicate network.

Another major significance is the depletion of natural aggregates, principally sand and gravel, due to their excess utilization in various construction processes. With an increased application of various alternatives materials, the ferrochrome slag, a by-product of the ferrochromium industry, is standing out because of its leaching issues during storage. Research shows that the ferrochrome slag can be an effective substitute for coarse and fine aggregates in concrete, for various civil engineering applications (10, 11). The utilization of ferrochrome slag as concrete aggregate removes the hazardous environmental threat of chromium leaching, as chromium gets immobilized in the concrete matrix (12). Studies were

¹ The emission caused by activators namely sodium hydroxide is 1.92 kg CO₂e / kg and sodium silicate is 1.51 kg CO₂e / kg. (13). It is higher than the emission of Portland cement - 0.82 kg CO₂e/kg, as the manufacture of these activators involves various intricate processes. But it is noted that the CO₂ equivalent emission for 1 m³ of geopolimer concrete of M30 grade is approximately 337 kg and for conventional cement concrete, the CO₂ equivalent emission is 384 kg. (13,14). Thus the CO₂ emission of geopolimer concrete is nearly 14% less than that of conventional cement concrete. The lower emission of geopolimer concrete is mainly attributed to the industrial by-products as source material whose emission is negligibly very low compared to ordinary Portland cement.

wykazują, że żużel żelazochromowy może skutecznie zastępować kruszywo grube i drobne w betonie, do różnych zastosowań w inżynierii lądowej (10, 11). Wykorzystanie żużla żelazochromowego jako kruszywa do betonu niweluje niebezpieczne dla środowiska zagrożenie związane z wymywaniem chromu, ponieważ chrom zostaje związany w matrycy betonowej (12).

Przeprowadzono badania w celu ustalenia wpływu geopolimeru na środowisko i zauważono, że geopolimery są bardziej przyjazne dla środowiska w porównaniu z konwencjonalnym betonem cementowym.

2. Materiały i metody

2.1. Przygotowanie próbek

Popiół lotny [PL] pochodzący z elektrowni Ennore, Tamil Nadu oraz zmielony granulowany żużel wielkopieczowy [GŻW] pozyskiwany lokalnie zostały użyte jako materiały wyjściowe do syntezy spoiwa geopolimerowego. Zastosowano stosunek popiół lotny: mielony granulowany żużel wielkopieczowy – 1:0.25. Mielony granulowany żużel wielkopieczowy dodano w celu ułatwienia twarzenia próbek, w temperaturze otoczenia. Jako kruszywa stosowano żwir kruszony o wielkości 12,5 mm oraz piasek rzeczny odpowiadający strefie II. Żużel żelazochromowy, stosowany jako częściowy zamiennik kruszywa grubego, uzyskano od Ferroalloys, Chennai. Żużel ten, o dużym uziarnieniu – 8-20 mm, chłodzono powietrzem i stosowano o takim samym uziarnieniu jak żwir. Zastosowany roztwór alkaliczny stanowił mieszaninę wodorotlenku sodu i krzemianu sodu. Płatki wodorotlenku sodu o czystości 97-98% oraz roztwór krzemianu sodu o stosunku molowym 2,14 – $\text{SiO}_2/\text{Na}_2\text{O}$ i NaOH przygotowano o molowości 12. – M. Zastosowano również superplastyfikator CONPLAST SP 430 w celu poprawy urabialności. Pozostałe przyjęte parametry były następujące: stosunek cieczy alkalicznej do spoiwa wynosił 0,4, stosunek aktywatorów alkalicznych 2,5, stosunek kruszywa drobnego do kruszywa całkowitego 0,3. Zastosowano superplastyfikator w ilości 2% masy spoiwa oraz wodę w ilości 15% masy spoiwa.

Beton geopolimerowy został wyprodukowany przy użyciu tych samych konwencjonalnych technik, co beton z cementu portlandzkiego (13). Kruszywa przygotowano w stanie nasyconym wodą i powierzchniowo suchym, a popiół lotny, mielony granulowany żużel wielkopieczowy i kruszywa najpierw wymieszano w stanie suchym razem w mieszalniku bębnowym przez około trzy minuty w laboratorium. Roztwór alkaliczny, będący połączeniem roztworu wodorotlenku sodu i roztworu krzemianu sodu, został zmieszany z superplastyfikatorem i dodatkową ilością wody. Następnie do suchych materiałów dodano płynny składnik mieszanki i kontynuowano mieszanie, zwykle przez kolejne cztery minuty, aż do uzyskania jednolitej mieszaniny. Świeży beton wlewano do standardowych form o wymiarach 100x100x100 mm, które zagęszczano przez ubijanie, wyrównywano i pozostawiano do twarzenia w temperaturze otoczenia przez 28 dni, a następnie poddawano badaniom w podwyższonej temperaturze. Mieszanka zastępcza

conducted to understand the environmental impact of geopolymer and it is noted that geopolymers are more sustainable and eco-friendly, compared to conventional cement concrete.

2. Experimental

2.1. Sample preparation

Fly ash [FA] from Ennore power station, Tamil Nadu and ground granulated blast furnace slag [GGBS], produced locally, were used as the source of the materials for the synthesis of geopolymer binder [fly ash: GGBS - 1:0.25]. GGBS were added to facilitate the ambient curing of the specimens. The aggregates used were crushed gravel of size 12.5 mm and river sand conforming to zone II. The ferrochrome slag, used as a partial coarse aggregate replacement was delivered from Ferroalloys, Chennai. The large-sized air-cooled ferrochrome slag 8-20 mm was subjected to size reduction by milling and grinding and used in the same gradation as gravel. The alkaline solution used was a combination of sodium hydroxide and sodium silicate. The sodium hydroxide flakes of 97-98% purity and sodium silicate Na_2SiO_3 solution with a molar ratio of 2.14 and NaOH was prepared of concentration equal 12M. Superplasticizer CONPLAST SP 430 was also used to ameliorate the workability of the mix. The other parameters adopted were alkaline liquid to binder ratio of 0.4, alkali activators ratio of 2.5, fine aggregate / total aggregate ratio of 0.3, superplasticizer addition was 2% by mass of binder and the extra water was 15% by mass of the binder.

Geopolymer concrete was prepared by the same conventional techniques as that of Portland cement concrete (15). The aggregates were prepared in saturated-surface-dry [SSD] condition and the fly ash, GGBS, and the aggregates were first mixed dry together in a drum mixer for about three minutes, in the laboratory. The alkaline liquid which is a combination of sodium hydroxide solution and sodium silicate solution were mixed with the superplasticizer and extra water. The liquid component of the mixture was then added to the dry materials and the mixing continued usually for another four minutes until the uniform mixture was obtained. The fresh concrete was then filled into standard moulds of size 100x100x100 mm and these were compacted well by tamping, levelled and left for ambient curing for 28 days until subjected for elevated temperature study. The replacement mix has arrived with 40% replacement of ferrochrome slag as coarse aggregates as it gave maximum strength at ambient conditions. Thus, the conventional mix [CM] consists of FA, GGBS, alkaline solution, coarse aggregates and fine aggregates, superplasticizers, and extra water, whereas the replacement mix [RM] consists of FA, GGBS, alkaline solution, coarse aggregates [60%], ferrochrome slag [40%], fine aggregates, superplasticizers, and extra water. The materials used for preparing conventional cement concrete [CC] are ordinary Portland cement [OPC] of grade 53, river sand as fine aggregate, gravel as coarse aggregate, water, and superplasticizer. The quantities of materials required for the formulation of CM, RM and CC are shown in Table 1.

