

# Ispitivanje cementnog morta ojačanog vlaknima brnistre dobivene maceracijom u otopini 5% NaOH

---

**Samardžić, Marijana**

**Master's thesis / Diplomski rad**

**2020**

*Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj:*

**University of Split, Faculty of Civil Engineering, Architecture and Geodesy / Sveučilište u Splitu, Fakultet građevinarstva, arhitekture i geodezije**

*Permanent link / Trajna poveznica:* <https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:123:403890>

*Rights / Prava:* [In copyright](#)/[Zaštićeno autorskim pravom.](#)

*Download date / Datum preuzimanja:* **2024-09-01**



*Repository / Repozitorij:*

[FCEAG Repository - Repository of the Faculty of Civil Engineering, Architecture and Geodesy, University of Split](#)



**SVEUČILIŠTE U SPLITU**  
**FAKULTET GRAĐEVINARSTVA, ARHITEKTURE I GEODEZIJE**

# **DIPLOMSKI RAD**

**Marijana Samardžić**

**Split, 2020.**

**SVEUČILIŠTE U SPLITU  
FAKULTET GRAĐEVINARSTVA, ARHITEKTURE I GEODEZIJE**

**Marijana Samardžić**

**Ispitivanje cementnog morta ojačanog vlaknima  
brnistre dobivene maceracijom u otopini 5 % NaOH**

**Diplomski rad**

**Split, 2020.**

**SVEUČILIŠTE U SPLITU**

**FAKULTET GRAĐEVINARSTVA, ARHITEKTURE I GEODEZIJE**

**STUDIJ: DIPLOMSKI SVEUČILIŠNI STUDIJ GRAĐEVINARSTVA**

**KANDIDAT:** Marijana Samardžić

**BROJ INDEKSA:** 723

**KATEDRA:** **Katedra za građevinske materijale**

**PREDMET:** Građevinski materijali I

### **ZADATAK ZA DIPLOMSKI RAD**

**Tema:** Ispitivanje cementnog morta ojačanog vlaknima brnistre dobivene maceracijom u otopini 5 % NaOH

Opis zadatka: Zadatak kandidatkinje je proučiti svojstva mikroarmiranog betona, te primjenu prirodnih vlakana u svrhu mikroarmiranja. U eksperimentalnom dijelu rada potrebno je izraditi uzorke morta. Referentna mješavina je standardni mort, a ostali mortovi su ojačani vlaknima brnistre dobivene držanjem grančica u otopini 5 % NaOH. Vlakna su duljine 1, 2 i 3 cm a dodaju se u količini od 0.5 i 1 % ukupnog volumena. Potrebno je odrediti čvrstoću na savijanje i tlak na 28-dnevnim uzorcima, te ih usporediti sa rezultatima ostalih vlaknima ojačanim uzorcima. To su uzorci izrađeni tijekom 2017. i 2018. godine i ispitani na Katedri za građevinske materijale, a također sadrže vlakna dobivena maceracijom u otopini 5 % NaOH. Na nekoliko uzoraka potrebno je prikazati dijagram opterećenje – pomak i usporediti ga sa referentnim mortom. Temeljem dobivenih rezultata potrebno je komentirati kvalitetu vlakana vezano za godinu berbe.

U Splitu, 09.03.2020.

Voditelj Diplomskog rada:

Prof.dr.sc Sandra Juradin

Predsjednik Povjerenstva za završne i  
diplomske ispite:

Doc. dr. sc. Ivo Andrić

## **Ispitivanje cementnog morta ojačanog vlaknima brnistre dobivene maceracijom u otopini 5 % NaOH**

### **Sažetak:**

Trošenje neobnovljivih izvora sirovina, te ispuštanje gotovo 30 % od ukupne emisije ugljičnog dioksida, dovelo je do toga da se u novije vrijeme, posvećuje velika pozornost upotrebi celuloznih vlakana u kompozitnim materijalima. U ovom radu korištena su vlakna brnistre dobivena maceracijom u 5% otopini NaOH, koja služe kao ojačanja u cementnom mortu. Vlakna su se koristila u količini od 0,5 i 1,0% volumena, u duljini od 1,2 i 3 cm. Uzorci su ispitani na tlačnu i savojnu čvrstoću, te su dobiveni rezultati uspoređeni sa rezultatima prijašnjih godina istraživanja. Prikazan je i  $\sigma - \delta$  diagram za nekoliko uzoraka.

