

Primljen / Received: 30.9.2023.

Ispravljen / Corrected: 12.3.2024.

Prihvaćen / Accepted: 3.4.2024.

Dostupno online / Available online: 10.4.2024.

Utjecaj letećeg pepela i vlakana banane na mehaničke karakteristike betonskih opločnika

Autori:



Doc.dr.sc. **Ananthakumar Ayyadurai**, dipl.ing.građ.
Tehnološki fakultet za žene Vivekanandha
Odjel za građevinarstvo
Tamilnadu, Indija
ananthaakumar7410@gmail.com
Autor za korespondenciju



Izv.prof.dr.sc. **Saravanan Muthuchamy Maruthai**
Tehnološki fakultet za žene Vivekanandha
Odjel za građevinarstvo
Tamilnadu, Indija
saromms@gmail.com



Prof.dr.sc. **Devi Muthu**, dipl.ing.građ.
Tehnološki fakultet za žene Vivekanandha
Odjel za građevinarstvo
Tamilnadu, Indija
devimcivil@gmail.com

Izvorni znanstveni rad

Ananthakumar Ayyadurai, Saravanan Muthuchamy Maruthai, Devi Muthu

Utjecaj letećeg pepela i vlakana banane na mehaničke karakteristike betonskih opločnika

Primjena betona ojačanog prirodnim vlaknima općenito se smatra održivim pristupom razvoju infrastrukture. Ovaj je rad istraživao glavne karakteristike betonskih opločnika proizvedenih primjenom letećeg pepela, pepela od ugljena, superplastifikatora i vlakana banane kao ojačanja vlakana. Pripremljena su vlakna banane (dužine 15 mm), nakon čega je uslijedila izrada i karakterizacija betonskih opločnika. U ovome istraživanju utjecaj vlakna banane (0,5 %, 1 %, 1,5 %, 2 % i 2,5 %) i dodataka (0,5 % stalno) upotrijebljeni su u različitim omjerima mješavina za izradu blokova za popločavanje kako bi se analizirala fizikalno-mehanička svojstva. Prikazano je da opločnici koji imaju udio od 2 % modificiranih vlakana banane (u odnosu na težinu letećeg pepela) pokazuju veću tlačnu čvrstoću (7,45 % za dupli vezani opločnik i 17,12 % za cik-cak opločnike), savojnu čvrstoću (14,99 % za dupli vezani opločnik i 8,67 % za cik-cak) i vlačnu čvrstoću dobivenu cijepanjem (12,182 % za dupli vezani opločnik i 9,971 % za cik-cak opločnike) u usporedbi s ostalim omjerima smjese. Uporaba modificiranih vlakana banane kao vlakana za armiranje pokazala se vrlo učinkovitom u poboljšanju mehaničkih svojstava i životnog vijeka opločnika, što može dovesti do smanjenja izrade.

Ključne riječi:

prirodno vlakno, tlačna čvrstoća, vlačna čvrstoća dobivena cijepanjem, savojna čvrstoća

Original research paper

Ananthakumar Ayyadurai, Saravanan Muthuchamy Maruthai, Devi Muthu

Impact of fly ash and banana fiber on mechanical performance of paver block concrete

The use of concrete reinforced with natural fibres is globally considered a sustainable approach to infrastructure development. This study investigated the salient features of concrete paver blocks fabricated using fly ash, coal ash, superplasticiser, and banana fibres as fibre reinforcements. Banana fibres (15 mm in length) were prepared, followed by the fabrication and characterisation of concrete paver blocks. In the current study, banana fibre (0.5 %, 1 %, 1.5 %, 2 %, and 2.5 %) and admixture (0.5 % constantly) were used in different mix proportions in the fabrication of paver block to analyse the physicommechanical properties. The results demonstrated that the paver blocks containing 2 % modified banana fiber (with respect to weight of fly ash) show higher compressive strength (7.45 % for I-dumble and 17.12 % for zigzag paver blocks), flexural strength (14.99 % for I-dumble and 8.67 % for zigzag) and split tensile strength (12.182 % for I-dumble and 9.971 % for zigzag paver blocks), compared to other mix proportions. The use of modified banana fibres as reinforcement was found to be very effective in improving the mechanical properties and life span of paver blocks, which may lead to minimizing the preparation.

Key words:

natural fiber, compressive strength, split tensile strength, flexural strength

1. Uvod

Opločnici se intenzivno primjenjuju za uređenje krajolika i u građevinarstvu jer osiguravaju trajnost, čvrstoću i vizualno privlačnu završnu obradu cesta, kolnika i prilaza. Primjena prirodnih vlakana u proizvodnji opločnika stekla je pozornost posljednjih godina, jer nudi održivu alternativu tradicionalnim materijalima čija proizvodnja znatno utječe na okoliš. Opločnici, poznati i kao betonski blokovi za popločavanje, popularan su građevni materijal koji se upotrebljava za različite namjene kao što su nogostupi, parkirališta i uređenje krajolika. Tradicionalno se izrađuju od cementa, pijeska i agregata, no posljednjih je godina porastao interes za primjenu prirodnih otpadnih vlakana kao materijala za ojačanje u proizvodnji opločnika. Primjena prirodnih otpadnih vlakana kao što su juta, kokosova vlakna, sisal i konoplja može poboljšati mehanička svojstva i trajnost opločnika, a istodobno smanjiti ukupne troškove proizvodnje. Osim toga primjena otpadnih vlakana ekološki je prihvatljivija jer smanjuje količinu proizvedenog otpada koji završava na odlagalištima. Ispitivanje mehaničkih svojstava (BIS 15658) opločnika proizvedenih upotrebom prirodnih otpadnih vlakana važno je kako bi se osiguralo postojanost njihove strukture i dugotrajnost. Uobičajena ispitivanja kao što su ispitivanja tlačne i savojne čvrstoće, otpornosti na habanje i ispitivanja apsorpcije vode poroznog betona ojačanog vlaknima banane izvor su korisnih informacija o tome kako to prirodno vlakno utječe na svojstva poroznog betona. Izvedivost i učinkovitost primjene vlakana banane u poboljšanju svojstava poroznog betona mogla bi dovesti do održivih rješenja u građevinskim praksama [1]. Očekuje se da će dodavanje mramorne prašine i vlakana banane u asfaltnu mješavinu rezultirati nalazima utjecaja tih aditiva na trajnost i ukupnu kvalitetu asfaltna mješavine [2]. Razvojem betona ojačanog prirodnim vlaknima nastoje se objasniti svojstva, održivost, primjene, prepreke i mogućnosti. Otkrića na temelju takvih istraživanja jesu potencijalne mogućnosti za daljnja istraživanja i primjenu u građevinskoj industriji [3]. Eksperimentalno istraživanje ponašanja armiranobetonskih greda pri savijanju upotrebom hibridne kombinacije vlakana banane i čeličnih vlakana pružilo je uvid u strukturalna poboljšanja postignuta tim inovativnim pristupom [4]. Utvrđeni su poljoprivredni otpadni materijali prikladni za upotrebu u građevinskoj industriji i sažeto je prikazana njihova raznolika primjena, pružajući osnovu za razumijevanje održivih alternativa dobivenih iz otpada iz poljoprivrede i ističući njihovu ulogu u ekološki prihvatljivoj gradnji [5]. Sve veća potreba za ekološki prihvatljivim građevnim materijalima dovela je do opsežnih istraživanja provedivosti i mogućih prednosti primjene prirodnih vlakana kao ojačanja u betonskim konstrukcijama [6]. Procijenjen je utjecaj kombinacija bakterijskih sojeva u hibridnome geopolimernom betonu ojačanom vlaknima, osobito u teškim i vrlo teškim uvjetima u prometu. Razumijevanje sinergija između bakterijskih sojeva i vlakana u poboljšanju trajnosti i učinkovitosti geopolimernih betona u situacijama jako gustog

prometa pridonosi održivome razvoju infrastrukture [7]. Istraživanjima učinaka ugrađivanja vlakana banane i vapna na mehanička i toplinska svojstva nepečene opeke otkrivena su moguća poboljšanja u strukturalnoj čvrstoći i izolacijskim svojstvima, što je pružilo korisna saznanja o razvoju održivih građevnih materijala pomoću poljoprivrednog otpada i dodataka betonu [8]. Utvrđena je održivost primjene prirodnih vlakana, uključujući vlakna od banane, za povećanje razine stabilnosti i trajnosti glinenih opeka, što pridonosi istraživanju ekološki prihvatljivih građevinskih rješenja [9]. Inovativnim pristupima obradi vlakana od banane nastoji se poboljšati njihova mehanička svojstva i proširiti njihovu potencijalnu primjenu u raznim industrijama, uključujući građevinarstvo [10].

