

Badania doświadczalne wytrzymałości betonu zawierającego zmielony popiół z osadnika

Experimental investigation on strength properties of concrete incorporating ground pond ash

K. Yuvaraj*, S. Ramesh

Department of Civil Engineering, K.S. Rangasamy College of Technology, Tiruchengode, Namakkal, Tamil Nadu, India – 637 215.

*Corresponding author: K. Yuvaraj, e-mail: yuva02raj@gmail.com

Streszczenie

W obecnych czasach zużycie energii elektrycznej gwałtownie wzrasta z każdym rokiem, ze względu na industrializację. Węgiel jest surowcem do produkcji energii elektrycznej w elektrociepłowniach. Szczególnie duża ilość niewykorzystanego popiołu jest wyrzucana do osadników, co stanowi poważny problem dla wielu krajów rozwijających się. Ponadto składowanie popiołu w osadnikach powoduje zagrożenia dla środowiska, takie jak zanieczyszczenie gleby i wody. Zidentyfikowanie realnej alternatywy dla wykorzystania popiołu z osadników staje się potrzebą chwili, aby uniknąć tych zagrożeń dla środowiska. W niniejszej pracy badawczej podjęto próbę częściowego zastąpienia cementu popiołem z osadnika jako dodatku mineralnego w betonie, co w znacznym stopniu ograniczy szkodliwy wpływ popiołu z osadnika na środowisko. Popiół ten zmielono do wielkości 45 μm i użyto go do zastąpienia cementu w betonie w proporcjach 5, 10, 15, 20 i 25% masy. Przeprowadzono badania wytrzymałości na ściskanie, zginanie oraz rozciąganie przy rozłupywaniu uzyskanych betonów. Wyniki badań wykazują, że dodatek 10% popiołu z osadnika znacznie zwiększył wytrzymałość betonu w wieku 7, 28, 56 i 90 dni.

Słowa kluczowe: popiół z osadnika; odpady niebezpieczne; dodatki do betonu; własności mechaniczne

Summary

In the present era, the consumption of electricity has increased rapidly with each passing year, due to the industrialization. Coal is a raw material for the production of electricity in the thermal power stations. Particularly, a large amount of unused ash is dumped in ponds, which are major problem concerning many developing countries. Further, dumping of ash in ponds causes environmental hazards effects such as soil, land and water pollution. Identifying a viable alternative to utilize pond ash becomes a necessity, to avoid these environmental hazards. In this research work, an attempt has been made to partially replace cement by the pond ash as a supplementary cementitious material [SCM] in concrete, which will considerably reduce the hazardous effects of pond ash, to the environment. The pond ash was ground to 45 μm and it was used to replace the cement in concrete by proportions of 5, 10, 15, 20 and 25% by mass. Test on compressive strength, split tensile strength and modulus of rupture were conducted on concrete mixes. The result indicate that the addition of 10% pond ash to concrete significantly increased the strength properties of the concrete at the age of 7, 28, 56 and 90 days.

Keywords: pond ash; hazards waste; supplementary cementitious materials; strength properties

1. Wprowadzenie

Beton jest uważany za najważniejszy na świecie używany przez człowieka materiał (1). Światowe zużycie betonu w roku 2002 wyniosło 2,7 miliardów metrów sześciennych i przewiduje się, że wykorzystanie betonu w budownictwie i innych pracach strukturalnych wzrośnie do około 7,5 miliardów metrów sześciennych do roku 2050 (2). Cement jest podstawowym surowcem do produkcji

1. Introduction

Concrete is construed as world's most significant man-made consumed material (1). The worldwide consumption of concrete in the year 2002 found to be 2.7 billion cubic meter and it is predicted that the utilization of concrete in building construction and for other infrastructure works will increase around 7.5 billion cubic meters by the year 2050 (2). Cement is a primary raw material in

betonu. Na całym świecie zapotrzebowanie na cement wzrasta i wynosi około 4,3 mld ton rocznie (3). Podczas produkcji cementu zużywana jest duża ilość energii, i jest ona jednym z największych źródeł emisji CO₂ do atmosfery (4). Dlatego inżynierowie koncentrują się na alternatywnych materiałach cementowych, aby zminimalizować użycie cementu w betonie. Ich użycie może dać lepsze wyniki w zakresie wytrzymałości i trwałości betonu (5). Zgodnie z dostępną literaturą, betony zawierające niektóre przemysłowe produkty uboczne, takie jak popiół lotny, popiół denny, popiół z palmy olejowej, mielony granulowany żużel wielkopieczowy, popiół z łusek ryżowych, metakaolin, pył krzemionkowy i nanokrzemionka miały lepszą wytrzymałość i trwałość niż beton wzorcowy (6 - 8).

Ostatnio niektórzy badacze donoszą, że popiół z osadników popiołu [PO], otrzymywany jako produkt uboczny z elektrowni ciepłych, może być stosowany jako dodatek mineralny w betonie. Popioły z osadników są zbierane w stanie mokrym i zawierają znaczną część popiołów lotnych (9, 10). Skład chemiczny, fazowy i właściwości fizyczne popiołu ze stawu znacznie się różnią, co wynika głównie z rodzaju węgla, warunków spalania i przechowywania w stanie mokrym, przez długi okres czasu (11). Duża ilość niewykorzystanego popiołu jest wyrzucana do osadników, co może powodować zanieczyszczenie ziemi, wody i powietrza. Ponadto dłuższy czas zalegania popiołu w osadniku powoduje, że zawiera on znaczne ilości wilgoci, niespalonego węgla oraz ma zmienną wielkość cząstek (12). Popiół z osadnika składa się z grubszej i drobniejszej frakcji cząstek. Frakcja grubsza wykazuje słabą aktywność pucolanową, a frakcja drobna dużą aktywność pucolanową (13). Mała reaktywność pucolanowa, spowodowana przez gruboziarniste popioły, może obniżyć wytrzymałość betonu (14).

