

## Wpływ temperatury na wytrzymałość i sorpcyjność betonów uzyskanych z alternatywnego kruszywa grubego

### A study of temperature effect on strength and sorptivity of concretes made with alternate coarse aggregates

#### 1. Wprowadzenie

Beton jest niejednorodnym materiałem, którego odporność ogniowa zależy od zastosowanych składników, to znaczy od kruszywa i zaczynu cementowego. Konstrukcje betonowe mogą być narażone na działanie wysokich temperatur, które powodują zmniejszenie wytrzymałości zwykłego betonu w wyniku powstawania rys pomiędzy zaczynem cementowym a kruszywem, spowodowanych gradientami termicznymi, występującymi w elemencie betonowym. Przykładami, które stwarzają takie warunki są konstrukcje betonowe dla startujących rakiet transportujących statki kosmiczne, osłony betonowe w elektrowniach jądrowych czy też konstrukcje przypadkowo narażone na działanie ognia (1). Właściwości mechaniczne i chemiczne betonu narażonego na działanie wysokich temperatur mogą ulegać znacznym zmianom, co może powodować zniszczenie tego kompozytu (2). Działanie ognia powoduje parowanie części wody z powierzchni, a część migruje w głąb elementu betonowego. Dłuższe działanie ognia zwiększa migrację wody do wnętrza betonu, co wywołuje wzrost ciśnienia. W niektórych przypadkach wzrost ciśnienia jest tak duży, że powoduje odpryski na powierzchni betonu. Tak więc, degradacja betonu wywołana działaniem ognia powoduje powstawanie rys, a także odprysków na jego powierzchni (3, 4).

Uszkodzenia wywołane przez wysokie temperatury są większe gdy temperatura przekracza 500°C, a większość zmian betonu zachodzących w tych temperaturach uważa się za nieodwracalne (5). Stwierdzono, że rysy powierzchniowe stają się widoczne, gdy temperatura osiąga 600°C. Pęknięcia są znacznie wyraźniejsze w temperaturze 800°C, a dalszy wzrost temperatury do 1000°C pogłębia ten efekt (6). Narażenie betonu na działanie wysokich temperatur, w zakresie pomiędzy 400°C i 800°C, przez dłuższy czas powoduje jego niszczenie oraz znaczny spadek wytrzymałości na ściskanie, który z kolei może prowadzić do niepożądanych uszkodzeń konstrukcyjnych (7). W związku z tym, zachowane po pożarze właściwości betonu mają duże znaczenie w celu określenia nośności i warunków koniecznych do przywrócenia właściwości eksploatacyjnych zniszczonych przez ogień konstrukcji.

#### 1. Introduction

Concrete is a non-homogenous material whose fire performance depends on the constituent materials viz. aggregates, cement paste and other ingredients. Concrete structures could be exposed to elevated temperature conditions, at which, ordinary concrete loses strength due to formation of cracks between cement paste and aggregate and associated thermal incompatibility between different ingredients. Some examples of such conditions are concrete foundations for launching rockets carrying spaceships, concrete structures in nuclear power stations or those accidentally exposed to fire (1). Concrete at elevated temperature may undergo considerable changes in the chemical and mechanical properties, resulting in the deterioration of concrete (2). When concrete is subjected to fire, some water in the concrete escapes from the surface and the rest is pushed back into the concrete. As the fire continues, more and more water attempts to move away from the surface and on getting restricted by concrete impermeability, the pressure builds up. In some cases, the pressure is so intense that the concrete spalls. Thus, the distress in concrete due to fire manifests in the form of cracking and spalling of concrete surface (3, 4). The alterations produced by high temperatures are more evident when the temperature surpasses 500°C and most changes experienced by concrete at this temperature level are considered irreversible (5). It was noticed that, the surface cracks become visible when the temperature reaches 600°C. The cracks will be more prominent at 800°C and further increase when the temperature rises to 1000°C (6). The exposure of concrete to high temperature, in the range between 400°C and 800°C, for long duration leads to its deterioration and significant loss in compressive strength, which in turn may result in undesirable structural failures (7). Therefore, the properties of concrete retained after a fire are important in determining the load carrying capacity and for reinstating fire-damaged constructions.

## 2. Znaczenie badań

Beton jest powszechnie stosowany jako materiał konstrukcyjny w budownictwie, a elementy betonowe takie jak belki, kolumny i inne, mogą być narażone na działanie wysokich temperatur, w przypadku niespodziewanego pożaru. Z tego powodu, odporność ogniowa staje się jednym z kluczowych zagadnień w projektowaniu betonu. Ważne jest poznanie zmian właściwości betonu, przede wszystkim wytrzymałości, spowodowanych działaniem podwyższonych temperatur (8). Konstrukcje betonowe poddane działaniu wysokich temperatur przechodzą szereg procesów fizycznych i chemicznych powodujących ich degradację. Narażenie betonu na działanie wysokich temperatur wpływa na wytrzymałość, sprężystość, gęstość oraz wygląd jego powierzchni. Wytrzymałość na ściskanie jest bardziej podatna na zmiany niż moduł sprężystości (9). Wiadomo, że zachowanie się betonu poddanego działaniu wysokich temperatur jest związane z kilkoma czynnikami, głównie z szybkością nagrzewania i maksymalną temperaturą. Temperatura powoduje dehydratację żelu C–S–H i  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  oraz inne przemiany fazowe, a także wywołuje różnice temperatur pomiędzy kruszywem a zaczynem cementowym (10). Ważne znaczenie, jak już wspomniano, ma określenie właściwości betonu zachowanych po narażeniu go na działanie ognia w celu określenia jego żywotności i warunków niezbędnych do przywrócenia mu właściwości eksploatacyjnych. W związku z tym, także poprawa odporności ogniowej betonu nabiera dużego znaczenia.

Badania zawarte w tej pracy przedstawiają wpływ wysokich temperatur na wytrzymałość na ściskanie oraz sorpcyjność betonu zwykłego, średniej klasy i betonu o dużej wytrzymałości, uzyskanych przy zastosowaniu różnych rodzajów kruszywa grubego.

## 3. Przegląd literatury

Dotychczasowe badania dotyczące odporności betonu na działanie ognia wykazały, że zachowanie się betonu zależy od kilku jednocześnie oddziałujących czynników, począwszy od składu betonu po warunki ogniowe. Malhotra (11), zbadał wpływ temperatury na wytrzymałość na ściskanie betonu. Wytrzymałość ta malała po ochłodzeniu materiału wcześniej podgrzanego, a efekt ten obserwowano niezależnie od stosunku w/c aż do temperatury 600°C, jednak zależał on od stosunku kruszywo/cement. Venecanin (12) zbadał wpływ gradientu temperaturowego poszczególnych składników betonu, na przykład kruszywa grubego i zaczynu cementowego, i stwierdził, że naprężenia rozciągające oraz pęknięcia w betonie mogą powstawać gdy współczynniki rozszerzalności cieplnej tych składników wykazują zbyt duże różnice. PothaRaju, i in. (13) badali wpływ podwyższonej temperatury [100°C, 200°C i 250°C utrzymywanych przez okres 1 h, 2 h i 3 h] na wytrzymałość na zginanie betonu. PothaRaju i JanakiRao (14), zbadał wpływ tej samej temperatury [100°C – 250°C] na resztkową wytrzymałość na ściskanie betonu popiołowego i zaobserwowali wzrost wytrzymałości, w przypadku zastosowania tego dodatku mineralnego. Noumowe (15), zbadał właściwości mechaniczne trzech betonów; o dużej wytrzymałości z włóknami polipropylenowymi i bez włókien

## 2. Research significance

Concrete is widely used as a structural material in building construction and the concrete elements like beams, columns etc., will be subjected to extreme temperatures in case of unexpected fire. Hence, fire resistance becomes one of the key considerations in design. It is important to understand the change in the concrete strength properties due to extreme temperature exposure (8). Concrete structures exposed to elevated temperature conditions suffer physical and chemical processes resulting in the deterioration of concrete. Characteristics such as color, compressive strength, elasticity, concrete density and surface appearance are affected by high temperature exposure. Compressive strength becomes more susceptible than modulus of elasticity (9). It is recognized that the behavior of concrete subjected to high temperature is a result of several factors such as heating rate, peak temperatures, dehydration of C–S–H gel, phase transformations, and thermal incompatibility between aggregates and cement paste (10). There is a need to determine the properties of concrete retained after a fire in order to determine its service life and for restoring fire-damaged constructions. Therefore, improving the fire resistance of concrete gains importance. The present study addresses the effect of sustained high temperatures on the compressive strength and sorptivity of ordinary, standard grade and high strength concretes made using varying types of coarse aggregates.

