

Primljen / Received: 22.10.2024.

Ispravljen / Corrected: 15.2.2025.

Prihvaćen / Accepted: 18.4.2025.

Dostupno online / Available online: 10.1.2026.

Analiza svojstava betona s dodatkom celuloznih kokosovih vlakana i nanosilike

Autori:



Doc.dr.sc. **S. Kubendran**, dipl.ing.građ.
P.T.R Fakultet inženjerstva i tehnologije, Indija
Odjel za građevinarstvo
kuberancivil@gmail.com
Autor za korespondenciju



Prof.dr.sc. **S. Jinesh Babu**, dipl.ing.građ.
Fakultet za inženjerstvo Mepco Schlenk, Indija
Odjel za građevinarstvo
ksjinesh@mepcoeng.ac.in



Dr.sc. **C. Mekala**, dipl.ing.građ.
Centar izvrsnosti za održivost, Honeywell
laboratorij za tehnološka rješenja, Indija
mekalachandrasekar@gmail.com



Doc.dr.sc. **N. Subash**, dipl.ing.građ.
Sveučilište u Nagercoilu, Indija
Fakultet za inženjerstvo
Odjel za građevinarstvo
subashnarayanan87@gmail.com

Izvorni znanstveni rad

S. Kubendran, S. Jinesh Babu, C. Mekala, N. Subash

Analiza svojstava betona s dodatkom celuloznih kokosovih vlakana i nanosilike

U ovome radu ispitani su učinci celuloznih kokosovih vlakana (CCF) i nanosilike (NS) na mehanička svojstva i trajnost svježeg i očvrslulog betona razreda C20/25. Svojstva svježeg betona procjenjuju se ispitivanjem slijeganja betona pomoću Abramsova stošca (engl. *slump cone test*), nakon čega slijede ispitivanja tlačne čvrstoće, vlačne čvrstoće cijepanjem i čvrstoće na savijanje na očvrslulome betonu. Trajnost se procjenjuje ispitivanjem prodora vode, upijanja vode i otpornosti na kiseline. Rezultati pokazuju da dodatak 3 % nanosilike povećava tlačnu čvrstoću za približno 14 %, dok kombinacija 3 % nanosilike i 0,9 % celuloznih kokosovih vlakana povećava čvrstoću za 27 % u odnosu na kontrolni uzorak, pri čemu se postiže tlačna čvrstoća veća od 40 N/mm². Slični trendovi zabilježeni su i u ostalim mehaničkim ispitivanjima. Za ocjenu trajnosti uzorci njegovani 28 dana izlagani su agresivnoj sredini uranjanjem u otopinu klorovodične kiseline na 30, 60 i 90 dana. Beton s dodatkom nanosilike i celuloznih kokosovih vlakana analiziran je skenirajućim elektronskim mikroskopom (SEM) i energijsko-disperzijskom rendgenskom analizom (EDX).

Ključne riječi:

nanosilika, celulozna kokosova vlakna, otpornost na kiseline, prodor vode, upijanje vode

Original research paper

S. Kubendran, S. Jinesh Babu, C. Mekala, N. Subash

Performance evaluation of cement concrete incorporating cellulose coir fibre and nano-silica

This paper employs experiments to examine the effects of cellulose coir fibre (CCF) and nano-silica (NS) on the fresh, mechanical, and durability properties of C20/25 grade cement concrete. A slump cone test is used to assess the fresh concrete properties, followed by compressive, split tensile, and flexural strength tests on the hardened concrete. Durability is evaluated through water penetration, water absorption, and acid resistance tests. The addition of 3 % nano-silica results in an approximate 14 % increase in compressive strength. With the incorporation of 0.9 % cellulose coir fibre, the strength increase rises from 14 % to 27 % compared to the control specimen. A compressive strength exceeding 40 N/mm² is achieved with the inclusion of 3 % nano-silica and 0.9 % cellulose fibre in C20/25 grade concrete. Similar trends are observed in other mechanical tests. For durability assessment, specimens cured for 28 days are exposed to an acidic environment by immersion in hydrochloric acid for 30, 60, and 90 days. The cement concrete blended with nano-silica and cellulose coir fibre is also subjected to scanning electron microscopy (SEM) and energy-dispersive X-ray (EDX) analysis.

Key words:

nano silica, cellulose coir fiber, acid resistance, water penetration, water absorption

1. Uvod

U građevinske sektoru beton je zasigurno najčešće korišteni materijal [1]. Cement je ključna komponenta u proizvodnji betona zbog svojih vezivnih i adhezivnih svojstava [2]. Međutim, proizvodnja običnoga portlandskog cementa (OPC) oslobađa u atmosferu znatne količine CO₂, čime znatno doprinosi emisiji stakleničkih plinova [3, 4]. Procjenjuje se da se na svaku proizvedenu tonu OPC-a emitira približno jedna tona CO₂ [5]. U suvremenoj je gradnji uz čvrstoću ključan čimbenik postala trajnost betona [6]. Napredak u betonskoj industriji usmjeren je na poboljšanje razreda čvrstoće betona primjenom dodatnih cementnih materijala [7]. U ovom je istraživanju nanosilika dodana betonskoj mješavini kao dodatni cementni materijal. Cilj je poboljšati čvrstoću i trajnost betona [8]. Cement djeluje kao vezivo koje povezuje ostale sastojke u betonu [9], no njegov je glavni nedostatak znatan doprinos emisiji CO₂ i degradaciji okoliša [10]. Kako bi se taj negativan utjecaj na okoliš ublažio, dodavanje nanosilike u beton obećavajuće je rješenje [11, 12]. To podrazumijeva zamjenu dijela cementa različitim udjelima nanosilike u odnosu na masu cementa, čime se poboljšavaju čvrstoća i druga svojstva betona [13]. Razred betona povećan je s nižeg na viši, a smanjena je količina cementa [14, 15]. Glavni cilj ovog istraživanja jest postići beton razreda C30/37 polazeći od razreda C20/25, a da se ne povećava količina cementa. Nanosilika vrlo je učinkovita u poboljšanju čvrstoće te fizikalnih i mehaničkih svojstava betona u usporedbi s drugim nanomaterijalima [16, 17]. Ona je iznimno snažan pucolanski materijal [18, 19], a njezine su čestice znatno sitnije od čestica običnog cementa [20, 21]. Dodavanje nanosilike poboljšava tlačnu čvrstoću betona, ubrzava formiranje gela kalcijeva silikatnog hidrata (C-S-H) i skraćuje vrijeme vezivanja [22-24]. Čestice nanosilike ispunjavaju pore i zračne šupljine veličine nanometra, čime se povećava gustoća betona te smanjuje propusnost i sposobnost upijanja vode [25-27]. Rezultat toga je produljena trajnost betona. Sarita Rai i suradnici procijenili su učinkovitost nanosilike u cementnoj pasti [28]. Kada nanosilika reagira s kalcijevim hidroksidom, tada nastaju dodatne C-S-H faze, čime se dodatno poboljšava razvoj čvrstoće [29, 30]. Osim toga nanosilika doprinosi skraćivanju vremena vezivanja cementa [17, 31].

Kada se u armiranome betonu pojavi pukotina, tada se ona pod primijenjenim opterećenjima postupno širi sve do armature [32, 33]. Zbog takvih ograničenja provedena su opsežna istraživanja radi razvoja novih strategija za poboljšanje krhke prirode betona [34, 35]. Zbog toga javlja se potreba za višesmjerno raspoređenom i gusto postavljenom armaturom u betonu [36]. Kako bi se to prevladalo, istraživači su razvili metode ugradnje vlakana u beton [37-39]. Dodavanje vlakana povećava i čvrstoću i duktilnost betona [40]. Beton ojačan vlaknima odnosi se na beton koji sadržava različite vrste vlakana [41]. Ovo je istraživanje usredotočeno na beton armiran celuloznim vlaknima (eng. *cellulose fiber reinforced concrete* - CFRC), odnosno celuloznim kokosovim vlaknima. U najnovijim istraživanjima za

poboljšanje čvrstoće betona korištena su prirodna vlakna [42, 43]. Radi primjene u armiranju betona istraživana su prirodna vlakna poput kokosovih vlakana, vlakana ploda palme palmire, vlakana uljane palme, vlakana kokosove prašine, jutenih vlakana i vlakana banana [44-46]. Međutim, dosadašnja su istraživanja o obrađenim prirodnim vlaknima ili prirodnim vlaknima na bazi celuloze ugrađenima u beton radi povećanja njegove čvrstoće bila ograničena. Zato su u ovome istraživanju u beton ugrađena celulozna kokosova vlakna radi poboljšanja njegovih mehaničkih svojstava. Vlakna korištena u ovome istraživanju prikupljena su iz kokosovih nasada u obližnjim selima, u kojima su lako dostupne velike količine kokosovih ljuski [47, 48]. Kokosova vlakna izdvajaju se iz kokosovih ljuski [49]. U nasadima obično se mogu pronaći dvije vrste kokosovih vlakana: smeđa i bijela. Smeđa kokosova vlakna dobivaju se iz zrelih kokosa, dok se bijela kokosova vlakna izdvajaju iz nezrelih plodova. Smeđa kokosova vlakna jača su i deblja od bijelih [50, 51]. U ovome istraživanju korištena su smeđa kokosova vlakna. Na globalnoj razini proizvede se približno 500.000 tona kokosovih vlakana na godinu [52], pri čemu je Indija na trećemu mjestu po proizvodnji kokosa [53]. Glavne prednosti kokosovih vlakana jesu otpornost na moljce, gljivice i truljenje, toplinska i akustična izolacijska svojstva, negorivost, otpornost na vlagu i vlažne uvjete, velika čvrstoća i trajnost te sposobnost vraćanja u prvotni oblik nakon dugotrajne upotrebe [54-56]. Kokosova vlakna također pokazuju sposobnost upijanja mrlja, koja je od 4 do 6 puta veća u odnosu na druga vlakna [57-59], uz izraženu rastezljivost i mogućnost produljenja [60-62]. Vlakna se izdvajaju iz kokosove ljuske, ispiru običnom vodom radi uklanjanja nečistoća, a zatim dodatno čiste kako bi se odstranile smolaste tvari [63]. Nakon pranja, sušenja i kemijske obrade površina celuloznih kokosovih vlakana postaje znatno hrapavija u odnosu na druga vlakna [64, 65]. Promjer celuloznih kokosovih vlakana u prosjeku iznosi između 1,08 i 5,80 μm [66]. Nakon obrade vlakna su spremna za primjenu u betonu. Celulozna vlakna dodaju se u betonsku mješavinu u udjelima od 0,3 %, 0,6 %, 0,9 %, 1,2 % i 1,5 % mase cementa [67].

