

Wpływ żużla pomiedziowego na właściwości mechaniczne i wytrzymałość różnych betonów

Effect of copper slag on mechanical and durability aspects for different strength concretes

M. Velumani¹, K. Nirmal Kumar²

¹K.S.Rangasamy College of Technology, Tiruchengode, Namakkal 637215, India

²Kongu Engineering College, Perundurai, Erode 638060, India

*corresponding author: M. Velumani; e-mail: mvelumani84@gmail.com

Streszczenie

W pracy zbadano wpływ żużla pomiedziowego na właściwości mechaniczne i wytrzymałość mieszanek betonowych o normalnej wytrzymałości [BNW] betonu o wysokiej wytrzymałości [BWW] i betonu ultra wysokowytrzymałego [BUWW]. Żużlem pomiedziowym, który jest produktem ubocznym z produkcji miedzi, zastępuje się kruszywo drobne w różnych proporcjach. Z badań wynika, że wytrzymałość na ściskanie ulega znacznej poprawie w przypadku zastąpienia do 60% kruszywa drobnego tym żużlem, we wszystkich mieszankach. Ponadto stwierdzono, że nawet całkowite zastąpienie kruszywa drobnego żużlem pomiedziowym zwiększa wytrzymałość na ściskanie i jest ona większa niż w przypadku mieszanki wzorcowej. Badania wytrzymałości, szybki pomiar penetracji chlorków, badanie sorpcji i nasiąkliwości wykazały znaczną odporność na penetrację chlorków, sorpcję i nasiąkliwość. Przyczynę znacznej poprawy wytrzymałości na ściskanie i trwałości betonu można przypisać zarówno aktywności pucolanowej tego żużla, jak i efektowi wypełniacza matrycy cementowej.

Słowa kluczowe: żużel pomiedziowy, fazy cementowe, gospodarka odpadami, wytrzymałość, beton

Summary

In the present study, the effect of copper slag on mechanical properties and durability aspects for Normal Strength Concrete [NSC], High Strength Concrete [HSC] and Ultra-High Strength Concrete [UHSC] mixes have been investigated. Copper slag, which is the by-product discharged from the copper manufacturing industry is replaced by fine aggregate in different proportions. It is observed from the studies that compressive strength has been significantly improved up to 60% replacement of fine aggregate by copper slag for all the mixes. Further, it is noted that even with 100% replacement of fine aggregate by copper slag, the compressive strength is higher than for the control mix. Durability studies such as rapid chloride penetration test, water sorptivity test and water absorption test showed significant resistance to chloride penetration, sorptivity and water absorption. The reason for significant improvement in compressive strength and durability aspects could be attributed to both pozzolanic activity and filler effect over the cementitious matrix effectively.

Keywords: copper slag, cementitious minerals, waste management, durability properties, concrete

1. Wprowadzenie

Beton jest unikalnym i bardzo ważnym materiałem konstrukcyjnym w historii ludzkości. Nie ulega wątpliwości, że wraz z rozwojem cywilizacji, beton będzie nadal dominującym materiałem budowlanym także w przyszłości. Jednak rozwój nowoczesnego przemysłu produkującego beton powoduje również wiele problemów dla środowiska, przede wszystkim zanieczyszczenia, składowanie odpadów, emisja niebezpiecznych gazów, zmniejszanie zasobów

1. Introduction

Concrete is an extraordinary and key structural material in the human history. There is no doubt that with the development of human civilization, concrete will continue to be a dominant construction material in the future. However, the development of modern concrete industry also introduces many environmental problems such as pollution, waste dumping, emission of dangerous gases, depletion of natural resources etc. By-products from various indu-

naturalnych. Produkty uboczne z różnych gałęzi przemysłu stanowią poważny problem ekologiczny na całym świecie. W celu zachęcenia do recyklingu odpadów i zapobiegania ich hałdowaniu, w krajach rozwiniętych wprowadzono podatek od składowania odpadów. Jednak składowanie odpadów jest nadal poważnym problemem dla środowiska na całym świecie. Wśród różnych produktów ubocznych powstających w przemyśle, popiół lotny [FA], granulowany żużel wielkopiecowy [GŻW] i żużel pomiedziowy [ŻM] wzbudziły duże zainteresowanie badaczy betonu (1–3).

Żużel pomiedziowy [ŻM] jest obecnie wykorzystywany do wielu zastosowań, przy czym zużywa się tylko około 15–20 % tego żużla (5–10). Światowy przemysł miedzi wytwarza około 24,6 mln ton żużla. Żużel pomiedziowy jest produktem ubocznym powstającym podczas eksploatacji pieców płomiennych. Zanieczyszczenia tworzą stop o mniejszej gęstości, unoszący się na powierzchni stopionej miedzi. Zanieczyszczenia te obejmują żelazo, wapń, krzemionkę i tworzą żużel. Żużel jest zgarniany z wierzchu, natomiast stopiony materiał, który zawiera do 50 procent miedzi, nazywany jest kamieniem. Kamień miedziowy przechodzi przez konwertor, który wdmuchuje w stop powietrze. Powietrze włącza krzemionkę z powrotem do kamienia miedziowego, aby zebrać zanieczyszczenia, co wytwarza więcej żużla. Żużel jest zgarniany i chłodzony powietrzem (11, 12). Ze względu na właściwości mechaniczne i chemiczne ŻM jest materiałem użytecznym i może być stosowany w betonie, jako częściowy zamiennik cementu portlandzkiego [CP] lub jako zamiennik kruszywa (15,18,20,21). Żużel pomiedziowy ma doskonałe właściwości akustyczne oraz szereg interesujących właściwości mechanicznych, a mianowicie dobrą odporność na ścieranie i dobrą trwałość, przy stosowaniu jako kruszywo do betonu (16, 17, 19). W literaturze można znaleźć szereg różnych zastosowań ŻM (4, 13, 14).

Dodatek żużla pomiedziowego poprawia urabialność i wytrzymałość betonu (22–24). Jednak, gdy zawartość żużla przekroczy 80%, wytrzymałość jest mniejsza, prawdopodobnie z powodu powstawania ettringitu. Ten beton wykazywał podobne właściwości mechaniczne i trwałość jak beton zawierający piasek (27, 39). Dodatek ŻM spowodował opóźnienie wiązania, ale nie wpłynął na trwałość betonu (5). Duży ciężar właściwy i szkliste właściwości powierzchni oraz nieregularny kształt ziaren ŻM powodują, że im większa jego zawartość jako drobnego kruszywa, tym większe wydzielanie mleczka przez zaczyn cementowy (37). Zmierzono wpływ dodatkowych materiałów cementowych na urabialność i stwierdzono, że zastąpienie 30% cementu popiołem lotnym może znacznie poprawić właściwości reologiczne mieszanki betonowej (31).