Istraživanja o primjeni kokosovih vlakana u cementnim materijalima bave se različitim primjenama kokosovih vlakana u poboljšanju svojstava materijala na bazi cementa i pomažu boljemu razumijevanju njihove učinkovitosti, izazova i mogućih doprinosa održivoj gradnji [11]. Primjena naprednih računalnih tehnologija optimizira proizvodne postupke, čime se pridonosi održivim praksama u proizvodnji građevnih materijala [12]. Beton ojačan vlaknima proizveden je primjenom vlakana industrijske konoplje kako bi se istražila učinkovitost vlakana konoplje kao materijala za pojačanje u betonu i procijenio njihov učinak na čvrstoću, trajnost i druga bitna svojstva [13]. Ispitan je širok spektar prirodnih vlakana za njihovu primjenu u građevnim materijalima, a aspekti njihove održivosti procijenjeni su tijekom njihova životnog ciklusa [14]. Težište je na poboljšanju svojstava poroznog betona dodavanjem dodatnih materijala i vlakana. Konkretno, čvrstoća poroznog betona poboljšana je dodavanjem pepela rižinih ljuski i staklenih vlakana, što pruža uvid u moguća poboljšanja čvrstoće i trajnosti [15]. Istražen je učinak prirodnih vlakana palme na obradivost i mehanička svojstva betona ojačanog vlaknima kako bi se utvrdio potencijal vlakana palme kao materijala za ojačavanje i procijenio njihov učinak na obradivost i mehaničku čvrstoću betona [16]. Sveobuhvatan pregled upotrebe vlakana jute za ojačavanje betona ističe njihov doprinos mehaničkim svojstvima materijala [17]. Studija karakterizacije mehaničkih svojstava hibridnoga ekološkog, vlaknima ojačanoga geopolimernog betona izrađenog od otpadnoga drvnog pepela istražuje sinergiju između hibridnih vlakana i otpadnoga drvnog pepela u geopolimernome betonu u cilju razvoja ekološki održivoga građevnog materijala [18]. Ispitana su svojstva savijanja i loma hibridnih kompozitnih ploča od polimernog metala ojačanih prirodnim vlaknima s fokusom na mehaničko ponašanje hibridnih kompozitnih materijala, pružajući uvid u njihovu savojnu čvrstoću i karakteristike loma [19]. Ističući održivost, ispitivanje upotrebe vlakana konoplje u građevnim materijalima može pružiti uvid u rano uzimanje u obzir i moguću primjenu vlakana konoplje u građevinarstvu [20]. Polipropilenski kompoziti ojačani bambusovim vlaknima s melaminpirofosfatom i aluminijevim hipofosfitom ispitivani su kako bi se otkrili sinergistički učinci usporivača gorenja na mehaničko ponašanje polipropilenskih kompozita ojačanih

bambusovim vlaknima, pridonoseći uvidu u razinu zaštite od požara i čvrstoće materijala [21]. Desmarais je istraživao primjenu otpadnih vlakana u nestabiliziranim prešanim glinenim opekama za održivu gradnju u Gani. Ova doktorska disertacija istraživala je primjenu otpadnih vlakana za poboljšanje svojstava glinenih blokova, pridonoseći održivim građevinskim praksama u tome području [22]. Kombiniranom upotrebom održivih agregata i vlakana sisala u kompozitnim blokovima nastaje ekološki prihvatljiv i trajan građevni materijal [23]. Također je istražena primjena nerazgradivog otpada kao građevnog materijala za jeftino stanovanje u cilju nalaženja pristupačnih i održivih rješenja za stambene projekte [24]. Mogućnost ojačanja vlaknima šećerne trske i konoplje u cementnim kompozitima pružila je uvide vrijedne za razvoj održivih građevnih materijala [25]. Puzanje pri savijanju samozbijajućeg betona ojačanog biljnim i sintetičkim vlaknima ispitano je kako bi se otkrio utjecaj vlaknastih ojačanja na ponašanje pri savojnome puzanju samozbijajućeg betona i pružio uvid u dugoročne rezultate takvih materijala [26]. Dodavanje mulja i poljoprivrednog otpada poboljšalo je termička svojstva glinenih opeka i pridonijelo održivoj proizvodnji opeke [27]. Svojstva bambusovih vlakana i njihovih kompozita pružaju uvid u moguću primjenu i učinkovitost tih materijala [28]. Ispitan je utjecaj ojačanja vlaknima sisala na čvrstoću i volumna svojstava betonskih blokova, dajući uvid u upotrebu prirodnih vlakana u proizvodnji betona [29]. Opisano je da armatura od pocinčane željezne žice utječe na čvrstoću i duktilno ponašanje betona, omogućujući primjenu u armiranome betonu [30].

Primjena (pepeo od drvene biomase i polimerna vlakna iz recikliranih guma) tih alternativnih materijala potencijalno je rješenje za umanjivanje skupljanja betona. Rezultati ovog istraživanja doprinose razumijevanju održivih dodataka za poboljšanje svojstava betona i ističu njihov pozitivan učinak na umanjivanje skupljanja [31]. Razmotreni su gospodarski aspekti upotrebe betona koji sadržava zguru za cestovne kolnike, utvrđen je odnos troškova i koristi te je istaknuta ekonomska isplativost dodavanja zgre. Istraživanje ističe moguću gospodarsku korist primjene alternativnih materijala u izgradnji cesta i pruža sveobuhvatnu sliku njihovih financijskih posljedica [32]. Izvršna mehanička svojstva betona ultravisoke čvrstoće, proizvedenog dodavanjem staklenih vlakana i silicijske prašine, ističu pozitivne učinke na svojstva betona i pružaju saznanja korisna za razvoj dugotrajnog betona iznimne učinkovitosti [33]. Eksperimentalnim istraživanjem otpornosti na smrzavanje propusnog betona modificiranog emulzijom kopolimera etilen-vinil-acetata i bazaltnim vlaknima nastojalo se odgovoriti na izazove povezane s uvjetima smrzavanja i pružiti uvid u poboljšanje trajnosti u teškim uvjetima. U zaključku istaknuta je učinkovitost predloženih izmjena radi povećanja otpornosti na smrzavanje propusnog betona [34]. S daljnjim napretkom u tehnologiji armiranja betona istražena je uloga obloženih staklenih vlakana u poboljšanju svojstava betona i dokazan pozitivan utjecaj presvučenih vlakana na čvrstoću betona [35].

Ispitivanjem mogućnosti primjene održivih materijala (recikliranih i otpadnih materijala) za cementnu stabilizaciju istraživanje pridonosi dubljemu razumijevanju ekološki prihvatljivih alternativa. Osim toga otkriven je pozitivan učinak ugradnje recikliranih i otpadnih materijala na tlačnu čvrstoću stabiliziranog cementa. Drugo je istraživanje istaknulo obećavajuća mehanička svojstva geopolimernih mortova na bazi letećeg pepela, podupirući razvoj ekološki prihvatljivih građevnih materijala [36, 37]. Istražene su mogućnosti ugradnje pepela od drvene biomase kao održive alternative tradicionalnim komponentama betona, ističući potencijal pepela od drvene biomase kao održive sirovine koja pridonosi održivim praksama u industriji betona [38]. Također je pokazan pozitivan utjecaj pepela iz spaljenoga papirnog mulja na geopolimerni beton s letećim pepelom, koji pridonosi održivome gospodarenju otpadom [39].

Upotrebom otpadnih vlakana banane u izradi opločnika znatan je napredak u području gradnje i održivih materijala. Vlakna banane bogati su biorazgradivi resursi u mnogim zemljama, osobito u tropskim predjelima. Upotreba vlakana banane za ojačavanje betonskih opločnika može smanjiti troškove gradnje i pružiti ekološki prihvatljivu alternativu tradicionalnim građevnim materijalima. Ovo je istraživanje uglavnom usmjereno na učinkovitost i isplativost izrade opločnika upotrebom otpadnih vlakana banane. Kao prvo, može pridonijeti smanjenju troškova izgradnje zamjenom skupih materijala kao što su čelik i sintetička vlakna. Drugo, upotreba vlakana od banane može pridonijeti smanjenju ugljičnog otiska koji nastaje gradnjom. Treće, istraživanje u ovome području može pomoći u promicanju održivog razvoja i pružiti gospodarske mogućnosti zajednicama koje imaju pristup vlaknima od banane.

Nadalje, upotreba prirodnih otpadnih vlakana banane u opločnicima može dovesti do poboljšanja njihovih mehaničkih svojstava kao što su povećana vlačna čvrstoća i smanjenje pukotina. Ta poboljšanja mogu dovesti do dugotrajnijih i izdržljivijih opločnika koji zahtijevaju manje održavanja i rjeđu zamjenu.