2. Znaczenie badań

W Indiach każdego roku elektrownie ciepłe wytwarzają prawie 125 mln ton popiołu ze spalania węgla, z czego jedynie około 15% popiołu jest wykorzystywane w różnych zastosowaniach budowlanych, takich jak cement, beton, cegły i w pracach geotechnicznych. Pozostały popiół składowany jest w osadnikach, co stanowi zagrożenie dla środowiska. W niniejszej pracy cement portlandzki [CP] zastąpiono zmielonym popiołem z osadnika popiołu w różnych proporcjach: 5, 10, 15, 20 i 25%, w stosunku do masy cementu i badano jego wpływ na właściwości mechaniczne, a mianowicie wytrzymałość na ściskanie i na rozciąganie przy rozłupywaniu oraz na zginanie. Zbadano również zależności pomiędzy wytrzymałością na ściskanie i wytrzymałością na rozciąganie przy rozłupywaniu oraz wytrzymałością na ściskanie i zginanie, stosując regresję potęgową.

3. Materiały

3.1. Cement

W niniejszej pracy zastosowano cement portlandzki o wytrzymałości na ściskanie 53 MPa. Gęstość cementu oznaczono zgodnie z normą BIS: 1727-1967 i stwierdzono, że wynosi 3,14 g/cm³. Skład

the production of concrete. Worldwide, the demand for cement is increasing and is around 4.3 billion tones annually (3). The large amount of energy is consumed during the manufacturing of cement, which is one of the largest sources of CO₂ emissions in the atmosphere (4). Therefore, engineers are focused on the alternative cementitious material to minimize the use of cement in concrete. It can give better performance in all the strength and durability properties of concrete (5). According to the available literature, concrete containing some industrial by-products such as fly ash [FA], bottom ash [BA], oil palm ash [OPA], ground granulated blast furnace slag [GGBS], rice husk ash [RHA], metakaolin [MK], silica fume [SF], nano-silica [NS] etc., had better strength and durability properties than the control concrete (6 - 8).

Recently some of the researchers have reported that the pond ash [PA], which is obtained as a by-product from thermal power plants can be used as a supplementary cementitious materials in concrete. Large quantity of pond ash is collected from the pond in the wet state, which contains significant proportion of fly ash (9, 10). The chemical composition, mineralogical, and physical properties of pond ash significantly differ, which is mainly based on coal type, burning conditions and wet storage for long period (11). The large quantity of unused ashes are dumped in the ponds, which may cause pollution issues such as land, water and air. Moreover, the longer duration of ash lying in the pond contains significant content of moisture, carbon particles and variation in the particle sizes (12). The pond ash comprises of coarser and fine fraction of particles. The coarser fraction shows the weak pozzolanic reactivity and fine fraction shows the strong pozzolanic properties (13). Low pozzolanic reactivity possess by the coarse ashes may decrease the strength of concrete (14).

2. Research significance

In India, every year nearly 125 million tonnes of coal ash is generated by thermal power stations, out of which around 15% of ash is only utilized for various building applications such as cement, concrete, bricks, and geotechnical applications. The remaining of unused ash has been disposed in ponds, which poses an environmental threat. In the present work, ordinary Portland cement [OPC] was replaced by ground pond ash at various mix proportions: 5, 10, 15, 20, and 25% by the mass of cement, and its effect on the strength properties such as compressive strength, split tensile strength and modulus of rupture, were studied. The relationships between compressive strength and splitting tensile strength as well as compressive strength and modulus of rupture have also been investigated, using power regression.

3. Materials

3.1. Cement

In this study, OPC of compressive strength 53 MPa has been used. The specific gravity test was conducted as per code BIS: 1727-1967 and found to be 3.14. The chemical composition of cement

chemiczny użytego cementu został określony metodą fluorescencji rentgenowskiej i przedstawiono go w tabelicy 1.

3.2. Popiół z osadnika

Popiół z osadnika [PO] otrzymano z elektrowni ciepłej Mettur. Zebrany popiół ze stawu osadowego okazał się być wilgotny i lepki. Suszono go w temperaturze otoczenia przez 2 dni. Następnie wysuszony popiół został przesiany i usunięto grube cząstki. Następnie przesiany popiół został drobno zmielony za pomocą rozdrabniacza o szybkości obrotowej 960 obr./min. Powierzchnia właściwa i gęstość popiołu z osadnika wynosiły odpowiednio 398 m²/kg i 2,17 g/cm³. Skład chemiczny popiołu podano w tabelicy 2. Dyfraktogram popiołu przedstawiono na rys. 2. Na dyfraktogramie występują refleksy wskazujące na fazy krystaliczne, poza fazą amorficzną. Spośród faz krystalicznych, główna to kwarc, a następnie mullit. Anortyt i hematyt występują w mniejszych ilościach. Strata prażenia popiołu wynosi 4,01%, co wynika głównie z obecności węgla.

Tabelica 2 / Table 2

SKŁAD CHEMICZNY POPIOŁU ZE STAWU
CHEMICAL COMPOSITION OF POND ASH

Component / Składnik	Content / Zawartość, %
SiO ₂	51.4
Al ₂ O ₃	29.2
Fe ₂ O ₃	7.64
CaO	0.89
MgO	0.87
SO ₃	4.28
K ₂ O	0.57
LOI	4.01

3.3. Kruszywo

W badaniach jako kruszywo grube zastosowano lokalnie dostępny tłuczeń kamienny, przechodzący przez sito 20 mm. Jako kruszywo drobne zastosowano piasek spełniający wymagania BIS 383-2016 i przechodzący przez sito 4,75 mm.

Tabelica 1 / Table 1

SKŁAD CHEMICZNY CEMENTU
CHEMICAL COMPOSITION OF CEMENT

Compound / Składnik	Content / Zawartość, %
SiO ₂	21.9
Al ₂ O ₃	5.63
Fe ₂ O ₃	4.58
CaO	63.2
MgO	1.35
SO ₃	1.29
Na ₂ O _{eq}	0.73
Cl	0.02
LOI	1.3

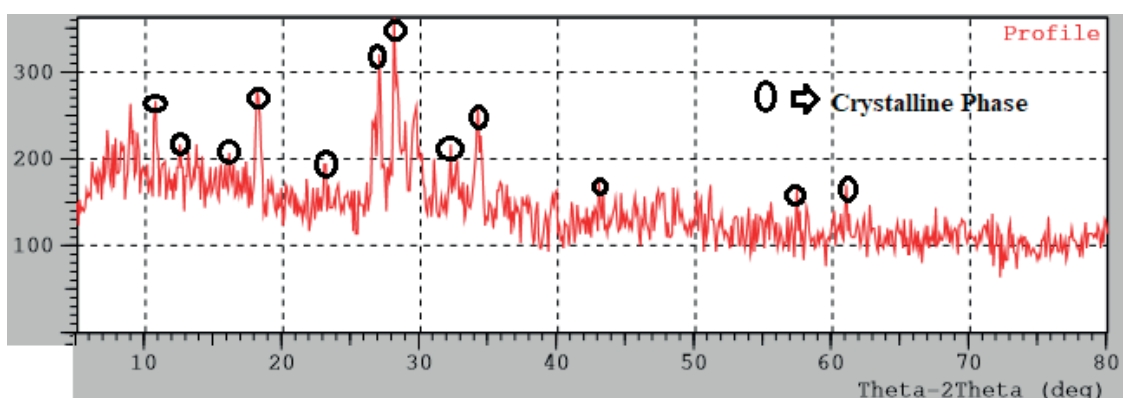
used was determined by X-ray fluorescence and is presented in Table 1.