Dodavanje celuloznih kokosovih vlakana u obični beton rezultira raspodjelom milijuna vlakana po kubnome metru, čime se poboljšava konstrukcijska cjelovitost [68, 69]. Iako vlakna mogu imati različite oblike, celulozna vlakna u očvrslome betonu pokazuju veliki modul elastičnosti [70]. Za razliku od čeličnih vlakana, celulozna kokosova vlakna omogućuju dugotrajno armiranje bez rizika od korozije [56]. Ona su također sigurna i jednostavna za rukovanje, a ravnomjerno se raspoređuju u cijeloj betonskoj mješavini [71]. Iako celulozna kokosova vlakna imaju minimalan utjecaj na tlačnu čvrstoću, znatno poboljšavaju žilavost i otpornost na udar [72, 73]. Napredak u proizvodnji celuloznih kokosovih vlakana rezultirao je visokokvalitetnim vlaknima s izvrsnom otpornošću na lužine i dobrim karakteristikama disperzije, što znatno poboljšava njihovu dugoročnu trajnost [74, 75]. Ovo istraživanje ispitalo je učinak ugradnje optimalne količine celuloznih kokosovih vlakana uz dodatak 3 % nanosilike u betonsku mješavinu razreda C20/25. Eksperimentalni rad analizirao je utjecaj celuloznih kokosovih vlakana i nanosilike (NS) na svojstva u svježemu stanju,

mehanička svojstva i svojstva trajnosti betona razreda C20/25. Za procjenu svojstava svježeg betona provodi se ispitivanje konzistencije betona (tzv. *slump test*), a na očvrslulome betonu ispitivanja tlačne čvrstoće, vlačne čvrstoće pri cijepanju i čvrstoće na savijanje. Trajnost se procjenjuje ispitivanjima prodiranja vode, upijanja vode i otpornosti na kiseline. Nanosilika dodaje se u konstantnome udjelu od 3 % mase cementa. Celulozna kokosova vlakna dodaju se u različitim udjelima (0,3 %, 0,6 %, 0,9 %, 1,2 % i 1,5 % mase cementa) u kombinaciji s nanosilikom. Glavni je cilj ovog istraživanja bio odrediti optimalan udio celuloznih kokosovih vlakana koji maksimira mehanička svojstva i trajnost betona.

2. Materijali i metode

Sastojci betona nabavljeni su iz lokalnih izvora i odabrani zbog svoje visoke kvalitete i čistoće. Njihova svojstva i ponašanje najprije su procijenjeni vizualnim i fizičkim pregledom. Daljnja ispitivanja provedena su radi procjene prikladnosti materijala u skladu s preporukama normi IS 456, IS 650, IS 1498, IS 8112, IS 10086, IS 383, IS 2386: dijelovi I–VIII, IS 2430, IS 516, IS 1786, IS 3025, IS 4031, IS 8142 i IS 1607. Obični portlandski cement nabavljen je iz tvornice *Chettinad Cement* u Madurajju, a pijesak i krupni agregat iz tvrtke *Vignesh Blue Metals*. Nanosilika kupljena je u tvrtki *Trimex Ltd* u Hiderabadu. Za glavni sastojak morta i betona odabran je obični portlandski cement razreda 53, koji je korišten kao vezivo. Svojstva cementa određena su prema normama IS 8112:1989 i IS 4031 (dijelovi 1, 3, 5 i 11) 1988. i 1999. Laboratorijskim ispitivanjima provedenima na običnome portlandskom cementu razreda 53 određeni su finoća (test prosijavanja), početak vremena vezivanja, završetak vremena vezivanja, gustoća i normirana konzistencija. Rezultati ispitivanja pokazali su sljedeća svojstva: gustoća 3,18, finoća 6,95 %, početak vremena vezivanja 45 min, završetak vremena vezivanja 585 min te normirana konzistencija 30 %. Za beton korišteni su prirodno tvrdi agregati zbog njihove ključne uloge u mješavini. Agregat ima najveći udio u volumenu betona te mu osigurava oblik i stabilnu strukturu, a istodobno smanjuje skupljanje, povećava čvrstoću i doprinosi ekonomskoj učinkovitosti. Čini približno 75 – 80 % volumena betona i znatno utječe na njegova svojstva [76–79]. Beton se obično sastoji od dviju vrste materijala: veziva i agregata. Agregati se vežu s cementnom matricom [80]. Dije se u dvije glavne skupine prema veličini čestica: sitni agregat (manji od 4,75 mm) i krupni agregat (veći od 4,75 mm). U ovom je istraživanju kao sitni agregat korišten pijesak razreda M, koji odgovara zoni prosijavanja II. prema normi IS: 383–1970, a nabavljen je iz lokalnih izvora [81]. Rezultati laboratorijskih ispitivanja sitnog agregata bili su sljedeći: gustoća 2,69, modul finoće 2,79, apsorpcija vode 0,24 % i nasipna gustoća 1670 kg/m³. Kao krupni agregat korišten je prirodni drobljeni granit koji je zadovoljio zahtjeve prosijavanja prema normi IS: 383–1970. Nakon prolaska kroz sito od 20 mm na situ je zadržan IS od 4,75 mm. Rezultati ispitivanja krupnog agregata bili su sljedeći: gustoća 2,71, modul finoće 7,55, apsorpcija vode 0,24

%, udarna vrijednost 14,88 %, vrijednost drobljenja 14,55 % te uglati oblik zrna.

2.1. Nanosilika (SiO₂)

Nanosilika može se dobiti izravnom sintezom silicijeva dioksida ili kristalizacijom kvarcnih kristala u nanočestice [82]. Taj se materijal sastoji od vrlo sitnih staklastih čestica, otprilike tisuću puta manjih od uobičajenih čestica cementa [83]. Nanosilika široko je poznata kao vrlo djelotvoran pucolanski materijal [8, 11, 84]. Pokazala se kao učinkovit dodatak cementu jer povećava trajnost i smanjuje propusnost. Nanosilika korištena u ovome istraživanju ima veličinu čestica od 17 nm. Njezina fizikalna i kemijska svojstva prikazana su u tablici 1. Kemijski sastav određen je u laboratoriju *M/S Trimex Mineral Industries Ltd* u Hiderabadu. Kao što je to prikazano u tablici 1., glavni sastojak nanosilike jest SiO₂, s udjelom od približno 99,54 %. Vizualni prikaz nanosilike dan je na slici 1.c.

2.2. Celulozna vlakna

Sirova kokosova vlakna dobivena su iz sela Kumarapuram Thoppur u okrugu Kanyakumari, Tamil Nadu. Kemikalije koje su korištene u procesu ekstrakcije, pelete natrijeva hidroksida za lužnatu obradu, klorovodičnu kiselinu za kiselu hidrolizu te natrijev hipoklorit za izbjeljivanje proizvela je tvornica *Suja Chemicals* u Nagercoilu.

Kokosova vlakna imaju znatne prednosti u različitim industrijama. Međutim, zbog velikog udjela lignina, hemiceluloze i celuloze njihova se čvrstoća smanjuje unutar nekoliko mjeseci. Celuloza je izdvojena primjenom metode kiselinske hidrolize. Lignin, koji pridonosi biorazgradivosti vlakana, uzrokuje njihovu degradaciju tijekom vremena, obično unutar jedne do dvije godine, odnosno najviše do pet godina, ovisno o njihovoj kvaliteti. Uklonjen je tretiranjem vlakana natrijevim hidroksidom (alkalizacija) [85]. U tom je postupku 200 g vlakana zagrijavano u 50-postotnoj otopini natrijeva hidroksida (500 g NaOH u litri vode) tijekom tri sata na temperaturi između 80 °C i 100 °C. Smjesa je zatim ohlađena i ispirana vodom sve dok smeđa boja, koja je upućivala na prisutnost lignina, nije izbljedadla. Kako bi se uklonio preostali lignin, provedena je druga lužnata obrada 25-postotnom otopinom natrijeva hidroksida. Nakon toga vlakna su podvrgnuta kiselinskoj hidrolizi primjenom 50-postotne klorovodične kiseline (500 ml u 1 litri vode) i njegovana u otopini tijekom 12 sati radi uklanjanja viška neceluloznih sastojaka. Dobiveni ostatak zatim je izbjeljivan natrijevim hipokloritom, zagrijavanjem smjese na 60 °C tijekom jednog sata. Taj postupak izbjeljivanja označio je završnu fazu ekstrakcije celuloze. Izdvojena celulozna vlakna temeljito su isprana destiliranom vodom i sušena u sušioniku toplim zrakom na 110 °C tijekom dva sata. Na kraju su vlakna ohlađena u eksikatoru [86]. Na slikama 1.a i 1.b prikazana su sirova i izdvojena celulozna kokosova vlakna.

Tablica 1. Kemijska i fizikalna svojstva nanosilike

Oznaka serije	Fizikalna svojstva	Vrijednost	Kemijski sastav	Omjer [%]
1	Specifična ploština (m ² /g)	200 ± 20	Silicijev dioksid (SiO ₂)	99,54
2	pH-vrijednost	3,7 – 4,5	Aluminijev (III) oksid, (Al ₂ O ₃)	0,056
3	Gustoća	2,2 – 2,4	Željezov (III) oksid (Fe ₂ O ₃)	0,016
4	Veličina čestica	17 nm	Kalijev oksid (K ₂ O)	0,007
5	Gubitak pri sušenju 105 °C	≤ 1,5	Natrijev oksid (Na ₂ O)	0,005
6	Gubitak žarenjem 1000 °C	≤ 2,0		
7	Ostatak na situ	≤ 0,04		
8	Sabijena gustoća (g/L)	40 – 60		
9	Boja	bijela		



Slika 1. Prirodna vlakna i nanosilika: a) Sirova kokosova vlakna; b) Celulozna kokosova vlakna; c) Nanosilika

2.3. Sastav betona

Cilj je bio odrediti sastav mješavine betona razreda C20/25 na temelju rezultata ispitivanja pojedinih komponenti. Sastav mješavine zasniva se na svojstvima odabranih materijala. Vodocementni omjer igra ključnu ulogu u proizvodnji visokokvalitetnog betona. Sastav mješavine određen je u skladu s normom IS 10262:2019 [87]. Za potrebe ovog istraživanja beton razreda C20/25 projektiran je za izradu uzoraka u obliku kocke, valjka i prizme. Jedan kubni metar betona imao je udio od 425,73 kg cementa, 640,34 kg sitnog agregata, 1150 kg krupnog agregata i 191,60 kg vode. Omjer sastojaka projektirane mješavine iznosio je 1 : 1,5 : 2,7, s vodocementnim omjerom od 0,45.