2. Svojstva materijala

U proizvodnji betonskih opločnika detaljna karakterizacija materijala ključna je za ponovljivost ispitivanja. Upotrijebljeni cement Ramco-OPC 53 služio je kao vezivo, a proizveden je mljevenjem klinkera (vapnenca, gline i drugih sirovina) na visokim temperaturama u klinu. Gips je dodan zajedno s drugim dodacima za reguliranje vremena vezanja. Za pojedinosti o proizvođaču i tipu gipsa potrebno je pogledati specifikacije proizvođača. Pepeo s dna peći i leteći pepeo, koji su nusproizvodi elektrana koje rade na ugljen (južna zona), mineralni su ostaci koji nastaju izgaranjem ugljena. Leteći je pepeo sitni kruti ostatak, dok je pepeo s rešetke ložišta teži i taloži se na dnu peći. Oba se mogu primjenjivati u proizvodnji betona, nudeći ekološki prihvatljivo rješenje za odlaganje otpada od izgaranja ugljena. Za bolje razumijevanje pogledajte standardne reference

za nusproizvode izgaranja ugljena (slika 1.). Čestice letećeg pepela posjeduju finoću u rasponu od 0,01 do 100 mikrometara. Ta raspodjela finih čestica po veličini poželjna je za betonske elemente jer potiče bolju interakciju s cementnom pastom i povećava gustoću pakiranja mješavine. Leteći pepeo ima specifičnu težinu od 2,05 g/cm³, što je manje od portland cementa (približno 3,15 g/cm³), i pridonosi smanjenju ukupne težine betonskih opločnika. Gubitak pri izgaranju (*Loss On Ignition*, LOI) letećeg pepela manji je od 6 %, što upućuje na manju prisutnost neizgorene organske tvari koja može spriječiti razvoj čvrstoće betona. Specifična težina ugljenog pepela iznosi 3,01 g/cm³, što je više od letećeg pepela, no manje od portland cementa. Nakon preračunavanja specifične težine gustoća pepela ložišta iznosi približno 2,4 g/cm³. Ta veća gustoća u usporedbi s onom letećeg pepela može utjecati na ukupnu težinu i gustoću dobivenih betonskih opločnika. Pepeo s dna peći pokazuje umjerenu sposobnost apsorpcije vode od 18 %. To svojstvo apsorpcije vode mora se uzeti u obzir tijekom pripremanja mješavine kako bi se omogućila pravilna upotrebljivost i smanjili mogući problemi vezani uz širenje vlage ili smanjivanje opločnika.

Udio SiO₂ kretao se od 40 % do 70 % i u letećem pepelu i u pepelu s dna peći. Taj oksid ima ključnu ulogu u pucolanskoj aktivnosti letećeg pepela, gdje reagira s kalcijevim hidroksidom u betonu da bi se formirao dodatni gel na bazi kalcijeva silikata (C-S-H), pridonoseći postizanju čvrstoće. Udio Al₂O₃ iznosio je između 15 % i 30 % u oba materijala. Aluminijev oksid (Al₂O₃) može pridonijeti stvaranju dodatnih cementnih faza i poboljšati dugoročnu održivost betona. Količina CaO varirala je ovisno o izvoru upotrijebljenog ugljena. U letećem pepelu udio CaO vjerojatno je bio niži od 10 %, dok je pepeo s dna mogao imati veće udjele, moguće do 20 %. Udio CaO u letećem pepelu utječe na njegovu pucolansku aktivnost. Koncentracija Fe₂O₃ kretala se od 5 % do 25 % i u letećem pepelu i u pepelu s dna peći. Željezni oksid može utjecati na boju dobivenih betonskih opločnika, a drobljeni pijesak, koji se primjenjuje kao fini agregat u betonskim opločnicima, zamjena je za prirodni riječni pijesak. Dobiva se drobljenjem pješčenjaka, granita i bazalta. Pijesak upotrijebljen u eksperimentu usklađen je sa standardima proizvodnje za komercijalni drobljeni pijesak. Krupni agregati i veće čestice drobljenoga kamena, šljunka ili troske dobavljali su se iz obližnjih kamenoloma i bili su veličine od 5 do 10 mm. Ti agregati osiguravaju sipki materijal, smanjuju troškove betona, poboljšavaju strukturnu cjelovitost i poboljšavaju vlačnu čvrstoću i otpornost na pucanje. Na dodavanje krupnog agregata u beton također se primjenjuju utvrđene norme. Definicije i pojmovi moraju biti usklađeni s tim normama i na njih se mora uputiti na odgovarajući način. Pridržavanje tih propisa osigurava preciznost i dosljednost u terminologiji koja se primjenjuje u kontekstu proizvodnje betona te poboljšava jasnoću i usklađenost s industrijskim normama. Upućivanje na posebne norme koje se odnose na primjenu grubih agregata u betonskim konstrukcijama povećava vjerodostojnost i pouzdanost ponuđenih informacija, a pridržavanje normi za betonske agregate omogućava ispravnu primjenu definicija i pojmova.

Vlakna banane, dobivena iz stabljika ili lišća banane, inovativno su ojačanje za betonske blokove. Kako bi se omogućilo ponavljanje eksperimenta, potrebno je navesti podrijetlo i postupak proizvodnje vlakana banane, uključujući glavna obilježja izvedena iz tih podataka. Važno je napomenuti da se vlakna banane ne mogu ponovno upotrebljavati nakon dodavanja u opločnike. Superplastifikatori kao što je Ceraplast 300 vrlo su učinkoviti reduktori vode, koji poboljšavaju obradivost i žitkost betonskih smjesa bez ugrožavanja njihove čvrstoće i trajnosti. Često se upotrebljavaju u proizvodnji betonskih opločnika kako bi se poboljšali tečnost i ukupna kvaliteta proizvoda. Kako bi se osigurala ponovljivost, potrebno je pogledati specifikacije proizvoda Ceraplast 300.



Slika 1. Upotrijebljeni materijali

Proizvodnja opločnika primjenom otpadnih vlakana banana uključuje miješanje otpadnih vlakana banana dobivenih iz stabljika i lišća banane s cementom ili alternativnim vezivima za dobivanje robusnih i ekološki prihvatljivih opločnika.

Vlakna banana imaju brojna korisna svojstva, što ih čini prikladnima za ugrađivanje u opločnike. Njihova čvrstoća, fleksibilnost i mala težina čine ih posebno prikladnima za primjenu u građevini. Osim toga, kao prirodni i obnovljivi resurs, vlakna banana znatno smanjuju utjecaj na okoliš povezan s konvencionalnim građevnim materijalima. Taj inovativni pristup nije usmjeren samo na rješavanje pitanja otpada, već je i usklađen s načelima održive gradnje, nudeći obećavajući put za ekološki prihvatljive građevinske prakse.

2.1. Prerada otpada od banane u vlakno

Početna faza uključivala je dekortikaciju pseudostabljike banane. To se izvodi ručnim odstranjivanjem vanjskog sloja (egzokarpa). Nakon toga izbrušena je površina kako bi se potpuno uklonilo preostalo okolno tkivo ili kontaminant. Nakon dekortikacije lisne osi banane (jezgra) prešaju se mehanički kako bi se ekstrahirao sok koji se može koristiti u razne druge svrhe. Vlaknasti materijal bez soka (talog) zatim se suši kako bi se njegov udio vlage smanjio na unaprijed određenu razinu. Nakon što je postignut željeni udio vlage, dehidrirani ostatak podvrgnut je mehaničkome razvlaknjivanju koje uključuje usitnjavanje ili struganje materijala u uske i izdužene niti (vlakna). Zatim se ta vlakna prikupljaju za daljnju obradu onako kako je to prikazano na slici 2. Dobivena vlakna imaju višestruku

primjenu. Taj sveobuhvatni proces sakupljanja, uklanjanja, grebanja, gnječenja, sušenja, struganja, rezanja i skupljanja vlakana omogućuje učinkovito iskorištavanje otpadaka banana i pridonosi smanjenju ukupnog otpada.

Posebne vrste vlakana banane koja se upotrebljavaju mogu se dobiti iz poljoprivrednog otpada ili proizvesti u laboratoriju. Vlakna banane iz poljoprivrednog otpada obično se dobivaju iz otpadaka banana, dok vlakna proizvedena u laboratoriju uključuju kontrolirani uzgoj i preradu stabala banana kako bi se dobila vlakna željenih svojstava. Trajanje i temperatura postupka sušenja mogu se razlikovati ovisno o specifičnim zahtjevima. Vlakna banane suše se na temperaturama od 60 °C, a trajanje se prilagođava kako bi se uklonio višak vlage i postigla tražena svojstva vlakana. Vlakna banane primjenjuju se u tekstilu, rukotvorinama, proizvodnji papira i u drugim proizvodima zbog svoje čvrstoće, fleksibilnosti i ekološke prirode. Vlakna banane povećavaju vlačnu čvrstoću i otpornost betona na udarce i čine ga izdržljivijim. To hoće li se vlakna banane upotrijebiti u betonu ovisi o željenim svojstvima za primjenu u građevinarstvu. U slučajevima gdje su vlačna čvrstoća i održivost prioriteti, vlakna banane mogu biti koristan izbor u usporedbi s drugim alternativama.