zawierała 40% żużła żelazochromowego jako kruszywo grube, ze względu na jego maksymalną wytrzymałość w warunkach otoczenia. Tak więc, mieszanka konwencjonalna [MK] składa się z popiołu lotnego, mielonego granulowanego żużła wielkopieczowy, roztworu alkalicznego, kruszyw grubych i drobnych, superplastyfikatorów i dodatkowej wody. Natomiast mieszanka z kruszywem żelazochromowym [MŻ] składa się z popiołu lotnego, GŻW, roztworu alkalicznego, kruszyw grubych [60%], żużła żelazochromowego [40%], drobnych kruszyw, superplastyfikatorów i dodatkowej wody. Materiały użyte do przygotowania konwencjonalnego betonu cementowego [BC] to zwykły cement portlandzki [CP] klasy 53, piasek rzeczny jako kruszywo drobne, żwir jako kruszywo grube, woda i superplastyfikator. Składy mieszanek MK, MŻ i BC przedstawiono w tablicy 1.

2.2. Możliwość zastosowania żużła żelazochromowego w betonie

Żużel żelazochromowy zawiera zwykle 6-12% resztkowego chromu, który może potencjalnie uwalniać niebezpieczne związki chromu do środowiska. Według Occupational Safety Health Administration [OSHA], główne zagrożenia dla zdrowia związane z narażeniem na Cr (VI) obejmują raka płuc, owrzodzenia i perforacje przegrody nosowej, owrzodzenia skóry, oraz alergiczne i drażniące kontaktowe zapalenie skóry (12) Możliwość wykorzystania żużła żelazochromowego została potwierdzona metodą Toxicity Characteristics Leaching Procedure [TCLP] zgodnie ze specyfikacją EPA1311. Wyniki ługowania przedstawiono w tablicy 2.

Stwierdzono, że wymywanie chromu sześciowartościowego jak i chromu całkowitego z żużła żelazochromowego przekraczało dopuszczalny limit. Jednak w przypadku zastosowania jako kruszywa w betonie, wymywanie jest znikomo małe, znacznie poniżej dopuszczalnego limitu, ponieważ reakcja geopolimeryzacji unieruchomiła związki chromu w matrycy betonowej.

2.3. Warunki podwyższonej temperatury

Po 28 dniach, próbki po stwardnieniu w temperaturze otoczenia, poddano działaniu podwyższonej temperatury w zakresie 100-800°C w piecu elektrycznym, przy szybkości wzrostu temperatury wynoszącej 5,5°C/minutę. Zanotowano początkową masę próbek.

Tablica 2 / Table 2

ŁUGOWANIE CHROMU Z ŻUŻŁA ŻELAZOCHROMOWEGO

LEACHING OF CHROMIUM FROM FERROCHROME SLAG

Składnik / Component	Ferrochrome slag Żużel żelazochromowy, mg/L	Concrete cube with ferrochrome slag aggregates Kostka betonowa z kruszywem z żużła żelazochromowego, mg/L	Allowed limit Dozwolona wartość graniczna, mg/L
Total chromium Chrom całkowity	2.9	0.01	2.0
Chromium as Cr (VI) Chrom sześciowartościowy	0.34	0.01	0.1

Tablica 1 / Table 1

SKŁADY MIESZANEK BETONOWYCH

QUANTITY OF MATERIALS FOR A CUBIC METER OF CONCRETE

Material / Materiał	Content / Zawartość, kg/m ³		
	CM / MK	RM / MŻ	CC / BC
FA / PL	315.42	315.42	-
GGBS / GŻW	78.84	78.84	-
Cement			400
NaOH solution / Roztwór NaOH	45.06	45.06	
Sodium silicate solution / Roztwór krzemianu sodu	112.65	112.65	
Coarse aggregate / Kruszywo grube	1293.6	776.16	1090.2
Ferrochrome slag / Kruszywo żelazochromowe	-	517.44	
Fine aggregate / Kruszywo drobne	554.4	554.4	721.4
Superplasticizer / Domieszka upłynniająca	7.8	7.8	3.1
Water / Woda	60.02	60.02	180

2.2. Feasibility of geopolymer concrete from ferrochrome slag

The ferrochrome slag usually contains 6-12% of residual chromium which has the potentiality of releasing hazardous chromium Cr(VI), to the environment. The Occupational Safety Health Administration [OSHA] is stating that the major health hazards of Cr(VI) exposure include lung cancer, nasal septum ulcerations and perforations, skin ulcerations, allergic and irritant contact dermatitis (12). In Europe the accepted content of Cr(VI) in dry cement is 2 mg/kg, however, in India, there are other rules [Table 2]. The feasibility of utilizing the ferrochrome slag was ascertained by Toxicity Characteristics Leaching Procedure [TCLP] Test as per EPA1311 specifications. The leaching results are shown in Table 2.

It was noted that the leaching of hexavalent and total chromium from ferrochrome slag was above the allowed limit. But when incorporated as aggregates in concrete, leaching is negligible and far below the allowed limit, since the geopolymerisation have immobilized chromium compounds in the concrete matrix.

2.3. Elevated temperature regime

After 28 days, the ambient cured samples were subjected to elevated temperature in an electric furnace in the range 100-800°C, at a rate of 5.5 °C/minute. The initial mass of the samples was noted. Once the target temperature was reached, the specimens were kept at the set temperature for one hour, to ensure uniform heating.

Po osiągnięciu temperatury docelowej, próbki były utrzymywane w wybranej temperaturze przez jedną godzinę, w celu zapewnienia równomiernego nagrzewania. Następnie próbki pozostawiono w piecu i chłodzono do temperatury pokojowej. Próbki zostały następnie zważone.

2.4. Badanie próbek

Po ochłodzeniu próbki poddano dalszej ocenie w zakresie ubytku masy, spadku wytrzymałości na ściskanie, a także obserwowano je wizualnie z uwagi na powstawanie odprysków i pęknięć. Ubytek masy oszacowano na podstawie różnicy masy przed i po ekspozycji w podwyższonej temperaturze.

Przeprowadzono badanie wytrzymałości na ściskanie próbek w celu określenia wpływu podwyższonej temperatury na tę właściwość. Badanie przeprowadzono w maszynie wytrzymałościowej do prób ściskania, o mocy 2000KN przy szybkości obciążania 24 MPa/min.

Próbki po poddaniu działaniu podwyższonej temperatury w 800°C poddano również badaniom rentgenograficznym, skaningowej mikroskopii elektronowej oraz tomografii rentgenowskiej. Dyfrakcja rentgenowska daje ostre refleksy na dyfraktogramie odpowiadające fazom krystalicznym, a szerokie piki bardzo małych kryształitom lub częściowo amorficznym fazom.

Skaningowy mikroskop elektronowy został zastosowany do obserwacji mikrostruktury, po ekspozycji w podwyższonej temperaturze. Rentgenowska tomografia komputerowa [TK] jest zaawansowaną nieniszczącą techniką, która daje obraz z rozkładu gęstości, w przekroju poprzecznym próbki.