3.2. Pond ash

Pond ash [PA] was obtained from the thermal power plant, Mettur. The collected pond ash was found to be moist and sticky. It was dried at ambient temperature for 2 days. Then the dried pond ash has been sieved and the coarse particles were removed. Further, the sieved pond ash was finely grounded using pulverizer with the rotation speed of 960 rpm. The specific surface area and specific gravity of pond ash were 400 m²/kg and 2.17, respectively. The chemical composition of pond ash is given in Table 2. The X-ray diffraction [XRD] pattern of the pond ash is shown in Fig. 1. Peaks present in the XRD pattern indicate that except the amorphous phase, also crystalline phases are present. XRD indicates that the pond ash contains crystalline phases, in which quartz is the main component, followed by mullite. Anorthite and hematite are minor crystalline phases in the pond ash. The loss on ignition [LOI] of pond ash is 4.01% which is mainly due to the presence of carbon.

3.3. Aggregate

Locally available crushed stone passing 20 mm sieve was used as coarse aggregate in the entire study. Manufacture sand (M- Sand)



Rys. 1. Dyfraktogram popiołu ze stawu

Fig. 1. The X-ray diffraction (XRD) of the pond ash

Mix designation Oznaczenie betonu	w/b / w/s, -	Cement, kg/m ³	Pond ash Popiół z osadnika, kg/m ³	Fine aggregate Kruszywo drobne, kg/m ³	Coarse aggregate Kruszywo grube, kg/m ³	Water Woda, kg/m ³
CC	0.44	448	--	788	996	197
M0	0.44	426	22	788	996	197
M1	0.44	403	45	788	996	197
M2	0.44	381	67	788	996	197
M3	0.44	358	90	788	996	197
M4	0.44	336	112	788	996	197

CC: Conventional Concrete / Beton wzorcowy; M0-M4: Pond Ash Concrete / Betony zawierające popiół ze stawu popiołowego

3.4. Woda

W trakcie badań do przygotowania mieszanki i pielęgnacji betonu stosowano wodę pitną wodociągową, zgodnie z zaleceniami BIS 456-2000.

3.5. Składy mieszanek

W niniejszej pracy przygotowano mieszankę betonową kontrolną oraz pięć mieszanek z udziałem popiołu z osadnika. Cement zastąpiono popiołem w ilościach 5%, 10%, 15%, 20% i 25%, w stosunku do masy cementu. Do przygotowania próbek betonowych zastosowano stały stosunek wody do spoiwa wynoszący 0,44. Proporcje mieszanki zostały ustalone dla klasy M25 wg BIS: 10262-2019 (15). Składy mieszanek przedstawiono w tablicy 3.

4. Metody badań

Dla wszystkich mieszanek oznaczono właściwości w stanie stwardniałym, a mianowicie wytrzymałość na ściskanie i na zginanie oraz na rozciąganie przy rozłupywaniu wg norm BIS. Normy BIS dotyczące właściwości mechanicznych podano w tablicy 4. Na uniwersalnej maszynie wytrzymałościowej o nośności 1500 kN oznaczono wytrzymałość na ściskanie i rozciąganie przy rozłupywaniu, wszystkich mieszanek w wieku 7, 28, 56 i 90 dni. Podobnie, na maszynie wytrzymałościowej do badań zginania o nośności 100 kN, określono wytrzymałość na zginanie wszystkich mieszanek w wieku 7, 28, 56 i 90 dni.

5. Wyniki i dyskusja

5.1. Wytrzymałość na ściskanie betonu

Zmianę wytrzymałości na ściskanie betonu z dodatkiem popiołu z osadnika przedstawiono na rys. 3. Wytrzymałość na ściskanie betonu konwencjonalnego i betonu z dodatkiem popiołu przedstawiono w tablicy 5. W wieku 7 dni wytrzymałość na ściskanie betonu z popiołem waha się od 19,5 do 15,1 MPa. Natomiast po 28 dniach wynosi od 30,8 do 25,7 MPa. Wyniki badań wykazały, że po 7 dniach wartość wytrzymałości na ściskanie betonu

confirming requirements of BIS 383-2016 and passing through 4.75 mm sieve was used as fine aggregate in this study

3.4. Water

Potable tap water was used throughout the study for preparation and curing of concrete, according to BIS 456- 2000 recommendations.

3.5. Mix proportion

In this study, control concrete mix and five mix proportions containing of pond ash were prepared. 5-25% of cement has been replaced by pond ash in the concrete matrix with an increment of 5% by mass of cement. Constant water to binder ratio of 0.44 was used to prepare concrete specimens. The mix proportions were arrived for M25 grade according to BIS: 10262-2019 (15). The mix proportions of CC and PAC are depicted in Table 3.

4. Methods

The hardened properties such as compressive strength, split tensile strength and modulus of rupture according to the BIS standards for all the mixes were determined. The BIS standards of mechanical properties are furnished in Table 4. The universal testing machine having capacity of 1500 kN was used to determine the compressive strength and split tensile strength of all the mixes at the age of 7, 28, 56 and 90 days. Similarly, the flexural testing machine having a capacity of 100 kN was used to determine the modulus of rupture of all the mixes at the age of 7, 28, 56 and 90 days.