### **Ključne riječi:**

Celulozna vlakna, cementni mort, brnistra, maceracija, 5% NaOH

## **Test of cement mortar reinforced with broom fibers obtained by maceration in a solution of 5% NaOH**

### **Abstract:**

Consumption of non-renewable resources of raw materials and almost 30% of carbon dioxide total mass emissions led to an increased usage of cellulose fibres in composite materials nowadays. In this paper spanish broom fibres are used obtained by maceration in 5% NaOH solution, serving as reinforcement in cement mortar. The fibers were used in an amount of 0.5 and 1.0% by volume, in lengths of 1, 2 and 3 cm. Compressive and flexural strength were determined for the specimens and obtained results are compared to older test results. A  $\sigma - \delta$  diagram for several samples is also shown.

### **Keywords:**

Cellulose fibres, cement mortar, spanish broom, maceration, 5% NaOH

## Sadržaj:

1. UVOD .....	1
2. OPĆENITO O MIKROARMIRANJU BETONA .....	2
2.1. Sastav MAB i utjecaj na svojstva betona.....	3
3. MIKROARMIRANJE PRIRODNIM VLAKNIMA .....	5
3.1. Kemijski sastav celuloznih vlakana .....	9
4. TRETIRANJE PRIRODNIH VLAKANA.....	11
4.1. Biološka obrada vlakana .....	11
4.1.1. Maceracija u morskoj vodi .....	11
4.1.2. Metoda mikrovalne maceracije .....	12
4.2. Kemijska obrada vlakana.....	12
4.2.1. Tretiranje silanom.....	13
4.2.2. Tretiranje sa NaOH i Na <sub>2</sub> SO <sub>3</sub> .....	14
5. PRIMJERI UPOTREBE TRETIRANIH BILJNIH VLAKANA OTOPINOM NaOH	14
5.1. Vlačna čvrstoća i modul elastičnosti .....	17
5.2. Promjena promjera i gustoće vlakana .....	19
5.3. Promjena na površini vlakana .....	20
5.4. Promjena boje vlakana .....	20
6. BRNISTRA (Spartium junceum L.).....	22
6.1. Vrijeme rezanja brnistre.....	23
6.2. Sastav i svojstva brnistre.....	23
6.3. Provedena istraživanja .....	24
6.3.1. Zaključak istraživanja.....	28
7. EKSPERIMENTALNI DIO.....	36
7.1. Materijali.....	36
7.1.1. Cement.....	37
7.1.2. Standardni kvarcni pijesak.....	38
7.1.3. Voda .....	39
7.1.4. Vlakna brnistre .....	39
7.2. Izrada i ispitivanje uzoraka morta.....	42
7.2.1. Izrada morta.....	42
7.2.2. Ispitivanje svježih uzoraka morta .....	45

7.2.3. Usporedba rezultata ispitivanja iz 2019.godine sa prijašnjim ispitivanjima iz 2018. i 2017.godine.....	49
8. ZAKLJUČAK .....	56
9. LITERATURA:.....	58

## 1. UVOD

Beton kao jedan od osnovnih i najstarijih građevinskih materijala, danas pokriva preko 50% građevinskih potreba, a čak 71% u Europskoj uniji. Beton kojeg danas poznajemo nastao je početkom 19. stoljeća, ali masovnija primjena uslijedila je tek sa izumom armiranog betona, u drugoj polovici 19. stoljeća. Prvih 100-tinjak godina beton je bila nepromijenjena smjesa agregata, cementa i vode. Voda, koja u vezivanju betona ima dvojnju ulogu – omogućuje hidrataciju cementa a time i očvršćivanje betona. [1]

Spajanjem betona i čelika dobijamo armirani beton, gdje čelik preuzima vlačna naprezanja, dok beton preuzima tlačna naprezanja. Ovakav spoj dvaju materijala različitih karakteristika daje superiornost zajedničkoj stukturi te poboljšava performanse armiranog betona.[1] Postavljanje betona zajedno sa čeličnim šipkama, odnosno armaturom, omogućeno je jer beton i čelik približno isto reagiraju na temperaturne promjene, a i beton dobro prianja na armaturu i štiti je od korozije, kao i od utjecaja požara. [2]