3. Wyniki i dyskusja

3.1. Utrata wytrzymałości

Badania wytrzymałości wykazały, że dodatek 40% żuźla żelazochromowego spowodował wzrost wytrzymałości na ściskanie RM o 12,38%, a więc więcej niż MK. Gdy próbki umieszczono w podwyższonej temperaturze, stwierdzono zmniejszenie wytrzymałości o 44,8% w przypadku CM i o 55,6% dla MŻ, w stosunku do uzyskanych w warunkach otoczenia. Pod wpływem podwyższonej temperatury geopolimery ulegają przemianom fazowym w wyniku krystalizacji oraz skurczom termicznym. Reakcje geopolimerów w wyniku zmian fazowych prowadzą do powstania naprężeń mikrostrukturalnych. Naprężenia te powodują na ogół pogorszenie właściwości mechanicznych (14).

Wytrzymałość MK zmniejsza się stopniowo od warunków otoczenia aż do ekspozycji w podwyższonej temperaturze. Spadek wytrzymałości próbek z betonu geopolimerowego w początkowych fazach może być spowodowany zmniejszeniem wiązań między cząsteczkami oraz utratą cząsteczek wody, co powoduje niewielki skurcz i mikropęknięcia. Spadek wytrzymałości w temperaturze wyższej od 400°C jest spowodowany różnicą w rozszerzalności cieplnej kruszyw i geopolimeru. Zaczyn geopolimerowy ulega skurczeniu,

The specimens were then left undisturbed and brought down to room temperature by air-cooling method. The samples were then weighed after they were brought down to normal temperature.

2.4. Testing of specimens

After the samples were cooled, they were further evaluated for mass loss, compressive strength loss and also observed visually for spalling and cracks. The mass loss was estimated by the difference in mass before and after elevated temperature exposure. The compressive strength test was carried out on the specimens to understand the effect of elevated temperature on strength. The test was carried out on a 2000 KN compression testing machine at a loading rate of 24 MPa/min. The samples, after exposure to an elevated temperature at 800°C, were also analysed for microstructural changes, using XRD, SEM, and X-ray tomography.

XRD is a non-destructive technique that helps in gathering detailed information about the phase composition and crystal structure. The sharp peak in XRD is typical for crystalline phases and the broad peaks for very small crystals or partially amorphous phases. The scanning electron microscope [SEM] was used for the microstructure observation of the paste, principally after exposure to elevated temperature. XRD and SEM were carried out by powdering the elevated temperature exposed specimens, after they have been cooled down to ambient condition. X-ray computed tomography [CT] is an advanced non-destructive technique that creates an image from the density distribution of the cross section of the specimen.

3. Results and Discussions

3.1. Strength loss

The strength study shows that the inclusion of ferrochrome slag at 40% in RM has improved its compressive strength by 12.4% compared to CM, under ambient conditions. When the samples were subjected at elevated temperature, it was observed that there is a strength reduction of 44.8% for CM and 55.6 % for RM, compared to the ambient condition. When exposed at elevated temperature, the geopolymers undergo phase changes such as crystallization and even thermal shrinkage might also occur. The responses of geopolymers, as a result of the phase changes, lead to microstructural stresses. These stresses in general result in the decline of mechanical properties (16).

In the case of CM, the strength decreases steadily from the ambient condition, after elevated temperature exposure. The strength loss of geopolymer concrete specimens during the early stages might be due to the reduction of bonding force and due to the expulsion of the water molecules, resulting in slight shrinkage and micro-cracks formation in the concrete. The decline in strength after heating at 400°C is due to the different thermal expansion of the aggregates and the geopolymer. The geopolymer paste undergoes contraction and the aggregates expand steadily on heating. This thermal mismatch will result in the formation of cracks, which act as a place for further crack propagation resulting in strength reduction.

a kruszywo przy ogrzewaniu stale się rozszerza. To niedopasowanie termiczne prowadzi do powstawania pęknięć, które powodują ich dalszą propagację, co powoduje zmniejszenie wytrzymałości.

W przypadku MŻ, dodatek żużla żelazochromowego mogło zwiększyć przewodność cieplną i ciepło właściwe. Wzrost przewodności cieplnej przypisuje się dużej ilości MgO i Cr₂O₃ w żużlu żelazochromowym, w porównaniu z normalnymi kruszywami (10). W RM wytrzymałość wzrasta początkowo do temperatury 400°C, a następnie maleje w zakresie od 500°C do 800°C. Stwierdzono, że w przypadku MŻ, ze względu na zwiększoną przewodność cieplną kruszywa z żużla żelazochromowego, w porównaniu z kruszywem konwencjonalnym, ciepło wnika szybciej do betonu. W zakresie temperatur od 200 do 400°C, właściwości użytkowe próbek MŻ są lepsze niż MK, ponieważ występuje wzrost ich wytrzymałości. Wzrost wytrzymałości jest spowodowany reakcjami tlenku glinu i krzemionki, co prowadzi do polimeryzacji. Spadek wytrzymałości MŻ w temperaturze wyższej od 500°C jest spowodowany różnicami we właściwościach dwóch rodzajów kruszyw, a także niekompatybilnością zaczynu geopolimerowego i kruszywa.

Porównując wyniki badań betonu geopolimerowego z konwencjonalnym betonem cementowym stwierdzono, że wytrzymałość na ściskanie zmniejsza się o 60% w przypadku BC i MK w 800°C, natomiast w MŻ spadek wytrzymałości nie występuje w zakresie do 400°C. Wykres wytrzymałości po ekspozycji w podwyższonej temperaturze dla BC, MK i MŻ pokazano na rysunku 1.

3.2. Ubytek masy

Ubytek masy próbek wzrastał wraz ze zwiększaniem temperatury zarówno w przypadku MK jak i MŻ. Stwierdzono, że w przypadku MK ubytek masy wyniósł 6.09% a dla MŻ 7.95%, podczas poddania działaniu podwyższonej temperatury. Utrata masy wzrasta gwałtownie dla MK i MŻ pomiędzy 100 i 200°C, a następnie wzrost jest stopniowy, podczas gdy w przypadku BC utrata masy gwałtownie wzrasta w temperaturze wyższej od 400°C. Stwierdzono również, że nie ma większej zmiany w zakresie od 600°C do 800°C w przypadku BC i MK, natomiast dla MŻ utrata masy wzrasta w zakresie temperatur 600-800°C. Ubytek masy jest związany z fizycznym odparowaniem wilgoci z próbek, lub chemicznymi procesami. Ubytek masy w późniejszych okresach jest spowodowany głównie ubytkiem wody z hydratu krzemianu wapnia, który powstał w wyniku dodania mielonego granulowanego żużla wielkopieczowego.