5. Results and discussions

5.1. Compressive strength of concrete

The compressive strength variation of pond ash incorporated concrete is shown in Fig. 2. The compressive strength of conventional concrete and pond ash concrete are shown in the Table 5. At the age of 7 days, the compressive strength of PAC varies between 19.5 to 15.1 MPa. Whereas, at 28 days, the compressive strength

Tablica 4 / Table 4

SZCZEGÓŁY BADAŃ WŁAŚCIWOŚCI MECHANICZNYCH BETONÓW

BIS STANDARDS FOR MECHANICAL STRENGTH TESTS

Tests / Badanie	Specimen shape Kształt próbki	Specimen size Wymiary próbek	Standard Norma
Compressive strength / Wytrzymałość na ściskanie	Cube / Kostki	150 mm x 150 mm x 150 mm	BIS 516 – 1959 (16)
Split tensile strength / Wytrzymałość na rozciąganie przy rozłupywaniu	Cylinder / Cylindry	φ150 mm x 300 mm	
Flexural strength / Wytrzymałość na zginanie	Prisms / Belki	500 mm x 100 mm x 100 mm	

Tablica 5 / Table 5

WYTRZYMAŁOŚCI BETONU WZORCOWEGO I Z DODATKIEM POPIOŁU

COMPRESSIVE STRENGTH OF CC AND PAC

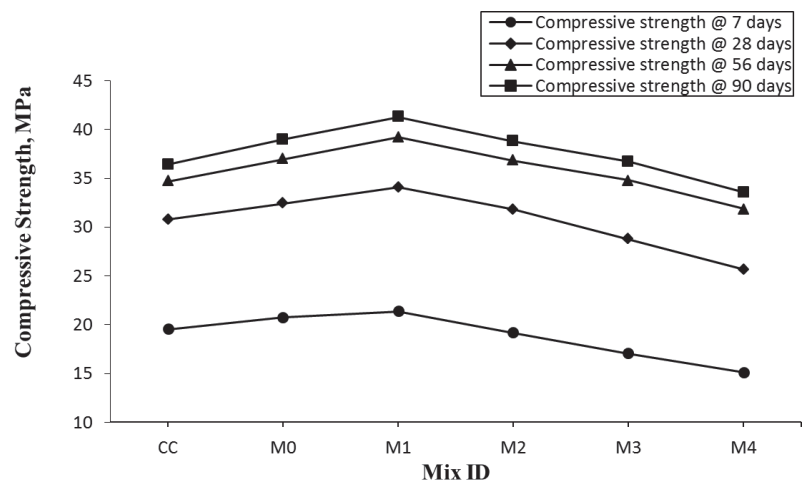
Mix Beton	Compressive Strength @ 7 days Wytrzymałość na ściskanie po 7 dniach, MPa	Compressive Strength @ 28 days Wytrzymałość na ściskanie po 28 dniach, MPa	Compressive Strength @ 56 days Wytrzymałość na ściskanie po 56 dniach, MPa	Compressive Strength @ 90 days Wytrzymałość na ściskanie po 90 dniach, MPa
CC	19.53	30.8	34.71	36.41
M0	20.76	32.44	36.96	38.98
M1	21.35	34.1	39.25	41.28
M2	19.17	31.85	36.83	38.75
M3	17	28.73	34.79	36.71
M4	15.12	25.68	31.87	33.58

z dodatkiem popiołu zmniejszyła się w porównaniu z betonem wzorcowym, z wyjątkiem M0 i M1. Wyniki te potwierdzają tendencje przyrostu wytrzymałości podawane w dostępnej literaturze (17, 18). Mieszanka M1 uzyskała największą wytrzymałość na ściskanie 34,10 MPa, w wieku 28 dni. Po 56 i 90 dniach twardnienia, w porównaniu do betonu wzorcowego zanotowano poprawę wytrzymałości na ściskanie dla wszystkich mieszanek, z wyjątkiem mieszanki M4. Wzrost wytrzymałości po 28 dniach twardnienia betonu może być spowodowany tworzeniem się dodatkowych ilości fazy C-S-H, w reakcji pucolanowej. Zjawisko to jest spowodowane reakcją nadmiaru wodorotlenku wapnia w zaczynie cementowym z krzemionką, pochodzącą z popiołu (19). W porównaniu z mieszankami M1 i M2, mieszanki M3 i M4 zawierające 20% i 25% popiołu ze stawu osadowego uzyskały mniejszą wytrzymałość na ściskanie, na co wpływ ma większe zawartość niespalonego węgla (20).

5.2. Wytrzymałość betonu na rozciąganie przy rozłupywaniu

Wytrzymałość na rozciąganie przy rozłupywaniu betonu wzorcowego i betonu z popiołem przedstawiono w tablicy 6. Zgodnie z normą IS 456, wytrzymałość na rozciąganie przy rozłupywaniu można określić za pomocą równania (1).

$$WRR = 0,7 (CS)^{0,5} \quad (1a)$$



Rys. 2. Wytrzymałość betonów wzorcowego i z dodatkiem popiołu

Fig. 2. Variation of compressive strength of concrete

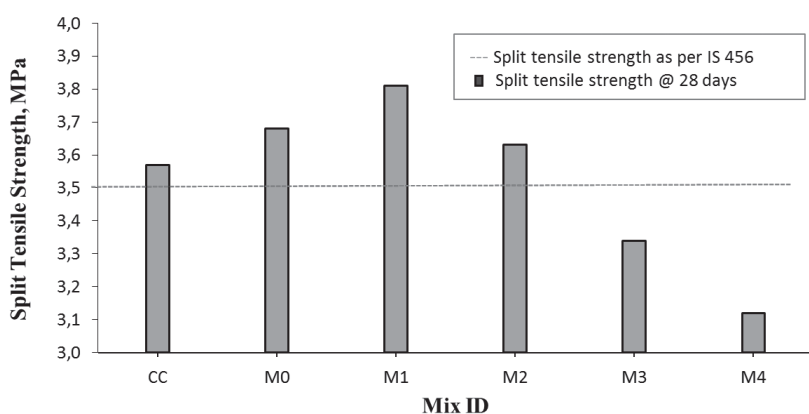
of PAC varies between 30.8 to 25.7 MPa. The test results depict, at the age of 7 days, the compressive strength of pond ash concrete had decreased comparing to conventional concrete, except M0 and M1. These results confirm the strength gain trend reported in available literature (17, 18). The mix M1 yielded the highest compressive strength of 34.10 MPa at the age 28 days. At 56 and 90 days of curing, compared to the conventional concrete [CC] improvement in compressive strength has been observed for all the mixes, except the mix M4. The strength increase after 28 days of curing concrete may be due to the formation of larger amounts of C-S-H phase. This formation is due to the reaction of calcium