Ipak, i pored ovih karakteristika, nijedan materijal nije otporan na utjecaj vremena. U posljednjih nekoliko godina, naročito na području Bliskog i Srednjeg Istoka, zabilježen je veliki broj AB konstrukcija koje zahtijevaju ozbiljne sanacije nakon manje od 20 godina uporabe. Korozija armature je glavni razlog ugrožavanja trajnosti armiranog betona. Trajnost betona je povezana s okolišem, pa ako smo u mogućnosti povećati vijek trajanja betona od 50 do 500 godina, njegov utjecaj na okoliš smanjuje se 10 puta. Nekolicina faktora utječe na trajnost ovih konstrukcija, među njima su zapreminska masa, upijanje vode, vodonepropustljivost, otpornost na mraz, pukotine, ali i homogenost koja ovisi kod svježeg betona o pravilnom projektiranom sastavu, kvaliteta i dužine miješanja u mješalici tijekom proizvodnje. [1]



## 2. OPĆENITO O MIKROARMIRANJU BETONA

Ojačavanje dodavanjem različitih vlakana u građevinske materijale poznato je od daleke prošlosti. Kao alternativa čeličnim armaturnim šipkama ili mrežama, došlo se na ideju mikroarmiranja betona. Mikroarmirani beton je visokih uporabnih svojstava (skraćeno MAB VUS) kompozitno gradivo sa cementnom matricom karakteristične tlačne čvrstoće veće od 150 MPa i s dodatkom vlakana koja služe za poboljšanje duktilnosti pri vlačnom opterećenju. U svijetu su se pojavili prije deset do petnaest godina i od tada se intenzivno proučavaju njihova svojstva, struktura i tehnologija. [3]

Kao zamjena armaturnom ili prenapregnutom čeliku, upotrebom vlaknastih materijala izbjegava se problem korozije. Također, ova vlakna nose i neke druge poboljšane karakteristike u odnosu na čelik. Svaka vrsta vlakana daje drugačije karakteristike betonu a jedinstveni parametar koji karakterizira svako vlakno je koeficijent oblika. [2] Koeficijent oblika je odnos dužine i promjera vlakna, pa o njemu ovise i svojstva betona u svježem i očvrslom stanju. S tehnološkog stajališta poželjan je što niži omjer, odnosno što kraća i deblja vlakna, no s tehničkog stajališta povoljnije je da su vlakna duža jer se bolje sidre u cementni kamen. [4]

Vlakna su uniformno raspoređena i nasumično orijentirana u betonu, te čine diskontinuiranu mikroarmaturu (Slika 1.). Kao takva, mikroarmatura ne služi da zamjeni čeličnu armaturu armiranog betona jer ne može preuzeti sile i napone koje čelične šipke mogu, već da poboljša određena svojstva betona, a bez otežavanja mase samog materijala kao što je to slučaj kod primjene čelične armature. [2]



**Slika 1.** 3D raspored vlakana u betonu [5]

Intenzitet poboljšanja svojstava betona mikroarmiranjem varira u ovisnosti od količine vlakana, karakteristika vlakana, kao i od kvaliteta samog betona. U ovisnosti od potrebnih performansi materijala i zahtjeva koje upotreba nalaže, betonu se dodaju različita vlakna koja nose svoje karakteristike. Tako se mikroarmirani beton koristi da bi se smanjilo skupljanje i vodopropustljivost betona, da bi se povećala otpornost betona na pucanje, udare i habanje. [2]

Kod izbora tipa vlakana mikroarmiranog betona treba voditi računa da modul elastičnosti vlakana bude veći od modula elastičnosti čistog betona. Kako bi spoj mikroarmature i betona dao odgovor na sve tehničke izazove, čvrstoće pri zatezanju i izduženja pri kidanju upotrebljenih vlakana moraju biti znatno veće nego kod betona. Na kvalitetu vlakana utječe i njihov oblik, struktura, dužina i kemijska otpornost, a moraju imati i malo tečenje, jer u protivnom dolazi do relaksacije napona u njima. Osim preuzimanja vlačnih naprezanja, vlakna sprječavaju i širenje pukotina do kojih može doći pri opterećenju materijala. Pravilnim odabirom mikroarmature dobija se beton veće žilavosti od betona bez dodatka vlakana. [1]