U ovom istraživanju projektirana je mješavina betona razreda C20/25. Sastojci su bili cement, sitni agregat (FA), krupni agregat (CA) i voda. Beton je pripremljen prema specificiranome omjeru sastojaka 1 : 1,5 : 2,7 (jedan dio cementa, 1,5 dijela FA i 2,7 dijela CA) uz vodocementni omjer od 0,45. Miješanje je provedeno mehaničkim mikserom. Posebna je pozornost posvećena postavljanju, zbijanju, vađenju iz kalupa i ispitivanju. Beton je izliven i zbijan prije početka vremena vezivanja.

Standardne dimenzije kalupa bile su 150 × 150 × 150 mm za kocke, promjer 150 mm i visina 300 mm za valjke i 100 × 100 × 500 mm za prizme. Za izradu kocki, valjaka i prizmi korišteni su kalupi od lijevanog željeza. Unutarnje površine kalupa premazane su tankim slojem ulja radi olakšanog vađenja uzoraka betona. Beton je promiješan u zdjelastome

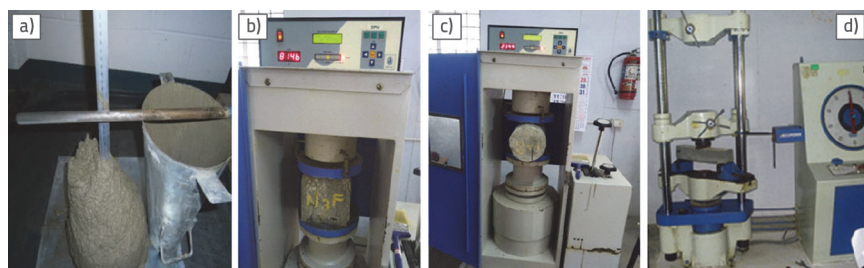
mikseru kapaciteta 100 kg, a nanosilika (NS) i celulozna kokosova vlakna (eng. *Cellulose coir fiber* - CCF) dodavani su nakon temeljitog miješanja suhih sastojaka. Za mješavine sa slojem debljine od 5 cm beton je postavljan u slojevima u kalupe, a svaki sloj zbijan ručno pomoću šipke s kuglastim vrhom. Gornja površina poravnana je gleterom. Uzorci su raskalupljeni 24 sata nakon

izlijevanja mješavine. Provedeno je probno ispitivanje s različitim udjelima nanosilike (0 %, 1 %, 2 %, 3 %, 4 % i 5 % mase cementa), pri čemu je optimalnu čvrstoću postigla mješavina s udjelom nanosilike od 3 %. Nakon toga dodavana su celulozna kokosova vlakna u udjelima od 0,3 %, 0,6 %, 0,9 %, 1,2 % i 1,5 % mase cementa, pri održavanju konstantnog udjela nanosilike od 3 %. Mješavina bez nanosilike (NS) i celuloznih kokosovih vlakana (CCF) označena je kao kontrolna mješavina (CM), dok je mješavina s udjelom 3 % NS-a i 0 % CCF-a označena kao FO. Mješavine s udjelom 3 % NS-a i različitim udjelima CCF-a označene su sljedećim oznakama: FO.3 (0,3 % CCF), FO.6 (0,6 % CCF), FO.9 (0,9 % CCF), F1.2 (1,2 % CCF) i F1.5 (1,5 % CCF).

2.4. Ispitivanje svježeg i očvrslulog betona

Ispitivanje slijeganja betona (tzv. *slump test*) najčešća je metoda za određivanje konzistencije betona. Primjenjiva je na gradilištu i u laboratorijskim uvjetima te široko prihvaćena zbog svoje jednostavnosti. Ispitivanje se provodi pomoću kalupa u obliku stošca, čije su unutarnje dimenzije u skladu s normom IS 1199:1959.

U ispitivanju korišten je stalak za smještaj stošca. Svježa betonska mješavina izlivena je u kalup u četiri sloja, a svaki je sloj zbijan standardnom šipkom za zbijanje s 25 udaraca, ravnomjerno raspoređenih po poprečnome presjeku. Nakon što je postavljen četvrti sloj, gornja površina betona izravnana je gleterom. Kalup stošca zatim je pažljivo uklonjen podizanjem u vertikalnome smjeru, što je omogućilo betonu da se slegne. Ta vertikalna promjena visine betona označava



Slika 2. Ispitivanja svježeg i očvrstnalog betona: a) Ispitivanje slijeganja; b) Ispitivanje tlačne čvrstoće; c) Ispitivanje vlačne čvrstoće cijepanjem; d) Ispitivanje čvrstoće na savijanje

slijeganje betona. Slijeganje se mjeri u milimetrima kao vertikalna udaljenost između vrha slegnutog betona i početne visine kalupa, a ilustrirano je na slici 2.a. Rezultati ispitivanja prikazani su u tablici 2. Mehanička svojstva uzoraka ispitivana su u skladu s normama IS 5816:1999 i IS 516:1959 [88]. Ispitivanje tlačne čvrstoće izvedeno je u elektrohidrauličkome stroju za ispitivanje tlačne čvrstoće maksimalnog kapaciteta od 2000 kN. Na slici 2.b prikazana je primjena aksijalnoga tlačnog opterećenja, koje je postupno povećavano brzinom od 5,4 kN/s u koracima od 50 kN. Prosječne vrijednosti tlačne čvrstoće za svaki uzorak u obliku kocke navedene su u tablici 2. Za ispitivanje vlačne čvrstoće cijepanjem korištena je oprema prikazana na slici 2.c, pri čemu je opterećenje primjenjivano brzinom od 2,9 kN/s. Eksperimentalni rezultati, sažeti u tablici 2., korišteni su za izračun odgovarajućih vrijednosti vlačne čvrstoće cijepanjem. Ispitivanje čvrstoće na savijanje prizmi provedeno je pomoću univerzalnog stroja (UTM), a rezultati su prikazani na slici 2.d. Čvrstoća na savijanje izračunana je na temelju eksperimentalnih podataka navedenih u tablici 2.

2.5. Ispitivanje trajnosti

Trajnost se odnosi na sposobnost betona da odolijeva djelovanju atmosferskih utjecaja, kemijskim djelovanjima i abraziji,

Uzorci su uronjeni u dvopostotnu otopinu HCl-ja tijekom 30, 60 i 90 dana pri sobnoj temperaturi. pH-vrijednost otopine iznosila je 1,54, a ukupna količina otopljenih tvari 54,5 ppm. Nakon vađenja iz otopine HCl-ja, uzorci su ispitani radi procjene gubitka čvrstoće ili mase, a rezultati uspoređeni. Kako bi se procijenila trajnost betonskih kocaka i njihova otpornost na djelovanje kiseline, provedeno je eksperimentalno istraživanje primjenom nanosilike (NS). Pripremljen je 21 betonski uzorak u obliku kocke, i to obični beton, beton s dodatkom nanosilike i s dodatkom celuloznih kokosovih vlakana, a dimenzije kocki bile su $150 \times 150 \times 150$ mm. Uzorci su podvrgnuti ispitivanju otpornosti na kiseline u određenim vremenskim intervalima, a kako je to prikazano na slici 3. Nakon 28 dana njege u vodi uzorci su izvađeni iz posude, obrisani radi uklanjanja zaostale vlage te sušeni jedan dan na zraku pri sobnoj temperaturi. Osušeni uzorci precizno su izvagani kako bi se zabilježila njihova početna masa. Na jednoj skupini uzoraka (po tri kocke) običnog betona



Slika 3. Betonske kocke uronjene u otopinu klorovodične kiseline (HCl)



Tablica 2. Svojstva svježeg i očvrstnalog betona

Oznaka serije	Oznaka mješavine	Nanosilika [%]	Celulozna kokosova vlakna [%]	Slijeganje [mm]	Tlačna čvrstoća [N/mm ²]			Vlačna čvrstoća cijepanjem [N/mm ²]			Čvrstoća na savijanje [N/mm ²]		
					Trajanje njege [dani]			Trajanje njege [dani]			Trajanje njege [dani]		
					7	14	28	7	14	28	7	14	28
1	CM	0	0	76	19,83	27,93	31,74	2,13	3,01	3,42	3,12	3,70	3,94
2	F0	3	0	73	22,01	31,14	37,29	2,37	3,35	4,01	3,28	3,91	4,27
3	F0.3	3	0,3	71	22,85	32,36	38,79	2,46	3,48	4,18	3,35	3,98	4,36
4	F0.6	3	0,6	70	23,72	33,63	40,46	2,55	3,62	4,36	3,41	4,06	4,45
5	F0.9	3	0,9	68	24,43	34,72	41,77	2,63	3,74	4,50	3,46	4,12	4,52
6	F1.2	3	1,2	67	23,88	34,08	41,02	2,57	3,67	4,42	3,42	4,09	4,48
7	F1.5	3	1,5	65	23,26	32,76	39,07	2,50	3,53	4,21	3,38	4,01	4,38

i betona s dodatkom nanosilike ispitana je tlačna čvrstoća pomoću CTM-a, u skladu s normom IS 516:1959. Primijenjeno opterećenje podijeljeno je s površinom presjeka radi određivanja tlačne čvrstoće, a zabilježene su srednje vrijednosti.

2.5.2. Ispitivanje upijanja vode

Za procjenu upijanja korišteni su betonski uzorci u obliku kocki dimenzija $150 \times 150 \times 150$ mm. Nakon 28 dana njege u vodi uzorci su sušeni u sušioniku tijekom 48 h. Nakon sušenja svaki je uzorak izvažen, a zatim uronjen u vodu na 24 h. Poslije su izvađeni i obrisani suhom krpom, a potom je zabilježena njihova konačna masa. Upijanje vode izračunano je kao postotni porast mase nakon 24 h uranjanja. Na slici 4. prikazani su uzorci uronjeni u vodu.



Slika 4. Uzorci betona uronjeni u vodu

2.5.3. Ispitivanje vodopropusnosti

Svrha ispitivanja vodopropusnosti bila je procijeniti i analizirati poroznost običnog betona, betona s nanosilikom i betona s celuloznim kokosovim vlaknima. Prije ispitivanja određena je gustoća svakog uzorka. Tijekom ispitivanja betonski zaštitni sloj bio je postavljen u kontakt s tlačnom komorom kako bi se spriječilo propuštanje vode kroz oblogu. Na standardne i vlaknima armirane betonske uzorke primijenjen je vodeni tlak od 2 do 3 Pa.