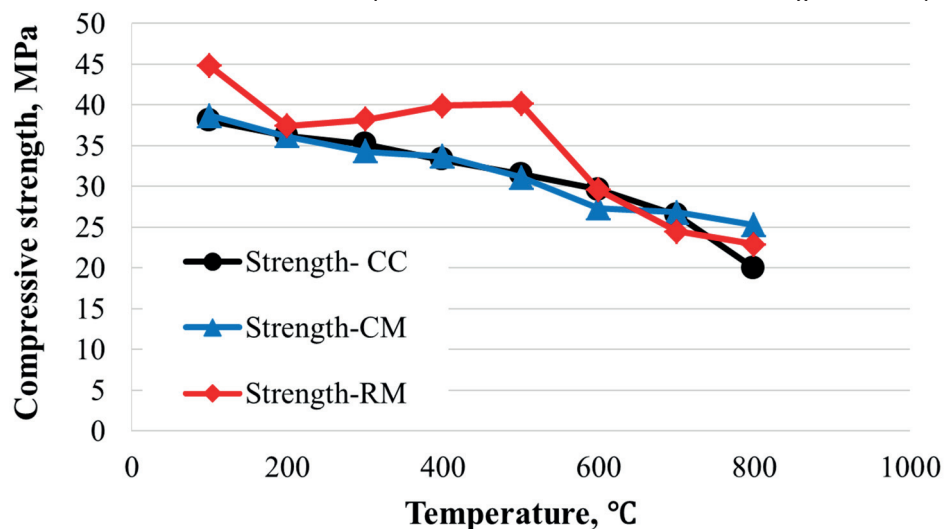
Stwierdzono również, że w przypadku MŻ ubytek masy jest większy w porównaniu z MK, ze względu na większą absorpcję wody przez kruszywo z żużla żelazochromowego, wynikającą z jego dużej porowatości.

In RM, the incorporation of ferrochrome slag might have increased the thermal conductivity and specific heat. The increase in thermal conductivity is attributed to the high content of MgO and Cr₂O₃ in ferrochrome slag, compared to normal aggregates (10). In RM, strength increases initially till 400°C, and then it decreases from 500°C to 800°C. It was noted that in RM, because of the increased thermal conductivity of ferrochrome slag aggregates compared to the conventional aggregates, the heat penetrated faster from the surface inwards to the concrete. In a temperature range of 200 - 400°C, the performance of RM specimens is better than CM, as an increase in strength is noted. The increase in strength is probably due to the sintering of the unreacted alumina and silica components, resulting in further polymerization. The strength decline of RM above 500°C is due to the thermal mismatch between the two types of aggregates, along with the incompatibility of geopolymer paste and aggregate.

In comparing the result of geopolymer concrete with conventional cement concrete it is noted that the compressive strength decreases up to 60% for CC and CM at 800°C whereas for RM the strength does not decrease up to 400°C. The strength plot after elevated temperature exposure for CC, CM and RM is shown in Fig. 1.

3.2. Mass loss

The samples suffered a mass loss that increased with an increase in temperature for both CM and RM. It was found that CM exhibited a mass loss of 6.09% and RM suffered a loss of 7.95%, when exposed to elevated temperature. It is noted that the mass loss increases sharply for CM and RM between 100 and 200°C and thereafter the increase is gradual, whereas for CC the mass loss steeply increases after 400°C. It has also been found that there is no significant change from 600°C to 800°C for CC and CM but for RM the mass loss increases at temperature increase to 600-800°C. The mass loss is attributed to the evaporation of moisture and water from the specimens bound physically and chemically in the initial phases. The loss of mass in the later stages is mainly



Rys. 1. Wytrzymałość na ściskanie betonów w warunkach podwyższonej temperatury

Fig. 1. Compressive strength of concretes at elevated temperature exposure

Porównanie ubytku masy z konwencjonalnym betonem cementowym wykazuje, że beton geopolimerowy ma większy ubytek masy niż konwencjonalny beton cementowy. Ubytek masy w przypadku MK, MŻ oraz BC we wszystkich zakresach temperatur pokazano na rysunku 2.

3.3. Obserwacja wzrokowa

Po zbadaniu próbek stwierdzono, że wszystkie próbki reagowały dobrze, bez kruszenia. Stwierdzono również lekkie przebarwienia w postaci różowawego odcienia, po podgrzaniu do temperatury 800°C. Drobne pęknięcia włoskowate stwierdzono w temperaturze 800°C zarówno w przypadku MK jak i Ż, co pokazano na rysunkach 3 i 4. W przypadku CC pęknięcia włoskowate pojawiły się w temperaturze 400°C, jak to uwidoczniło na rysunku 5. Stwierdzono, że rdzeń miał kolor czarny w temperaturze 800°C zarówno w przypadku MK jak i MŻ, co pokazano na rysunku 6.

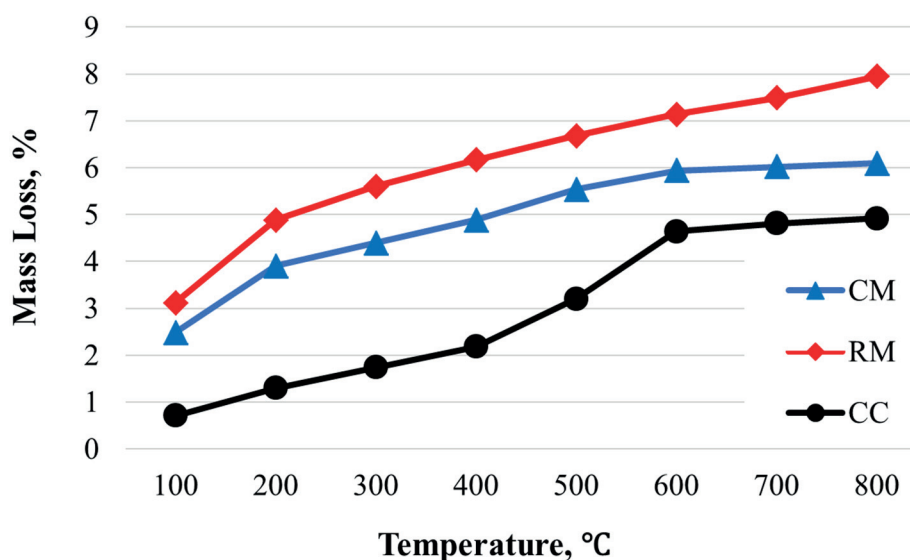
3.4. Badania mikrostrukturalne

3.4.1. Tomografia rentgenowska

Próbki MK i MŻ poddane działaniu temperatury wynoszącej 800°C zbadano za pomocą tomografii rentgenowskiej w celu poznania mikrostruktury próbek. Na rysunkach 7 i 8 przedstawiono obrazy wycinków tomografii komputerowej. Obrazy tych wycinków są korzystne dla próbek, a czarne obszary oznaczają porowatość. Pory tworzą również skupienia spowodowane prawdopodobnie zapotrzebowaniem na wodę oraz przypuszczalnie mają trudności w zagęszczaniu.

3.4.2. Dyfrakcja rentgenowska

Dyfraktogramy próbek MK i MŻ pokazują, że N-A-S-H – uwodniony żel sodowo – glinianowo - krzemianowy wystąpił już w temperaturze otoczenia i po ekspozycji w 200°C, w zakresie 20-40 stopni 2θ (17). Krystaliczne N-A-S-H można ogólnie ocenić jako zeolity, natomiast N-A-S-H powstające w geopolimerach są amorficzne. Należy zauważyć, że gdy GŻW dodano do mieszanki, na dyfraktogramach stwierdzono występowanie fazy C-S-H w około 30 stopni 2θ (18). W publikacjach podano również, że faza C-A-S-H może także powstawać w wyniku dodania GŻW i jest bardzo podatna na degradację, z powodu ekspozycji w podwyższonej temperaturze. Refleksy pochodzące od fazy N-A-S-H mogą nie być wyraźnie widoczne na dyfraktogramie ze względu na małe intensywności, a także z powodu nakładania się refleksów. Dyfraktogramy geopolimerów przed obróbką termiczną wskazują na występowanie kwarcu [Q], mulitu [M], albitu [A] i hematytu [H]. Zeolity, z których jak hydroksysodalit i analcym [AC] powstały jako produkty wtórne, w zakresie ogrzewania w 200–400°C (17). Fazę analcymu zidentyfikowano również w betonie MŻ po wygrzewaniu w 400°C.