Ze względu na szybki wzrost urbanizacji znacznie rozwinięta infrastruktura jest niezbędna do wzrostu gospodarczego i dobrobytu. Wiele konstrukcji ważnych dla tej infrastruktury, zwłaszcza wykonanych z betonu zbrojonego, uległo poważnej degradacji od czasu ich wybudowania, z powodu połączonego oddziaływania soli odładzających, cykli zamrażania i rozmrażania, agresywnego środowiska i drastycznie zwiększonych obciążeń dodatkowych.

stries cause a major environmental problems around the world. In order to encourage waste recycling and prevent waste dumping, a landfill tax has also been imposed in the developed countries. However, waste dumping is still a serious environmental issue throughout the world. Among various by-products generated by the industries, Fly Ash [FA], Ground Granulated Blast-Furnace Slag [GGBS] and Copper Slag [CS] have attracted much attention by concrete researchers (1-3).

Copper slag is currently being used for many applications utilize only about 15–20 % of the copper slag generated (5-10). Approximately 24.6 million tons of slags are generated from the world copper industry (11). The copper slag is a by-product of operation of reverberator furnaces. Impurities form a less dense liquid floating on top of the copper melt. These impurities include iron, lime, silica, and form the slag. The slag is skimmed off the top, while the melted material which has up to 50 percent copper, is called matte. The copper matte goes through a converter to blow forced air into it. The air forces silica back into the copper matte to collect the impurities and make more slag. The slag is skimmed off and air-cooled (11-12). By virtue of copper slag's mechanical and chemical characteristics, it becomes usable material in concrete as a partial replacement for Portland cement or as a substitute for aggregates (16-21). Copper slag has a number of interesting mechanical properties such as excellent soundness characteristics, good abrasion resistance and good stability for using as aggregate (17-21). In the literature, it was noted that copper slag is being used for a variety of applications (4,13, 14).

The workability and strength of the concrete were enhanced by the addition of copper slag (22-24). However, as the content of CS exceeded 80%, lower strength was obtained possibly due to the formation of ettringite. The concrete exhibited similar mechanical properties and durability as that containing the conventional sand (25-31). The presence of CS caused the delay in setting time although this did not have any influence on its durability (32). The heavy specific weight and glass-like surface properties with irregular grain shape, the more the volume fraction of copper slag as a fine aggregate, the greater the bleeding (33-34). The influence of supplementary cementitious materials on workability was tested, and it was concluded that the replacement of cement by 30% of fly ash can significantly improve rheological properties of fresh concrete mix (35-36).

Due to fast growth in urbanization, a highly developed infrastructure is essential for economic growth and prosperity. Many structures essential to this infrastructure, especially those made of reinforced concrete, have suffered severe degradation since their construction due to the combined effects of deicing salts, freeze–thaw cycles, aggressive environments, and drastically increased live loads. One of the major problems facing the civil engineers of today is to preserve, maintain, and retrofit these structures. Concrete has been one of the most commonly used building materials in the world. The historical development of concrete material may be marked and divided into several stages. The consumption of natural aggregates by construction industries increased to 8-12 billion tons annually

Jednym z głównych problemów stojących przed współczesnymi inżynierami budownictwa jest zachowanie, konserwacja i modernizacja tych konstrukcji.

Beton jest jednym z najpowszechniej stosowanych materiałów budowlanych na świecie. Historyczny rozwój betonu może być podzielony na kilka etapów. Zużycie kruszyw naturalnych przez przemysł budowlany wzrosło do 8-12 mld ton rocznie, po 2010 roku (38, 39). Pierwszym z nich jest tradycyjny beton cementowy o normalnej wytrzymałości [BNW], następnym beton wysokowytrzymały [BWW] i na końcu beton ultra wysokowytrzymały [BUWW]. Ten ostatni ma wytrzymałość na ściskanie większą od 100 MPa, a także dużą wytrzymałość na rozciąganie – ponad 10% wytrzymałości na ściskanie (18 30, 32, 33). BWW ma wyraźną przewagę i wielki potencjał w szerokim zakresie zastosowań inżynierskich, do których należą schrony przeciwoatomowe, konstrukcje odporne na uderzenia, budowle jądrowe, drapacze chmur, konstrukcje odporne na korozję i chodniki. W celu poprawy wytrzymałości, odkształcalności i ciągliwości BUWW, w matrycy umieszcza się szereg krótkich włókien stalowych, które powstrzymują propagację rys. Osadzenie włókien stalowych w matrycy zwiększa ciągliwość i odkształcalność BUWW oraz zmniejsza dużą jego kruchość (14, 15, 20, 29, 34).

W obecnych doświadczeniach, zagadnienia mechaniczne i wytrzymałość były badane w przypadku betonu o normalnej wytrzymałości, betonu o wysokiej wytrzymałości i BUWW, przez zastąpienie w różnym stopniu kruszywa drobnego i piasku kwarcowego żużlem pomiedziowym.

2. Materiały i przygotowanie próbek

W badaniach stosowano następujące materiały: cement, kruszywo drobne, kruszywo grube, pył krzemionkowy, proszek kwarcowy, włókno stalowe i żużel pomiedziowy.

Żużel pomiedziowy jest szklistym granulowanym materiałem o dużym ciężarze właściwym. Do badań uzyskano ten żużel od Sterlite Industries of India Limited [SIIL], Tuticorin, Tamil Nadu, Indie. W tablicy 1 przedstawiono właściwości i skład chemiczny żużla pomiedziowego, użytego w badaniach. W tej tablicy podano również właściwości cementu portlandzkiego. Z danych z tej tablicy wynika, że ŻM ma dużą zawartość SiO_2 i Fe_2O_3 , w porównaniu z cementem portlandzkim. Od żużla pomiedziowego oczekuje się dobrych właściwości pucolanowych, ponieważ suma trzech tlenków – krzemionki, tlenku glinu i tlenku żelaza, przekracza 89%. Ciężar właściwy i gęstość żużla pomiedziowego określa się zgodnie z normą IS 2386 część III. Użyty żużel pomiedziowy miał ciężar właściwy 4,11 i gęstość nasypową 2,30 g/cm^3 . Są to wartości większe niż w przypadku kruszywa drobnego – te ostatnie mają odpowiednio 2,7 i 1,54 g/cm^3 . Dzięki temu z dodatkiem żużla uzyskuje się beton o większej gęstości. Ponadto nasiąkliwość żużla wynosi 0,42%, podczas gdy w przypadku piasku rzecznoego jest to około 0,8%. Wykazuje to, że żużel pomiedziowy ma mniejszą porowatość otwartą i może mieć mniejszą wodożądność w porównaniu

after 2010 (37). The first is the traditional NSC and followed by HSC, high performance concrete [HPC] and UHSC with axial compressive strength more than 100 MPa and also with a high tensile strength [more than 10% of the compressive strength] has been successfully developed (38). UHSC has a distinctive advantage and great potential in a wide range of engineering applications such as blast shelters, impact resistant structures, nuclear structures, skyscrapers, corrosion proof structures and pavements. In order to improve the strength deformability and toughness of a UHSC, a number of short steel fibers are embedded to restrain cracks in the matrix. Embedding steel fibers in the matrix enhances the toughness and deformation of UHSC and overcome the disadvantage of high brittleness (14, 15, 20-29, 39).