Table 6 / Table 6

WYTRZYMAŁOŚĆ BETONÓW NA ROZCIĄGANIE PRZY ROZŁUPYWANIU

SPLIT TENSILE STRENGTH OF CC AND PAC

Mix Beton	Split tensile Strength as per IS 456 = $0.7 (CS)^{0.5}$, MPa [Theoretical Value] / Wytrzymałość na rozciąganie przy rozłupywaniu obliczona zgodnie z IS 456 = $0,7 (CS)^{0.5}$, MPa	Split tensile Strength obtained @ 28 days, MPa [Experimental Value] / Wytrzymałość na rozciąganie przy rozłupywaniu wyznaczona doświadczalnie, MPa
CC	3.5	3.57
M0		3.68
M1		3.81
M2		3.63
M3		3.34
M4		3.12



Rys. 3. Wytrzymałość na rozciąganie przy rozłupywaniu badanych betonów

Fig. 3. Variation of split tensile strength of concrete

gdzie WRR to wytrzymałość na rozciąganie przy rozłupywaniu, a CS jest charakterystyczną wytrzymałością betonu na ściskanie. Zróżnicowanie wytrzymałości na rozciąganie przy rozłupywaniu dla betonu wzorcowego i betonu z popiołem przedstawiono na rys. 4. Wytrzymałość na rozciąganie przy rozłupywaniu betonu z dodatkiem popiołu z osadnika jest większa niż betonu wzorcowego, z wyjątkiem mieszanek M3 i M4.

Wartość wytrzymałości na rozciąganie przy rozłupywaniu betonu wzorcowego wg IS 456 jest o 1,96% mniejsza od wartości doświadczalnej. Natomiast wytrzymałość na rozciąganie przy rozłupywaniu

Tablica 7 / Table 7

WYTRZYMAŁOŚĆ BETONÓW NA ZGINANIE

MODULUS OF RUPTURE OF CC AND PAC

Mix Beton	Modulus of rupture as per IS 456 = $0.7 (CS)^{0.5}$, MPa [Theoretical Value] / Wytrzymałość na zginanie obliczona wg. IS 456 = $0,7 (CS)^{0.5}$, MPa	Modulus of rupture strength obtained @ 28 days (MPa) [Experimental Value] / Wytrzymałość na zginanie wyznaczona doświadczalnie, MPa
CC	3.5	4.95
M0		5.12
M1		5.30
M2		5.05
M3		4.84
M4		4.57

hydroxide [CH] present in cement paste with SiO_2 originating from pond ash (19). Compared with mix M1 and M2, mix M3 and M4 comprising 20% and 25% pond ash gained lower compressive strength which is influenced by the higher contents of the unburned carbon (20).

5.2. Split Tensile Strength of Concrete

The splitting tensile strength [STS] values of conventional and pond ash concrete are shown in Table 6. As per IS 456, the STS can be determined by the equation (1a).

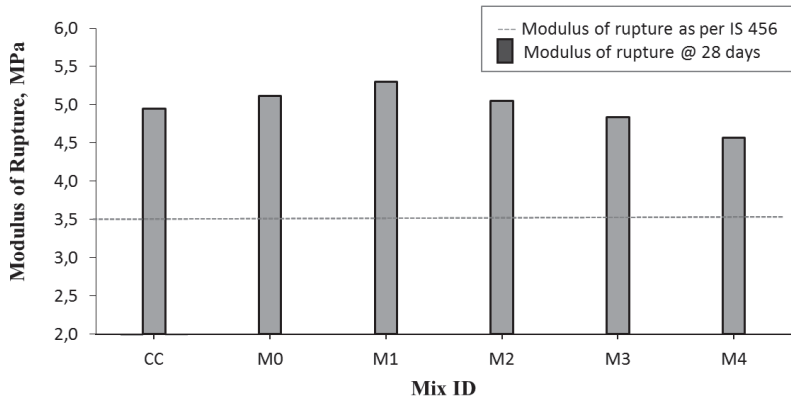
$$WRR = 0,7 (CS)^{0.5} \quad (1a)$$

where, CS is the characteristic compressive strength of concrete. The variations in STS obtained from theoretical and experimental values and are shown in Fig. 3. The STS of pond ash incorporated concrete is higher than the conventional concrete, except mix M3 and M4.

The STS of conventional concrete as per IS 456 is 1.96% less than experimental value. Whereas, the STS of pond ash concrete as per IS 456 is 4.89%, 8.13%, and 3.58% lower than experimental value, except M3 and M4 mix.

5.3. Modulus of rupture of concrete

The modulus of rupture [MR] of various concrete mixes has been determined, test results are presented in Table 7. The MR of con-



Rys. 4. Wytrzymałość na zginanie betonów

Fig. 4. Variation of modulus of rupture of concrete

betonu z dodatkiem popiołu ze stawu osadowego wg IS 456 jest o 4,89%, 8,13% i 3,58% mniejsza od wartości doświadczalnej, z wyjątkiem mieszanek M3 i M4.

5.3. Wytrzymałość betonu na zginanie

Wyniki badań wytrzymałości na zginanie podano w tabelicy 7. Wytrzymałość na zginanie betonu określa się na podstawie teoretycznego równania (1) podanego w normie IS 456.

$$WZ = 0,7 (CS)^{0,5} \quad (1b)$$

gdzie WZ to wytrzymałość na zginanie. Na podstawie wyników badań stwierdzono, że po 28 dniach twardnienia wytrzymałość na zginanie próbek betonu jest większa od wartości teoretycznych, uzyskanych za pomocą równania dla każdej mieszanki. Wartości wytrzymałości na zginanie dla każdej mieszanki przedstawiono na rys. 5.

Wytrzymałość na zginanie betonu wzorcowego, obliczona wg IS 456, jest o 29,29% mniejsza od wartości doświadczalnej. Natomiast wytrzymałość na zginanie betonu z dodatkiem popiołu obliczona wg IS 456, jest o odpowiednio 31,64%, 33,96%, 30,69%, 27,68% i 23,41% mniejsza od wartości doświadczalnej. Z powyższego można wywnioskować, że wyrażenie teoretyczne daje znacznie mniejszą wartość niż wartość doświadczalna.