## **2.1. Sastav MAB i utjecaj na svojstva betona**

Sastav mikroarmiranog betona razlikuje od običnog betona osim po dodanim vlaknima i po povećanoj količini cementa, manjoj količini krupnog agregata i manjem najvećem zrnju agregata. Vlakna mikroarmiranog betona mogu biti od čelika, stakla, polimera i od prirodnih materijala. Nekada su vlakna u betonu bila od prirodnih materijala, tipa konjska dlaka i slama, da bi se kasnije prešlo i na druge materijale kao što je azbest. Kada je ustanovljena štetnost azbesta prešlo se na čelična, staklena i sintetička vlakna. Danas su najviše u upotrebi čelična i sintetička vlakna koja su napravljena od polipropilena. [2]

Tako čelična vlakna daju veću čvrstoću betonu, smanjuju potrebnu količinu čelične, klasične armature a povećavaju duktilnost betona. Beton je složeni materijal koji se sastoji iz agregata, cementa i vode, i jedan od problema koji ga prati tijekom životnog vijeka je mogućnost nastanka pukotina. Sintetička vlakna sprječavaju skupljanje betona i nastanak pukotina, te poboljšavaju koheziju betonske smjese, poboljšavaju otpornost na cikluse smrzavanja-odmrzavanja. [2]



**Slika 2.** Čelična vlakna u betonu [6]



**Slika 3.** Polipropilenska vlakna [7]



**Slika 4.** Sintetička vlakna [2]

Mikroarmirani beton upotrebljava se za izradu zastora na cestama, aerodromima, mostovima, za teško opterećene podove, oblaganje tunela, za cjevovode, silose, za vojne objekte itd. Prema podacima mikroarmirani se beton najviše upotrebljava u Europi za industrijske podove (oko 50%), u tunelogradnji (oko 45%) i u industriji predgotovljenih elemenata (<5%). Ostala područja primjene prema količini korištenih vlakana su zanemariva. [8,9]

### 3. MIKROARMIRANJE PRIRODNIM VLAKNIMA

Trošenje neobnovljivih izvora sirovina, te ispuštanje gotovo 30 % od ukupne emisije ugljičnog dioksida, dovelo je do toga da se u novije vrijeme, pogotovo u području materijala, posvećuje velika pozornost upotrebi celuloznih vlakana u kompozitnim materijalima, te za održivim razvojem.

Pokušava se pronaći što bolja, ekološki prihvatljiva, jeftinija, obnovljiva i po mogućnosti lako dostupna zamjena klasičnim sintetičnim vlaknima. [10]

Tablica 1. prikazuje popis važnijih biljnih kultura koje su pogodne za dobivanje prirodnih vlakana i grubu procjenu njihovih količina.

Kvaliteta prirodnih vlakana najviše ovisi o njihovom porijeklu, načinu dobivanja, sastavu i fizikalnim svojstvima. [11]

Proizvodnja sintetičnih vlakana bazira se na skupim strojevima i velikim ulaganjima, dok se proizvodnja prirodnih vlakana može se provesti ljudskim radom i tradicionalnim znanjima.

**Tablica 1.** Popis glavnih mogućih svjetskih izvora prirodnih vlakana [11]

IZVOR PRIRODNIH VLAKANA	SVIJET (tona osušene tvari)
DRVO	175000000
SLAMA (pšenica, riža, ječam, zob, raž, lan, trava)	114500000
STABILJKA (kukuruz, sorgum, pamuk)	97000000
ŠEĆERNA TRSKA	7500000
TRSKA	3000000
BAMBUS	3000000
SORTIRANI PAMUK	1500000
SRČIKA (juta, kenaf, konoplja)	800000
PAPIRUS	500000
LIKO (juta, kenaf, konoplja)	290000
PAMUK PROČIŠĆEN	100000
ESPARTO TRAVA	50000
LIST(američka agava, manila)	48000
SABAI TRAVA	20000
<b>UKUPNO</b>	<b>403308000</b>

Kompozit je kombinacija najmanje dva različita materijala radi dobivanja novog, sa značajno poboljšanim fizikalnim ili kemijskim svojstvima pojedinačnih komponenata ili sa svojstvima koja te komponente same nemaju.