Slika 5. Uređaj za ispitivanje vodopropusnosti

Trajanje kalibracijskog ispitivanja nije bilo kraće od jednog sata. U slučaju pojave propusnosti vode koeficijent propusnosti

izračunan je metodom stalnog protoka. Ako nije bilo mjerljivog protoka vode, koeficijent propusnosti (K) određen je metodom dubine prodiranja, pri čemu su uzorci kocki rascijepljeni te je izmjerena dubina prodiranja vode. Ispitivanja vodopropusnosti provedena su u skladu s normom IS 3085:1965 [89]. Uređaj za ispitivanje prikazan je na slici 5.

2.6. Mikroskopska ispitivanja

U ovom su istraživanju primijenjene dvije vrste mikroskopskih analiza: skenirajući elektronski mikroskop (SEM) i energetski disperzivna rendgenska spektroskopija (EDX). Obje su metode vrlo precizne analitičke tehnike.

2.6.1. Skenirajući elektronski mikroskop (SEM)

Skenirajući elektronski mikroskop (SEM) omogućuje dobivanje slika u visokoj rezoluciji [90]. Elektronski top generira visokofokusirani snop elektrona koji se usmjerava na malo područje uzorka. Uzorak reflektira elektrone visoke energije, koje potom detektira skenirajući elektronski mikroskop. Određeno područje uzorka fokusira se pomoću objektivne leće skenirajućeg elektronskog mikroskopa. Udaljenost između elektronskog topa i uzorka naziva se radna udaljenost, a ona znatno utječe na kvalitetu slike [91]. SEM detektira dvije vrste elektrona: povratno raspršene elektrone i sekundarne elektrone. Povratno raspršeni elektroni daju kontrast koji varira ovisno o kemijskome sastavu uzorka, dok se sekundarni elektroni, emitirani blizu površine, koriste za određivanje topografije površine.

2.6.2. Energijsko-disperzivna rendgenska spektroskopija (EDX)

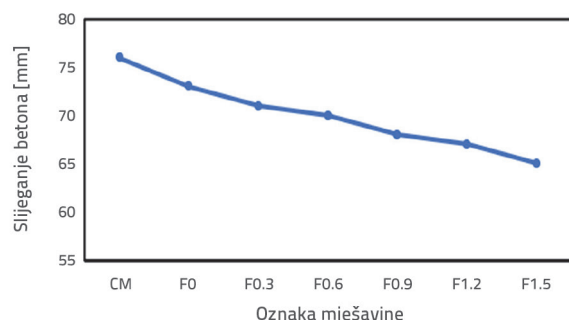
Spektroskopski uređaji EDX, poznati i kao EDS, integrirani su u svaki sustav SEM [92]. Kada je atom izložen elektronskome snopu, emitira karakteristične rendgenske zrake specifične za svoj atomski broj. To omogućuje elementno mapiranje, linijsko skeniranje te analizu elementnog sastava, lokalno ili na širem području. Za procjenu kemijskog sastava uzorka također se može primjenjivati polukvantitativna analiza. Osim toga TWI nudi valno-disperzivnu rendgensku spektroskopiju (WDX) za analizu lakih elemenata poput dušika i kisika. Kada se kombinira s konvencionalnom analizom SEM, tada EDX omogućuje sveobuhvatnije razumijevanje lokalnog sastava materijala [93].

3. Rezultati i rasprava

3.1. Utjecaj na slijeganje betona

Dodavanje celuloznih kokosovih vlakana i nanosilike smanjilo je obradivost betona. Povećanje udjela celuloznih kokosovih vlakana rezultiralo je proporcionalnim smanjenjem slijeganja betona kao što je to prikazano u tablici 1. Najveće slijeganje imala je kontrolna mješavina betona. Kod mješavine koja je imala udio

nanosilike od 3 % zabilježeno je smanjenje slijeganja za 4 %. Zbog celuloznih kokosovih vlakana površina betona bila je hrapavija. U mješavini F1.5, koja je imala najveći udio celuloznih kokosovih vlakana, obradivost je smanjena za 17 %. Nanosilika ispunila je nanošupljine u betonskoj matrici, što je dodatno doprinijelo smanjenju obradivosti betona [94, 95]. Nadalje, utvrđeno je da grupiranje i zbijanje vlakana negativno utječu na obradivost [96]. Varijacije slijeganja svih mješavina prikazane su na slici 6.

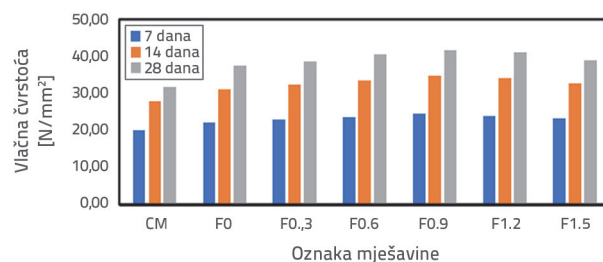


Slika 6. Vrijednosti slijeganja svih mješavina betona

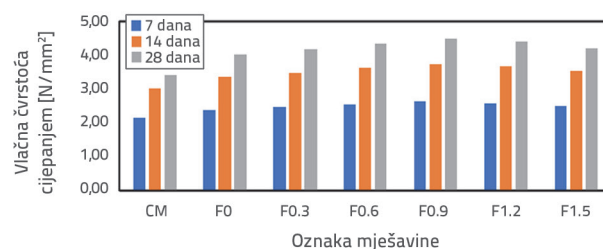
3.2. Utjecaj na mehanička svojstva betona

Na slici 7. prikazane su vrijednosti tlačne čvrstoće svih mješavina nakon 7, 14 i 28 dana. Mješavina koja je imala udio od 0,9 % celuloznih kokosovih vlakana i 3 % nanosilike postigla je najveću tlačnu čvrstoću, koja je iznosila 41,77 N/mm². Dodavanjem nanosilike povećana je gustoća betona popunjavanjem većine poroznih šupljina. Nanosilika poboljšala je tlačnu čvrstoću, vlačnu čvrstoću cijepanjem i čvrstoću na savijanje. Mješavina s 3 % nanosilike pokazala je povećanja u odnosu na kontrolnu mješavinu, i to za 15 % u tlačnoj čvrstoći, 14 % u vlačnoj čvrstoći cijepanjem i 8 % u čvrstoći na savijanje. To se poboljšanje pripisuje velikome udjelu silicija u nanosilici, koji brzo stvara gel kalcijeva silikat-hidrata (C-S-H), čime se povećava čvrstoća betona [97–101]. Međutim, prekomjerni udio nanosilike može smanjiti udio kalcijeva hidroksida (C-H) u mješavini, a višak silicija može dovesti do zbijanja, što rezultira smanjenjem čvrstoće [102]. U ovome istraživanju kao optimalna doza odabran je udio od 3 % nanosilike jer daje najveću tlačnu čvrstoću. Dodavanje celuloznih kokosovih vlakana do 0,9 % povećalo je tlačnu čvrstoću, a zbog

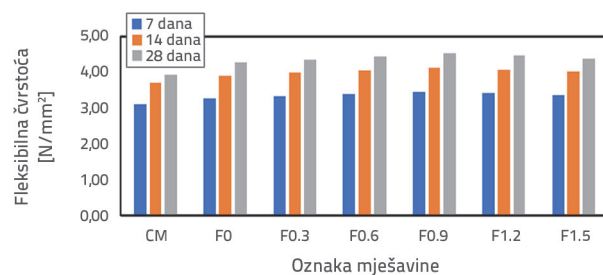
udjela celuloznih kokosovih vlakana iznad te vrijednosti tlačne čvrstoće smanjivale su se zbog zbijanja vlakana. Mješavina koja je imala udjele od 3 % nanosilike i 0,6 % celuloznih vlakana postigla je povećanje tlačne čvrstoće od 32 %, vlačne čvrstoće cijepanjem od 31 % te čvrstoće na savijanje od 15 %. Na slici 8. prikazana je vlačna čvrstoća cijepanjem svake mješavine nakon 7, 14 i 28 dana. Iako su celulozna kokosova vlakna relativno slaba na vlačno opterećenje, a snažna na tlačno, njihova primjena u betonu rezultirala je povećanjem i vlačne čvrstoće cijepanjem i čvrstoće na savijanje, osobito pri udjelu od 0,9 %. Na slici 9. prikazana je čvrstoća na savijanje pojedinih mješavina nakon 7, 14 i 28 dana.



Slika 7. Tlačna čvrstoća svih uzoraka betona



Slika 8. Vlačna čvrstoća cijepanjem svih uzoraka betona



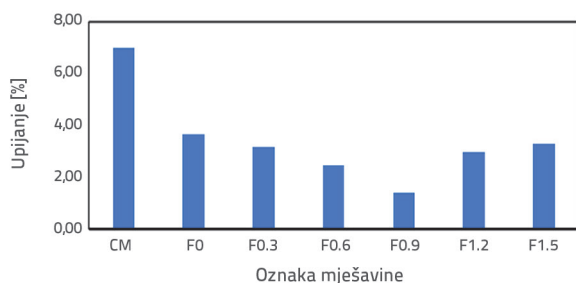
Slika 9. Čvrstoća na savijanje svih uzoraka betona

Tablica 3. Rezultati ispitivanja trajnosti betona

Oznaka serije	Oznaka mješavine	Upijanje vode [%]	Gubitak mase [g]			Gubitak tlačne čvrstoće [N/mm ²]			Dubina prodora vode [mm]
			30 dana	60 dana	90 dana	30 dana	60 dana	90 dana	
1	CM	7,00	27	33	51	29,84	28,22	27,45	18
2	F0	3,68	24	29	46	35,4	35,12	35,02	15
3	F0.3	3,17	22	28	44	37,68	37,54	37,48	12
4	F0.6	2,49	20	26	43	39,82	39,36	39,01	10
5	F0.9	1,39	19	25	42	40,66	40,38	40,17	8
6	F1.2	2,98	21	28	44	39,12	38,67	38,48	11
7	F1.5	3,29	23	29	45	38,47	37,88	37,24	12

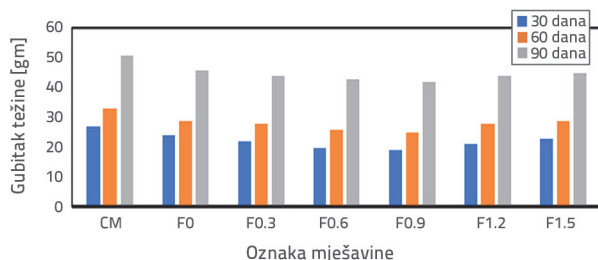
3.3. Utjecaj na svojstva trajnosti betona

Provedene su tri vrste ispitivanja kako bi se ocijenila trajnost cementnog betona: upijanje vode, otpornost na kiseline i otpornost na prodor vode. Sva su provedena na sobnoj temperaturi. Na slici 10. prikazani su rezultati upijanja vode za sedam različitih mješavina. Kontrolni uzorak betona, sastavljen samo od sitnog i krupnog agregata te cementa, imao je najveći postotak upijanja vode od 7 %. Na uzorku s 3 % nanosilike zabilježeno je smanjenje upijanja vode za 3,33 % u odnosu na kontrolni uzorak. Najmanje je vode upijala mješavina koja je imala udio od 3 % nanosilike i 0,9 % celuloznih kokosovih vlakana. Međutim, mješavine s 1,2 % i 1,5 % celuloznih kokosovih vlakana pokazale su povećano upijanje vode. To se pripisuje zbijanju vlakana u pojedinim područjima te prevelikoj količini vlakana, što je rezultiralo stvaranjem zračnih šupljina.