In the present investigation, mechanical and durability aspects have been studied for normal strength concrete, high strength concrete and ultra-high strength concrete by replacement of fine aggregate and quartz sand with copper slag in various percentages.

2. Materials and sample preparation

The materials used in this investigation were cement, fine aggregate, coarse aggregate, silica fume, quartz powder, steel fiber, copper slag.

Copper slag used for the present investigation was a glassy granular material with high specific gravity, obtained from Sterlite Industries of India limited [SIIL], Tuticorin, Tamil Nadu, India. Table 1 presents properties and chemical composition of copper slag used in the present studies. Table 1 also presents the companion values of OPC. From Table 1, it can be noted that CS has a high content of SiO_2 and Fe_2O_3 compared to OPC. Copper slag is expected to be a high quality pozzolana as the sum of three oxides: silica, alumina and iron oxide is exceeding 89%. The specific gravity and density of copper slag was determined in accordance with IS 2386 part III. Copper slag has a specific gravity of 4.11 and bulk density of 2.30 g/cm^3 which is higher than that of fine aggregate [2.7, 1.54 g/cm^3] which will result in concrete with higher density.

Tablica 1 / Table 1

SKŁAD CHEMICZNY CP I ŻM

CHEMICAL COMPOSITIONS OF OPC AND CS

Component / Składnik	OPC	CS
Density / Gęstość, kg/m^3	3140	3420
Mean particle size / Średni rozmiar ziaren, μm	25.00	4750
SiO_2 , %	20.85	33.05
Al_2O_3 , %	4.78	2.79
Fe_2O_3 , %	3.51	53.45
CaO, %	63.06	6.06
MgO, %	2.32	1.56
SO_3 , %	2.48	1.89
K_2O , %	0.54	1.07
$[\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3]$, %	29.14	89.29

Tablica 2 / Table 2

PROPORCJE MIESZANEK BNW, BWW I BUWW

MIX PROPORTIONS OF NSC, HSC AND UHSC

Mix Mieszanka	Cement	Fine aggregate Kruszywo drobne	Coarse aggregate Kruszywo grube	Silica fume Pył krzemionkowy	Quartz sand Piasek kwarcowy	Quartz powder Mączka kwarcowa	Steel fiber by volume Udział objętościowy włókien stalowych	w/c	SP %
NSC	1	1.23	2.46	-	-	-	-	0.44	-
HSC	1	-	-	0.23	1.5	-	2%	0.31	2.6
UHSC	1	-	-	0.24	1.0	0.38	2%	0.24	3.8

Tablica 3 / Table 3

SKŁAD MIESZANEK I ICH WŁAŚCIWOŚCI

MIX COMPOSITION AND CORRESPONDING PROPERTIES

Mix ID Oznaczenie mieszanki	Mix composition Skład mieszanki	Fresh concrete density Gęstość mieszanki betonowej, kg/m ³	Slump Opad stożka, mm	Compressive strength at 28 days Wytrzymałość na ściskanie po 28 dniach, MPa
NSC	NSC control / wzorcowy	2380	45	53.2
NSC-CS20	20%CS+80% S	2487	63	58.2
NSC-CS40	40%CS+60% S	2564	54	61.9
NSC-CS60	60%CS+40% S	2684	64	65.4
NSC -CS80	80%CS+20% S	2765	86	60.2
NSC-CS100	100%CS	2802	43	57.3
HSC	HSC control / wzorcowy	2540	80	89.6
HSC-CS20	20%CS+80% QS	2598	85	96.5
HSC-CS40	40%CS+60% QS	2684	75	102.7
HSC-CS60	60%CS+40% QS	2794	83	105.5
HSC -CS80	80%CS+20% QS	2954	82	99.5
HSC-CS100	100%CS	2987	78	94.3
UHSC	UHSC control / wzorcowy	2654	90	118.9
UHSC-CS20	20%CS+80% QS	2764	95	127.4
UHSC-CS40	40%CS+60% QS	2893	90	133.8
UHSC-CS60	60%CS+40% QS	2981	85	138.4
UHSC -CS80	80%CS+20% QS	3021	83	131.9
UHSC-CS100	100%CS	3092	94	125.6

NSC - normal strength concrete / beton o normalnej wytrzymałości [BNW], CS - copper slag / żużel pomiedziowy, S - sand [fine aggregate] / piasek [kruszywo drobne], HSC - high strength concrete / beton o wysokiej wytrzymałości [BWW], QS - quartz sand / piasek kwarcowy, UHSC - ultra high strength concrete / beton ultra wysokowytrzymały [BUWW]

z piaskiem, podczas przygotowywania mieszanki betonowej. Ze względu na nadmiarową wodę, dostępną w mieszance betonowej i większe ziarna żużla pomiedziowego, generalnie oczekuje się, że opad stożka betonu z żużlem, będzie większy.

Materiały i proporcje mieszanki ustalone dla BNW, BWW i BUWW podano w tablicy 2. W niniejszej pracy żużel pomiedziowy zastępował w różnym stopniu kruszywo drobne w normalnym betonie cementowym oraz piasek kwarcowy w BWW i BUWW. W tablicy 3 przedstawiono dane dotyczące różnych mieszaneek, badanych w pracy. Żużel pomiedziowy zastępował kruszywo drobne i piasek kwarcowy w różnych proporcjach, od 20% do 100%. Oznaczono

Further, water absorption was found to be 0.42% whereas for the case of river sand, it was about 0.8%. This indicates that copper slag has less surface porosity and it may require less water compared to sand while preparing concrete mix. Due to the free water available in concrete mix and larger coarseness of copper slag, it is generally expected that the slump of copper slag based concrete will be more.

The materials and mix proportions finalized for NSC, HSC and UHSC are presented in Table 2. In the present study, copper slag has replaced fine aggregate in NSC and quartz sand in HSC and UHSC in different percentages. Table 3 presents the details of

właściwości betonu, a mianowicie opad stożka oraz wytrzymałość na ściskanie po 28 dniach. W tablicy 3 przedstawiono właściwości różnych mieszanek.