Slika 2. Pripremanje vlakana banane

2.2. Fizikalna svojstva materijala

Upotrijebljen je obični portland cement (klase 53), specifične težine 3,05 g/cm³, utvrđene laboratorijskim mjerenjima. Opločnici su imali udjele drobljenog pijeska, letećeg pepela i pepela od ugljena kao punila. Specifične težine filera izmjerene su u laboratoriju i iznosile su redom 2,76, 2,95 odnosno 3,01 g/cm³. Otpadna vlakna banane primijenjena su za ojačanje opločnika i sprječavanje stvaranja pukotina i šupljina. Specifična težina vlakana banane, izmjerena u laboratoriju, iznosila je 1,2 g/cm³. Specifična težina agregata određena je usporedbom njegove težine s onom jednakog

volumena vode. To je važan parametar iz nekoliko razloga. Agregati obično imaju specifičnu težinu u rasponu između 2,5 i 3,0 g/cm³ [5]. Idealan agregat za optimalnu učinkovitost obično ima prosječnu specifičnu težinu od 2,60 g/cm³. Ta se vrijednost definira kao masa jedinice volumena agregata podijeljena masom jednakog volumena destilirane vode bez plina na određenoj temperaturi, uzimajući u obzir težinu vode unutar šupljina ispunjenih uronjavanjem agregata u vodu na otprilike 15 sati. Apsorpcija vode mjera je unutarnje strukture agregata. Proveden je standardizirani laboratorijski test apsorpcije vode kako bi se odredila sposobnost krupnih agregata da zadrže vodu. Test je rezultirao vrijednošću od 2,22 %. Prihvatljiva granica apsorpcije vode za krupne agregate razlikuje se ovisno o njihovoj namjeni. Na primjer, drenažni slojevi mogu primiti agregate sa sposobnošću apsorpcije vode od približno 4 %, dok je u nosivim slojevima to općenito ograničeno na najviše 1 %. Ta dopuštena ograničenja utvrđena su primjenom standardiziranih laboratorijskih postupaka ispitivanja.

Vrijednost otpornosti agregata koji se primjenjuju u habajućemu sloju na drobljenje ne smije prelaziti 30 %. Najviši dopušteni postotak bitumenskog makadama prema IRC smjernicama iznosi 35 %. Za nosive slojeve makadama vezanog vodom najviša dopuštena vrijednost iznosi 40 %. Vrijednost čvrstoće agregata mjera je koja se primjenjuje u cestogradnji, a predstavlja težinski udio drobljenog ili sitnijeg materijala dobivenog kada se agregat koji se ispituje podvrgne posebnome opterećenju u standardiziranim uvjetima. Vrijednosti drobljenja bitumenskih makadamskih cesta obično iznose između 40 % i 45 %. Željena vrijednost čvrstoće agregata za cestogradnju iznosi 43 %, čime se može odrediti njegova prikladnost za različite slojeve ceste. U tablici 1. (laboratorijsko mjerenje) prikazana su fizikalna svojstva krupnog agregata. Ispitivanje apsorpcije vode krupnih agregata otkriva unutarnju strukturu i poroznost koji utječu na količinu zadržane vode i ključni su za učinkovitost betona. Otpornost na drobljenje, postotak bitumenskog makadama i čvrstoća agregata važni su pokazatelji za procjenu prikladnosti agregata za cestogradnju i za pružanje uvida u njihovu čvrstoću i trajnost.

2.3. Priprema uzorka i ugrađivanje u kalupe

Omjeri mješavine za opločnike (tablica 2.) razlikovali su se ovisno o željenoj čvrstoći, teksturi i trajnosti gotovog proizvoda. Postupak proizvodnje (slika 3.) opločnika obuhvaća nekoliko koraka, a počinje miješanjem različitih materijala kao što su cement, pijesak, krupni agregat, leteći pepeo, pepeo ugljena, vlakna banane i superplastifikator (Ceraplast 300).

Tablica 1. Fizikalna svojstva krupnog agregata

Br. uzorka	Materijal	Vrsta ispitivanja	Jedinica	Srednja vrijednost
1	Krupni agregat	Čvrstoća	%	42,7
2		Otpornost na drobljenje	%	29,21
3		Apsorpcija vode	%	2,08
4		Specifična težina	g/cc	2,59

Tablica 2. Omjeri betonskih mješavina za popločavanje po uzorku

Br. uzorka	Naziv materijala	Mješavina 1	Mješavina 2	Mješavina 3	Mješavina 4	Mješavina 5																			
		[g]																							
1	Leteći pepeo	495	490	485	480	475																			
2	Pepeo ugljena	300	300	300	300	300																			
3	Drobljeni pijesak	2000	2000	2000	2000	2000																			
4	Cement	200	200	200	200	200																			
5	Krupni agregat	2500	2500	2500 </tr <tr> <td>6</td> <td>Vlakna banane</td> <td>5</td> <td>10</td> <td>15</td> <td>20</td> <td>25</td> </tr> <tr> <td>7</td> <td>Superplastifikator (0,5 %) [ml]</td> <td>5</td> <td>5</td> <td>5</td> <td>5</td> <td>5</td> </tr> <tr> <td>8</td> <td>Voda [ml]</td> <td>766</td> <td>766</td> <td>766</td> <td>766</td> <td>766</td> </tr>	6	Vlakna banane	5	10	15	20	25	7	Superplastifikator (0,5 %) [ml]	5	5	5	5	5	8	Voda [ml]	766	766	766	766	766
6	Vlakna banane	5	10	15	20	25																			
7	Superplastifikator (0,5 %) [ml]	5	5	5	5	5																			
8	Voda [ml]	766	766	766	766	766																			



Slika 3. Postupak proizvodnje opločnika

Nakon miješanja materijal se ulijeva u kalupe i zbija pomoću vibrirajućeg stroja kako bi se uklonili mogući zračni džepovi, čime se jamči pravilno oblikovanje opločnika. Nakon zbijanja kalupi se vade kako bi se dobili opločnici. Taj se postupak mora izvesti pažljivo kako se opločnici ne bi oštetili. Naposljetku, opločnici su njegovani (na temperaturi od 35 °C) tijekom preporučenog vremena (7, 14 i 28 dana) kako bi se postigli željena čvrstoća i trajnost. Njegovanje pomaže u sprječavanju pucanja i poboljšava postojanost strukture opločnika. Da bi se to postiglo, opločnike je trebalo održavati u vlažnim uvjetima i omogućiti im očvršćivanje tijekom određenog vremena. Izrada opločnika upotrebom otpadnih vlakana banane nije samo ekološki prihvatljivo rješenje za gospodarenje otpadom, već je i prilika lokalnih zajednica za ostvarivanje prihoda, posebno onih koje žive u područjima u kojima se uzgajaju banane.

Tablica 3. Tlačna čvrstoća opločnika

Oznaka mješavine	Tlačna čvrstoća [MPa] (duplo vezani opločnik)			Tlačna čvrstoća [MPa] (cik-cak)		
	7 dana	14 dana	28 dana	7 dana	14 dana	28 dana
Mješavina 1.	9,96	16,53	23,57	9	15,09	22,46
Mješavina 2.	11,95	19,75	31,28	10,35	17,15	24,53
Mješavina 3.	14,37	23,68	34,58	11,53	19,1	30,54
Mješavina 4.	15,6	25,68	37,65	13,5	22,28	32,42
Mješavina 5.	10,41	17,23	33,64	9,92	16,43	23,42

3. Mehanička svojstva

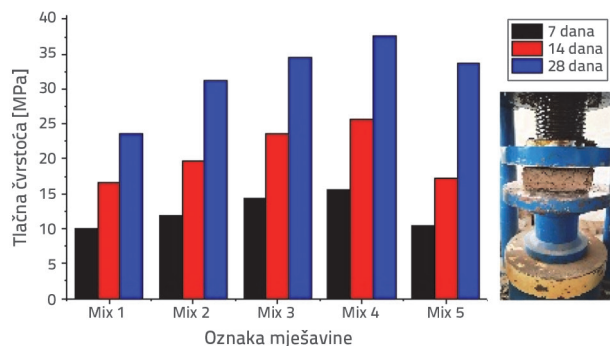
3.1. Ispitivanje tlačne čvrstoće

Tlačna čvrstoća važno je svojstvo opločnika koje određuje njihovu nosivost. Označava silu koju opločnik može izdržati prije nego što se počne lomiti ili propadati. Drugim riječima, tlačna čvrstoća najveći je pritisak ili naprezanje koje opločnik može podnijeti bez pucanja, mrvljenja ili drobljenja. To je ključni čimbenik u oblikovanju, proizvodnji i

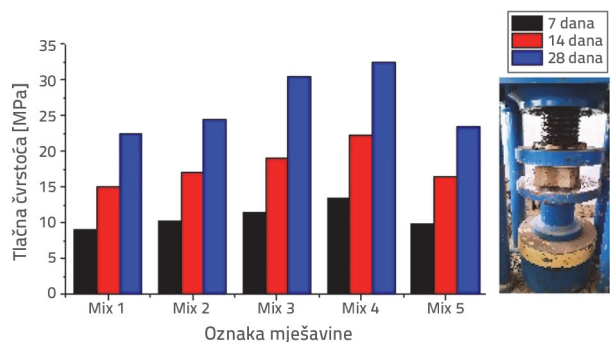
ugradnji opločnika jer utječe na njihovu učinkovitost i trajnost. Tlačna čvrstoća opločnika određuje se standardiziranim testovima i obično se mjeri u megapaskalima (MPa). Veća tlačna čvrstoća upućuje na jači i izdržljiviji opločnik koji može izdržati velika opterećenja i teške vremenske uvjete. Primijenjen je IS 15658:2006 za ispitivanje tlačne čvrstoće [46, 47]. Ispitano je 90 uzoraka (45 duplih vezanih i 45 cik-cak opločnika). Tlačna čvrstoća betona obično se mjeri nakon 7, 14 i 28 dana tijekom kojih beton postiže svoju čvrstoću. Nakon 28 dana njege očekivalo se da će beton postići najveću razinu čvrstoće. U tablici 3. prikazane su tlačne čvrstoće duplih vezanih i cik-cak opločnika.