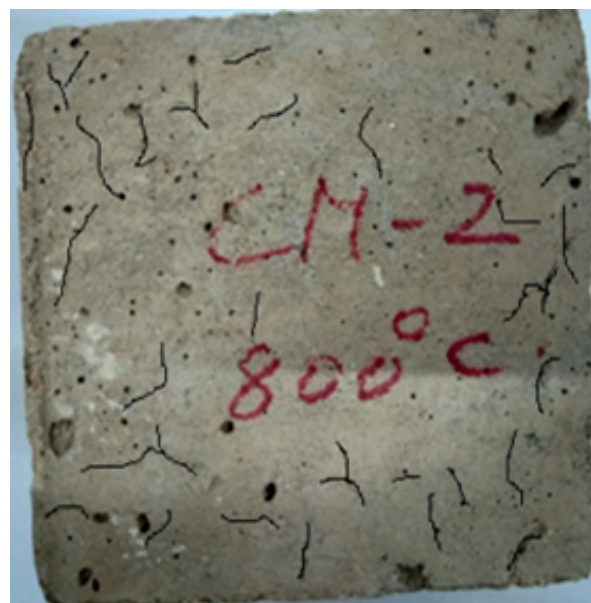
Rys. 2. Strata masy próbek betonów poddanych działaniu podwyższonej temperatury

Fig. 2. Mass loss plots at elevated temperature exposure

attributed to the dehydration of calcium silicate hydrate which has been formed from the GGBS addition. It is also noted that for RM, the mass loss is higher compared to CM, because of the greater water absorption of ferrochrome slag aggregate, on account of its porous microstructure. The comparison of the result of mass loss with conventional cement concrete has shown that the geopolymer concrete has higher mass loss than the conventional cement concrete. The mass loss for CM, RM and CC for the same temperature range is shown in Fig. 2.

3.3. Visual observation

When the specimens were examined, it was noted that all the specimens reacted well without spalling and slight discolouration in terms of pinkish tint were observed when heated to 800°C. Minor



Rys. 3. Próbką betonu MK poddanego działaniu temperatury 800°C

Fig. 3. CM concrete sample treated at 800°C



Rys. 4. Próbką betonu MŻ poddanego działaniu temperatury 800°C

Fig. 4. RM concrete sample treated at 800°C

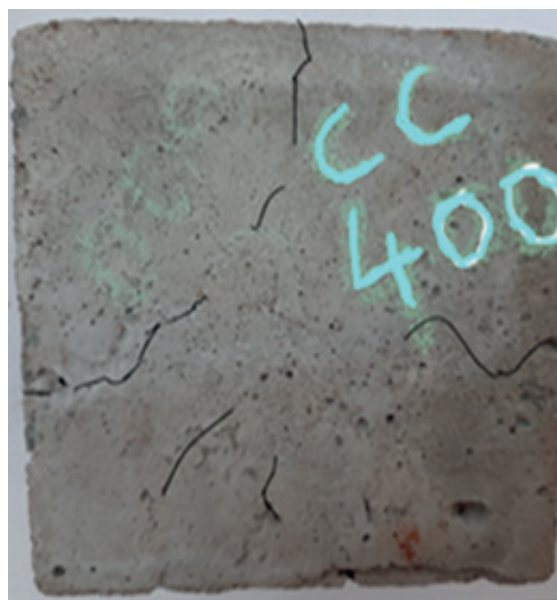
Zawartość mullitu i kwarcu zmniejsza się w wyższych temperaturach. W zakresie 600-800°C próbki geopolimeru zawierają dużą zawartość nieprzereagowanych lub częściowo przereagowanych krzemianów przyczyniających się do rozszerzalności cieplnej, która ostatecznie powoduje zmniejszenie wytrzymałości. Po ekspozycji w 800°C ślady nefelinu [N] i rozmyte piki albitu [A] (20) znaleziono zarówno w MK, jak i MŻ. Występowanie albitu w temperaturze 800°C potwierdza również analiza mikroskopowa [Rys. 11].

Stwierdzono, że zarówno MK, jak i MŻ ulegają różnym przemianom fazowym w podwyższonej temperaturze, a krystaliczność próbek wzrasta wraz ze wzrostem temperatury, co uwidacznia się w ostrych pikach na dyfraktogramach. Należy również stwierdzić,



Rys. 6. Próbką betonu BC poddanego działaniu temperatury 800°C

Fig. 6. CC concrete sample treated at 800°C



Rys. 5. Próbką betonu BC poddanego działaniu temperatury 400°C

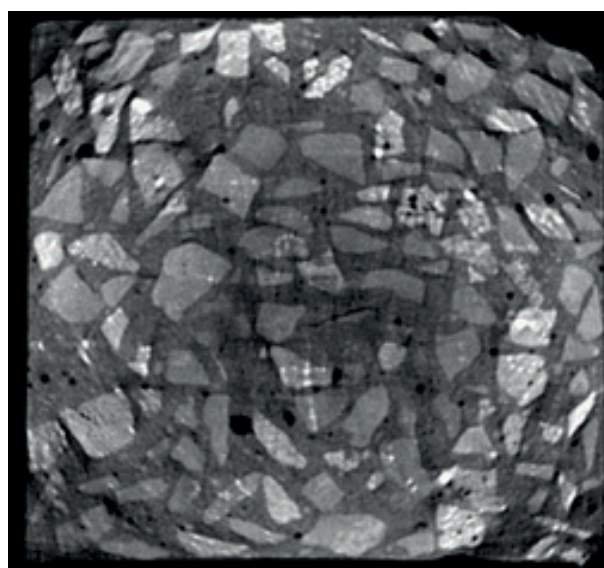
Fig. 5. CC concrete sample treated at 400°C

hairline cracks were observed at the temperature of 800°C in both CM and RM, as shown in Figs. 3 and 4 and in CC the hairline cracks appeared at 400°C, as shown in Fig. 5. It was noted that the core had black colour at 800°C for both CM and RM, as shown in Fig. 6.

3.4. Microstructural study

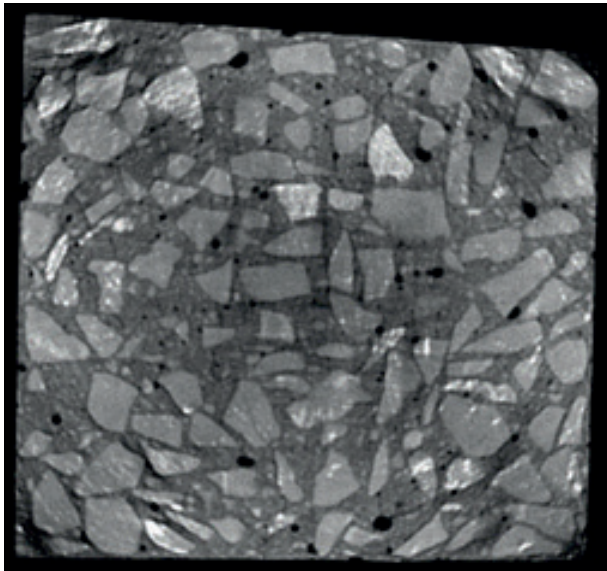
3.4.1. X-Ray Tomography

The RM and CM specimens heated at 800°C were examined by X-ray tomography to understand and visualize the interior feature. Figs. 7 and 8 denote the CT slice images. In the CT slice images, the black regions indicate the porosity. The pores are also present in agglomerated form due to the increased water demand, which caused difficulties in compaction.