3. Badania doświadczalne

Na podstawie danych zawartych w tablicy 3 można stwierdzić, że urabialność betonu wzrasta wraz z dodatkiem żużla pomiedziowego do mieszanki betonowej. Powodem może być mała nasiąkliwość żużla pomiedziowego. Można również stwierdzić, że wzrost urabialności zapewnia większą wytrzymałość w porównaniu z betonem konwencjonalnym, o małym stosunku wodno-cementowym. W przypadku niektórych mieszanek, w których udział kruszywa drobnego/piasku kwarcowego jest duży, stwierdzono wydzielanie mlecza i segregację. Można temu zapobiegać dodając popiół lotny lub pył skalny z kamieniołomu. Gęstość betonu zawierającego żużel pomiedziowy wzrasta wraz ze wzrostem zastąpienia kruszywa drobnego/piasku kwarcowego przez ten żużel. Wzrost ten wynosi od 10 do 20%, co można przypisać większemu ciężarowi właściwemu żużla pomiedziowego, w porównaniu do drobnego kruszywa, czyli piasku kwarcowego. Wytrzymałość na ściskanie wzrasta wraz ze wzrostem zastąpienia kruszywa drobnego lub piasku kwarcowego przez żużel pomiedziowy. Maksymalną wytrzymałość stwierdzono w przypadku zastąpienia 60% kruszywa drobnego lub piasku kwarcowego żużlem pomiedziowym. Wzrost ten wynosi około 20%, w porównaniu z odpowiednimi mieszankami kontrolnymi. Wytrzymałość na ściskanie w przypadku całkowitego zastąpienia kruszywa drobnego lub piasku kwarcowego żużlem pomiedziowym jest większa niż dla odpowiedniej mieszanki kontrolnej. Przyczynę znacznej poprawy wytrzymałości na ściskanie można przypisać zarówno aktywności pucolanowej żużla, jak i efektowi wypełniacza matrycy cementowej.

4. Właściwości mechaniczne

Przygotowanie próbek dla wszystkich mieszanek było ściśle kontrolowane, w celu zmniejszenia rozrzutu wyników badań. W przypadku BNW, próbki rozformowywano po 1 dniu i dojrzewały w wodzie, w temperaturze otoczenia przez 28 dni. W przypadku BWW i BUWW próbki po 1 dniu również rozformowywano i umieszczano w wodzie, w temperaturze otoczenia, na 2 dni. Następnie próbki umieszczano w autoklawie w temperaturze 90°C na okres 2 dni oraz w piecu w temperaturze 200°C na 1 dzień. Następnie próbki chłodzono powietrzem przez około 4 godziny i umieszczano w wodzie w temperaturze otoczenia na kolejny 1 dzień, przed badaniem. Wytrzymałość na ściskanie i rozciąganie przy rozłupywaniu oceniano przeprowadzając odpowiednie badania na próbkach walcowych o wymiarach 150×300 mm [rednica × wysokość] w przypadku BNW oraz na mniejszych próbkach cylindrycznych 75×150 mm w przypadku BWW i UBWW.

various mixes investigated in the present study. Copper slag has been replaced fine aggregate and quartz sand in various percentages ranging from 20% to 100%. The properties such as fresh concrete mix density, slump and compressive strength at 28 days have been evaluated. Table 3 presents the properties evaluated for various mixes.

3. Experimental investigation

From Table 3, it can be noted that:

- The workability of concrete mix increases with the addition of copper slag in the concrete mixes. The reason could be low water absorption of copper slag. It can also be interpreted that the increase in workability yields higher strength compared to conventional concrete with low water cement ratio. For some of the mixes where the % replacement of fine aggregate/quartz sand is high, signs of bleeding and segregation are noted. This can be taken care of by adding fly ash or quarry dust.
- The density of copper slag concrete increases with increase of replacement of fine aggregate/quartz sand by copper slag. The increase is about 10 to 20%, which can be attributed to higher specific gravity of copper slag compared to fine aggregate/quartz sand.
- Compressive strength increases with the increase of % replacement of fine aggregate or quartz sand by copper slag. The maximum strength is observed for the case of 60% replacement of fine aggregate or quartz sand by copper slag. The percentage increase is about 20% compared to respective control mixes. The compressive strength for the case of 100% replacement of fine aggregate or quartz sand by copper slag is more than the respective control mix. The reason for significant improvement in compressive strength could be attributed to both pozzolanic activity and filler effect over the cementitious matrix effectively.

4. Mechanical properties

The specimen preparation for all mixes was strictly controlled to minimize the scatter in the test results. For the case of NSC, the specimens were demoulded after 1 day and cured in a water tank at ambient temperature for 28 days. For the case of HSC and UHSC, the specimens were also demoulded after 1 day and immersed in water at ambient temperature for 2 days. The specimens were then placed in an autoclave at 90°C for 2 days and in an oven at 200°C for 1 day. Thereafter the specimens were air cooled for about 4 hours and placed in water at ambient temperature for a further 1 day before testing. Compression and split tensile strengths were evaluated by conducting appropriate tests on cylindrical specimens of $\phi 150$ mm \times 300 mm [diameter \times height] in the case of NSC and on smaller cylinders $\phi 75$ mm \times 150 mm in the case of HSC and UHSC.

5. Badania trwałości

W celu zbadania trwałości przeprowadzono szybki pomiar penetracji chlorków, badania sorpcji i nasiąkliwości. Badania przeprowadzono na próbkach cylindrycznych o grubości 50 mm wyciętych z walców o średnicy 100 mm i wysokości 200 mm po 28 dniach dojrzewania.

5.1. Szybki pomiar wnikania chlorków

Szybki pomiar wnikania chlorków przeprowadzono zgodnie z normą ASTM C1202. W tym celu nasączoną wodą próbkę betonową o grubości 50 mm i średnicy 100 mm poddano działaniu stałego napięcia wynoszącego 60 V przez 6 godzin, przy zastosowaniu urządzenia pokazanego na rys. 1. W jednym zbiorniku znajdował się 3,0 % roztwór NaCl, a w drugim 0,3 M roztwór NaOH. Określany jest całkowity przekazany ładunek, który jest wykorzystywany do oceny betonu. W szybkim pomiarze penetracji chlorków miarą przewodności elektrycznej betonu jest ilość przekazanych ładunków w czasie trwania próby, która wynosi około 6 godzin, zgodnie z normą ASTM C 1202 (2001).

5.2. Badanie absorpcji

Badanie nasiąkliwości przeprowadza się zgodnie z normą ASTM C 1585 (2001) na standardowej próbce, krążku o średnicy 100 mm i grubości 50 mm, w celu określenia szybkości absorpcji wody przez pory kapilarne w betonie. Absorpcja mierzona szybkością wnikania wody w pory kapilarne w betonie, określana jest nasiąkliwością kapilarną. Nasiąkliwość jest miarą jakości betonu i oznacza wpływ twardnienia przerywanego, w odróżnieniu od twardnienia ciągłego, na jakość betonu. Badanie nasiąkliwości przeprowadza się na próbkach po 28 dniach, zgodnie z normą ASTM C 1585 (2001).