## 3. Literature review

Several investigations on the fire resistance of concrete revealed that the behaviour of concrete depends on several simultaneously interacting factors ranging from composition of materials to characteristics of fire. Malhotra (11), studied the effect of temperature on the crushing strength of concrete. The crushing strength decreased when cooled after heating, and it was observed to be independent of the w/c ratio up to 600°C but influenced by the aggregate/cement ratio. Venecanin (12) studied the effect of thermal incompatibility between concrete components (TICC) i.e. coarse aggregate and hydrated cement paste, and concluded that tensile stresses and crack formation in concrete can develop, if the coefficients of thermal expansion of these components differ too much. PothaRaju, et al. (13), investigated the effect of temperature [100°C, 200°C and 250°C for 1 h, 2 h and 3 h duration] on the flexural strength. PothaRaju and JanakiRao (14), investigated the influence of high temperature [100°C – 250°C] on residual compressive strength of fly ash concrete and reported an improvement in compressive strength with the use of this mineral addition. Noumowe (15), investigated on the mechanical properties of three concretes, viz., high-strength concrete with and without polypropylene fibres and lightweight aggregate concrete, after a heating and cooling cycle at 200°C. Thienel and Rostary (16), studied the influence of high temperature and biaxial stresses on the strength of unsealed concrete and mortar containing quartzite aggregate and bound by Portland cement. Hossain and Lachemi (17), investigated the strength and durability performance of concretes incorporating

oraz betonu z kruszywem lekkim, po cyklach ogrzewania i chłodzenia do temperatury 200°C. Thienel i Rostary (16), analizowali natomiast wpływ podwyższonej temperatury oraz dwuosioowych naprężeń na wytrzymałość betonu i zapraw z cementu portlandzkiego, zawierających kruszywo kwarcytowe. Hossain i Lachemi (17), zbadali wytrzymałość i trwałość betonów zawierających do 40% masowych popiołu wulkanicznego, jako materiału zastępującego cement, które poddano działaniu wysokich temperatur, aż do 800°C. Cheng i in. (18), prześledzili wpływ wysokiej temperatury na wytrzymałość i zależność naprężenie-odkształcenie betonu wysokowytrzymałościowego [BWW]. Reinhardt i Stegmaier (19), przeprowadzili badania różnych betonów samozagęszczających się o wytrzymałości na ściskanie wynoszącej od 25 do 65 MPa, poddając próbki działaniu ognia i porównując ich właściwości z referencyjnym betonem wibrowanym. Kodur i Phan (20), omówili cechy materiałowe konstrukcyjne i ogniowe, które wpływają na właściwości BWW w warunkach działania ognia, a Sancak i in. (21), zbadali zachowanie betonów lekkich konstrukcyjnych produkowanych przez Pumice oraz betonów ze standardowym kruszywem po poddaniu ich działaniu wysokich temperatur [20°C, 100°C, 400°C, 800°C, 1000°C] i stwierdzili większy stopień uszkodzeń w drugim betonie w porównaniu do betonu lekkiego. Spadek wytrzymałości na ściskanie wzrastał w zależności od zawartości pyłu krzemionkowego w temperaturze około 800°C i wyższej. Morsy i in. (22) ocenili wpływ wysokich temperatur [100°C, 200°C, 400°C, 600°C i 800°C] działających na próbki przez 2 godziny, na właściwości mechaniczne, skład fazowy oraz mikrostrukturę betonu z dodatkiem mączki kwarcytowej, częściowo zastępującej cement portlandzki w ilości 0%, 5%, 10%, 15% i 20%. Wyniki badań pokazały, że dodatek mączki kwarcytowej zastępującej cement portlandzki poprawia właściwości wyprodukowanego betonu z cementu wieloskładnikowego, poddanego działaniu podwyższonych temperatur do 400°C. Krishna Rao i in. (23), zbadali wpływ długotrwałego działania wysokich temperatur na właściwości betonów klasy M40, zawierających różne rodzaje cementów i przechowywanych w różnych warunkach. Odnotowano spadek wytrzymałości i utratę masy betonu rosnące wraz z temperaturą, podczas gdy normowe przechowywanie w wodzie pokazało doskonałe właściwości w porównaniu do próbek dojrzewających z zastosowaniem nieprzepuszczalnej folii. Koksai i in. (24), badali mikrostrukturę oraz właściwości mechaniczne czterech różnych mieszanek kompozytowych ze zmiennymi zawartościami wermikulitu ekspandowanego [bardzo lekkie kruszywo], przy narażeniu na działanie wysokich temperatur: 300°C, 600°C, 900°C i 1100°C utrzymywanych przez 6 godzin i stwierdzili, że beton lekki zawierający wermikulit wykazuje dobre właściwości w podwyższonych temperaturach. Balakrishnaiah i in. (25), przeprowadzili przegląd prac ostatnich autorów, którzy badali wpływ różnych domieszek, kruszyw i warunków dojrzewania na właściwości mechaniczne betonu w podwyższonych temperaturach [28°C do 1200°C].

#### 4. Zakres pracy

Głównym celem doświadczeń było zbadanie wpływu długotrwałego działania wysokich temperatur na wytrzymałość na ściskanie oraz

0 to 40% by mass of volcanic ash (VA) as cement replacement subjected to high temperatures up to 800°C. Cheng et. al (18), investigated the effects of high temperature on the strength and stress-strain relationship of high strength concrete [HSC]. Reinhardt and Stegmaier (19), conducted experiments on different SCCs with compressive strengths between 25 and 65 MPa, by subjecting test specimens to fire and related to the performance of a reference vibrated concrete. Kodur and Phan (20), discussed the material, structural and fire characteristics that influence the performance of HSC under fire conditions and Sancak et al. (21) investigated the behaviour of structural light-weight concretes produced by Pumice (LWC) and concretes with normal-weight aggregate (NWC) on their exposure to sustained elevated temperatures [20°C, 100°C, 400°C, 800°C, 1000°C] and reported higher deterioration rate in NWC in comparison to LWC. The loss of compressive strength increased depending on the ratio of SF at about 800°C and over. Morsy et al. (22), experimentally evaluated the influence of elevated temperatures [100°C, 200°C, 400°C, 600°C and 800°C for 2 hours] on the mechanical properties, phase composition and microstructure of silica fume concrete by partially replacing OPC in the range of 5%, 10%, 15% and 20%. The results showed that the addition of silica fume to OPC improves the performance of the produced blended cement concrete, when exposed to elevated temperatures up to 400°C. Krishna Rao et al. (23), investigated the effect of sustained elevated temperatures on the properties of M40 grade concretes, containing different types of cements and cured in two different conditions. The strength and weight loss of concrete was increasing with temperature while the conventional water curing showed superior performance over membrane curing. Koksai et al. (24), studied the microstructure, and mechanical properties of four different composite mixtures, with varying amounts of expanded vermiculite [a significant lightweight aggregate], by exposing to high temperatures of 300°C, 600°C, 900°C and 1100°C for 6 hours and concluded that lightweight concrete with vermiculite shows a good performance at elevated temperatures. Balakrishnaiah et al. (25), reviewed the works of past researchers, that studied the effect of using different admixtures, aggregates and curing conditions on the mechanical properties of concrete at elevated temperatures [28°C to 1200°C].