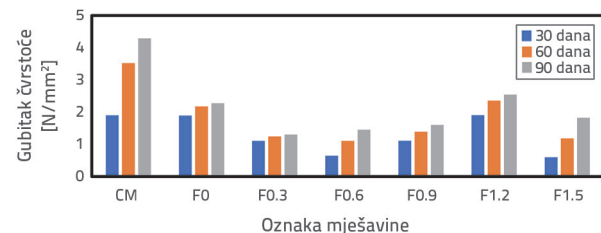


Slika 10. Postotak upijanja vode za sve mješavine betona

Sve su mješavine izgubile masu i čvrstoću uslijed izloženosti kiselome okolišu, kao što je to prikazano na slikama 11. i 12. Kontrolni uzorak betona imao je najveći gubitak mase i čvrstoće, dok su mješavine F0.9 i F0.6 imale najmanji gubitak. Dodavanje 3 % nanosilike mješavini djelovalo je kao nanopunilo i učinkovito smanjilo poroznost mješavine. Uzorci koji su imali udio nanosilike pokazali su znatno manji gubitak mase i čvrstoće u usporedbi s kontrolnim uzorkom betona.

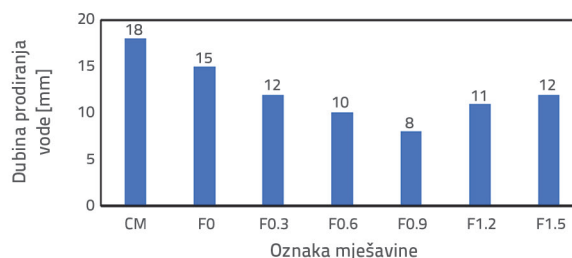


Slika 11. Gubitak mase uslijed izloženosti kiselinama za sve mješavine



Slika 12. Gubitak čvrstoće uslijed izloženosti kiselinama za sve mješavine

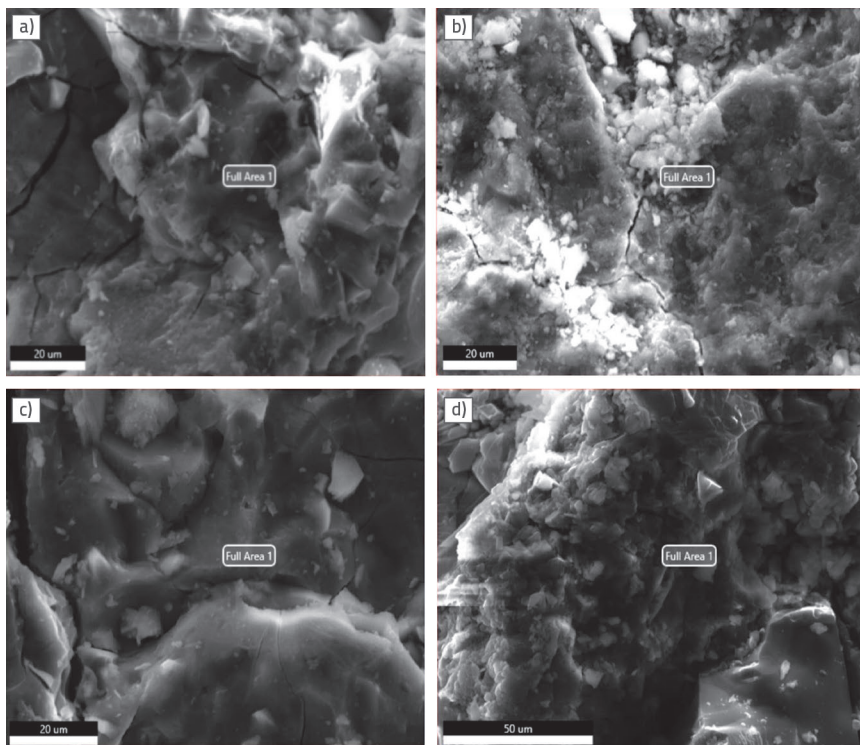
Na slici 13. prikazana je dubina prodora vode za sve mješavine. Referentna mješavina imala je najveću dubinu prodora, s izmjerenom vrijednošću od 18 mm. Dodavanje 3 % nanosilike rezultiralo je gušćom mješavinom, smanjujući prodor vode. Mješavina koja je imala udio od 3 % nanosilike i 0,9 % celuloznih kokosovih vlakana (F0.9) imala je najmanju dubinu prodora vode, što upućuje na kompaktniju strukturu u odnosu na ostale mješavine. Mješavina F0.9 imala je 1,25 puta manju dubinu prodora u usporedbi s referentnom mješavinom. Sveukupno gledano, mješavina F0.9 pokazala je bolja svojstva trajnosti, pri čemu je 3 % nanosilike znatno poboljšalo karakteristike trajnosti betona.



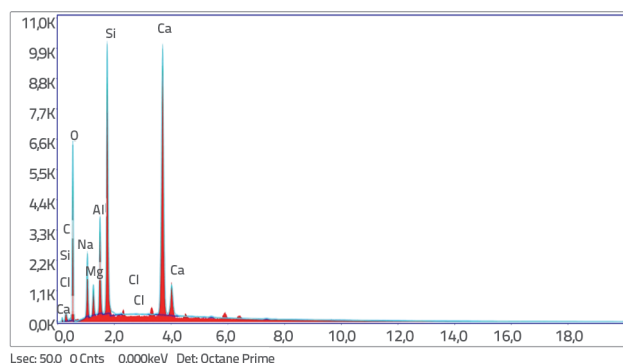
Slika 13. Dubina prodora vode za sve mješavine

3.4. Analiza površine i sastava betona

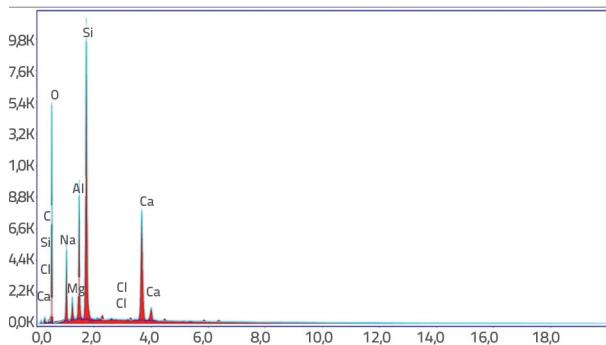
Nanosilika ima veliku površinu i pokazuje dobra pucolanska svojstva. Silicij reagira brzo s kalcijevim hidroksidom, tvoreći C-S-H gel. Ta reakcija povećava količinu C-S-H gela, smanjuje zračne šupljine i povećava gustoću betona, što rezultira manjom propusnošću. Quercia i suradnici uočili su gustu i ujednačenu mikrostrukturu s formiranjem C-S-H gela u prijelaznoj zoni samozbijajućeg betona (SCC). Andalibi i suradnici izvijestili su da beton s dodatkom nanosilike pokazuje homogenu strukturu, jer nanosilika učinkovito smanjuje mikrozračne šupljine. Prema Du i suradnicima, nanosilika pokazuje snažnu pucolansku reakciju, stvarajući dodatni C-S-H gel koji ispunjava mikropukotine i šupljine, čime se dobiva gušća i ujednačenija mikrostruktura. Međutim, Huang i suradnici utvrdili su da beton s dodatkom 6 % nanosilike razvija brojne mikropukotine. Prekomjerni udio nanosilike izaziva flokulaciju, što povećava zračne šupljine i propusnost. Na slici 14.a prikazana je SEM slika referentnog uzorka, na kojoj su vidljivi brojni kristali kalcijeva hidroksida i velike šupljine, što upućuje na veliku propusnost u usporedbi s uzorcima koji sadržavaju silicij. Suprotno tome, na slici 14.b prikazana je SEM slika uzorka s 3 % nanosilike i 0,6 % celuloznih kokosovih vlakana, koji ima gušću mikrostrukturu, sa znatno manjim brojem šupljina. Kristali kalcijeva hidroksida vidljivi su na slici 14.b. Na slici 14.c prikazan je uzorak betona s 3 % nanosilike i 0,9 % celuloznih kokosovih vlakana. SEM slika otkriva manji broj pora i šupljina. Međutim, povećanje udjela celuloznih kokosovih vlakana iznad 1,2 % dovodi do zbijanja vlakana, što rezultira većim brojem šupljina. Propusnost mješavine F0.9 manja je od propusnosti mješavine F0.6. Na slici 14.d prikazan je uzorak s 3 % nanosilike, pri čemu je jasno vidljiva prisutnost SiO₂.



Slika. 14. SEM slike: a) kontrolni uzorak; b) uzorak F0.6; c) uzorak F0.9; d) uzorak F0



Slika 15. EDX analiza mješavine CM



Slika 16. EDX analiza mješavine F0

Dodavanje nanosilike učinkovito ispunjava pore u betonu [105, 106]. Dodavanje 3 % nanosilike pomaže u sprječavanju nastanka mikropukotina i ublažava promjene volumena tijekom faze sušenja, a rezultira ujednačenom mikrostrukturom i smanjenom propusnošću [107]. Kako se smanjuje propusnost, tako čvrstoća betona proporcionalno raste [25]. Uzorci su podvrgnuti EDX analizi, a odgovarajuće slike prikazane su na slikama 15. i 16.