5.4. Zależność między wytrzymałością betonu na ściskanie a wytrzymałością na rozciąganie przy rozłupywaniu

Opracowano równanie regresji pomiędzy wytrzymałością na ściskanie a wytrzymałością na rozciąganie przy rozłupywaniu badanych betonów w wieku 28 dni, które przedstawiono na rys. 6. Zależność pomiędzy wytrzymałością na ściskanie a wytrzymałością na rozciąganie przy rozłupywaniu betonu z dodatkiem popiołu, uzyskana na podstawie analizy regresji, jest podana w równaniu (2).

$$WRR = 0.301(CS)^{0.718} R^2 = 0.994 \quad (2)$$

crete is determined using the theoretical expression mentioned in equation (1b). From the experiment results, at 28 days of curing, the MR of concrete samples was found higher than the theoretical values obtained by the equation, for each mix. The MR value of each mix is shown in Fig. 4.

$$WZ = 0,7 (CS)^{0,5} \quad (1b)$$

The MR of conventional concrete as per IS 456 is 29.29% less than experimental value. Whereas, the MR of pond ash concrete as per IS 456 is 31.64%, 33.96%, 30.69%, 27.68% and 23.41% is lower than experimental value. From the above results, it is concluded that the theoretical expression gives far less value than the experimental value.

5.4. Relation between Compressive Strength and Split Tensile Strength of Concrete

Regression equation has been developed between compressive and split tensile strength of PAC at the age of 28 days, which is presented in Fig. 5. The relationship between compressive strength and split tensile strength of pond ash concrete obtained from regression analysis is given by equation (2).

$$WRR = 0.301(CS)^{0.718} R^2 = 0.994 \quad (2)$$

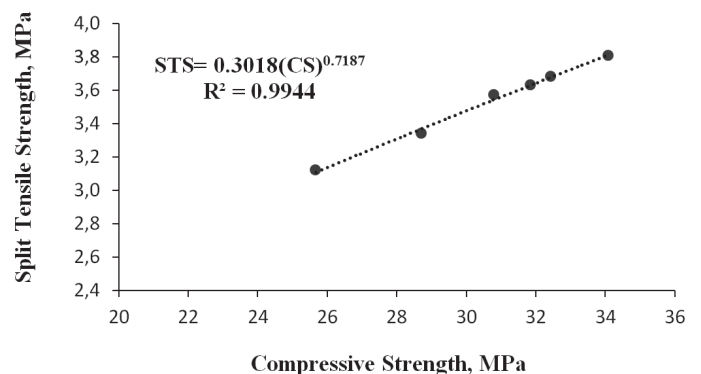
Equation (2) indicates that relationship between the compressive strength and splitting tensile strength of pond ash concrete. This relationship is in line with the ACI (1999), Neville (1995) and European code CEB-FIP mentioned in equations 3, 4 and 5, respectively.

$$STS = 0,56(CS)^{0,5} \quad (3)$$

$$STS = 0,23(CS)^{0,67} \quad (4)$$

$$STS = 0,30(CS)^{0,67} \quad (5)$$

The split tensile strength results obtained from the experimental investigation and the predicted values from the equations 2, 3, 4 and 5 are given in Table 8.



Rys. 5. Zależność pomiędzy wytrzymałością na ściskanie a wytrzymałością na rozciąganie przy rozłupywaniu badanych betonów

Fig. 5. Relationship between compressive strength and split tensile strength of pond ash concrete

PORÓWNANIE WYZNACZONEJ DOŚWIADCZALNIE I OBLICZONEJ Z MODELI WYTRZYMAŁOŚCI NA ROZCIĄGANIE PRZY ROZŁUPYWANIU [WRR]
 COMPARISON OF EXPERIMENTAL & THEORETICAL SPLIT TENSILE STRENGTH [STS]

Mix Beton	Experimental STS WRR wyznaczona doświadczalnie, MPa		Theoretical STS Obliczona WRR, MPa				Experiment / Theoretical ratio of STS Stosunek WRR wyznaczonej doświadczalnie do obliczonej, -			
	CS	STS	Eq.2	Eq.3	Eq.4	Eq.5	Eq.2	Eq.3	Eq.4	Eq.5
CC	30.8	3.57	3.52	3.10	2.28	2.98	1.01	1.15	1.56	1.20
M0	32.44	3.68	3.66	3.18	2.36	3.08	1.00	1.16	1.55	1.19
M1	34.1	3.81	3.79	3.27	2.44	3.19	1.00	1.16	1.56	1.19
M2	31.85	3.63	3.61	3.16	2.33	3.04	1.00	1.15	1.55	1.19
M3	28.73	3.34	3.35	3.00	2.18	2.84	0.99	1.11	1.53	1.18
M4	25.68	3.12	3.09	2.83	2.02	2.63	1.00	1.10	1.54	1.19

Równanie (2) wskazuje na zależność pomiędzy wytrzymałością na ściskanie a wytrzymałością na rozciąganie przy rozłupywaniu betonu z dodatkiem popiołu. Charakter zależności jest zgodny z zależnościami proponowanymi przez ACI (1999), Neville (1995) i kod europejski CEB-FIP, opisanymi odpowiednio w równaniach 3, 4 i 5.

$$STS = 0,56(CS)^{0,5} \quad (3)$$

$$STS = 0,23(CS)^{0,67} \quad (4)$$

$$STS = 0,30(CS)^{0,67} \quad (5)$$

Wyniki wytrzymałości na rozciąganie przy rozłupywaniu uzyskane podczas badań eksperymentalnych oraz wartości przewidywane na podstawie równań 2, 3, 4 i 5, podano w tablicy 8.

W przypadku betonu z dodatkiem popiołu ze stawu osadowego, stosunek eksperymentalnej i przewidywanej wartości STS daje wynik zbliżony do 1, z wyjątkiem równania (4) Neville'a (1995). Wartości STS były całkowicie niedoszacowane przez wyrażenie Neville'a. Podobne wnioski są zgodne z wynikami podawanymi przez (24, 25).