#### 4. Scope of the present work

The main objective of this study is to investigate the effect of sustained high temperatures on the compressive strength and permeability of concrete via water sorptivity test on concretes containing varying types of coarse aggregates. This paper presents the influence of high temperatures on concrete principally on compressive strength, weight and water sorptivity of 28-day cured concrete specimens. To achieve this objective, three different grades of concrete [M20, M40, M60], covering ordinary, standard grade and high strength concretes were considered. The other variable parameters of the study include type of coarse aggregate (crushed granite, quartz and feldspar), temperature [200°C, 400°C, 600°C and 800°C] and condition of test concrete [hot condition, air cooling



przepuszczalność betonu [oznaczona za pomocą badania nasiąkliwości], zawierającego różne rodzaje kruszywa grubego. W pracy przedstawiono wpływ wysokich temperatur na wytrzymałość na ściskanie, ubytek masy oraz sorpcyjność próbek betonu, po 28 dniach dojrzewania. W doświadczeniach zastosowano trzy różne klasy betonu [M20, M40, M60], obejmujące dwa betony zwykłe oraz jeden BWW. Innymi zmiennymi czynnikami były trzy rodzaje kruszywa grubego [granit łamany, kwarc oraz skaień], temperatura [200°C, 400°C, 600°C i 800°C] oraz różne warunki chłodzenia próbek w powietrzu oraz szybko w wodzie. Kostki betonowe o boku 100 mm podgrzewano przez 1 godzinę w piecu muflowym w różnych temperaturach: 200°C, 400°C, 600°C 800°C, w celu zbadania wpływu tych temperatur na właściwości betonu. Łącznie przygotowano 486 kostek sześciennych. Jak już wspomniano badano zmiany wytrzymałości na ściskanie i sorpcyjność tych próbek.

Próbki oznaczono w zależności od rodzaju kruszywa i klasy betonu: CG20 przygotowano z betonu klasy M20 zawierającego granit łamany jako kruszywo grube. Podobnie QZ40 i FS60 oznaczają kolejno klasy betonów M40 i M60 przygotowanych kolejno z kwarcu i skalenia jako kruszywa grubego.

## 5. Materiały

**Cement:** Zastosowano cement portlandzki zwykły klasy 53 zgodnie z normą indyjską IS: 12269 -2013 (26) o ciężarze właściwym 3,15. Jego konsystencja normowa, początek i koniec czasu wiązania oraz rozdrobnienie wynosiły odpowiednio 32%, 40 min, 178 min i 6,2%.

**Kruszywo drobne:** Do badań zastosowano piasek rzeczny należący do kategorii drugiej, zgodnie z normą indyjską IS: 383-1970 (27). Właściwości fizycznych podano w tablicy 1.

**Kruszywo grube:** Zastosowano granit łamany o maksymalnym rozmiarze ziarna wynoszącym 20 mm zgodny z normą indyjską IS: 383-1970 (27). Dwa pozostałe rodzaje kruszywa, czyli kwarc i skaień miały również maksymalną rozmiar ziarna wynoszący 20 mm. Właściwości fizyczne różnych rodzajów kruszywa grubego podano w tablicy 1. Krzywe rozkładu ziarnowego kruszywa grubego pokazano na rysunku 1. Warto zauważyć, że wszystkie kruszywa mają prawidłowy rozkład wielkości ziaren, a w przypadku łamanego granitu i skalenia jest on niemal identyczny.

**Woda:** Do badań użyto wody pitnej, którą wykorzystano zarówno do przygotowania mieszanki jak i do przechowywania próbek betonowych

**Superplastyfikator:** Zastosowano domieszkę Conplast SP 430, zgodną z normą indyjską IS: 9103-1999 (28), którą był sulfonowany kondensat naftalenowo-formaldehadowy

### 5.1. Skład mieszanki betonowej

Betony klasy M20 i M40 zaprojektowano zgodnie z normą IS: 10262-2009 (29), podczas gdy beton klasy M60 metodą Erntröya

and water quenching]. In this work, 100 mm concrete cubes were heated for 1 hour in a muffle furnace to varied temperatures ranging from 200°C to 800°C, in steps of 200°C, to evaluate the effect of sustained high temperatures on the performance of concrete.

## 5. Tests

The experimental program was designed to investigate the temperature effect on strength and sorptivity characteristics of concrete made with different types of coarse aggregates aforementioned. A total of 486 cubes of 100 mm size were cast, heated to four different peak temperatures and tested in three different conditions as already indicated. The compressive strength and sorptivity are the two properties considered for the study.

**Designation of specimens:** The specimens were designated based on the type of aggregate and grade of concrete. For example, specimen designated as CG20 represents the one of M20 grade concrete made using crushed granite as coarse aggregate. Similarly, QZ40 and FS60 denote those of M40 and M60 grade concretes made using quartz and feldspar as coarse aggregates respectively.

### 5.1. Materials

**Cement:** Ordinary Portland Cement (OPC) of 53 grade confirming to IS: 12269 -2013 (26) with a specific gravity of 3.15 was used. The standard consistency, initial & final setting times, and fineness were 32%, 40 min & 178 min, and 6.2% respectively.

**Fine Aggregate:** River sand confirming to Zone-II of IS: 383-1970 (27) was used in the study and its properties such as Specific Gravity, Bulk Density, and Fineness Modulus etc are determined. The details of the physical properties are shown in Table 1.

**Coarse Aggregate:** Properly graded crushed granite of 20 mm maximum size conforming to IS: 383-1970 (27) was used as coarse aggregate. Two other types of aggregates, namely quartz and feldspar of 20 mm maximum size are used in the experimental investigation. The physical properties of different types of coarse aggregates used are shown in Table 1. The particle-size distribution curves of coarse aggregates are shown in Fig.1. It could be observed that all the materials are well-graded and the gradation is almost identical in crushed granite and feldspar.

**Water:** Potable water was used in the experimental work for both mixing and curing.

**Superplasticizer:** Conplast SP 430, confirming to IS: 9103-1999 (28), a Sulphonated Naphthalene Formaldehyde solution was used as super plasticizer in the study.

### 5.2. Mix proportioning

M20 and M40 grade concretes were designed using IS: 10262-2009 (29) while M60 grade concrete was designed using Erntröy and Shacklock method (30). Superplasticizer was also used in

Tablica 1 / Table 1

WŁAŚCIWOŚCI FIZYCZNE KRUSZYWA DROBNEGO I GRUBEGO

PHYSICAL PROPERTIES OF FINE AND COARSE AGGREGATES

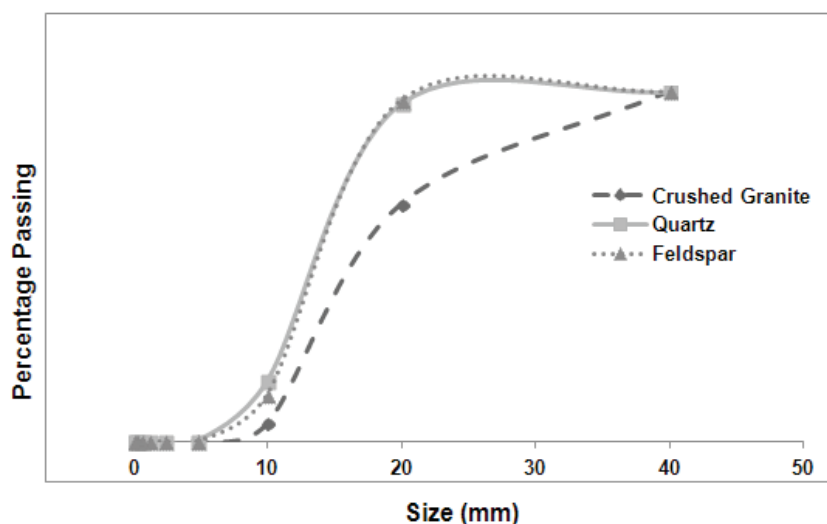
Właściwość / Property	Wielkość / Value			
	Kruszywo drobne Fine aggregate	Kruszywo grube / Coarse aggregate		
		Granit łamany Crushed granite	Kwarc Quartz	Skaleń Feldspar
Ciężar właściwy / Specific gravity	2.61	2.65	2.50	2.51
Moduł rozdrobnienia / Fineness modulus	3.58	7.24	7.86	7.89
Porowatość / Porosity	0.293	0.62	0.46	0.53
Wskaźnik porowatości / Void ratio	0.415	1.625	0.85	1.14
Zawartość wilgoci / Moisture content, %	1.0	0.20	0.20	0.20
Sorpcyjność / Water absorption, %	0.5	0.30	0.40	0.60
Gęstość nasypowa / Bulk density, kg/m <sup>3</sup> Loose: Zagęszczona / Compacted:	1664 1614	1567 1465	1393 1298	1320 1232
Zgniatanie / Crushing value, %	–	21.25	28.57	32
Udarność / Impact value, %	–	21.42	31.84	30
Ścieralność / Abrasion value, %	–	16	42.70	43.70