Primjena nanosilike u betonu dovela je do promjena u kemijskom sastavu, posebno do povećanja udjela silicija. Kako se udio nanosilike povećavao, tako je rastao udio silicija u betonu. Optimalna doza nanosilike pomaže u održavanju uravnoteženog omjera Si/Ca. Međutim, prekomjerno dodavanje nanosilike može dovesti do povećanog sadržaja Si u odnosu na Ca [16, 108]. Slike također otkrivaju djelomično hidratizirane čestice nanosilike i znakove zbijanja. Kalcijev hidroksid reagira s tim djelomično hidratiziranim

česticama nanosilike, tvoreći C-S-H gel [109], što potvrđuje pucolansku reakciju. EDX analiza potvrđuje da je nanosilika materijal visokih pucolanskih svojstava te da znatno poboljšava čvrstoću i trajnost betona [22, 110].

4. Zaključak

U ovome istraživanju ispitan je utjecaj celuloznih kokosovih vlakana (CCF) i nanosilike (NS) na čvrstoću i trajnost betona. Na temelju eksperimentalnih rezultata može se zaključiti sljedeće:

- Rezultati pokazuju da dodavanje 0,9 % celuloznih kokosovih vlakana i 3 % nanosilike—mješavini betona znatno poboljšava čvrstoću betona. Uzorci u obliku kocki, valjaka i prizmi koji imaju udjele CCF-a i NS-a pokazali su veću čvrstoću u usporedbi s uzorcima običnog betona. Mehanička svojstva uzoraka s nanoslikom bila su bolja od svojstva uzoraka običnog betona. Dodatno, upotreba nanosilike doprinosi poboljšanju isplativosti proizvodnje betona. Buduća istraživanja trebala bi uključiti detaljnu SEM analizu kako bi se dodatno istražili mikrostrukturni učinci nanosilike u betonu.
- Na temelju eksperimentalnih rezultata uzorci koji imaju udjele od 0,9 % celuloznih kokosovih vlakana i 3 % nanosilike imaju veću čvrstoću. U usporedbi s kontrolnim uzorcima, nakon uranjanja u kiselinu zabilježen je tek neznatan gubitak mase i tlačne čvrstoće.

- Rezultati ispitivanja otpornosti na kiseline, prodora vode i upijanja vode potvrđuju da dodavanje nanosilike poboljšava trajnost betona.
- Kombinirano dodavanje nanosilike i celuloznih kokosovih vlakana poboljšava tlačnu čvrstoću, vlačnu čvrstoću cijepanjem i čvrstoću na savijanje betona.

Zahvala

Autori s velikim zadovoljstvom zahvaljuju Odsjeku za građevinarstvo P. T. R. Fakulteta inženjerstva i tehnologije u Maduraiju, Tamil Nadu, u Indiji.

LITERATURA

- [1] Sandanayake, M., Bouras, Y., Haigh, R., Vrcelj, Z.: Current sustainable trends of using waste materials in concrete - A decade review, *Sustain.*, 12 (2020) 22, pp. 1–38, <https://doi.org/10.3390/su12229622>.
- [2] Lavagna, L., Nisticò, R.: An insight into the chemistry of cement - A review, *Appl. Sci.*, 13 (2023) 1, <https://doi.org/10.3390/app13010203>.
- [3] Engineering, K.S.R.C.O., Nadu, T. Ash, F.: Experimental study on geopolymers concrete using heavy weight aggregate value, *International Research Journal of Modernization in Engineering Technology and Science*, 6 (2022), pp. 4663–4667
- [4] Annapurna, D., Kishore, R., Ushaee, M.: Comparative study of experimental and analytical results of geo polymer concrete, *Int. J. Civ. Eng. Technol.*, 7 (2016) 1, pp. 211–219
- [5] Sreevidya, V., Anuradha, R., Venkatasubramani, R.: Study on fly ash geopolymer concrete to reduce global warming gases, *Nat. Environ. Pollut. Technol.*, 9 (2010) 2, pp. 383–387
- [6] Adesina, A., Zhang, J.: Impact of concrete structures durability on its sustainability and climate resiliency, *Next Sustain.*, 3 (2024) 3, pp. 100025, <https://doi.org/10.1016/j.nxsust.2024.100025>.
- [7] Snellings, R., Suraneni, P., Skibsted, J.: Future and emerging supplementary cementitious materials, *Cem. Concr. Res.*, 171 (2023), pp. 107199, <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2023.107199>.
- [8] Aitawaiha, H., Alhomaidat, F., Eljufout, T.: A review of the effect of nano-silica on the mechanical and durability properties of cementitious composites, *Infrastructures*, 8 (2023) 9, <https://doi.org/10.3390/infrastructures8090132>.
- [9] Gartner, E.M., Macphee, D.E.: A physico-chemical basis for novel cementitious binders, *Cem. Concr. Res.*, 41 (2011) 7, pp. 736–749, <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2011.03.006>.
- [10] Khaiyum, M.Z., Sarker, S., Kabir, G.: Evaluation of carbon emission factors in the cement industry: An emerging economy context, *Sustain.*, 15 (2023) 21, <https://doi.org/10.3390/su152115407>.
- [11] Aggarwal, P., Singh, R.P., Aggarwal, Y.: Use of nano-silica in cement based materials—A review, *Cogent. Eng.*, 2 (2015) 1, <https://doi.org/10.1080/23311916.2015.1078018>.
- [12] Tran, H.B., Phan, V.T.A.: Potential usage of fly ash and nano silica in high-strength concrete: Laboratory experiment and application in rigid pavement, *Case Stud. Constr. Mater.*, 20 (2024) 9, pp. e02856, <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2024.e02856>.
- [13] Alqamish, H.H., Al-Tamimi, A.K.: Development and evaluation of nano-silica sustainable concrete, *Appl. Sci.*, 11 (2021) 7, <https://doi.org/10.3390/app11073041>.
- [14] Shunmuga Vembu, P.R., Ammasi, A.K.: A comprehensive review on the factors affecting bond strength in concrete, *Buildings*, 13 (2023) 3, <https://doi.org/10.3390/buildings13030577>.
- [15] Kim, J., Lee, D., Ubysz, A.: Comparative analysis of cement grade and cement strength as input features for machine learning-based concrete strength prediction, *Case Stud. Constr. Mater.*, 21 (2024) 7, pp. e03557, <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2024.e03557>.
- [16] Althoei, F., Zaid, O., Martínez-García, R., Alsharari, F., Ahmed, M., Arbili, M.M.: Impact of Nano-silica on the hydration, strength, durability, and microstructural properties of concrete: A state-of-the-art review, *Case Stud. Constr. Mater.*, 18 (2023) 2, <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2023.e01997>.
- [17] Nigam, M., Verma, M.: Effect of nano-silica on the fresh and mechanical properties of conventional concrete, *Forces Mech.*, 10 (2023) 1, pp. 0–6, <https://doi.org/10.1016/j.finmec.2022.100165>.
- [18] Zhuang, C., Chen, Y.: The effect of nano-SiO₂ on concrete properties: A review, *Nanotechnology Reviews*, 8 (2019) 1, pp. 562–572
- [19] Gayathiri, K., Praveenkumar, S.: Influence of Nano-silica on fresh and hardened properties of cement-based materials - A Review, *Springer Netherlands*, 14 (2022) 14, <https://doi.org/10.1007/s12633-021-01598-z>.
- [20] Khan, K., Ahmad, W., Amin, M.N., Nazar, S.: Nano-Silica-modified concrete: A bibliographic analysis and comprehensive review of material properties, *Nanomaterials*, 12 (2022) 12, <https://doi.org/10.3390/nano12121989>.
- [21] Nie, L., Li, X., Li, J., Zhu, B., Lin, Q.: Analysis of high performance concrete mixed with Nano-Silica in front of Sulfate attack, *Materials (Basel)*, 15 (2022) 21, <https://doi.org/10.3390/ma15217614>.
- [22] Kashyap, V.S., Sancheti, G., Yadav, J.S., Agrawal, U.: Smart sustainable concrete: enhancing the strength and durability with nano silica, *Smart Constr. Sustain. Cities*, 1 (2023) 1, pp. 1–17, <https://doi.org/10.1007/s44268-023-00023-1>.
- [23] Buckner, C.A., et al.: Advanced biometric technologies, <https://www.intechopen.com/books/advanced-biometric-technologies/liveness-detection-in-biometrics>, [2.10.2024.]
- [24] Kumar, V.V.P., Prasad, D.R.: Study on strength and durability characteristics of lime sludge based blended cement concrete, *J. Build. Pathol. Rehabil.*, 4 (2019) 1, <https://doi.org/10.1007/s41024-018-0041-5>.
- [25] Arif, M., Hasan, S., Siddiqui, S.: Effect of nano silica on strength and permeability of concrete, *Mater. Today Proc.*, (2023), <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2023.04.073>.
- [26] Belkowitz, J., Belkowitz, W., Nawrocki, K., Fisher, F.: Impact of nanosilica size and surface area on concrete properties, *ACI Mater. J.*, 112 (2015), <https://doi.org/10.14359/51687397>.