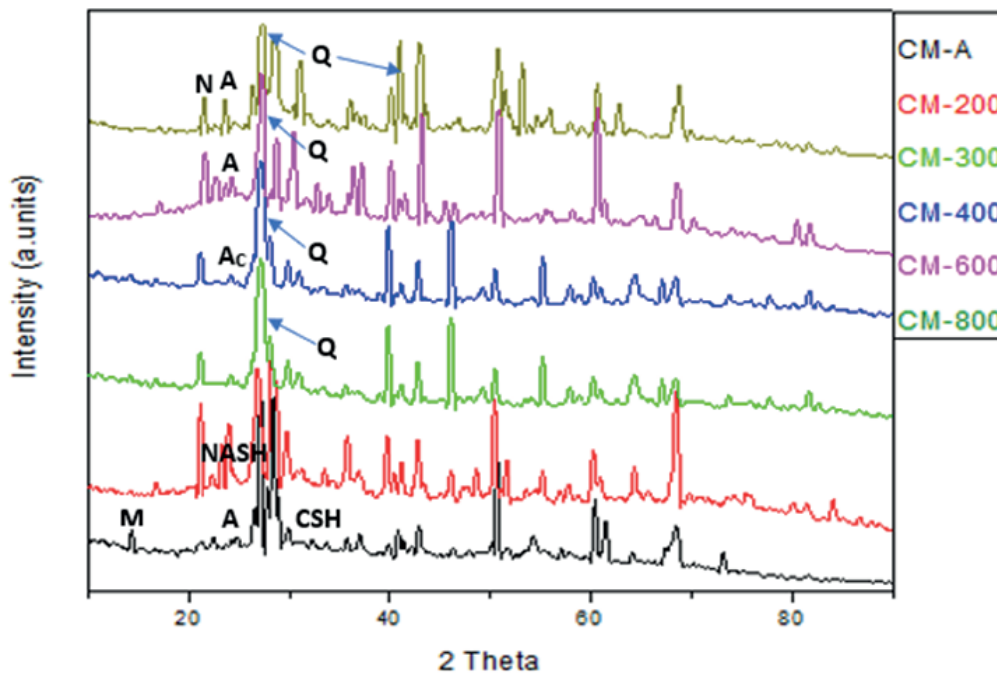
Rys. 7. Obraz próbki betonu MK uzyskany za pomocą tomografu komputerowego

Fig. 7. CT slice image for CM



Rys. 8. Obraz próbki betonu MŻ uzyskany za pomocą tomografu komputerowego

Fig. 8. CT slice image for RM



Rys. 9. Dyfraktogram betonu MK Poddango działania temperatur w zakresie 200 do 800°C

Fig. 9. XRD patterns of CM exposed at a temperature from 200 to 800°C

że zwiększona krystaliczność poprawiłaby wytrzymałość, ale pomimo tych czynników degradacja termiczna i pęknięcia oraz niezgodność termiczna między zaczynem a kruszywem spowodowały spadek wytrzymałości w podwyższonej temperaturze.

3.4.3. Skaningowy mikroskop elektronowy

Żel N-A-S-H, podstawowy składnik geopolimeru, został wykryty na obrazach mikroskopowych MK i MŻ, w temperaturze otoczenia. Podobnie zanotowano puste przestrzenie i mikropory. Albit, produkt powstający z przekształcenia fazy N-A-S-H w podwyższonej tem-

3.4.2. XRD

Geopolymer samples CM and RM that were subjected to elevated temperature in the range of 100-800°C were analysed using X-ray diffraction [XRD], to understand the phase changes that occur as a result of exposure at elevated temperature. It is noted that when CM and RM were subjected to high temperatures there can be peak shifts, structural changes and redistribution of peak intensities. These results in the changes in the XRD pattern when compared to the ambient condition diffraction pattern. The XRD patterns of the CM and RM specimens exposed at the elevated temperature is shown in Figs. 9 and 10.

The XRD patterns of CM and RM shows that N-A-S-H [Sodium Alumino-Silicate Hydrate] has been noticed at ambient temperature and after exposure to 200°C in the range of 20-40 2θ degrees (17). N-A-S-H can be broadly referred as zeolites, but the N-A-S-H formed in geopolymers are amorphous while zeolites are crystalline form of N-A-S-H. It is noted that when GGBS is incorporated in the mix, a new diffraction pattern of C-S-H was found around 30 2θ degrees (18). Literature also shows that Calcium Alumino-Silicate

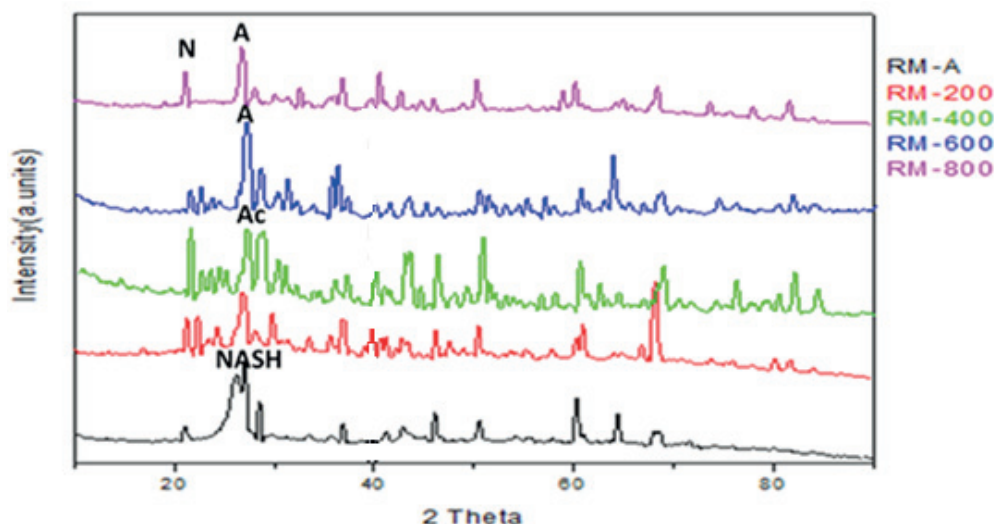
Hydrate might also be formed due to the addition of GGBS, and are highly vulnerable to degradation due to elevated temperature exposure. The diffused peak in the range of 20-40 2θ degrees is the result of CaO-SiO₂-Al₂O₃ interactions (19). N-A-S-H might not be distinctly visible in the pattern mainly of low intensities peak and also due to the overlapping of peaks. XRD pattern of ambient condition geopolymer shows amorphous to semi-crystalline composition due to the presence of quartz [Q], mullite [M], albite [A], hematite [H] etc. Zeolites such as hydroxysodalite and analcime [A_c], which were formed as secondary products were identified in the heating range of 200-400°C (17). The analcime phase has been identified in RM too in the heating range of 400°C. The mullite and quartz phases decrease at higher heating ranges. At a heating range of 600-800°C the geopolymer specimens contain a high amount of unreacted or partially reacted silicate species causing thermal expansion that eventually resulting in deterioration of amorphous lump and thereby reduction in strength. After exposure to 800°C, traces of nepheline [N] and broad peaks of albite [A] were found (20) in both CM and RM. The presence of albite at 800°C is also confirmed by SEM analysis [Fig. 11].