Najveća tlačna čvrstoća opločnika dobivena je kod mješavine 4. za duple vezane i cik-cak opločnike. U duplo vezanome opločniku mješavina 4. postigla je tlačnu čvrstoću od 37,65 MPa

nakon 28 dana njege, a primijenjeno je 480 g letećeg pepela i 1,5 % vlakana banane. Tlačna čvrstoća povećavala se za približno 7 – 10 MPa kako se produljivalo vrijeme njege (slika 4.). Slično tome, u cik-cak opločniku mješavina 4. postigla je maksimalnu tlačnu čvrstoću od 32,42 MPa nakon 28 dana njege, s istim udjelom letećeg pepela i vlakana banane (slika 5.), no tlačna čvrstoća duplo vezanih opločnika bila je veća u odnosu na cik-cak opločnike.



Slika 4. Tlačna čvrstoća duplog vezanog opločnika



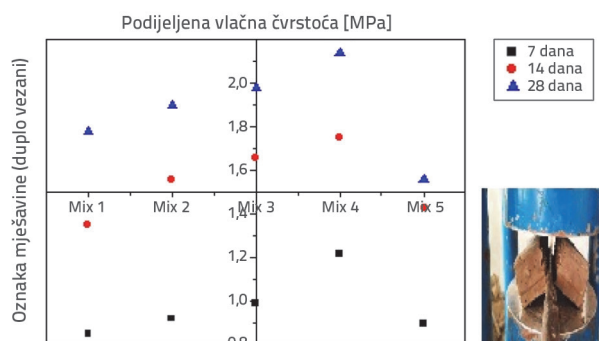
Slika 5. Tlačna čvrstoća cik-cak opločnika

Na temelju tih rezultata može se zaključiti da je dupli vezani opločnik prikladniji za površine s velikim korisnim opterećenjem. Veća tlačna čvrstoća duplog vezanog opločnika upućuje na to da može izdržati veća opterećenja. Važno je istaknuti da tlačna čvrstoća ne može biti jedini kriterij pri odabiru oblika opločnika. Ostala svojstva kao što su savojna čvrstoća, sposobnost apsorpcije vode i vlačna čvrstoća dobivena cijepanjem također

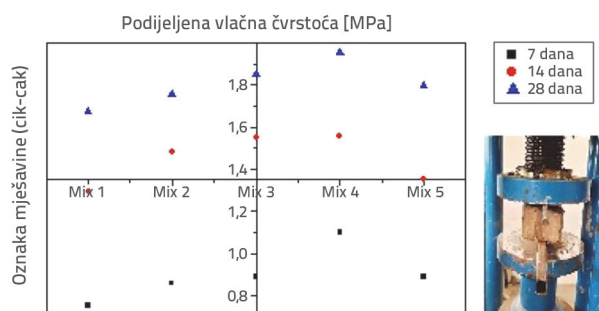
treba uzeti u obzir radi sveobuhvatne procjene učinkovitosti opločnika u posebnim primjenama.

3.2. Vlačna čvrstoća cijepanjem

Ispitivanje vlačne čvrstoće cijepanjem provedeno je na opločnicima kako bi se odredila vlačna čvrstoća bloka. Ispitivanje je uključivalo primjenu vlačne sile na valjkasti uzorak bloka sve dok nije puknuo. Vlačna čvrstoća dobivena cijepanjem (IS 15658:2006) duplog vezanog i cik-cak opločnika ovisi o različitim čimbenicima kao što su vrste korištenih materijala (tablica 4.), proizvodni postupak, dimenzije i oblik opločnika te trajanje njegovanja [38].



Slika 6. Vlačna čvrstoća duplo vezanog opločnika dobivena cijepanjem



Slika 7. Vlačna čvrstoća cik-cak opločnika dobivena cijepanjem

Vlačna čvrstoća mješavine 4. dobivena cijepanjem iznosila je 2 % i smatra se najvišom u odnosu na ostale mješavine. U duplom vezanom opločniku vlačna čvrstoća dobivena cijepanjem i dalje

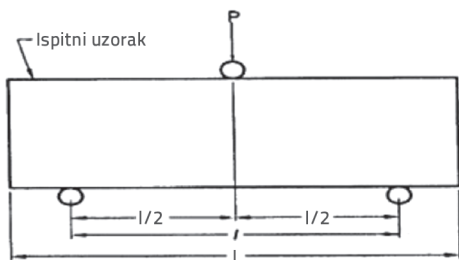
Tablica 4. Vlačna čvrstoća opločnika dobivena cijepanjem

Oznaka mješavine	Vlačna čvrstoća dobivena cijepanjem [MPa] (duplo vezani opločnik)			Vlačna čvrstoća dobivena cijepanjem [MPa] (cik-cak)		
	7 dana	14 dana	28 dana	7 dana	14 dana	28 dana
Mješavina 1.	0,85	1,35	1,78	0,75	1,3	1,67
Mješavina 2.	0,92	1,555	1,9	0,86	1,48	1,75
Mješavina 3.	0,99	1,655	1,98	0,89	1,55	1,85
Mješavina 4.	1,215	1,75	2,14	1,1	1,56	1,95
Mješavina 5.	0,895	1,42	1,56	0,89	1,35	1,8

raste od mješavine 1. do mješavine 3. i doseže maksimum u mješavini 4., tj. 2 % od 2,140, a smanjuje se već u sljedećoj mješavini 5., odnosno 2,5 %. U duplom vezanom opločniku prosječna razlika između triju testova vlačne čvrstoće dobivene cijepanjem, provedenih nakon 7, 14 i 28 dana, iznosila je 45,35 % (slika 6.). U cik-cak opločnicima prosječna razlika između triju testova vlačne čvrstoće dobivene cijepanjem, provedenih nakon 7, 14 i 28 dana, iznosila je 34,82 % za najmanju vlačnu čvrstoću dobivenu cijepanjem. Usporedbom najveće vrijednosti vlačne čvrstoće dobivene cijepanjem za dupli vezani i cik-cak opločnik (slika 7.) došlo se do zaključka da je vlačna čvrstoća dobivena cijepanjem za dupli vezani opločnik za 9,03 % viša u odnosu na cik-cak opločnik tijekom 28 dana. Na temelju toga može se zaključiti da je dupli vezani opločnik prikladnija opcija za područja s velikim korisnim i stalnim opterećenjem.

3.3. Ispitivanje savojne čvrstoće

Savojna čvrstoća opločnika odnosi se na njegovu sposobnost da izdrži naprezanje pri savijanju bez lomljenja ili pucanja. To je svojstvo važno za opločnike jer se obično primjenjuju na vanjskim područjima s redovitim prometom pješaka i vozila. Savojna čvrstoća opločnika osigurava da im struktura ostane netaknuta i da zadrže svoju estetsku privlačnost tijekom dužeg razdoblja.

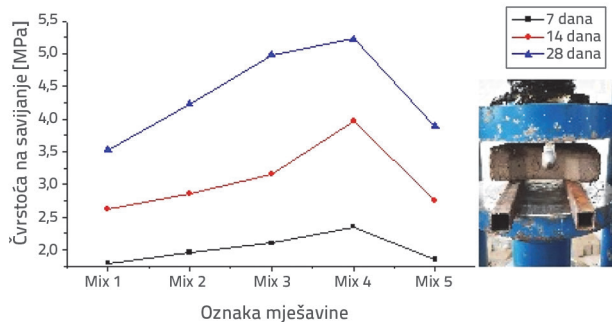


Slika 8. Shematski dijagram ispitivanja savojne čvrstoće (IS 15658:2006)

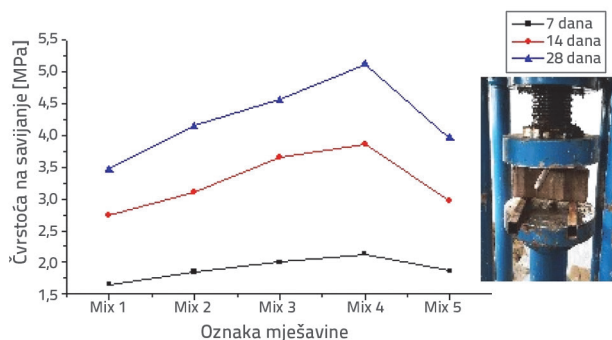
Savojna čvrstoća opločnika određuje se ispitivanjem i obično se izražava u megapaskalima (MPa). Specifikacije ispitivanja savojne čvrstoće dostupne su u IS 15658:2006 (slika 8.). U tablici 5. navedene su savojne čvrstoće duplih vezanih i cik-cak opločnika.