- [27] Singh, L.P., Goel, A., Bhattacharyya, S.K., Ahalawat, S., Sharma, U., Mishra, G.: Effect of morphology and dispersibility of silica nanoparticles on the mechanical behaviour of cement mortar, *Int. J. Concr. Struct. Mater.*, 9 (2015) 2, pp. 207–217, <https://doi.org/10.1007/s40069-015-0099-2>.
- [28] Rai, S., Tiwari, S.: Nano silica in cement hydration, *Mater. Today Proc.*, 5 (2018), pp. 9196–9202, <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2017.10.044>.
- [29] Maddalena, R., Li, K., Chater, P.A., Michalik, S., Hamilton, A.: Direct synthesis of a solid calcium-silicate-hydrate (C-S-H), *Constr. Build. Mater.*, 223 (2019), pp. 554–565, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.06.024>.
- [30] Lin, Q., Xu, Z., Lan, X., Ni, Y., Lu, C.: The reactivity of nano silica with calcium hydroxide. *J. Biomed. Mater. Res. B. Appl. Biomater.*, 99 (2011), pp. 239–246, <https://doi.org/10.1002/jbm.b.31891>.
- [31] Zhang, M.H., Islam, J.: Use of nano-silica to reduce setting time and increase early strength of concretes with high volumes of fly ash or slag, *Constr. Build. Mater.*, 29 (2012), pp. 573–580, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2011.11.013>.
- [32] Soltani, A., Harries, K.A., Shahrooz, B.M.: Crack opening behavior of concrete reinforced with high strength reinforcing steel, *Int. J. Concr. Struct. Mater.*, 7 (2013) 4, pp. 253–264, <https://doi.org/10.1007/s40069-013-0054-z>.
- [33] Chen, E., Berrocal, C.G., Löfgren, I., Lundgren, K.: Correlation between concrete cracks and corrosion characteristics of steel reinforcement in pre-cracked plain and fibre-reinforced concrete beams, *Mater. Struct. Constr.*, 53 (2020) 2, <https://doi.org/10.1617/s11527-020-01466-z>.
- [34] Salami, B.A., Mukhtar, F., Ganiyu, S.A., Adekunle, S., Saleh, T.A.: Graphene-based concrete: Synthesis strategies and reinforcement mechanisms in graphene-based cementitious composites (Part 1), *Constr. Build. Mater.*, 396 (2023), pp. 132296, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.132296>.
- [35] Meraz, M.M., et al.: Self-healing concrete: Fabrication, advancement, and effectiveness for long-term integrity of concrete infrastructures, *Alexandria Eng. J.*, 73 (2023), pp. 665–694, <https://doi.org/10.1016/j.aej.2023.05.008>.
- [36] Zahid, H.F., Jiradilok, P., Singh Kuntal, V., Nagai, K.: Investigation of the effects of multiple and multi-directional reinforcement on corrosion-induced concrete cracking pattern, *Constr. Build. Mater.*, 283 (2021), pp.122594, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.122594>.
- [37] Zhao, C., Zhu, Z., Guo, Q., Zhan, Y., Zhao, R.: Research on fiber reinforced concrete and its performance prediction method and mix design method, *Constr. Build. Mater.*, 365 (2023), pp. 130033, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.130033>.
- [38] Anas, M., Khan, M., Bilal, H., Jadoon, S., Khan, M.N.: Fiber reinforced concrete: A review, *Eng. Proc.*, 22 (2022) 1, pp. 1–7, <https://doi.org/10.3390/engproc2022022003>.
- [39] Mukhopadhyay, S., Khatana, S.: A review on the use of fibers in reinforced cementitious concrete, *J. Ind. Text.*, 45 (2015) 2, pp. 239–264, <https://doi.org/10.1177/1528083714529806>.
- [40] Khan, M.S., Fuzail Hashmi, A., Shariq, M., Ibrahim, S.M.: Effects of incorporating fibres on mechanical properties of fibre-reinforced concrete: A review, *Mater. Today Proc.*, (2023), <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2023.05.106>.
- [41] More, F.M.D.S., Subramanian, S.S.: Impact of fibres on the mechanical and durable behaviour of fibre-reinforced concrete. *buildings*, 12 (2022) 9, <https://doi.org/10.3390/buildings12091436>.
- [42] Codispoti, R., Oliveira, D.V., Olivito, R.S., Lourenço, P.B., Figueiro, R.: Mechanical performance of natural fiber-reinforced composites for the strengthening of masonry, *Compos. Part B Eng.*, 77 (2015), pp. 74–83, <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2015.03.021>.
- [43] Wong, D., Fabito, G., Debnath, S., Anwar, M., Davies, I.J.: A critical review: Recent developments of natural fiber/rubber reinforced polymer composites, *Clean. Mater.*, 13 (2024) 7, <https://doi.org/10.1016/j.clema.2024.100261>.
- [44] Velmurugan, R., Manikandan, V.: Mechanical properties of glass/palmyra fiber waste sandwich composites, *Indian J. Eng. Mater. Sci.*, 12 (2005) 6, pp. 563–570.
- [45] Adamu, M., Alanazi, F., Ibrahim, Y. E., Alanazi, H., Khed, V.C.: A comprehensive review on sustainable natural fiber in cementitious composites: The date palm fiber case, *Sustain.*, 14 (2022) 11, pp. 1–31, <https://doi.org/10.3390/su14116691>.
- [46] Al Mahmud, M.Z., Rabbi, S.M.F., Islam, M.D., Hossain, N.: Synthesis and applications of natural fiber-reinforced epoxy composites: A comprehensive review. *SPE Polym.*, 8 (2024), pp. 1–19, <https://doi.org/10.1002/pls2.10161>.
- [47] Nunes, L.A., Silva, M.L.S., Gerber, J.Z., de A. Kalid, R.: Waste green coconut shells: Diagnosis of the disposal and applications for use in other products, *J. Clean. Prod.*, 255 (2020), pp. 120169, <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.120169>.
- [48] Kabir Ahmad, R., Anwar Sulaiman, S., Yusup, S., Sham Dol, S., Inayat, M., Aminu Umar, H.: Exploring the potential of coconut shell biomass for charcoal production, *Ain Shams Eng. J.*, 13 (2022) 1, <https://doi.org/10.1016/j.asej.2021.05.013>.
- [49] Koitumet, J.S.M.: Fibre extraction and characterization from coconut husks waste for industrial application. 7 (2023), https://www.researchgate.net/profile/Joel-Sabore-2/publication/374294892_Fibre_extraction_and_characterization_from_coconut_husks_waste_for_industrial_application/links/65239effd717ef1293dce853/Fibre-extraction-and-characterization-from-coconut-husks-wast, [1.10.2024.]
- [50] Sia, C.V., Nakai, Y., Tanaka, H., Shiozawa, D.: Interfacial fracture toughness evaluation of Poly(L-lactide acid)/natural fiber composite by using double shear test method, *Open J. Compos. Mater.*, 04 (2014) 02, pp. 97–105, <https://doi.org/10.4236/ojcm.2014.42011>.
- [51] Wang, W., Huang, G.: Characterisation and utilization of natural coconut fibres composites, *Mater. Des.*, 30 (2009) 7, pp. 2741–2744, <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2008.11.002>.
- [52] Ali, M., Liu, A., Sou, H., Chouw, N.: Mechanical and dynamic properties of coconut fibre reinforced concrete, *Constr. Build. Mater.*, 30 (2012), pp. 814–825, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2011.12.068>.
- [53] Preethi, V.P., Jesy Thomas, K., Kuruvila, A.: Performance of coconut in India: A trend analysis, *J. Trop. Agric.*, 56 (2018) 2, pp. 210–214.
- [54] Ali, M.: Coconut Fibre - A versatile material and its applications in engineering, *J. Civ. Eng. Constr. Technol.*, 2 (2011).
- [55] Bui, H., Sebaibi, N., Boutouil, M., Levacher, D.: Determination and review of physical and mechanical properties of raw and treated coc materials, *Fibers*, 8 (2020) 37, pp. 1–19.
- [56] Adeniyi, A., Onifade, D., Ighalo, J. O., Adeoye, S.: A review of coir fiber reinforced polymer composites, *Compos. Part B Eng.*, 176 (2019), pp. 107305, <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2019.107305>.
- [57] Ahmad, W., et al.: Effect of coconut fiber length and content on properties of high strength concrete, *Materials (Basel)*, 13 (2020) 5, <https://doi.org/10.3390/ma13051075>.