i Shacklocka (30). W niektórych mieszankach zastosowano superplastyfikator aby uzyskać odpowiednią urabialność. Zawartość różnych składników w m<sup>3</sup> betonu podano w tablicy 2. Przygotowano normowe kostki sześciennie o boku 100 mm, które przechowywano w wodzie po rozformowaniu, po 24 godzinach. Przed wygrzewaniem w piecu i późniejszymi badaniami próbki dojrzewały w wodzie przez 28 dni.

## 6. Wyniki doświadczeń

### 6.1. Wytrzymałość na ściskanie

Po 28 dniach dojrzewania w wodzie, próbki podgrzewano w piecu muflowym do różnych temperatur i przetrzymywano w tych temperaturach przez okres 1 godziny, po czym badano w różnych warunkach po chłodzeniu w powietrzu, po szybkim chłodzeniu w wodzie oraz szybko bez chłodzenia. Wyniki badań wytrzymałości na ściskanie betonów po 28 dniach pokazano na rysunkach 2-7. Wytrzymałość próbek betonów ze skaleniem i kwarcem była mniejsza od betonów ze standardowym kruszywem [tablice 3 i 4]. Można zauważyć, że wytrzymałość na ściskanie po 28 dniach niewygrzewanych próbek ze skaleniem i kwarcem była mniejsza odpowiednio o 4,9% i 9,1%; 5,0% i 12,6% oraz 3,7% i 5,9%, od próbek zawierających łamane kruszywo granitowe odpowiednio dla klas betonu M20, M40 i M60, pomimo że te betony zawierały mniej cementu i miały większy stosunek w/c. Podobne wyniki uzyskano także w podwyższonych temperaturach, z wyjątkiem dwóch w 600°C w przypadku betonu klasy M40, co może być błędem doświadczalnym.



Rys. 1. Rozkład wielkości ziaren kruszywa grubego

Fig. 1. Particle size distribution of coarse aggregates

some mixes to achieve the required workability. The quantities of various ingredients per m<sup>3</sup> of concrete are shown in the Table 2. Standard cubes of 100 mm size were prepared and water cured after demoulding the specimens at the end of 24 hours. The specimens were cured for 28 days in water prior to heating and testing.

## 6. Results of tests

### 6.1. Compressive strength of specimens

At the end of 28 days of water curing, all the specimens were heated in the Muffle furnace to different peak temperatures viz. 200,400,600 and 800°C and the specimens were maintained at these temperatures for 1 hour and tested under different condi-

Tablica 2 / Table 2.

SKŁAD BETONU, kg/m<sup>3</sup> ORAZ DODATEK SUPERPLASTYFIKATORA, ml

CONCRETE COMPOSITION, kg/m<sup>3</sup> AND DOSAGE OF SUPERPLASTICIZER, ml

	Mieszanka Mix	Cement	Kruszywo drobne Fine aggregate	Kruszywo grube Coarse aggregate	Zawartość wody Water content	w/c	SP
1	CG20*	350.00	611.96	1215.76	175.00	0.50	-
2	CG40	383.00	577.20	1114.68	190.96	0.50	-
3	CG60	383.00	577.20	1116.90	193.22	0.50	-
4	QZ20	450.00	461.70	1248.30	180.00	0.40	90
5	QZ40	450.00	446.27	1260.00	162.31	0.36	90
6	QZ60	450.00	446.27	1262.49	164.85	0.36	90
7	FS20	500.00	540.00	1270.00	165.00	0.33	250.00
8	FS40	481.41	520.00	1222.78	158.87	0.33	240.71
9	FS60	482.35	520.94	1225.17	160.00	0.33	241.18

\* CG – granit łamany / crushed granite, QZ – kwarc / quartz, FS – skaień / feldspar

Tablica 3 / Table 3

PROCENTOWY SPADEK WYTRZYMAŁOŚCI BETONU ZAWIERAJĄCEGO SKAŁEŃ JAKO KRUSZYWO GRUBE

% DECREASE IN STRENGTH OF CONCRETE WITH FELDSPAR AS COARSE AGGREGATE

	Wytrzymałość na ściskanie po 28 dniach (f <sub>c</sub> ) w N/mm <sup>2</sup> 28-day mean compressive strength (f <sub>c</sub> ) in N/mm <sup>2</sup>												
	Bez obróbki cieplnej Room	Po schłodzeniu powietrzem, w °C After air cooling, in °C				Na gorąco, w °C Heated conditions, in °C				Po szybkim schłodzeniu wodą, w °C After water quenching, in °C			
	Temp	200	400	600	800	200	400	600	800	200	400	600	800
M20	4.9	5.3	5.9	7.0	9.9	17.2	22.6	37.3	28.0	24.8	0.8	0.0	6.6
M40	5.0	16.8	17.0	22.8	8.0	12.7	37.3	30.2	7.6	13.3	13.6	-25.3	12.6
M60	3.7	7.5	10.3	21.4	3.0	4.2	18.0	11.4	8.4	-6.5	4.2	14.4	11.6

Tablica 4 / Table 4

PROCENTOWY SPADEK WYTRZYMAŁOŚCI BETONU ZAWIERAJĄCEGO KWARC JAKO KRUSZYWO GRUBE

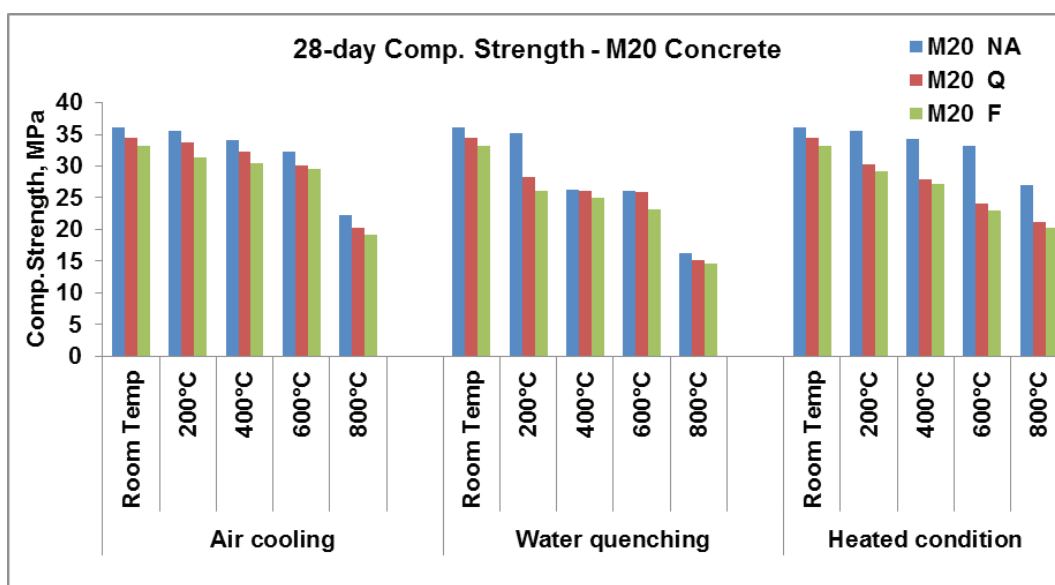
% DECREASE IN STRENGTH OF CONCRETE WITH QUARTZ AS COARSE AGGREGATE

	Wytrzymałość na ściskanie po 28 dniach (f <sub>c</sub> ) w N/mm <sup>2</sup> 28-day mean compressive strength (f <sub>c</sub> ) in N/mm <sup>2</sup>												
	Bez obróbki cieplnej Room	Po schłodzeniu powietrzem, w °C After air cooling, in °C				Na gorąco, w °C Heated conditions, in °C				Po szybkim schłodzeniu wodą, w °C After water quenching, in °C			
	Temp	200	400	600	800	200	400	600	800	200	400	600	800
M20	9.1	13.7	11.8	8.8	16.8	22.0	26.2	43.9	33.0	34.9	5.6	12.1	11.0
M40	12.6	20.3	20.8	25.8	11.0	9.1	46.4	36.2	12.4	18.6	21.2	-19.0	20.2
M60	5.9	13.1	15.0	23.9	7.6	14.3	23.4	13.7	11.5	0.9	7.1	17.9	18.7