Tablica 5. Savojna čvrstoća opločnika

Oznaka mješavine	Savojna čvrstoća [MPa] (duplo vezani opločnik)			Savojna čvrstoća [MPa] (cik-cak)		
	7 dana	14 dana	28 dana	7 dana	14 dana	28 dana
Mješavina 1.	1,8	2,62	3,52	1,65	2,74	3,46
Mješavina 2.	1,96	2,86	4,23	1,85	3,1	4,15
Mješavina 3.	2,1	3,15	4,98	2	3,65	4,56
Mješavina 4.	2,35	3,98	5,23	2,13	3,86	5,12
Mješavina 5.	1,85	2,75	3,89	1,86	2,96	3,95



Slika 9. Savojna čvrstoća duplog vezanog opločnika

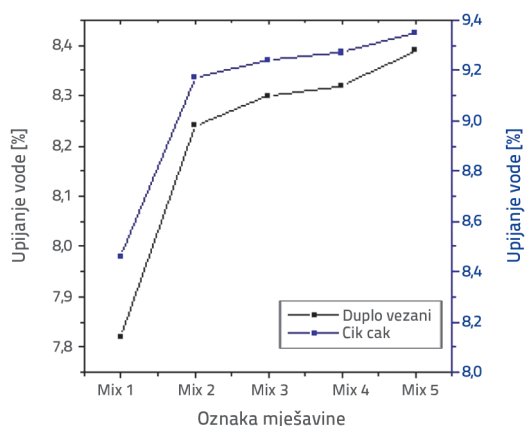


Slika 10. Savojna čvrstoća cik-cak opločnika

Rezultati savojne čvrstoće pokazali su da je mješavina 4., koja je imala udio vlakana banane od 2 %, imala najveću savojnu čvrstoću među svim ispitanim mješavinama (slike 9. i 10.). U slučaju duplog vezanog opločnika savojna čvrstoća postupno je rasla od mješavine 1. do mješavine 3. i dosegla svoj vrhunac u mješavini 4., a iznosila je 5,23 MPa. Međutim, savojna čvrstoća smanjila se u sljedećoj mješavini 5. (2,5 % vlakana banane). Najniža vrijednost savojne čvrstoće dobivena je za mješavinu 1. (0,5 % vlakana banane), a iznosila je 3,52 MPa. Za cik-cak opločnike dobivene najmanje i najveće vrijednosti savojne čvrstoće iznosile su 3,46 MPa odnosno 5,12 MPa. Razlika u postocima između dviju najvećih vrijednosti savojne čvrstoće za duple vezane i cik-cak opločnike koji imaju udio vlakana banane od 2 %, iznosila je 2,15 % tijekom razdoblja ispitivanja od 28 dana. Slično tome, razlika u postotku između dviju najmanjih vrijednosti savojne čvrstoće duplih vezanih i cik-cak opločnika s 0,5 % vlakana banane iznosila je 1,71 % tijekom razdoblja ispitivanja od 28 dana.

3.4. Apsorpcija vode

Test apsorpcije vode proveden je na opločnicima kako bi se utvrdila njihova sposobnost da upiju vodu. Uključivao je uranjanje bloka opločnika u vodu na određeno vrijeme i mjerenje povećanja težine nastalog upijanjem vode. Detalji ispitivanja sposobnosti apsorpcije vode dostupni su u IS 15658:2006.



Slika 11. Sposobnost apsorpcije vode opločnika

Prema rezultatima ispitivanja (slika 11.), vrijednosti apsorpcije vode za sve uzorke premašile su 6 %, ponajprije zbog kombinacije omjera mješavine i inherentnih fizikalnih svojstava upotrijebljenih materijala. Mješavina 5., koja je imala udio od 2,5 % vlakana banane, imala je najveću sposobnost apsorpcije vode u duplom vezanome opločniku. To znači da je opločnik izrađen primjenom mješavine 5. upio najviše vode nakon uranjanja u vodu tijekom određenog trajanja.

S druge strane, mješavina 5. u cik-cak opločnicima imala je najmanju sposobnost apsorpcije vode. Sudeći po tim podacima, opločnik na bazi mješavine 5. pokazao je najmanju sposobnost apsorpcije vode u usporedbi s ostalim omjerima mješavine kada je podvrgnut testu uranjanja u vodu. Razlike u vrijednostima apsorpcije vode među različitim omjerima mješavine mogu se pripisati nekoliko čimbenika, uključujući interakciju između vlakana banane i betonske matrice, raspodjelu vlakana i ukupnu poroznost opločnika. Razlog veće sposobnosti apsorpcije vode duplih vezanih opločnika može biti prisutnost većeg broja šupljina ili međusobno povezanih pora, što omogućuje prodiranje vode i njezinu apsorpciju.

3.5. Uzorak lomova opločnika

Općenito, obrasci loma opločnika mogu se svrstati u tri kategorije: posmični, savojni i tlačni. Posmični lom nastaje uslijed klizanja opločnika zbog primjene opterećenja. Savojni lom nastaje uslijed savijanja opločnika i pucanja zbog primjene opterećenja. Tlačni lom nastaje uslijed gnječenja opločnika zbog primjene opterećenja. Obrazac loma (slika 12.) opločnika u čijemu su sastavu otpadna prirodna vlakna banane ovisi o različitim čimbenicima poput vrste primijenjene betonske

mješavine, veličini i obliku opločnika, postotku dodanih vlakana banane i primijenjenoj metodi zbivanja tijekom proizvodnje.



Slika 12. Obrasci loma opločnika

Dodavanje vlakana banane u betonsku smjesu može poboljšati mehanička svojstva opločnika, uključujući povećanu vlačnu čvrstoću, savojnu čvrstoću i otpornost na udarce. Očekuje se da će učinak premošćivanja otpadnih vlakana banane ublažiti širenje pukotina i poboljšati ponašanje opločnika nakon pucanja i dovesti do smanjenja savojnog loma i pucanja pod opterećenjem na savijanje. Otpadna vlakna banane mogla bi poboljšati međufaznu snagu veze između cementne matrice i agregata. Ta poboljšana veza može dovesti do učinkovitijeg mehanizma prijenosa naprezanja, čime se povećava otpornost opločnika na posmične deformacije i lomove. Na mehanička svojstva i učinkovitost ojačanja vlaknima od otpadne banane mogu znatno utjecati čimbenici kao što su duljina vlakana, omjer širine i visinetai površinska obrada. Režim njegovanja koji se primjenjuje tijekom procesa proizvodnje opločnika može utjecati na razvoj veze između vlakana i matrice te posljedično utjecati na cjelokupno mehaničko ponašanje. Promjene u procesu miješanja, tehnikama zbivanja i metodama raspršivanja vlakana mogu utjecati na raspodjelu i učinkovitost ojačanja od otpadnih vlakana banane u opločniku.

4. Analiza troškova opločnika

Pri određivanju cijene treba uzeti u obzir barem materijalne troškove, troškove pripreme vlakana i troškove proizvodnje opločnika. Proces izračuna obuhvaća moguće zarade za pojedinu situaciju ili projekt i oduzimanje ukupnih troškova povezanih s njegovim dovršetkom. Predviđa dobit ostvarenu projektom i uspoređuje trošak projekta s procijenjenom financijskom dobiti. Analiza troškova u tablici 6. pokazuje da je tržišna cijena [24] duplog vezanog opločnika viša od cijene cik-cak opločnika. Zahvaljujući dodavanju vlakana banane, poboljšane su tlačna, savojna i vlačna čvrstoća dobivena cijepanjem. Stopa troška smanjena je za 35,56 % u duplome vezanom opločniku odnosno za 27,40 % u cik-cak opločniku. Zato kupnja opločnika ojačanog

Tablica 6. Analiza troškova za opločnike

Oznaka mješavine	Trenutna cijena [EUR]	Dupli vezani opločnik [EUR]	Trenutačna cijena [EUR]	Cik-cak [EUR]
Mješavina 1.	0,19	0,122	0,17	0,122
Mješavina 2.	0,19	0,121	0,17	0,121
Mješavina 3.	0,19	10,0,121	0,17	0,121
Mješavina 4.	0,19	0,121	0,17	0,121
Mješavina 5.	0,19	0,121	0,17	0,121

vlaknima banane naveliko može biti ekonomski isplativa. Postotne razlike između tržišne i procijenjene cijene iznosile su 43,261 % i 31,75 % za dupli vezani odnosno cik-cak opločnik.