5.3. Nasiąkliwość

Badanie nasiąkliwości przeprowadzono po 28 dniach, zgodnie z normą ASTM C 642 -11. Do badania nasiąkliwości, wałek o wymiarach 100 x 200 mm tnie się na trzy części: górną, środkową i dolną o grubości 50 mm i średnicy 100 mm, następnie próbki suszy się w suszarce, w temperaturze 100°C do 110°C, przez nie mniej niż 24 godziny. Po wyjęciu z suszarki każdą próbkę pozostawia się do ochłodzenia w suchym powietrzu w temperaturze 20-25°C i oznacza ich masę. Jeżeli różnica między wartościami uzyskanymi z dwóch kolejnych wartości masy przekracza 0,5%, próbki należy ponownie umieścić w piecu na dodatkowe 24 godziny suszenia. Powtarza się to postępowanie do momentu, gdy różnica między dwoma kolejnymi pomiarami będzie mniejsza od 0,5%, najmniejszej uzyskanej wartości. Następnie materiał zanurza się w wodzie, w temperaturze 23°C na 48 godzin lub aż do osiągnięcia równowagi. Próbkę wyjmuje się, suszy powierzchniowo, a następnie ponownie waży. Następnie umieszcza się je w autoklawie i gotuje przez 5 godzin, po czym chłodzi i stabilizuje przez około 14 godzin. Próbkę suszy się ponownie powierzchniowo i waży. Na koniec mierzy się masę, zanurzonej w wodzie próbki.

5. Durability studies

To study the durability aspects, Rapid chloride penetration test, sorptivity and water absorption tests were carried out. Cylinders of size $\phi 100$ mm x 200 mm were used to study the durability of concrete such as Rapid Chloride Penetration Test, Water Sorptivity Test and Water Absorption test. After 28 days, cylinders were cut into slices of 50 mm thickness, using concrete cutting machine, to carry durability tests.

5.1. Rapid Chloride Penetration Test [RCPT]

The rapid chloride penetration test was carried out as per ASTM C1202 test. In this, a water-saturated, 50 mm thick, 100 mm diameter concrete specimen was subjected to a 60 V applied DC voltage for 6 hours using the apparatus presented in Fig. 1. In one reservoir there was a 3.0% NaCl solution and in the other reservoir there was 0.3 M NaOH solution. The total charge passed was determined and this was used to rate the concrete. In rapid chloride penetration test, the charge passed is a measure of the electrical conductance of the concrete during the period of the test and was recorded as per ASTM C 1202 (2001).

5.2. Sorptivity test

Sorptivity testing was performed in accordance with ASTM C 1585 (2001) on the standard test specimens, 50 mm thick disks with a diameter of 100 mm. Sorptivity test measures the rate of penetration of water into the pores of concrete by capillary suction. Water sorptivity is used as a measure of concrete quality and discusses the effect of interrupted curing [as distinct from continuous curing] on the quality of concrete. The sorptivity test was carried out at the age of 28 day as per ASTM C 1585 (2001).

5.3. Water absorption

The water absorption test was carried out at the age of 28 day according to standard procedure ASTM C 642-11. For the water



Rys. 1. Stanowisko do szybkiego badania przepuszczalności chlorków

Fig. 1. Typical RCPT test set-up

6. Wyniki i dyskusja

6.1. Właściwości mechaniczne

W tabelicy 4 podano wytrzymałość na rozciąganie przy rozłupywaniu, która w przypadku BNW wynosi 3,8 MPa. Jest to około 7% wytrzymałości na ściskanie. W przypadku BWW, wytrzymałość ta wynosi około 18% wytrzymałości na ściskanie. Wzrost wytrzymałości jest znaczny w porównaniu z BNW. Ponadto z tabelicy 4 wynika, że BUWW ma wysoką wytrzymałość na ściskanie – około 119 MPa oraz na rozciąganie 19,9 MPa. Ta wysoka wytrzymałość może być spowodowana ścisłym upakowaniem ziaren, które wynika z dobrego rozmieszczenia cząstek, ponieważ składniki mają wymiary przypadające w mezo- i mikroskali.

6.2. Szybki pomiar dyfuzji chlorków

W tabelicy 5 podano dyfuzję jonów chlorkowych BWW i ten beton zmodyfikowany nano-cząstkami. Z danych zamieszczonych w tabelicy 5 wynika, że średni ładunek przekazany przez jony chlorkowe do kontrolnego BNW wynosi 2630 kulombów i wzrasta on wraz ze zwiększeniem zastąpienia kruszywa drobnego żużlem pomiedziowym. Średni ładunek przekazany w przypadku 100% zastąpienia kruszywa drobnego żużlem pomiedziowym wynosi 2801 kulombów, co stanowi zaledwie około 10% wzrostu w stosunku do wartości kontrolnej. Dla przypadków BWW i BUWW stwierdzono, że wszystkie mieszanki dają bardzo dobre wyniki w odniesieniu do BNW, BWW i BUWW z kruszywem z żużla pomiedziowego, co widać na rysunku 2.

6.3. Badanie sorpcji

W tabelicy 5 przedstawiono wyniki sorpcji różnych mieszanek. Wyniki te wykazują, że absorpcja w przypadku mieszanki kontrolnej BNW wynosi 15,0 i następuje marginalny wzrost sorpcji, wraz ze wzrostem zastąpienia kruszywa drobnego żużlem pomiedziowym. Z rysunku 3, dla pozostałych mieszanek BWW i BUWW, wynika, że absorpcja minimalnie maleje wraz ze wzrostem zastąpienia piasku kwarcowego żużlem pomiedziowym, co wykazuje, że migracja wody w porach betonu jest mniejsza, w porównaniu z mieszankami kontrolnymi.

6.4. Badanie nasiąkliwości

Na rysunku 4 pokazano typowe wyniki badania nasiąkliwości. W tabelicy 5 przedstawiono średnie wartości nasiąkliwości różnych mieszanek BNW, BWW i BUWW. Z danych przedstawionych w tej tabelicy wynika, że średnia nasiąkliwość dla kontrolnego BNW wynosi 4,3, a dla BNW ze 100% zastąpieniem kruszywa drobnego żużlem miedziowym – 4,75. W przypadku kontrolnego BWW średnia nasiąkliwość wynosi 3,2,

absorption test, $\phi 100$ mm x 200 mm cylinder was cut into three parts: top, middle, bottom, of 50 mm thickness and 100 mm diameter. Next specimens were dried in an oven at 100°C to 110°C for not less than 24 hours. After removing each specimen from the oven, it was cooled down in dry air to a temperature of 20°C to 25°C and the mass was determined. If the difference between values obtained from two successive values of mass exceeded 0.5% of the lesser value, the specimens were returned to the oven for an additional 24h drying period, and the procedure was repeated until the difference between any two successive values was less than 0.5% of the lowest value obtained. The material was then immersed in water, at 23°C for 48 hours or until equilibrium. The specimens were removed, surface dried and then weighed again. It was then placed in an autoclave and boiled for 5 hours and then allowed to lose heat and maintain temperature for about 14 hours. The specimens were again surface dried and weighed. Finally the immersed weight of the specimen in water was measured.