### 6.1.1. Wpływ wzrostu temperatury na wytrzymałość na ściskanie

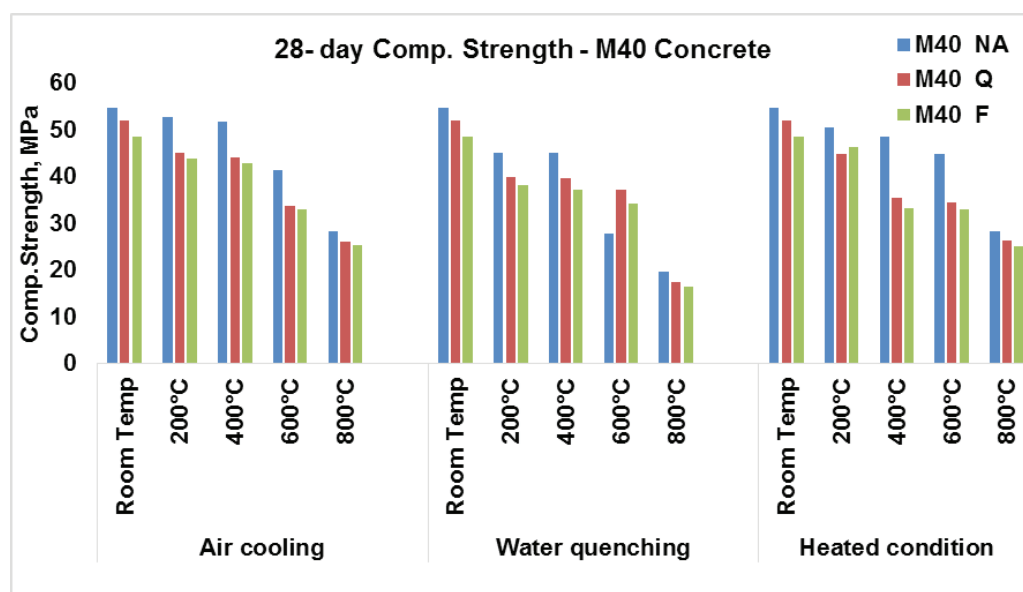
Wytrzymałość na ściskanie kostek sześciennych o boku 100 mm maleje wraz ze wzrostem temperatury [200°C, 400°C, 600°C i 800°C] w przypadku wszystkich badanych klas betonu z różnymi rodzajami kruszywa grubego, zastosowanego w badaniach. Można zauważyć, że wytrzymałość na ściskanie betonu z kwarcu lub

tions namely after air cooling, after water quenching and in hot condition. The details of the 28-day mean compressive strength of concretes made with crushed granite, quartz and feldspar as coarse aggregates at different temperatures and under varying test conditions are presented in Figs. 2-7. The results show the decrease in the strength of feldspar and quartz based concrete specimens respectively over conventional aggregate concrete [Tables 3 and 4]. It could be noted that the 28 day compressive



Rys. 2. Wpływ temperatury na wytrzymałość na ściskanie [M20]

Fig. 2. Compressive strength vs temperature [M20]



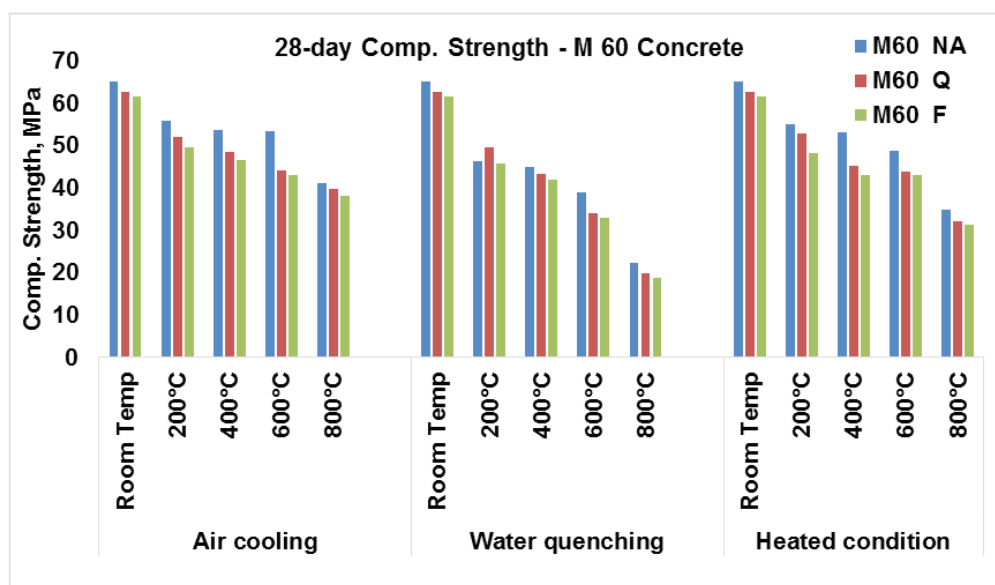
Rys. 3. Wpływ temperatury na wytrzymałość na ściskanie [M40]

Fig. 3. Compressive strength vs temperature [M40]

skalania jako kruszywa grubego wykazuje tendencję spadkową w porównaniu do betonu z granitem. Spadek wytrzymałości na ściskanie w betonach poddanych działaniu wysokich temperatur można przypisać zmianom mikrostruktury betonu. Zmiany takie jak skurcz, rozkład różnych faz oraz ekspansja mogą występować w trakcie działania ognia, co może być przyczyną zmniejszenia wytrzymałości. Spadek wytrzymałości betonu z kruszywem kwarcowym, przy jego ogrzaniu, może wiązać się z przemianą polimorficzną tego minerału w temperaturze 573°C, powodującej nagły, duży wzrost objętości, co prowadzi do powstawania rys w betonie (32). Z tego powodu, beton ogniotrwały nigdy nie jest wykonany z kruszywa kwarcowego [31, 32]. Należy zauważyć, że po poddaniu betonów działaniu różnych wysokich temperatur,

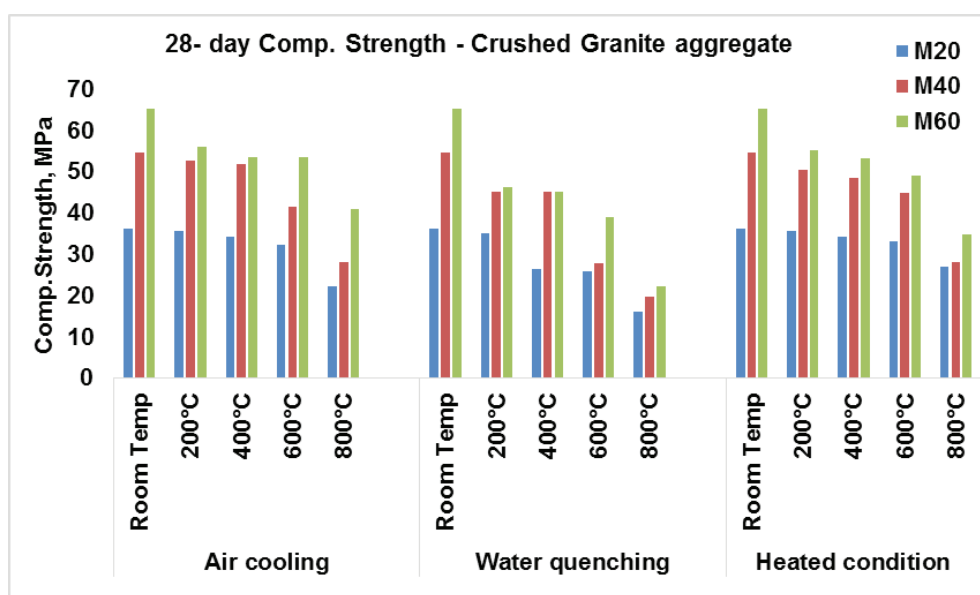
strength of unheated concrete specimens with quartz and feldspar aggregates recorded 4.9% and 9.1%, 5.0% and 12.6%, 3.7% and 5.9% lower values than the corresponding specimen containing crushed granite aggregate in respect of M20, M40 and M60 grades of concrete respectively. This result was found independently of the highest content of cement in concrete with feldspar aggregate and with the lowest w/c ratio.