Thus, it is noticed that both CM and RM are subjected to various phase transformations under elevated temperature exposure, and crystallinity increases with an increase of temperature, as depicted

peraturze, zidentyfikowano również w 800°C. Obrazy SEM dla MK i MŻ w warunkach temperatury otoczenia i po ekspozycji w podwyższonej temperaturze 800°C są pokazane na rysunku 11.

4. Wnioski

- Stwierdzono, że próbki MK wykazują spadek wytrzymałości o 44,8% w przypadku zmiany warunków otoczenia. Natomiast próbki MŻ wykazują ten spadek wynoszący 55,6% w zmienionych warunków otoczenia. Większy spadek wytrzymałości w przypadku MŻ w porównaniu do MK może być spowodowany większą niekompatybilnością termiczną w MŻ. W MŻ, oprócz niezgodności termicznej zaczynu z kruszywem, mogą wystąpić różnice termiczne kruszywa grubego z kruszywem z żużla żelazochromowego, ze względu na różnicę w nagrzewaniu.
- Odnosnie do ubytku masy, próbki MK wykazywały ubytek masy wynoszący prawie 6,1%, natomiast próbki MŻ miały ten ubytek wynoszący prawie 8%, ze względu na porowaty żużel żelazochromowy.
- Próbki poddane działaniu podwyższonej temperatury (800°C) zbadano również za pomocą tomografii rentgenowskiej, w celu poznania zmian mikrostrukturalnych. Wyniki badań tomograficznych wyraźnie wskazują na obecność pustek w temperaturze 800°C.
- Wyniki badań rentgenograficznych wykazują, że spadek wytrzymałości ze wzrostem temperatury, może być spowodowany wzrostem krystaliczności w wyniku przemian fazowych żelu N-A-S-H. Obrazy mikroskopowe wyraźnie uwidaczniają powstawanie żelu N-A-S-H, występowanie pustek i mikroporów. Obserwacje mikroskopowe wskazują również na tworzenie się albitu w wyniku przemiany fazowej N-A-S-H, pod wpływem podwyższonej temperatury.
- Przeprowadzone badania wykazały, że MŻ w porównaniu do MK dobrze sprawdzała się w temperaturze otoczenia. W warunkach podwyższonej temperatury, MŻ wykazała większą wytrzymałość od MK dla tego samego zakresu temperatur i mogła zachować tę wytrzymałość, w pewnym zakresie temperatur, w większym stopniu niż MK. Ta właściwość żużla żelazochromowego dała dodatkową korzyść MŻ, zapewniając odpowiedni czas reakcji na wypadek ewakuacji budynku, w przypadku zagrożenia pożarowego. Tak więc mieszanka zastępcza z kruszywem z żużla żelazochromowego okazuje się lepszym rozwiązaniem niż konwencjonalna mieszanka geopolimerowa i konwencjonalny beton cementowy, zarówno



Rys. 10. Dyfraktogram betonu MŻ Poddango działaniu temperatur w zakresie 200 do 800°C

Fig. 10. XRD patterns of RM exposed at a temperature from 200 to 800°C

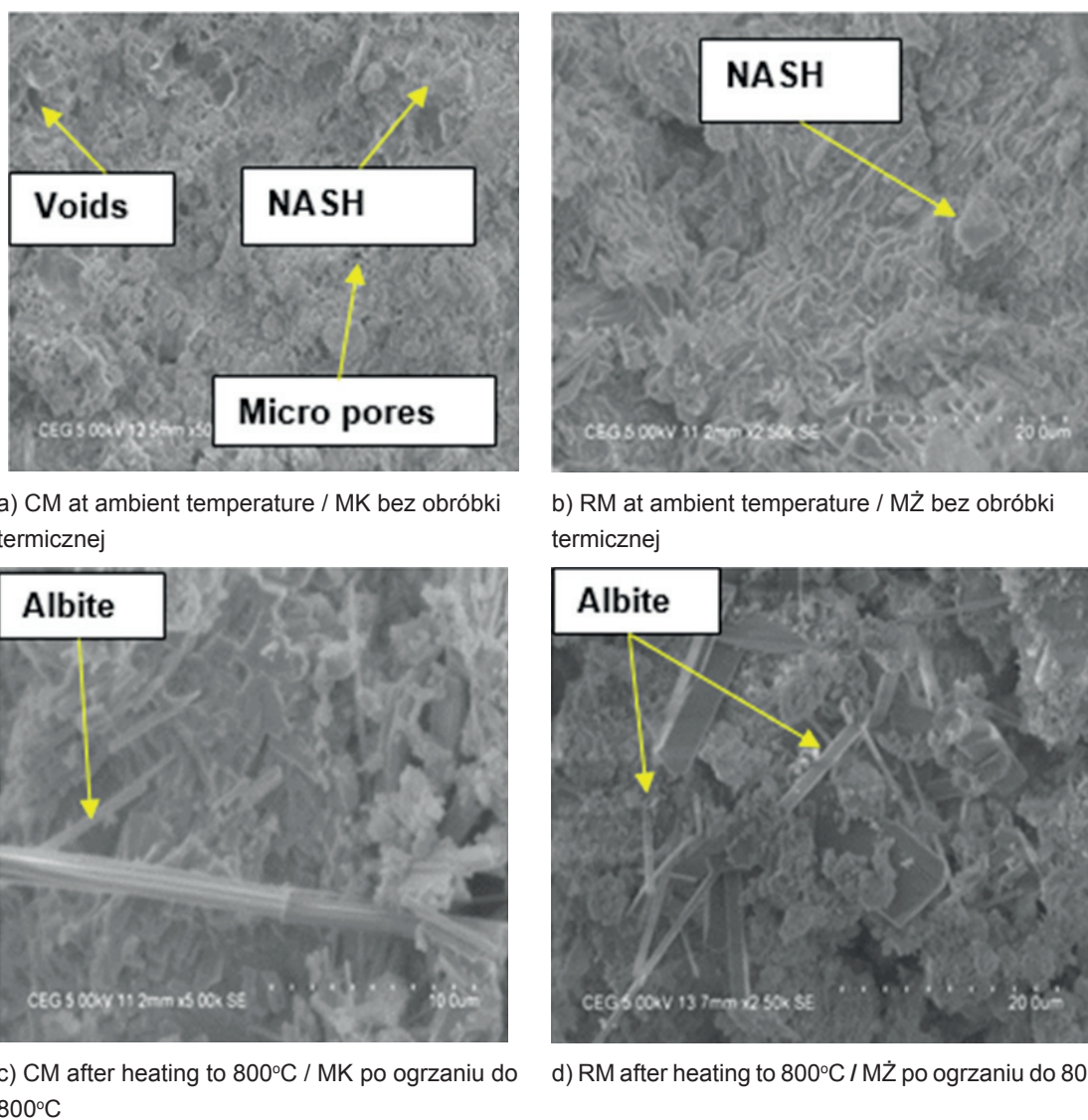
by sharp peaks in the XRD pattern. It is also noted that increased crystallinity would have improved the strength characteristics, but despite these factors, thermal degradation and cracks, and thermal incompatibility between the paste and aggregate would have resulted in the decrease of strength under elevated temperature.