6. Result and discussion

6.1. Mechanical properties

From Table 4, it can be noted that the split tensile strength for the case of NSC is 3.8 MPa. It is about 7% of compressive strength. In the case of HSC, the split tensile strength is about 18% of compressive strength. The increase in strength is significant compared to NSC. Further, it can be observed from Table 4 that UHSC has high compressive strength of about 119 MPa and tensile strength of 19.9 MPa. This high strength could be attributed to the close packing of grains which is on account of good grading of the particles as the ingredients are at meso and micro scales.

6.2. Rapid Chloride Penetration Test (RCPT)

Table 5 shows the chloride ion penetrability on HSC and nano modified HSC. From the Table 5 it can be noted that the average charge passed for NSC control is 2630 coulombs and the charge is increasing with increase of percentage replacement of fine aggregate by copper slag. The average charge passed for 100% replacement of fine aggregate by copper slag is 2801 Coulombs, which is just about 10% increase compared to control. For the cases of HSC and UHSC, it can be noted that all the mixes are

Tablica 4 / Table 4

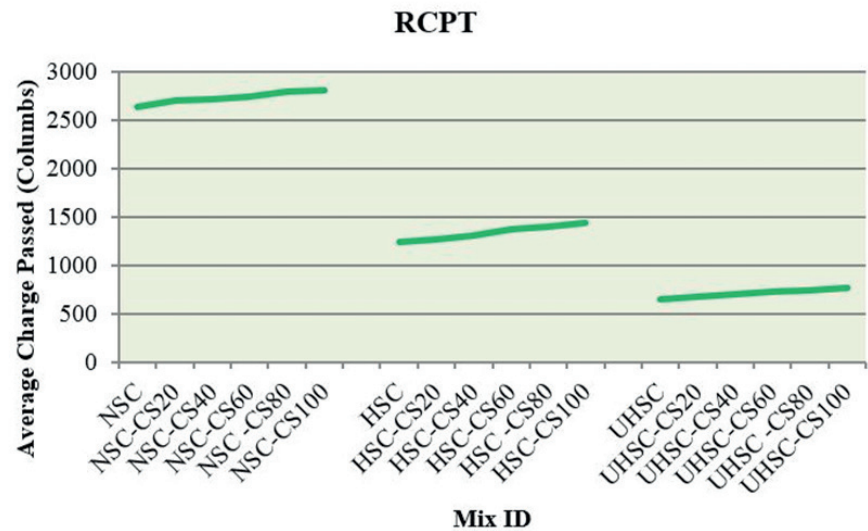
WŁAŚCIWOŚCI MECHANICZNE BNW, BWW I BUWW
MECHANICAL PROPERTIES OF NSC, HSC AND UHSC

Mix Mieszanka	Cylinder compressive strength Wytrzymałość na ściskanie walca, MPa	Split tensile strength Wytrzymałość na rozciąganie przy rozłupywaniu, MPa	Modulus of elasticity Moduł sprężystości, GPa
NSC / BNW	53.2	3.8	34.6
HSC / BWW	89.6	14.9	37.8
UHSC / BUWW	118.9	19.9	41.9

a w przypadku BWW, z całkowitym zastąpieniem piasku kwarcowego przez żużel pomiedziowy, wynosi 3,56. Natomiast dla kontrolnego BUWW wynosi ona 2,34 i 2,50, w przypadku 100% zastąpienia piasku kwarcowego żużlem pomiedziowym. Ogólnie rzecz biorąc, na podstawie rysunku 4 można stwierdzić, że wraz ze wzrostem procentowego udziału żużla pomiedziowego, dla wszystkich mieszanek następuje nieznaczny wzrost nasiąkliwości.

7. Wnioski

Zbadano właściwości mechaniczne i wytrzymałość betonów: BNW, BWW i BUWW z żużlem pomiedziowym. Żużel pomiedziowy zastępował w różnych proporcjach kruszywo drobne i piasek kwarcowy. Z wyników przeprowadzonych badań można wyciągnąć następujące wnioski.



Rys. 2. Ładunek w kulombach przekazywany w różnych mieszankach

Fig. 2. Charge in coulombs passed in various mixes

Tablica 5 / Table 5

WŁAŚCIWOŚCI TRWAŁOŚCIOWE BNW, BWW I BUWW Z ŻUŻLEM POMIEDZIOWYM

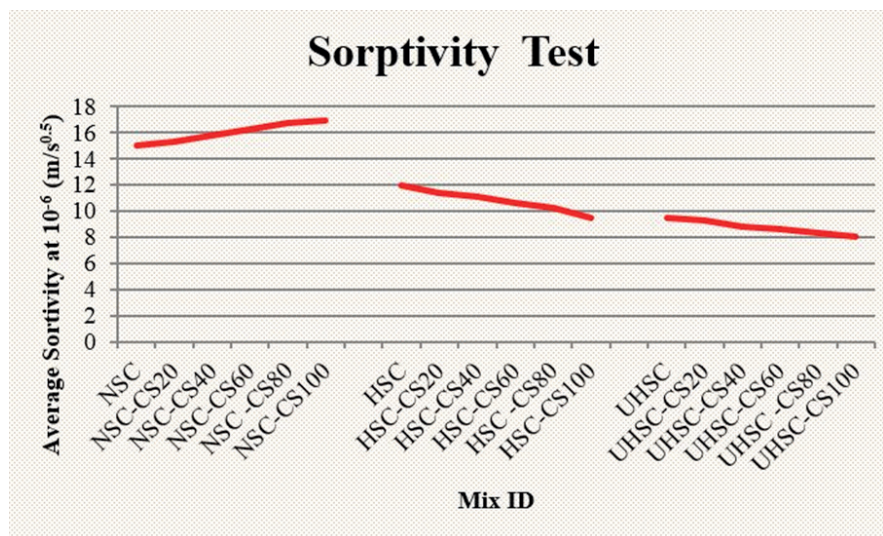
DURABILITY ASPECTS OF COPPER SLAG BASED NSC, HSC AND UHSC

Mix ID Oznaczenie mieszanki	Mix composition Skład mieszanki	Average charge passed, coulombs Średni przepuszczony ładunek w kulombach	Penetrability class (ASTM C 1202) Klasa przenika-łności wg ASTM C 1202	Average sorptivity Średnia absorpcja, $\times 10^{-6} \text{ m/s}^{0.5}$	Average water absorption Średnia nasiąkliwość, %
NSC	NSC control / Wzorcowy BNW	2630	Moderate / Umiarkowana	15	4.30
NSC-CS20	20%CS+80% S	2702	Moderate / Umiarkowana	15.3	4.40
NSC-CS40	40%CS+60% S	2712	Moderate / Umiarkowana	15.8	4.50
NSC-CS60	60%CS+40% S	2734	Moderate / Umiarkowana	16.3	4.50
NSC-CS80	80%CS+20% S	2786	Moderate / Umiarkowana	16.7	4.70
NSC-CS100	100%CS	2801	Moderate / Umiarkowana	16.9	4.75
HSC	HSC control / Wzorcowy BWW	1234	Low / Mała	12	3.20
HSC-CS20	20%CS+80% QS	1267	Low / Mała	11.4	3.21
HSC-CS40	40%CS+60% QS	1301	Low / Mała	11.1	3.34
HSC-CS60	60%CS+40% QS	1365	Low / Mała	10.6	3.45
HSC-CS80	80%CS+20% QS	1396	Low / Mała	10.2	3.51
HSC-CS100	100%CS	1432	Low / Mała	9.5	3.56
UHSC	UHSC control / Wzorcowy BUWW	650	Very low / Bardzo mała	9.5	2.34
UHSC-CS20	20%CS+80% QS	675	Very low / Bardzo mała	9.3	2.37
UHSC-CS40	40%CS+60% QS	698	Very low / Bardzo mała	8.8	2.41
UHSC-CS60	60%CS+40% QS	721	Very low / Bardzo mała	8.6	2.45
UHSC-CS80	80%CS+20% QS	743	Very low / Bardzo mała	8.3	2.48
UHSC-CS100	100%CS	765	Very low / Bardzo mała	8.0	2.50