Similar observations were noted at elevated temperatures also, except for two values at 600°C for M40 grade concrete which probably may be due to the experimental errors.



Rys. 4. Wpływ temperatury na wytrzymałość na ściskanie [M60].

Fig. 4. Compressive strength vs temperature [M60]



Rys. 5. Wpływ temperatury na wytrzymałość na ściskanie [granit łamany].

Fig. 5. Compressive strength vs temperature [crushed granite]

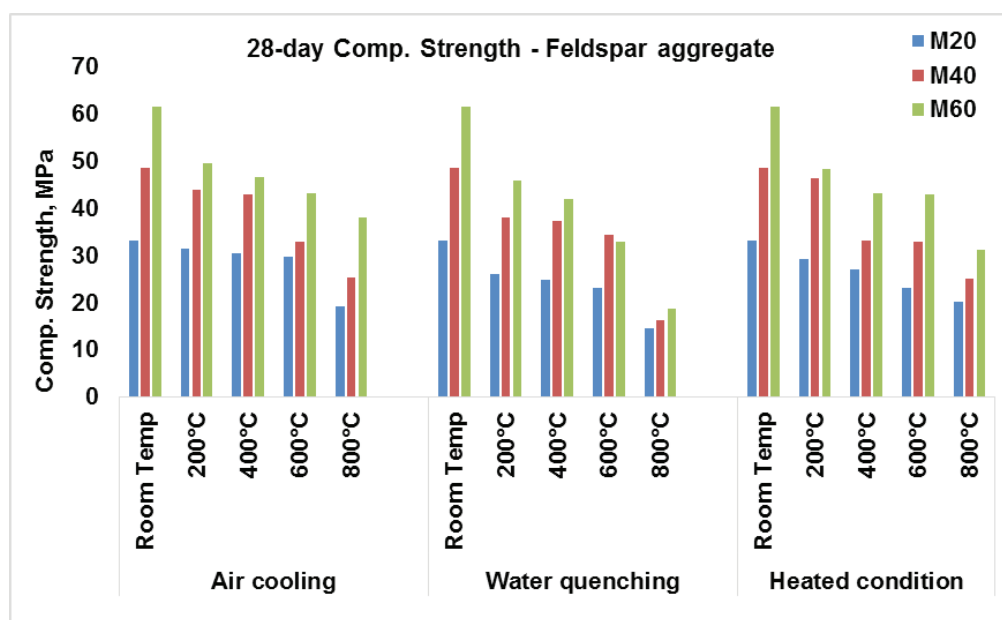
zmiany wytrzymałości badano w zmiennych warunkach; bez chłodzenia, po ochłodzeniu w powietrzu oraz po szybkim ochłodzeniu próbek w wodzie.

Szybkie chłodzenie w wodzie spowodowało większy spadek wytrzymałości, który zmienił się wraz ze wzrostem temperatury dla rozpatrywanych klas betonu, w porównaniu do próbek badanych na gorąco oraz po ochłodzeniu w powietrzu. Spadek wytrzymałości na ściskanie betonu z kruszywem granitowym po szybkim chłodzeniu w wodzie był mniejszy, w porównaniu do betonów z kruszywem grubym kwarcowym i skaleniowym. Stwierdzono, że różnica spadku wytrzymałości w przypadku betonów klas M20 i M40 jest większa niż dla klas M20 i M60 [rysunki 2-7].

### 6.1.1. Influence of temperature increase on compressive strength

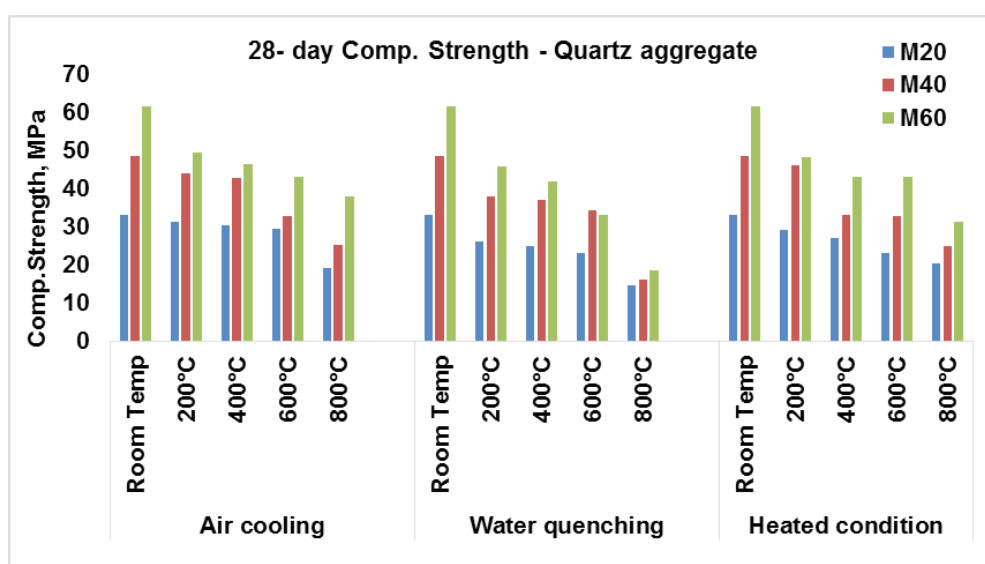
The compressive strength of 100 mm cubes was found to decrease with increase in the temperature [200°C, 400°C, 600°C and 800°C], in all grades of concretes made with different types of coarse aggregates considered for the study. It can be seen that compressive strength of concrete made with quartz and feldspar as coarse aggregates followed decreasing trend when compared with the crushed granite concrete. The compressive strength loss in concretes subjected to elevated temperatures can be attributed to changes in the concrete microstructure during the heating process. Changes like shrinkage, phases decomposition and expansion





Rys. 6. Wpływ temperatury na wytrzymałość na ściskanie [skaleń]

Fig. 6. Compressive strength vs temperature [feldspar]



Rys. 7. Wpływ temperatury na wytrzymałość na ściskanie [kwarc]

Fig. 7. Compressive strength vs temperature [quartz]

### 6.1.2. Wpływ rodzaju kruszywa grubego

Największą wytrzymałość na ściskanie zanotowano w przypadku próbek betonowych z kruszywem granitowym łamanym, podczas gdy najmniejszą wartość wykazały próbki betonu z kruszywem skaleniowym. Wyniki te wskazują na to, że rodzaj kruszywa ma znaczny wpływ na wytrzymałość na ściskanie betonu. Wiadomo, że skaleń ma mniejszą wytrzymałość niż granit czy kwarc, więc mała wytrzymałość jest w tym przypadku zrozumiała.