5. Rasprava i zaključak

Ovo istraživanje bavi se primjenom modificiranih vlakana banane (MVB) kao mogućeg ojačanja u betonskim opločnicima u cilju poboljšanja njihovih mehaničkih svojstava. Učinkovitost opločnika koji imaju različite udjele vlakana banane (u odnosu na težinu letećeg pepela) uspoređena je s referentnom. Rezultati su pokazali znatno poboljšanje tlačne čvrstoće, savojne čvrstoće i vlačne čvrstoće dobivene cijepanjem opločnika koji ima optimalan udio vlakana banane od 2 %. To nadilazi uobičajeni udio vlakana banane od 1,5 % zabilježen u prethodnim istraživanjima, što upućuje na potencijalne prednosti primijenjenoga specifičnog postupka modifikacije vlakana banane. Ovo istraživanje potvrđuje utjecaj nekoliko čimbenika na učinkovitost ojačanja vlaknima banane, uključujući inherentna svojstva samih vlakana (duljina, omjer širine i površine te površinska obrada), sveukupna obilježja mješavine betonskog opločnika (udio cementa, vrsta agregata te omjer vode i cementa) i duljinu njegovanja betona tijekom proizvodnje. Svi ti čimbenici igraju ulogu u interakciji vlakana i matrice te u mehanizmima prijenosa naprezanja unutar kompozitnog materijala.

Rezultati istraživanja općenito dokazuju potencijal vlakana banane kao održivog materijala za ojačanje opločnika. Uočena poboljšanja u mehaničkoj čvrstoći sugeriraju da bi ti opločnici mogli ponuditi vrhunsku, dugotrajnu izdržljivost i otpornost na pucanje pod realnim opterećenjima. Osim toga taj pristup usklađen je sa sve većim težištem na održivim građevinskim praksama koje primjenjuju lako dostupne poljoprivredne nusproizvode kao što su vlakna banane, čime bi se moglo smanjiti oslanjanje na tradicionalne materijale koji troše više resursa.

Ovaj eksperimentalni rad obuhvatio je pretvorbu stabljika banane u vlakna te izradu opločnika ojačanih vlaknima banane, čija su inženjerska svojstva procijenjena u smislu sposobnosti apsorpcije vode, tlačne čvrstoće, savojne čvrstoće i vlačne čvrstoće dobivene cijepanjem.

- Najveća tlačna čvrstoća od 37,650 N/mm² dobivena je za mješavinu 4. i iznosila je 37,650 N/mm² nakon 28 dana njege u duplome vezanom opločniku, dok je najveća tlačna čvrstoća

od 32,420 N/mm² postignuta za mješavinu 4. i iznosila je 32,420 N/mm² nakon 28 dana njege u cik-cak opločniku. Tlačna čvrstoća duploga vezanog opločniku bila je veća od one cik-cak opločnika, što upućuje na mogućnost njegove primjene u područjima s velikim korisnim opterećenjem.

- Savojna čvrstoća mješavine 4. (2 % od 5,230 N/mm²) bila je najveća u odnosu na ostale mješavine. Dobivene najmanje i najveće vrijednosti iznosile su 3,520 N/mm² i 5,230 N/mm² za dupli vezani odnosno cik-cak opločnik. Postotne razlike između najveće i najmanje savojne čvrstoće iznosile su 2,156 % odnosno 1,719 % nakon 28 dana.
- Vlačna čvrstoća dobivena cijepanjem bila je najveća u mješavini 4. u odnosu na ostale mješavine. U duplome vezanom opločniku vlačna čvrstoća dobivena cijepanjem porasla je s mješavine 1. na mješavinu 3. i dosegla najveću vrijednost u mješavini 4. Prosječna najmanja razlika testova provedenih nakon 7, 14 i 28 dana za vlačnu čvrstoću dobivenu cijepanjem iznosila je 45,35 %. U cik-cak opločnicima prosječna najmanja razlika testova provedenih nakon 7, 14 i 28 dana za vlačnu čvrstoću dobivenu cijepanjem iznosila je 34,82 %. Vlačna čvrstoća duploga vezanog opločnika dobivena cijepanjem bila je za 9,03 % veća u odnosu na cik-cak opločnik nakon 28 dana.
- Mješavina 5. (2,5 % vlakana banane) imala je najveći rezultat apsorpcije vode u duplome vezanom opločniku i najmanju apsorpciju vode u cik-cak opločniku.
- Uzorci loma opločnika mogu se kategorizirati u tri vrste: posmični, savojni i tlačni. Dodavanje vlakana banane u betonsku smjesu može poboljšati mehanička svojstva opločnika, uključujući povećanu vlačnu čvrstoću, savojnu čvrstoću i otpornost na udarce. Međutim, uzorak loma i dalje može ovisiti o čimbenicima kao što su kvaliteta upotrijebljenih vlakana banane, uvjeti njege betona i postupak proizvodnje.
- Dokazano je da opločnici koji imaju udio od 2 % modificiranih vlakana banane (u odnosu na težinu letećeg pepela) pokazuju bolja mehanička svojstva (7,45 % za dupli vezani i 17,12 % za cik-cak opločnik, 14,99 % za dupli vezani i 8,67 % za cik-cak opločnik te 12,182 % za dupli vezani i 9,971 % za cik-cak opločnik) u odnosu na druge omjere mješavine.

Vlakna banane ravnomjerno su raspoređena u mješavini rezanjem i pravilnim raspoređivanjem kako bi se spriječilo

zgrudnjavanje. Vlakna djeluju na sprječavanje pucanja tijekom ispitivanja i pridonose poboljšanim svojstvima loma. S obzirom na mehanička svojstva, udio od 2 % vlakana banane pokazao se kao optimalan omjer mješavine za betonske opločnike ojačanim vlaknima banane. Prema tablici 1. iz norme IS 15658:2006, dupli vezani opločnik ojačan vlaknima banane u udjelu od 2 % može se upotrijebiti u slabo prometnim područjima i u preporučenoj debljini od 60 mm, dok se cik-cak opločnik ojačan vlaknima

banane u udjelu od 2 % može upotrijebiti u područjima u kojima teče promet i u preporučenoj debljini od 50 mm.

Zahvala

Ovo istraživanje podržali su osnivači obrazovne ustanove Vivekanandha, Tiruchengode, i zahvaljujemo kampusu Sankari na njihovoj potpori i motivaciji tijekom istraživanja.