- [58] Charles, O., Olumide, A., Popoola, A.: Enhancement of mechanical properties of cotton fabric using coconut and rice fibre, *Int. J. Recent Adv. Biotechnol. Nanotechnol.*, 3 (2020) 1.
- [59] Widiarto, M.: Serat Sabut Kelapa Sebagai Bahan Tambah Beton untuk Perkeras Jalan Pedesaan, *Polym. Rev.*, 15 (2023) 5, pp. 1–15, <https://koran-jakarta.com/serat-sabut-kelapa-sebagai-bahan-tambah-beton-untuk-perkeras-jalan-pedesaan?page=all>, [2.10.2024.]
- [60] Sengupta, S., Basu, G.: Properties of coconut fiber in reference module in materials science and materials engineering, (2016). <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-803581-8.04122-9>.
- [61] Ru, S., Zhao, C., Yang, S.: Multi-Objective optimization and analysis of mechanical properties of coir fiber from coconut forest waste, *Forests*, 13 (2022) 12, <https://doi.org/10.3390/f13122033>.
- [62] Mishra, L., Basu, G.: Coconut fibre: Its structure, properties and applications, *Handbook of Natural Fibres*, Woodhead Publishing, 2020., pp. 231–255
- [63] Chand, N., Fahim, M. Eds.: 1 - Natural fibers and their composites, *Tribology of Natural Fiber Polymer Composites*, Woodhead Publishing Series in Composites Science and Engineering, Woodhead Publishing, 2008., pp. 1–58, <https://doi.org/10.1533/9781845695057.1>.
- [64] Klunklin, W., Hinmo, S., Thipchai, P., Rachtanapun, P.: Effect of bleaching processes on physicochemical and functional properties of cellulose and carboxymethyl cellulose from young and mature coconut coir, *Polymers (Basel)*, 15 (2023) 16, <https://doi.org/10.3390/polym15163376>.
- [65] Rahman, M.M., Khan, M.A.: Surface treatment of coir (Cocos nucifera) fibers and its influence on the fibers' physico-mechanical properties, *Compos. Sci. Technol.*, 67 (2007) 11, pp. 2369–2376, <https://doi.org/10.1016/j.compscitech.2007.01.009>.
- [66] Dharmaratne, P.D., Galabada, H., Jayasinghe, R., Nilmini, R., Halwatura, R.U.: Characterization of physical, chemical and mechanical properties of Sri Lankan coir fibers, *J. Ecol. Eng.*, 22 (2021) 6, pp. 55–65, <https://doi.org/10.12911/22998993/137364>.
- [67] Ma, W., et al.: Mechanical properties and engineering application of cellulose fiber-reinforced concrete, *Mater. Today Commun.*, 22 (2019), pp. 100818, <https://doi.org/10.1016/j.mtcomm.2019.100818>.
- [68] Yalley, P.P., Kwan, A.S.: Coconut fibre as enhancement of concrete, *J. Eng. Technol.*, 2 (2012) 1, pp. 54–73
- [69] Martinelli, F.R.B., Ribeiro, F.R.C., Marvila, M.T., Monteiro, S.N., Filho, C.G., de Azevedo, A.R.G.: A Review of the use of coconut fiber in cement composites, *Polymers (Basel)*, 15 (2023) 5, <https://doi.org/10.3390/polym15051309>.
- [70] Jakob, M., et al.: The strength and stiffness of oriented wood and cellulose-fibre materials: A review, *Prog. Mater. Sci.*, 125 (2022) 12, <https://doi.org/10.1016/j.pmatsci.2021.100916>.
- [71] Tonoli, G.H.D., Rodrigues Filho, U., Jr, H., Bras, J., Belgacem, N., Rocco Lahr, F.: Cellulose modified fibres in cement based composites, *Compos. Part A Appl. Sci. Manuf.*, 40 (2009), pp. 2046–2053, <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2009.09.016>.
- [72] Andıç-Çakır, Ö., Sarikanat, M., Tüfekçi, H.B., Demirci, C., Erdoğan, Ü. H.: Physical and mechanical properties of randomly oriented coir fiber–cementitious composites, *Compos. Part B Eng.*, 61 (2014), pp. 49–54, <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2014.01.029>.
- [73] Stapper, J.L., Gauvin, F., Brouwers, H.J.H.: Influence of short-term degradation on coir in natural fibre-cement composites. *Constr. Build. Mater.*, 306 (2021), pp. 124906, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.124906>.
- [74] Mundhe, A., Kandasubramanian, B.: Advancements in natural fiber composites: Innovative chemical surface treatments, characterization techniques, environmental sustainability, and wide-ranging applications. *Hybrid Adv.*, 7 (2024) 6, pp. 100282, <https://doi.org/10.1016/j.hybadv.2024.100282>.
- [75] Elfaleh, I., et al.: A comprehensive review of natural fibers and their composites: An eco-friendly alternative to conventional materials, *Results Eng.*, 19 (2023) 6, <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2023.101271>.
- [76] Kowsalya, M., Sindhu Nachiar, S., Sekar, A., Ravichandran, P.T.: Study on mechanical and microstructural properties of concrete with fly ash cenosphere as fine aggregate - A Sustainable Approach, *Buildings*, 12 (2022) 10, <https://doi.org/10.3390/buildings12101679>.
- [77] Savva, P., Ioannou, S., Oikonomopoulou, K., Nicolaidis, D., Petrou, M.F.: A mechanical treatment method for recycled aggregates and its effect on recycled aggregate-based concrete, *Materials (Basel)*, 14 (2021) 9, <https://doi.org/10.3390/ma14092186>.
- [78] Khan, M.I., Abbass, W., Alrubaidi, M., Alqahtani, F.K.: Optimización de la relación agregado fino a grueso para la trabajabilidad y propiedades mecánicas de hormigones reforzados con fibra de acero de alta Resistencia, *Materials (Basel)*, 13 (2020) 22, pp. 1–17
- [79] Luo, H., Aguiar, J., Wan, X., Wang, Y., Cunha, S., Jia, Z.: Application of aggregates from construction and demolition wastes in concrete: Review, *Sustain.*, 16 (2024) 10, <https://doi.org/10.3390/su16104277>.
- [80] Zhang, S., Liu, R., Lu, C., Hong, J., Chen, C., Xu, J.: Influence of Nano-SiO₂ content on cement paste and the interfacial transition zone, *Materials (Basel)*, 16 (2023) 18, <https://doi.org/10.3390/ma16186310>.
- [81] IS:383: Specification for coarse and fine aggregates from natural sources for concrete, *Indian Stand.*, (1970), pp. 1–24
- [82] He, X., Wang, F., Liu, H., Li, J., Niu, L.: Synthesis of quartz crystals supporting Ag nanoparticle powder with enhanced antibacterial properties, *Surfaces and Interfaces*, 6 (2017), pp. 122–126, <https://doi.org/10.1016/j.surfin.2017.01.002>.
- [83] Vanitha, N., Thanigaiselvan, R., Manivannan, M., Jeyalakshmi, R., Megha, S.N., Kesavan, M.: Expounding the application of nano and micro silica as a complementary additive in metakaolin phosphate geopolymer for ceramic applications - Micro and nanoscale structural investigation, *J. Mater. Sci. Mater. Eng.*, (2024), <https://doi.org/10.1186/s40712-024-00176-6>.
- [84] Ramezaniapour, A.A., Mortezaei, M., Mirvalad, S.: Synergic effect of nano-silica and natural pozzolans on transport and mechanical properties of blended cement mortars, *J. Build. Eng.*, 44 (2021), pp. 102667, <https://doi.org/10.1016/j.jobte.2021.102667>.
- [85] Muensri, P., Kunanopparat, T., Menut, P., Siriwanayotin, S.: Effect of lignin removal on the properties of coconut coir fiber/wheat gluten biocomposite, *Compos. Part A Appl. Sci. Manuf.*, 42 (2011) 2, pp. 173–179, <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2010.11.002>.
- [86] Salaenoi, J., Jurejan, N., Yokthongwattana, C., Pluempunupat, W., Boonprab, K.: Characteristics of coconut husk cellulose and its effectiveness as a potassium permanganate absorbent for fishery applications, *Case Stud. Chem. Environ. Eng.*, 10 (2024), pp. 100975, <https://doi.org/10.1016/j.cscee.2024.100975>.
- [87] Indian Standard: Concrete Mix Proportioning - Guidelines, 2019.
- [88] Bur. Indian Stand: IS 516: Method of Tests for Strength of Concrete, 1959., pp. 1–30.

- [89] Bur. Indian Stand., IS:3085-1965: Method of test for Permeability of Cement Mortar and Concrete, New Delhi, 1997., pp. 1–12
- [90] Joy, D.C., Pawley, J.B.: High-resolution scanning electron microscopy, *Ultramicroscopy*, 47 (1992) 1, pp. 80–100, [https://doi.org/10.1016/0304-3991\(92\)90186-N](https://doi.org/10.1016/0304-3991(92)90186-N).
- [91] Mohammed, A., Abdullah, A.: Scanning Electron Microscopy (SEM): A review, *Proc. Int. Conf. Hydraul. Pneum - HERVEX*, 1 (2018), pp. 77–85
- [92] Ali, A., Zhang, N., Santos, R.M.: Mineral characterization using Scanning Electron Microscopy (SEM): A Review of the fundamentals, advancements, and research directions, *Appl. Sci.*, 13 (2023) 23, <https://doi.org/10.3390/app132312600>.
- [93] Dias, F.J., Fuentes, R., Navarro, P., Weber, B., Borie, E.: Assessment of the chemical composition in different dental implant types: An analysis through EDX system, *Coatings*, 10 (2020) 9, pp. 1–11, <https://doi.org/10.3390/coatings10090882>.
- [94] Adetukasi, A.O., Fadugba, O.G., Adebakin, I.H., Omokungbe, O.: Strength characteristics of fibre-reinforced concrete containing nano-silica, *Mater. Today Proc.*, 38 (2021), pp. 584–589, <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.03.123>.
- [95] Praveen Kumar, V.V., Dey, S.: Study on strength and durability characteristics of nano-silica based blended concrete, *Hybrid Adv.*, 2 (2023) 100011, <https://doi.org/10.1016/j.hybadv.2022.100011>.
- [96] Yao, X., et al.: Review of mechanical and temperature properties of fiber reinforced recycled aggregate concrete, *Buildings*, 12 (2022) 8, <https://doi.org/10.3390/buildings12081224>.
- [97] Beskopylny, A.N., et al.: A study on the cement gel formation process during the creation of nanomodified high-performance concrete based on Nanosilica, *Gels*, 8 (2022) 6, <https://doi.org/10.3390/gels8060346>.
- [98] Wang, Y., Lu, H., Wang, J., He, H.: Effects of highly crystalized nano C-S-H particles on performances of portland cement paste and its mechanism, *Crystals*, 10 (2020) 9, pp. 1–17, <https://doi.org/10.3390/cryst10090816>.
- [99] Zhang, P., Sha, D., Li, Q., Zhao, S., Ling, Y.: Effect of nano silica particles on impact resistance and durability of concrete containing coal fly ash, *Nanomaterials*, 11 (2021) 5, <https://doi.org/10.3390/nano11051296>.
- [100] Yin, H., Wang, X., Qin, H., Wang, S., Cai, K.: Nanoindentation study of Calcium-Silicate-Hydrate gel via molecular dynamics simulations, *Nanomaterials*, 13 (2023) 18, <https://doi.org/10.3390/nano13182578>.
- [101] Madadi, A., Wei, J.: Characterization of Calcium Silicate Hydrate Gels with different Calcium to Silica ratios and polymer modifications, *Gels*, 8 (2022) 2, <https://doi.org/10.3390/gels8020075>.
- [102] Diamond, S., Sahu, S., Thaulow, N.: Reaction products of densified silica fume agglomerates in concrete, *Cem. Concr. Res.*, 34 (2004) 9, pp. 1625–1632, <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2004.01.031>.
- [103] Yan, L., Su, S., Chouw, N.: Microstructure, flexural properties and durability of coir fibre reinforced concrete beams externally strengthened with flax FRP composites, *Compos. Part B Eng.*, 80 (2015), pp. 343–354, <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2015.06.011>.
- [104] Anggraini, V., Huat, B., ASADI, A., Nahazanan, H.: Effect of coir fibers on the tensile and flexural strength of soft marine clay, *J. Nat. Fibers*, 12 (2015), <https://doi.org/10.1080/15440478.2014.912973>.
- [105] Wu, H., Chen, C., Zhang, W., Wang, R., Zhang, W.: Effect of nano-clay dispersion on pore structure and distribution of hardened cement paste, *Buildings*, 13 (2023) 11, <https://doi.org/10.3390/buildings13112753>.
- [106] Brzozowski, P., Strzałkowski, J., Rychtowski, P., Wróbel, R., Tryba, B., and Horszczaruk, E.: Effect of nano-sio2 on the microstructure and mechanical properties of concrete under high temperature conditions, *Materials (Basel)*, 15 (2022) 1, <https://doi.org/10.3390/ma15010166>.
- [107] Huseien, G.F.: A Review on concrete composites modified with nanoparticles, *J. Compos. Sci.*, 7 (2023) 2, <https://doi.org/10.3390/jcs7020067>.
- [108] Barbhuiya, G.H., Moiz, M.A., Hasan, S.D., Zaheer, M.M.: Effects of the nanosilica addition on cement concrete: A review, *Mater. Today Proc.*, 32 (2020), pp. 560–566, <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.02.143>.
- [109] Maddalena, R., Hall, C., Hamilton, A.: Effect of silica particle size on the formation of calcium silicate hydrate [C-S-H] using thermal analysis, *Thermochim. Acta*, 672 (2019) 9, pp. 142–149, <https://doi.org/10.1016/j.tca.2018.09.003>.
- [110] Rahmawati, C., Aprilia, S., Saidi, T., Aulia, T.B., Hadi, A.E.: The effects of nanosilica on mechanical properties and fracture toughness of geopolymer cement, *Polymers (Basel)*, 13 (2021) 13, <https://doi.org/10.3390/polym13132178>.