5.5. Zależność między wytrzymałością betonu na ściskanie a wytrzymałością na zginanie

Opracowano równanie regresji pomiędzy wytrzymałością na ściskanie a wytrzymałością na zginanie betonów w wieku 28 dni, które przedstawiono na rys. 8. Równanie empiryczne (6) służy do przewidywania wytrzymałości na zginanie betonu z dodatkiem popiołu ze stawu osadowego.

$$WZ = 0.90(CS)^{0.499} R^2 = 0.985 \quad (6)$$

Równanie (6) wskazuje na zależność pomiędzy wytrzymałością na ściskanie a wytrzymałością na zginanie betonu, z dodatkiem popiołu ze stawu osadowego. Równania te są zgodne z wytycznymi komitetu ACI

For pond ash concrete, the ratio of experimental and predicted values of STS give a ratio closer to 1 except for Neville (1995) equation (4). The STS values were totally under estimated by Neville expression. Similar findings are in agreement with the results reported by (24, 25).

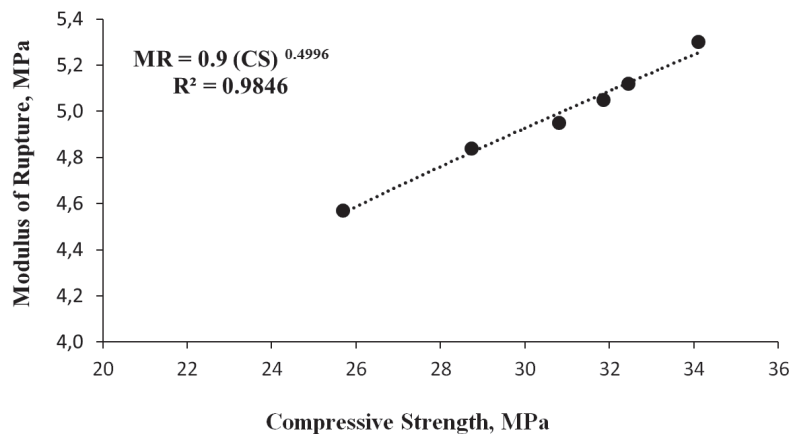
5.5. Relation between compressive strength and modulus of rupture of concrete

Regression equation has been developed between compressive and modulus of rupture of PAC at the age of 28 days which is shown in Fig. 6. The below mentioned empirical equation used to predict the MR of the pond ash incorporated concrete:

$$WZ = 0.90(CS)^{0.499} R^2 = 0.985 \quad (6)$$

The equation (6) indicates this relationship between the compressive strength and modulus of rupture of pond ash concrete. These equations are in line with the ACI committee 363 (1997), ACI Committee 318, 2005 and Bhanjaa and Sengupta (2005) as given in equations 7, 8 and 9 respectively.

$$MR = 0,94(CS)^{0,5} \quad (7)$$



Rys. 6. Zależność pomiędzy wytrzymałością na ściskanie i modulem rozłupywania dla badanych betonów

Fig. 6. Relationship between compressive strength and modulus of rupture of pond ash concrete

Mix Beton	Experimental MR WZ wyznaczona doświadczalnie, MPa		Theoretical MR Obliczona WZ, MPa				Experiment / Theoretical ratio of STS Stosunek WZ wyznaczonej doświadczalnie do obli- czonej, -			
	CS	MR	Eq.6	Eq.7	Eq.8	Eq.9	Eq.6	Eq.7	Eq.8	Eq.9
CC	30.8	4.95	4.97	5.21	2.86	4.41	0.99	0.95	1.73	1.12
M0	32.44	5.12	5.10	5.35	2.94	4.60	1.00	0.95	1.74	1.11
M1	34.1	5.30	5.23	5.48	3.01	4.79	1.01	0.96	1.76	1.10
M2	31.85	5.05	5.06	5.30	2.91	4.53	0.99	0.95	1.73	1.11
M3	28.73	4.84	4.80	5.03	2.77	4.17	1.00	0.96	1.74	1.16
M4	25.68	4.57	4.54	4.76	2.61	3.81	1.00	0.96	1.75	1.19

363 (1997), komitetu ACI 318, 2005 oraz Bhanjaa i Sengupta (2005), podanymi odpowiednio w równaniach 7, 8 i 9.

$$MR = 0,94(CS)^{0,5} \quad (7)$$

$$MR = 0,517(CS)^{0,5} \quad (8)$$

$$MR = 0,275(CS)^{0,81} \quad (9)$$

Wyniki wytrzymałości na zginanie uzyskane podczas badań eksperymentalnych oraz wartości przewidywane na podstawie równań 6, 7, 8 i 9 podano w tablicy 9.

W przypadku betonu z dodatkiem popiołu z osadnika, stosunek wyznaczonej doświadczalnie i obliczonej wytrzymałości na zginanie daje wynik zbliżony do 1, z wyjątkiem równania (8) komitetu ACI 318, 2005. Wartości wytrzymałości na zginanie były całkowicie niedoszacowane przez wyrażenie komitetu ACI318, 2005.

6. Wnioski

W niniejszej pracy zbadano wytrzymałość na ściskanie, wytrzymałość na rozciąganie przy rozłupywaniu oraz modułem rozłupywania betonu wzorcowego i z dodatkiem popiołu z osadnika. Na podstawie uzyskanych wyników badań sformułowano następujące wnioski.

- Największe wytrzymałości na ściskanie i zginanie oraz na rozciąganie przy rozłupywaniu uzyskał beton z dodatkiem 10% popiołu.
- Wartość R² dla wykresu regresji wykazuje, że opracowany model empiryczny ma dobrą korelację pomiędzy wytrzymałością na ściskanie i wytrzymałością na rozciąganie przy rozłupywaniu, jak również dobrą korelację pomiędzy wytrzymałością na ściskanie i modułem rozłupywania betonu z dodatkiem popiołu z osadnika, po 28 dniach twardnienia.
- Częściowe zastąpienie cementu portlandzkiego popiołem z osadnika może zmniejszyć zanieczyszczenie środowiska i odegrać ważną rolę w zrównoważonym rozwoju.

$$MR = 0,517(CS)^{0,5} \quad (8)$$

$$MR = 0,275(CS)^{0,81} \quad (9)$$

The modulus of rupture results obtained from the experimental investigation and the predicted values from the equation [6, 7, 8 and 9] are given in Table 9.

For pond ash concrete, the ratio of experimental and predicted values of MR give a ratio closer to 1 except for ACI Committee 318, 2005 equation (8). The MR values were totally under estimated by ACI Committee318, 2005 expression.

6. Conclusion

The strength characteristic such as compressive strength, split tensile strength, modulus of rupture of CC and PAC have been examined in the present study. From the obtained test results, the following conclusions are drawn.