- Występuje wzrost gęstości o około 5 do 20% wraz ze wzrostem zawartości żużla pomiedziowego.
- Stwierdzono, że urabialność jest lepsza.
- Największą wytrzymałość na ściskanie uzyskano w przypadku BNW i wynosi 65,4 MPa, przy zastąpieniu 60% kruszywa drobnego żużlem pomiedziowym. Wytrzymałość kontrolnego BNW wynosi 53,2 MPa. Wytrzymałość BNW w przypadku 100% zastąpienia kruszywa drobnego żużlem pomiedziowym wynosi 57,3 MPa i jest większa od wytrzymałości mieszanki kontrolnej. Podobne spostrzeżenia odnoszą się do BWW i BUWW.

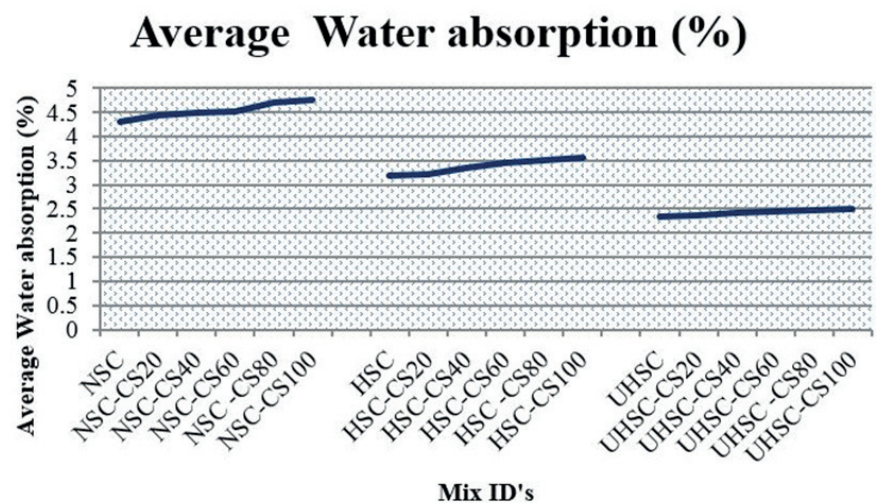
Literatura / References

1. Alpa, H.Deveci, Utilization of flotation wastes of copper slag as raw material in cement production. *J. Hazard. Mater.* **159**(2-3), 390-395 (2008). <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2008.02.056>.
2. A.M. Arino, B. Mobasher, Effect of copper slag on the strength, and toughness of cementitious mixtures, *ACI Mater. J.* **96**(1), 68-75 (1999). <https://doi.org/10.14359/430>
3. ASTM C618-99, Standard Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use in Concrete. ASTM International, 1999.
4. T. Ayano, O. Kuramoto, K. Sakata, Concrete with Copper Slag Fine Aggregate. *J. Soc. Mat. Sci. Japan* **49**(10), 1097–1102 (2000).
5. T. Ayano, K. Sakata, Durability of concrete with copper slag fine aggregate. *Proc. 5th CANMET/ACI Int. Conf. Durability of Concrete. ACI Sp. Publ.* **SP-192**, 141–158 (2000).
6. K. Al Jabri, Makoto Hisada, Copper slag as sand replacement for high performance concrete. *Cem. Concr. Comp.* **31**(7), 483-488 (2009) <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2009.04.007>
7. K. Al Jabri, R. Taha, M. Al-Ghassani, Use of copper slag and cement by-pass dust as cementitious materials. *Cem. Concr. Aggreg.* **24**, 7-12 (2005).
8. K.S. Al Jabri, H. Abdullah, T. Ramzi, Effect of copper slag and cement by-pass dust addition on mechanical properties of concrete. *Constr. Build. Mater.* **20**(5), 322-33 (2006). <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2005.01.020>.
9. K.S. Al Jabri, R.A. Taha, A.S. Al Hashmi, Effect of copper slag as a fine aggregate on the properties of cement mortars and concrete. *Constr. Build. Mater.* **25**(5), 933-938 (2011). <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2010.06.090>.
10. K.S. Aljabri, H. Makoto, H.A. Abdulla, S.K. Aloraini, Performance of high strength concrete made with copper slag as a fine aggregate. *Constr. Build. Mater.* **23**(6), 2132-2140 (2009). <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2008.12.013>.
11. L. Massidda, U. Sanna, E. Cocco, P. Meloni, High pressure steam curing of reactive-powder mortars, *ACI SP200-27*, **200**, 447–64 (2001)
12. A.K. Biswas, W.G. Davenport, Extractive metallurgy of copper. Pergamon Press, 2002.



Rys. 3. Wyniki absorpcji różnych mieszanek

Fig. 3. Sorptivity test result for various mixes



Rys. 4. Nasiąkliwość różnych mieszanek

Fig. 4. Water absorption for various mixes

performing very well with respect to copper slag based NSC, HSC and UHSC as observed from Fig. 2.

6.3. Sorptivity Test

Table 5 shows the sorptivity values for various mixes. From Table 5, it can be noted that the sorptivity value for NSC control mix is 15.0 and there is marginal increase of sorptivity with increase of replacement of copper slag by fine aggregate. From Fig. 3, for other mixes like HSC and UHSC, it can be noted that sorptivity values are marginally decreasing with the increase of percentage replacement of quartz sand by copper slag, which indicates the penetration of water into the pores of concrete is less compared to control mixes.

6.4. Water Absorption Test

Figure 4 shows the typical water absorption test. Table 5 shows the average water absorption values for various cases of NSC, HSC

13. O. Burgos-Montes, M.M. Alonso, F. Puertas, Viscosity and water demand of limestone- and fly ash-blended cement pastes in the presence of superplasticisers. *Constr. Build. Mater.* **48**, 417–423 (2013). <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.07.008>.