### 6.2. Sorpcyjność betonu

Badania nasiąkliwości przeprowadzono na próbkach sześciennych [100 mm] po 28 dniach normowego przechowywania w wodzie.

may occur during heating, which can be the possible reasons for decrease in strength. The decrease in strength of concrete with quartz aggregate, on heating, could be attributed to the reason that quartz undergoes polymorphic inversion at 573°C, involving a sudden huge volume increase, followed by crack formation with disruption in concrete (32). Due to this reason, fire-resistant concrete is never made with quartz aggregate (31, 32). It is to be noted that after subjecting concretes to different peak temperatures, the strength behaviour of concrete was tested under heated condition, after air cooling and after water quenching as well.

Water quenching was observed to cause higher decrease in compressive strength, in variable percentages, with increasing temperatures in different grades of concrete considered, as compared

Tablica 5 / Table 5

## SORPCYJNOŚĆ BETONU

## SORPTIVITY OF CONCRETE

	Średnia sorpcyjność betonu, ( ) Mean sorptivity of concrete, ( )														
	Łamane kruszywo granitowe Crushed granite aggregate					Kruszywo kwarcowe Quartz aggregate					Kruszywo skaleniowe Feldspar aggregate				
	Room temp.	200°C	400°C	600°C	800°C	Room temp	200°C	400°C	600°C	800°C	Room temp	200°C	400°C	600°C	800°C
M20	0.037	0.274	0.548	1.826	3.286	0.046	0.365	0.511	1.789	3.159	0.064	0.402	0.511	1.625	2.958
M40	0.028	0.256	0.529	1.588	2.629	0.037	0.201	0.456	1.388	2.501	0.046	0.237	0.438	1.278	2.483
M60	0.018	0.164	0.383	1.552	2.355	0.028	0.164	0.365	1.205	2.282	0.037	0.128	0.329	1.095	2.264

Próbki zważono przed badaniem. Sorpcyjność oznaczano przez pomiar szybkości absorpcji wody związanej z podciąganiem kapilarnym. Ilość wody zaabsorbowanej w ciągu 30 minut oznaczono przez kolejne ważenie próbki. Wodę z powierzchni próbki usunięto za pomocą zwilżonej ściereczki, po czym obliczono sorpcyjność. Sorpcyjność (N) jest to właściwość materiału, który absorbuje i transportuje wodę w wyniku podciągania kapilarnego. Sumaryczna sorpcyjność [na jednostkę powierzchni] rośnie z pierwiastkiem kwadratowym czasu jej trwania (t). Tak więc, sorpcyjność (N) można obliczyć z równania:

$$\text{sorpcyjność}(N) = l / t^{1/2} \quad [1]$$

gdzie, N oznacza sorpcyjność w mm/ $\sqrt{\text{min}}$ ; t oznacza czas w min;  $l = \Delta W / A \cdot d$ ;  $\Delta W$  wzrost masy; A powierzchnia próbki penetrowanej przez wodę; d gęstość wody.

W tablicy 5 podano wyniki sorpcyjności betonów różnych klas, z różnymi rodzajami kruszywa grubego, po 28 dniach dojrzewania. Beton z kruszywem skaleniowym miał mniejszą nasiąkliwość we wszystkich klasach betonu. Wiązało się to niewątpliwie z największą zawartością cementu i najmniejszym stosunkiem w/c. Sorpcyjność rośnie ze wzrostem temperatury ogrzewania betonu, niezależnie od jego klasy.

## 7. Wnioski

Na podstawie wyników badań betonów różnych klas uzyskanych z kilku rodzajów kruszyw, po poddaniu ich działaniu wysokich temperatur oraz chłodzonych w różnych warunkach, można wysunąć następujące wnioski:

1. Rodzaj kruszywa grubego ma znaczny wpływ na wytrzymałość na ściskanie; najmniejszą wytrzymałość miał beton ze skaleniowym kruszywem grubym, pomimo że miał znacznie

do air cooling and hot condition testing. The loss of compressive strength of concrete with crushed granite after water quenching has been lower, compared to concretes made with quartz and feldspar as coarse aggregate. It was found that the variation of strength decrease in M20 and M40 grade concretes is higher than that between M20 and M60 grades (Figs. 2-7).

### 6.1.2. Effect of type of coarse aggregate

The highest compressive strength, in all studied mixes, was found in the case of concrete specimens prepared with crushed granite aggregate, while the lowest value was recorded in the concrete specimens with feldspar aggregate. This indicates that the type of aggregate has a significant effect on compressive strength of concrete. Since feldspar is known to be weaker than crushed granite and quartz, the low load carrying capacity is understandable.

## 6.2. Water sorptivity of concrete

The cube specimens of size 100 x 100 x 100 mm were used to conduct sorptivity test at end of 28 days of conventional wet curing. The weight of the specimen was recorded prior to testing. Sorptivity was determined by the measurement of absorption rate of water due to capillary action. The quantity of absorbed fluid in a time period of 30 minutes was measured by weighing the specimen. Surface water on the specimen was wiped off with a dampened tissue and the sorptivity value was calculated. Sorptivity (S) is a material property which characterizes the tendency of a porous material to absorb and transmit water by capillarity. The cumulative water absorption (per unit area of the inflow surface) increases as the square root of elapsed time (t). Thus, sorptivity (S) can be calculated using the following equation,

$$\text{Sorptivity}(S) = l / t^{1/2} \quad [1]$$

większą zawartość cementu i mniejszy w/c od kruszywa z granitem.

- Spadek wytrzymałości na ściskanie betonu z granitu łamanego po poddaniu działaniu wysokich temperatur jest mniejszy w porównaniu do betonów z kruszywem kwarcowym i skaleniowym, w przypadku wszystkich klas betonu.
- Spadek wytrzymałości wzrasta wraz ze wzrostem temperatury w przypadku wszystkich klas betonu. Zmniejszenie wytrzymałości na ściskanie zmienia się wraz ze wzrostem temperatury w przypadku różnych klas betonu i z zastosowaniem różnych kruszyw grubych.
- Spadek wytrzymałości na ściskanie betonów po wygrzewaniu w piecu jest znaczny w przypadku próbek poddanych szybkemu chłodzeniu w wodzie w porównaniu do próbek po chłodzeniu w powietrzu oraz próbek badanych bez chłodzenia.
- Z porównania betonów przygotowanych z różnych kruszyw grubych: granitu, kwarcu oraz skalenia, beton z granitem wykazuje dobrą odporność na działanie ognia, natomiast beton z kruszywem kwarcowym ma lepsze właściwości od betonu z kruszywa skaleniowego.
- Sorpcyjność betonu maleje ze wzrostem jego klasy, a rośnie wraz ze wzrostem temperatury wygrzewania w betonach z różnym kruszywem grubym, bez wyjątku. Sorpcyjność jest mniejsza w betonach zawierających kruszywo granitowe w stosunku do betonów z kruszywem grubym kwarcowym i skaleniowym.
- Z punktu widzenia wytrzymałości i odporności ogniowej, kwarc jest lepszym kruszywem grubym niż skała.

## Podziękowania

Niniejsze badania przeprowadzono w laboratoriach Wydziału Inżynierii Lądowej, Instytutu Technologii Chaitanya Bharathi w Hyderabad w Indiach oraz Wydziału Metalurgii i Nauki o Materiałach, Instytutu Technologii Mahatma Gandhi, w Hyderabad w Indiach. Autorzy dziękują za współpracę kierownictwu Instytutów oraz za wsparcie i pomoc ze strony wszystkich pracowników tych jednostek.

## Literatura / References

- Toumi, B., Resheidat, M., Guemmadi, Z and Chabil, H. (2009). Coupled Effect of High Temperature and Heating Time on the Residual Strength of Normal and High-Strength Concretes. *Jordan Journal of Civil Engineering*, 3(4), 322-330.
- Heikal, M. Effect of Temperature on the Physico-Mechanical and Mineralogical Properties of HomraPozzolanic Cement Pastes, *Cem. Concr. Res.*, **30**, 1835-1839 (2000).
- Ali, F., Nadjai, A., Silcock, G. and Abu-Tair, A. (2004). Outcomes of a Major Research on Fire Resistance of Concrete Columns. *Fire Safety Journal*. 39(6), 433-445.
- Kalifa, P., Menneteau, D.F. and Quenard, D. *Cem. Concr. Res.*, **30**, 1915-1927 (2000).

where,  $S$  is the sorptivity in  $\text{mm}/\sqrt{\text{min}}$ ;  $t$  is the elapsed time in min; and  $I = \Delta W / A \cdot d$ ;  $\Delta W$ , increase in mass;  $A$  is the surface area of specimen through which water penetrates and  $d$  is the density of water.