- The maximum compressive, splitting tensile and modulus of rupture was obtained by the sample containing 10% of pond ash.
- The R² value of the regression plot indicated that the developed empirical model have good correlation between compressive strength and split tensile strength as well as good correlation between compressive strength and modulus of rupture of the pond ash incorporated concrete at 28 days of curing.
- The partial replacement of ordinary Portland cement by pond ash may decrease the environmental pollution and contribute an important role in sustainable development.

Literatura / References

1. M. Rafieizonooz, J. Mirza, M.R. Salim, M.W. Hussin, E. Khankhaje, Investigation of coal bottom ash and fly ash in concrete as replacement for sand and cement. *Constr. Build. Mater.* **116**, 15-24 (2016).
2. T.R. Naik, Sustainability of concrete construction. *Pract. Period. Struct. Design Constr.* **13**, 98–103 (2008).
3. M. Aly, M.S.J. Hashmi, A.G. Olabi, M. Messeiry, E.F. Abadir, A.I. Hussain, Effect of colloidal nano-silica on the mechanical and physical behavior of waste-glass cement mortar. *Mater. Des.* **33**, 127-135 (2012).
4. L. Senff, D. Hotza, S. Lucas, V.M. Ferreira, J.A. Labrincha, Effect of nano-SiO₂ addition on the rheological behavior and the hardened properties of cement mortars and concrete. *Mater. Sci. Eng. A* **532**, 354-361 (2012).
5. V. Sata, C. Jaturapitakkul, K. Kiattikomol, Influence of pozzolan from various by-product materials on mechanical properties of high-strength concrete. *Constr. Build. Mater.* **21**, 1589-1598 (2007).
6. N. Pradip, S. Prabir Kumar, Effect of mixture proportions on the drying shrinkage and permeation properties of high strength concrete containing class F fly ash. *KSCE J. Civ. Eng.* **17**, 1437-1445 (2013).
7. K. Haldun, K. Mine, Usage of coal combustion bottom ash in concrete mixture. *Constr. Build. Mater.* **22**, 1922–1928 (2008).
8. S. O. Bamaga, M. W. Hussin, M.A. Ismail, Palm oil fuel ash: promising supplementary cementing materials, *KSCE J. Civ. Eng.* **17**, 1708-1713 (2013).
9. J. Temuujina, A. Minjigmaa, U. Bayarzul, D. S. Kim, S-Ho Lee, H. J. Lee, C. H. Ruescher, K.J.D. MacKenzie, Properties of geopolymer binders prepared from milled pond ash. *Mater. Constr.* **67**, 1-11 (2017).
10. L.B. Chun, K.J. Sung, K.T. Sang, S.T. Chae, A study on the fundamental properties of concrete incorporating pond-ash in Korea. In: *Proc. 3rd Int. Conf. on the sustainable concrete technology and structures sustainable concrete technology and structures in local climate and environmental conditions, Vietnam*, 401-408 (2008).
11. M. J. McCarthy, M.R. Jones, L. Zheng, T.L. Robl, J.G. Groppo, Characterising long-term wet-stored fly ash following carbon and particle size separation. *Fuel* **111**, 430–441 (2013).
12. J. D. Bapat, S. S. Sabnis, C. V. Hazaree, A. D. Deshchowgule, Eco-friendly concrete with high volume of lagoon ash. *J. Mater. Civ. Eng.* **18**, 453-461 (2006).
13. V.R. Ranganath, B. Bhattacharjee, S. Krishnamoorth, Influence of size fraction of ponded ash on its pozzolanic activity. *Cem. Concr. Res.* **28**, 749-761 (1998).
14. C. Jaturapitakkul, K. Kiattikomol, V. Sata, T. Leekeeratikul, Use of ground coarse fly ash as a replacement of condensed silica fume in producing high-strength concrete. *Cem. Concr. Res.* **34**, 549–55 (2004).
15. BIS 10262 Concrete mix proportioning – guidelines (Second Revision), Bureau of Indian Standards, New Delhi, India, (2019).
16. BIS 516, Indian standard methods of tests for strength of concrete, Bureau of Indian Standards, New Delhi, India, (2004).
17. A. Cristina, M. Sanjuan, M. Esperanza, Coal bottom ash for Portland cement production, *Adv. Mater. Sci. Eng.* **17**, 1-7 (2017).
18. A. Jaturapitakkul, R. Cheerarot, Development of bottom ash as pozzolanic material. *J. Mater. Civ. Eng.* **15**, 48-53 (2003).
19. M. Cheriaf, R.J. Cavalcante, J. Pera, Pozzolanic properties of pulverized coal combustion bottom ash, *Cem. Concr. Res.* **29**, 1387-1391 (1993).
20. K. Hyeong-Ki, Utilization of sieved and ground coal bottom ash powders as a coarse binder in high-strength mortar to improve workability. *Constr. Build. Mater.* **91**, 57-64 (2015).
21. ACI 318, Building code requirements for structural concrete (ACI 318-99) and commentary 318R-99, American Concrete Institute, Farmington Hills, (1999).
22. A.M. Neville, Properties of concrete, Fourth and Final Edition, Pearson Prentice Hall, United Kingdom, (1995).
23. CEB-FIP Model Code for Concrete Structures, evaluation of the time dependent behavior of concrete. Bulletin d'Information No. 199. Comite European du Beton/Federation Internationale de la Precontrainte, Lausanne, (1990).
24. M. Ajmal, T. Palanisamy, Experimental investigation on FACA and FACACRETE– an innovative building material. *KSCE J. Civ. Eng.* **23**, 4758-4770 (2019).
25. M.I. Juki, M. Awang, M.K.A. Mahamad, K.H. Boon, N. Othman, A.A. Kadir, M.A. Roslan, F.S. Khalid, Relationship between compressive, splitting tensile and flexural strength of concrete containing granulated waste polyethylene terephthalate (pet) bottles as fine aggregate. *Adv. Mater. Res.* **795**, 356-359 (2013).
26. ACI Committee 363, State-of-the-art report on high strength concrete, ACI 363R-92 American Concrete Institute, Farmington Hills, (1997).
27. ACI Committee 318, Building code requirements for structural concrete (ACI 318-05) and Commentary (318R-05), American Concrete Institute, Farmington Hills, (2005).
28. S. Bhanjaa, B. Sengupta, Influence of silica fume on the tensile strength of concrete. *J. Cem. Concr. Res.* **35**, 743–747 (2005).