14. S. Caijun, M. Christian, B. Ali, Utilization of copper slag in cement and concrete. *Resour. Conserv. Recyc.* **52**, 1115–1120 (2008). <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2008.06.008>.

15. S. Caliskan, A. Behnood, Proc. 7th Int. Conf. Concrete Technology in Developing Countries, Malaysia, 91–98 (2004).

16. Y.W. Chan, S.H. Chu, Effect of silica fume on steel fiber bond characteristics in reactive powder concrete. *Cem. Concr. Res.* **34**, 1167–1172 (2004). <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2003.12.023>.

17. P. Goltermann, V. Johansen, L. Palbol, Packing of aggregate an alternative tool to determine the optimal aggregate Mix. *ACI Mater. J.* **94**(5), 435–443 (1997).

18. G. Guvensoy, F. Bayramov, A. Ilki, C. Sengül, M.A. Tasdemir, A.N. Kocatürk, M. Yerlikaya, Int. Symp. Ultra High Performance Concrete, **13**, 649–60 (2004).

19. S.H. Han, J.K. Kim, Y.D. Park, Prediction of compressive strength of fly ash concrete by new apparent activation energy function. *Cem. Concr. Res.* **33**(7), 965–71 (2003). [https://doi.org/10.1016/S0008-8846\(03\)00007-3](https://doi.org/10.1016/S0008-8846(03)00007-3).

20. P. Gorai, R.K. Jana, Premchand, Characteristics and utilisation of copper slag—a review. *Resour. Conserv. Recy.* **39**(4), 299–313 (2003). [https://doi.org/10.1016/S0921-3449\(02\)00171-4](https://doi.org/10.1016/S0921-3449(02)00171-4).

21. J. Deja, J. Malolepszy, Proc. 3rd Int. Conf. The use of Fly-Ash, Silica Fume, Slag and Natural Pozzolans in Concrete, **SP-114**, Norway. ACI, 1547–1561 (1989).

22. E. Douglas, P.R. Mainwaring, Hydration and pozzolanic activity of nonferrous slags. *Am. Ceram. Soc. Bull.* **64**, 700–706 (1985).

23. M. Khanzadi, A. Behnood, Mechanical properties of high-strength concrete incorporating copper slag as coarse aggregate. *Constr. Build. Mater.* **23**(6), 2183–2188 (2009). <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2008.12.005>.

24. M.G. Lee, Y.C. Wang, C.T. Chiu, A preliminary study of reactive powder concrete as a new repair material. *Constr. Build. Mater.* **21**(1), 182–189 (2007). <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2005.06.024>.

25. M.A. Mannan, C. Ganapathy, Concrete from an agricultural waste-oil palm shell (OPS). *Build Environ.* **39**(4), 441–418 (2004). <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2003.10.007>.

26. P. Shanmuganathan, P. Lakshmiathiraj, S. Kumar, A. Sumathy, S. Srikanth, Stability of copper smelter slag in sea water. *Environ. Prog. Sustain.* **31**(1), 68–76 (2012). <https://doi.org/10.1002/ep.10523>.

27. C.J. Shi, C. Meyer, A. Behnood, Utilization of copper slag in cement and concrete. *Resour. Conserv. Recy.* **52**(10), 1115–1120 (2008). <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2008.06.008>.

28. K. Hwang, T. Noguchi, F. Tomosawa, Prediction model of compressive strength development of fly-ash concrete. *Cem. Concr. Res.* **34**(12), 2269–76 (2004). <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2004.04.009>.

29. C.L. Hwang, J.C. Laiw, Properties of concrete using copper slag as a substitute for fine Aggregate. Proc. 3rd Int. Conf. Fly Ash, Silica Fume, Slag, and Natural Pozzolans in Concrete, **114**, 1677–96 (1989).

30. S. Khalifa, K. AlJabri, H. Makoto, K. Salem, H. Abdullah, Copper slag as sand replacement for high performance concrete. *Cem. Concr. Comp.* **31**(7), 483–488 (2008). <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2009.04.007>.

31. F. Li, J. Fuzhou Univ. (Nat. Sci. Ed.), **27**, 59–62 (1999).

32. L. Zong, J. Qingdao Inst. Archit. Eng. **24**, 20–22 (2003).

and UHSC. From Table 5, it can be noted that the average water absorption for NSC control is 4.30 and it is 4.75 for the case of NSC with 100% replacement of fine aggregate by copper slag. For the case of HSC control, the average water absorption is 3.20 and for the case of HSC with 100% replacement of quartz sand by copper slag is 3.56. And for UHSC control, it is 2.34 and 2.50 is for 100% replacement of quartz sand by copper slag. Overall from Fig. 4, it can be noted that there is marginal increase in water absorption with the increase of percentage of copper slag for all the mixes.

7. Conclusions

Mechanical and durability aspects have been investigated for copper slag based normal NSC, HSC and UHSC. Fine aggregate and quartz sand has been replaced by copper slag in different proportions. The following conclusions may be drawn from the present investigation:

- About 5 to 20% increase in density was observed with the increase of copper slag content.
- Workability was found to be better for concrete containing copper slag.
- The highest compressive strength obtained for the case of NSC is 65.4 MPa with 60% replacement of fine aggregate by copper slag. The strength of reference NSC was 53.2 MPa. The strength of NSC with 100% replacement of fine aggregate by copper slag was 57.3 MPa, which is higher than the control mix. Similar observations can be drawn for HSC and UHSC.

33. M. Shoya, S. Nagataki, F. Tomosawa, S. Sugita, Y. Tsukinaga, Freezing and thawing resistance of concrete with excessive bleeding and its improvement. Proc. 4th CANMET/ACI Int. Conf. Durability of Concrete, **170**, 879–98 (1987).
34. N. Miura, N. Takeda, R. Chikamatsu, S. Sogo, Application of super workable concrete to reinforced concrete structures with difficult construction conditions. Proc. ACI SP, **140**, 163–86 (1993).
35. T.Y. Tu, Y.Y. Chen, C.L. Hwang, Properties of HPC with recycled aggregates. Cem. Concr. Comp. **36**(5), 943–50 (2006). <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2005.11.022>.
36. E. Shaheen, N. Shrive, Optimization of mechanical properties and durability of reactive powder concrete. ACI Materials Journal, **103**, 444–51 (2006).
37. N. Mingzhe, Y.C. Ziruo, Z. Shuaiquan, L. Liang, Fatigue properties of RPC under cyclic loads of single-stage and multi-level amplitude. J. Wuhan Univ. Techn. Mater. Sci. **25**, 167-173 (2010). <https://doi.org/10.1007/s11595-010-1167-8>.
38. P. Richard, M.H. Cheyrezy, ACI SP **144**, 24, 507–18 (1994).
39. P. Richard, M.H. Cheyrezy, Composition of reactive powder concretes. Cem. Concr. Res. **25**(7), 1501-1511 (1995). [https://doi.org/10.1016/0008-8846\(95\)00144-2](https://doi.org/10.1016/0008-8846(95)00144-2).