Table 5 shows the details of water sorptivity of concrete for different grades of concrete (M20, M40 and M60) made using various types of aggregates [crushed granite, quartz and feldspar] at end of 28 days curing. The table depicts the variation of water sorptivity of various concretes at the end of 28-days curing. Feldspar aggregate concrete demonstrated a better sorptivity [low absorption] in the case of all the three grades of concrete considered. It was caused by the highest cement content and the lowest w/c ratio in this concrete. Sorptivity is found to increase with the increase of temperature, irrespective of concrete grade.

## 7. Conclusions

Based on the experimental investigations conducted on different grades of concrete using various types of aggregates and tested under different conditions after exposure to high temperatures, the following conclusions can be drawn:

- The type of coarse aggregate has a significant effect on the compressive strength and the lowest strength was noted in case of concrete with feldspar as coarse aggregate. As aforementioned this concrete has the highest cement content and the lowest w/c ratio.
- The percentage loss in compressive strength of crushed granite concrete is lower compared to quartz and feldspar concretes in all concrete grades, when subjected to varying peak temperatures.
- The loss of strength increases with increase in temperature for each grade of concrete. Loss of compressive strength occurs, in variable percentages, with increase in temperature in case of different grades of concretes produced using different types of coarse aggregates
- The loss of compressive strength of heated concrete is found significant in specimens tested after water quenching in comparison to those tested after air cooling and in hot condition as well.
- Among concrete mixes prepared using crushed granite, quartz and feldspar as coarse aggregates, the one with crushed granite offer superior fire resistance while the concrete of quartz aggregate exhibits better performance than the concrete with feldspar as aggregate.
- Water sorptivity decreases with increase in grade of concrete and increases with temperature in concretes made with varying types of coarse aggregates without exception. Sorptivity is less in concretes containing crushed granite aggregate as compared to those made of quartz and feldspar as coarse aggregates.
- Quartz is a more suitable alternative coarse aggregate than feldspar from strength and fire resistance point of view.

5. Luccioni, B.M., Figueroa, M.I. and Danesi, R.F. (2003). Thermo-mechanic Model for Concrete Exposed to Elevated Temperatures. *Engineering Structures*, **25** (6), 729-742.
6. Omer, A. (2007). Effects of Elevated Temperatures on Properties of Concrete. *Fire Safety Journal*, **42** (6), 516-522.
7. Chan, Y.N., Peng, G.F. and Anson, M. (1999). Residual Strength and Pore Structure of High-Strength Concrete and Normal Strength Concrete after Exposure to High Temperatures. *Cement and Concrete Composites*, **21** (1), 23-27.
8. Pathan, M.A., and Jammu, M.A. (2012) Compressive Strength Of Conventional Concrete And High Strength Concrete With Temperature Effect, *International Journal of Advanced Engineering Research and Studies*, **1** (3), 101-102.
9. Wang H.Y. (2008). The effects of elevated temperature on cement paste containing GGBFS, *Cement and Concrete Composites*, **30** (10), 992-999.
10. Sha, W and Pereira, B. (2001) "Differential scanning calorimetry study of ordinary Portland cement paste containing metakaolin and theoretical approach of metakaolin activity." *Cement Concrete Composites*. **23**, 455-461.
11. Malhotra H.L. (1956) Effect of temperature on the compressive strength of concrete. *Magazine of Concrete Research*, **8** (23), 85-94.
12. Venecanin S.D. (1990) "Thermal incompatibility of concrete components and thermal properties of carbonate rocks". *ACI Material Journal*, **87**(6), 602-607.
13. PothaRaju, M., Shobha, M. and Rambabu, K. (1993). Flexural strength of fly ash concrete under elevated temperatures. *Magazine of Concrete Research*, **56** (2), 83-88.
14. PothaRaju M. and JanakiRao. A. (2001) Effect of temperature on residual compressive strength on fly ash concrete. *Indian Concrete Journal*, **75** (5), 347-352.
15. Noumowe, A. N. (2003) Temperature Distribution and Mechanical Properties of High-Strength Silica Fume Concrete at Temperatures up to 200°C. *ACI Materials Journal*, **100** (4), 326-330.
16. Thienel, K.Ch. and Rostasy, F. S (2003). Strength of concrete subjected to high temperature and biaxial stress: Experiments and modelling. *Materials and structures*, **28** (10), 575-581.
17. Hossain, K.M.A., and Mohamed Lachemi (2004). Residual Strength and Durability of Volcanic Ash Concrete Exposed to High Temperature. *ACI Materials Journal*, **101** (6), 493-500.
18. Cheng, F.P., Kodur, V.K.R. and Wang, T.C. (2004). Stress-Strain Curves for High Strength Concrete at Elevated Temperatures, *Journal of Materials in Civil Engineering*, **16** (1), 84-90.
19. Reinhardt, H.W., and Stegmaier, M (2006). Self-Consolidating Concrete in Fire. *ACI Materials Journal*, **103** (2), 130-135.
20. Kodur, V.K.R. and Phan, L (2007). Critical factors governing the fire performance of high strength concrete systems. *Fire Safety Journal*, **42** (6), 482-488.
21. Sancak, Y.E, Sari, D, Simsek, O. (2008). Effects of elevated temperature on compressive strength and weight loss of the light-weight concrete with silica fume and super plasticizer. *ACI Materials Journal*, **95** (4), 395-406.
22. Morsy, M.S., Alsayed, S.H., and Aqel, M. (2010). Effect of Elevated Temperature on Mechanical Properties and Microstructure of Silica Flour Concrete. *International Journal of Civil & Environmental Engineering*, **10** (1), 1-5.
23. Krishna Rao, M.V., Shobha, M., and Dakshina Murthy, N.R. (2011). Effect of Elevated Temperature on Strength of Differently Cured Concretes- An Experimental Study. *Asian Journal of Civil Engineering (Building and Housing)*, **12** (1), 73-85.

## Acknowledgements

This research was carried out in the laboratories of the Department of Civil Engineering, CBIT, Hyderabad and Metallurgy and Material Science Department, MGIT, Hyderabad. The authors gratefully acknowledge the co-operation of Institutional administration, support and assistance provided by all staff working in these facilities.



24. Koksai, F., Gencel, O., Brostow, W., and HaggLobland, H. E. (2012). Effect of high temperature on mechanical and physical properties of lightweight cement based refractory including expanded vermiculite. *Materials Research Innovations*, **16** (1), 7-13.
25. Balakrishnaiah, D., Balaji, K.V.G.D., and SrinivasaRao, P. (2013). Study of Mechanical Properties of Concrete at Elevated Temperatures - A Review. *IJRET: International Journal of Research in Engineering and Technology*, **2** (8), 317-328.
26. IS: 12269-2013. Indian Standard Specification for Ordinary Portland cement-53 Grade (First Revision), Bureau of Indian Standards, New Delhi.
27. IS: 383-1970 (Reaffirmed 1997). Indian Standard Specification for coarse and fine Aggregates from Natural Source for concrete, Bureau of Indian Standards, New Delhi.
28. IS: 9103-1999 Indian Standard Specification for Concrete Admixtures, Bureau of Indian Standards, New Delhi.
29. IS: 10262-2009 Indian Standard Concrete Mix Proportioning-Guidelines (First Revision). Bureau of Indian Standards, New Delhi.
30. Krishna Raju, N. Design of Concrete Mixes, 4th Edition (2009): CBS Publishers & Distributors, New Delhi.
31. Lea, F.M (Edited by Hewlett, P.C). *Lea's Chemistry of Cement and Concrete (Fourth Edition)*, Elsevier Butterworth-Heinemann, 2004, p. 977.
32. Neville, A. M., *Properties of Concrete*, 5<sup>th</sup> edition, Pearson Education 2011, p. 148.