3.4.3. Scanning Electron Microscope

Sodium aluminosilicate hydrate, the primary constituent of geopolymer, has been identified in the SEM images of CM and RM, under ambient conditions. Also voids, micropores are detected in SEM. Albit, as a product of transformation of N-A-S-H phase under elevated temperature exposure, was also identified at 800°C. The SEM images of CM and RM under ambient conditions and after exposure to an elevated temperature of 800°C are shown in Fig. 11.

4. Conclusions

- Regarding the strength loss, it was found that CM specimens suffered a strength loss of 44.8% from its ambient condition, whereas RM suffered 55.6% from its ambient strength. The greater strength loss of RM compared to CM might be due to higher thermal incompatibility in RM. In RM the thermal mismatch can occur between the coarse aggregates and the ferrochrome slag aggregates, due to the differential heating, apart from the thermal mismatch between the paste and aggregates.
- Regarding the mass loss, the CM specimens exhibited a mass loss of nearly 6.1% whereas RM specimens suffered a mass loss of nearly 8%, probably due to the porous nature of ferrochrome slag.
- The elevated temperature exposed specimens [800°C] were also subjected to X-ray tomography to understand the microstructural changes. Tomography results depict the presence of voids at 800°C.



Rys. 11. Obrazy mikroskopowe próbek betonów MK i MŻ

Fig. 11. SEM images of CM and RM

w warunkach otoczenia, jak i w podwyższonej temperaturze.

- Dlatego też wykorzystanie żużla żelazochromowego prowadzi do całkowicie zrównoważonego rozwoju, ponieważ zapobiega składowaniu odpadów, zatrzymuje wyłukiwanie chromu i chroni naturalne minerały, zapewniając jednocześnie lepszą wytrzymałość.

Podziękowania

Autorzy dziękują za pomoc finansową udzieloną przez Anna University Anna Centenary Research Fellowship [ACRF].

Literatura / References

1. J. Davidovits, Geopolymer Chemistry and Applications. Institute Geopolymere; 2011.
2. J.L. Provis, J. Deventer, Geopolymers: structure, processing, properties, and industrial applications, Woodhead Publishing Limited, 2009.
3. P. Duxson, A. Fernandez, J. Provis, G. Lukey, A. Palamo, J. Deventer, Geopolymer Technology: Current State of Art. J. Mat. Sci. **42**, 2917- 33 (2007).

- XRD results show that the decline of strength with an increase in temperature might be due to the increase of crystallinity due to the phase transformations of N-A-S-H gel. The SEM images depict the formation of N-A-S-H, presence of voids and micro-pores. The formation of albite due to the phase transformation of N-A-S-H under the influence of temperature exposure is also depicted in SEM.

- The studies carried out show that RM performed well at ambient temperature compared to CM. Under elevated temperature exposure, RM showed a greater strength compared to CM for the same temperature range and could retain its strength – with an increase in strength in some temperature range, to a greater extent compared to CM. This thermal resistant property of ferrochrome slag would give an added advantage to RM to have adequate response time for evacuation for fire hazards. Thus, the replacement mix with ferrochrome slag aggregates proves to be a better option than the conventional geopolymer mix and conventional cement concrete mix, both at ambient and elevated temperature conditions.

4. K. Kupade, F.Soto, A.Kunjumon, E.Allouche, D. Mainardi, Multiscale modelling and experimental investigations of geopolymetric gels at elevated temperatures. *Comput. Struct.* **122**, 164-177 (2013).
5. C. Shi, J.Fernandez, Stabilisation/ Solidification of hazardous and radioactive wastes with alkali-activated cement. *J. Hazard. Mater.* **137**, 1656- 63 (2006).
6. D.A. Crozier, J.G. Sanjayan, Chemical and Physical degradation of Concrete at Elevated Temperatures. *Concrete in Australia*, **25**(1), 18-21 (1999).
7. J.G. Sanjayan, L. J. Stocks, Spalling of High-Strength Silica Fume Concrete in Fire. *ACI Mater. J.* **90**(2), 170-173 (1993).
8. K. Willam, Y. Xi, K. Lee, B Kim, Thermal Response of Reinforced Concrete Structures in Nuclear Power Plants. Project Report, University of Colorado, 2009.
9. L. T. Phan, Fire Performance of High Strength Concrete: A Report of the State -of-The Art. Building and Fire Research Laboratory, National Institute of Standards, Maryland, 1996.
10. K.S. Jabri, Research on the use of Ferrochrome Slag in Civil Engineering Applications. *MATEC Web of Conferences*, **149**, 1-5 (2018).
11. A. Yilmaz, K. Ahin, Mechanical properties of Ferrochromium Slag in granular layers of Flexible Pavements. *Mater. Struct.* **43**, 309-312 (2010).
12. C.R. Panda, K.K. Mishra, K.C. Panda, B.D. Nayak, B.B.Nayak, Environmental and Technical Assessment of Ferrochrome Slag as Concrete Aggregate Material. *Constr. Build. Mater.* **49**, 262-271 (2013).
13. L.K. Turner, F.G. Collins, Carbon dioxide equivalent (CO₂e) emissions: A comparison between geopolymer and OPC cement concrete. *Constr. Build. Mater.* **43**, 125-130 (2013).
14. G. Hammond , C. Jones, Inventory of Carbon & Energy (ICE), Version 2.0, Sustainable Energy Research Team (SERT) , University of Bath, UK, 2011.
15. B.V. Rangan, Fly Ash-Based Geopolymer Concrete. *Proceedings of the International Workshop on Geopolymer Cement and Concrete*, 68-106, 2010.
16. K. Zulkifly, H. C. Yong, A. B. Abdullah, L.Y. Ming, D. Panias, & K. Sakkas: Review of Geopolymer Behaviour in Thermal Environment. *International Conference on Innovative Research*, IOP Publishing, 2017.
17. M.W. Hussin, M.A.R. Bhutta, M.Azreen, P. J. Ramadhansyah J. Mirza, Performance of blended ash geopolymer concrete at elevated temperatures. *Mater. Struct.* **48**, 709-720 (2015).
18. A. Saludung, Y.Ogawa, K. Kawai, Microstructure and mechanical properties of FA/GGBS based Geopolymer. *MATEC Web of Conferences*, 195, 01013, 2018.
19. G.Kurkulu, The effect of high temperature on the design of blast furnace slag and coarse fly-ash based geopolymer mortar. *Composites B*, **92**, 9-18, (2016).
20. H.Rui, D.Nan, W.Zhenjun, Thermal and Mechanical Properties of Geopolymers Exposed to High Temperature: A literature Review. *Adv. Civ. Eng.* **2020**, 1-17, (2020).

- Thus utilization of ferrochrome slag leads to total sustainable development as it prevents landfill, arrest the leaching of chromium, and safeguards the natural minerals along with the better strength performance.

Acknowledgement

The financial assistance provided by Anna University Anna Centenary Research Fellowship [ACRF] is greatly acknowledged by the authors.