LITERATURA

- [1] Gopinath, A., Amala, D., Nath, A.G., Vasudev, A.D., Thomas, J.: Fibre Reinforced Pervious Concrete Using Banana Fibre, *International Journal of Engineering and Management Research (IJEMR)*, 7 (2017) 2, pp. 127-132.
- [2] Shakeil, M., Kumar, E.A.: Improvising the Quality of Asphalt Mix Using Marble Dust and Banana Fiber, 2022.
- [3] Chen, L., Chen, Z., Xie, Z., Wei, L., Hua, J., Huang, L., Yap, P.S.: Recent developments on natural fiber concrete: A review of properties, sustainability, applications, barriers, and opportunities, *Developments in the Built Environment*, 16 (2023), 100255.
- [4] Vignesh, A.H., Gokula Rhagavi, R., Shanmugavadiuvu, V., Vidhya, K., Mohan, S.: Experimental investigation on flexural behaviour of RC beam using hybrid fibre (banana fibre & steel fibre) with copper slag as partial replacement, In *AIP Conference Proceedings*, 2782 (2023) 1, AIP Publishing.
- [5] Anitha, K., Senthilselvan, S.: Agricultural Waste Materials Applications in Building Industry—An Overview, *ECS Transactions*, 107 (2022) 1, pp. 2371.
- [6] Awwad, E., Mabsout, M., Hamad, B., Khatib, H.: Preliminary studies on the use of natural fibers in sustainable concrete, *Lebanese Science Journal*, 12 (2011) 1, pp. 109-117.
- [7] Ganesh, C., Muthukannan, M., Kumar, A.S., Arunkumar, K.: Influence of bacterial strain combination in hybrid fiber reinforced geopolymer concrete subjected to heavy and very heavy traffic condition, *Journal of Advanced Concrete Technology*, 19 (2021) 4, pp. 359-369.
- [8] Pushpakumara, B.H.J., Hewawaduge, T.R.: Effect of banana fibre and lime on mechanical and thermal properties of unburnt clay bricks, *Australian Journal of Civil Engineering*, (2022), pp. 1-10.
- [9] Gowda, R.P.C.: Experimental study of cement stabilized fiber reinforced compressed earth blocks as an alternative building material, Arizona State University, 2016.
- [10] Emrith, P.D., Ramasawmy, H., Surroop, D., Das, D.B.: Substantial size reduction of banana fibres and enhancement of fibre properties achieved through a single mechanical treatment, *Waste and Biomass Valorization*, 14 (2023) 4, pp. 1369-1389.
- [11] Ali, B., Hawreen, A., Kahla, N.B., Amir, M.T., Azab, M., Raza, A.: A critical review on the utilization of coir (coconut fiber) in cementitious materials, *Construction and Building Materials*, 351 (2022), pp. 128957.
- [12] Iftikhar, B., Ali, S.C., Vafaei, M., Javed, M.F., Ali, M., Gamil, Y., Rehman, M.F.: A machine learning-based genetic programming approach for the sustainable production of plastic sand paver blocks, *Journal of Materials Research and Technology*, 25 (2023), pp. 5705-5719.
- [13] Awwad, E., Mabsout, M., Hamad, B., Farran, M.T., Khatib, H.: Studies on fiber-reinforced concrete using industrial hemp fibers, *Construction and Building Materials*, 35 (2012), pp. 710-717.
- [14] Ahmad, H., Chhipi-Shrestha, G., Hewage, K., Sadiq, R.: A comprehensive review on construction applications and life cycle sustainability of natural fiber biocomposites, *Sustainability*, 14 (2022) 23, pp. 15905.
- [1] Shende, A., Borkar, P., Borghare, R., Manvar, S., Raza, R., Bhaisare, S., Meshram, S.: Analysis of strength of pervious concrete by adding rice husk ash and glass fibre. *Carbon (C)*, 2 (2019), pp. 4-10.
- [16] Ramalingam, V., Ramesh, K., Arumugam, M., Muralidharan, V.: Effect of natural fish tail palm fiber on the workability and mechanical properties of fiber reinforced concrete, *Građevinskimaterijaliikonstrukcije*, 65 (2022) 1, pp. 7-22.
- [17] Ahmad, J., Arbili, M.M., Majidi, A., Althoey, F., Farouk Deifalla, A., Rahmawati, C.: Performance of concrete reinforced with jute fibers (natural fibers): A review, *Journal of Engineered Fibers and Fabrics*, 17 (2022), 15589250221121871.
- [18] Arunkumar, K., Muthukannan, M., Ganesh, A.C., Devi, R.K.: Hybrid fibre reinforced eco-friendly geopolymer concrete made with waste wood ash: A mechanical characterization study, *Engineering and Applied Science Research*, 49 (2022) 2, pp. 235-247.
- [19] Kazi, A., Dam, R., Datta, S., Venkatachalam, G., Rajan, G.: Flexural and fracture analysis of polymer metal hybrid composite panels reinforced with natural fibers, *University Politehnica of Bucharest Scientific Bulletin series B-chemistry and Materials Science*, 80 (2022), pp. 85-96.
- [20] Awwad, E., Hamad, B., Mabsout, M., Khatib, H.: Sustainable construction material using hemp fibers—preliminary study, In *Proceedings of the Second International Conference on Sustainable Construction Materials and Technologies*. Ancona, Italy: Università Politecnica delle Marche, 2010.
- [21] Fang, L., Lu, X., Zeng, J., Chen, Y., Tang, Q.: Investigation of the flame-retardant and mechanical properties of bamboo fiber-reinforced polypropylene composites with melamine pyrophosphate and aluminum hypophosphite addition, *Materials*, 13 (2022) 2, pp. 479.
- [22] Desmarais, M.: Incorporating waste fibers in unstabilized compressed earth blocks for sustainable construction in Ghana (Doctoral dissertation, Doctoral dissertation, Worcester Polytechnic Institute), 2021.
- [23] Shanmugam, R., Sowmiya, S., Dinesh, V., Venkatramana, N., Naveen, S.: A study on eco-friendly composite blocks incorporating scrap tyre rubber and steel slag as coarse aggregate with sisal fiber, *Materials Today: Proceedings*, 2023.

- [24] Zuraida, S., Dewancker, B., Margono, R.B.: Application of non-degradable waste as building material for low-cost housing, *Scientific Reports*, 13 (2023) 1, pp. 6390.
- [25] Ruano, G., Bellomo, F., Lopez, G., Bertuzzi, A., Nallim, L., Oller, S.: Mechanical behaviour of cementitious composites reinforced with bagasse and hemp fibers, *Construction and Building Materials*, 240 (2020), pp. 117856.
- [26] Chahinez, A., Abderraouf, B.A., Yacine, A., Oussama, K.: Experimental study on flexural creep of self-compacting concrete reinforced with vegetable and synthetic fibers, *REM-International Engineering Journal*, 76 (2023), pp. 229-237.
- [27] Hassan, A.M.S., Abdeen, A., Mohamed, A.S., Elboshy, B.: Thermal performance analysis of clay brick mixed with sludge and agriculture waste, *Construction and Building Materials*, 344 (2022), pp. 128267.
- [28] Gao, X., Zhu, D., Fan, S., Rahman, M.Z., Guo, S., Chen, F.: Structural and mechanical properties of bamboo fiber bundle and fiber/bundle reinforced composites: A review, *Journal of Materials Research and Technology*, 19 (2022), pp. 1162-1190.
- [29] Coetzee, G.: The mechanical and volumetric behaviour of sisal fibre reinforced concrete blocks (Doctoral dissertation, Stellenbosch: Stellenbosch University), 2013.
- [30] Emon, M.A.B.: Study of strength and ductility of galvanized iron wire reinforced concrete, 2014.
- [31] Grubor, M., Carević, I., Serdar, M., Štirmer, N.: Shrinkage of mortar with the addition of wood biomass ash and recycled tyre polymer fibres, *GRAĐEVINAR*, 75 (2023) 4, pp. 367-378, <https://doi.org/10.14256/JCE.3642.2022>
- [32] Geçkil, T., Tanyıldızı, M.M., İnce, C.B.: Benefit–cost relationship of using concrete with blast furnace slag as road pavement, *GRAĐEVINAR*, 75 (2023) 1, pp. 23-37, <https://doi.org/10.14256/JCE.3570.2022>
- [33] Natarajan, S., Murugesan, A., Dhanapal, J., Narayanan, A.: Glass fiber reinforced ultra-high strength concrete with silica fume, *GRAĐEVINAR*, 74 (2022) 10, pp. 849-856, <https://doi.org/10.14256/JCE.3431.2021>
- [34] Wang, W., Cheng, X., Zhu, J., Liu, S., Chen, X.: Experimental study on freezing resistance of permeable concrete mixed with vinyl acetate-ethylene copolymer emulsion and basalt fiber, *GRAĐEVINAR*, 75 (2023) 2, pp. 143-152, <https://doi.org/10.14256/JCE.3373.2021>
- [35] Yogeewaran Kanag, S., Anandan, Y.K., Vaidyanath, P., Baskar, P.: Strength properties of coated E-glass fibres in concrete, *GRAĐEVINAR*, 68 (2016) 9, pp. 697-703, <https://doi.org/10.14256/JCE.1335.2015>
- [36] Stijanović, M., Radonjanin, V., Malešev, M., Milović, T., Furgan, S.: Compressive strength of cement stabilizations containing recycled and waste materials, *GRAĐEVINAR*, 73 (2021) 8, pp. 791-804, <https://doi.org/10.14256/JCE.3161.2021>
- [37] Kaya, M., Uysal, M., Yilmaz, K., Karahan, O., Atis, C.D.: Mechanical properties of class C and F fly ash geopolymer mortars, *GRAĐEVINAR*, 72 (2020) 4, pp. 297-309, <https://doi.org/10.14256/JCE.2421.2018>
- [38] Milovanović, B., Štirmer, N., Carević, I., Baričević, A.: Wood biomass ash as a raw material in concrete industry, *GRAĐEVINAR*, 71 (2019) 6, pp. 504-514, <https://doi.org/10.14256/JCE.2546.2018>
- [39] Senthamselvi, P., Palanisamy, T.: Effect of incinerated paper sludge ash on fly ash-based geopolymer concrete, *GRAĐEVINAR*, 69 (2017) 9, pp. 851-859, <https://doi.org/10.14256/JCE.1864.2016>
- [40] American Society for Testing and Materials: Standard Test Method for Slump of Hydraulic-Cement Concrete (ASTM C143/C143M-16). ASTM International, 2016.
- [41] American Society for Testing and Materials: Standard Practice for Making and Curing Concrete Test Specimens in the Field (ASTM C31/C31M-15), ASTM International, 2015.
- [42] American Society for Testing and Materials: Standard Test Method for Relative Density (Specific Gravity) and Absorption of Coarse Aggregate (ASTM C127-15), ASTM International, 2015.
- [43] Bureau of Indian Standards: IS 15658:2006 - Precast concrete blocks for paving – Specifications, New Delhi, India: BIS, 2016.
- [44] Bureau of Indian Standards: IS:516-1959 - Method of Tests for Strength of Concrete, New Delhi, India: BIS, 1959.
- [45] Bureau of Indian Standards: IS 15658-1: Concrete paving blocks - Part 1: Requirements, 2006.
- [46] Bureau of Indian Standards: IS 15658-2: Concrete paving blocks - Part 2: Methods of test, 2006.
- [47] Bureau of Indian Standards: IS:516-1959: Method of Tests for Strength of Concrete, 1959.