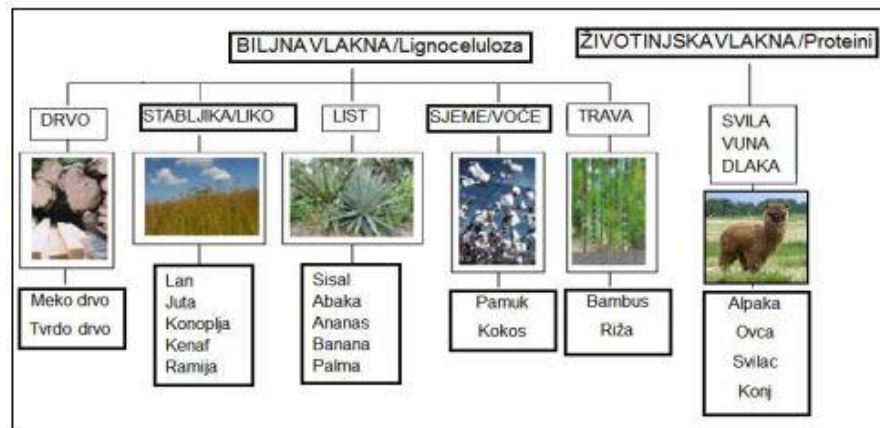
Kompozite s prirodnim vlaknima nazivamo još i biokompozitima.

Biokompozite možemo definirati kao kompozitne materijale načinjene od [12] :

- prirodnih vlakana (biljnog ili životinjskog podrijetla) [Slika 5.] i biološki nerazgradivih polimera nastalih derivacijama nafte (duromera - npr. epoksidna smola, fenolna smola),
- sintetskih (umjetnih) vlakana i biopolimera (nastalih preradom biljaka)
- od prirodnih vlakana i biopolimera koje su ujedno najekološkiji kompoziti i često se nazivaju zeleni kompoziti.

Prirodna vlakna mogu biti:

- Biljnog podrijetla:
  - vlakna (drva, trave, slame itd.)
  - lišće
  - sjeme
  - voće
  
- Životinjskog podrijetla:
  - vuna
  - dlaka
  - svila



**Slika 5.** Prirodna vlakna biljnog i životinjskog podrijetla [12]

Biokompoziti imaju povećanu žilavost, savojnu i vlačnu čvrstoću, čvrstoću na umor, dinamičku čvrstoću i otpornost na udarce. Dodavanje vlakana u matricu krčkog materijala poput betona odgađa širenje mikropukotina prenošenjem naprezanja s mjesta nastale pukotine na susjedne presjeke. [4]

Dok se drveno brašno i vlakna dobivena iz drva upotrebljavaju kao jeftina zamjena za mineralna punila i ojačala, ili za poboljšanje svojstava oporabljenih plastomera, vlakna dobivena iz biljaka kao što su lan, konoplja, juta, sisala, banane, palme, pamuka i ostalih vrsta vlakana od celuloze, trenutno su konkurencija čeličnim i sintetičkim vlaknima u kompozitima zbog svoje ekološke prihvatljivosti i povoljne cijene.

Uporabom celuloznih vlakana moguće je smanjiti plastično skupljanje, povećati toplinsku i zvučnu izolaciju, te prigušiti vibracije u cementnim kompozitima.

Također, prirodna vlakna nisu abrazivna tj. ne troše se, imaju malu gustoću i potreban je mali utrošak energije za njihovu preradbu. [11]



**Slika 6.** Vlakna od jute [13]



**Slika 7.** Sisal vlakna [14]

Biokompoziti imaju i neke nedostatke [11] :

- teško raspršljivi u matrici
- prirodna vlakna su higroskopna-upijaju vlagu, što ima za posljedicu stvaranje pora, slabljenje veza a time i lošija mehaničkih svojstva kompozita
- osjetljiva su na truljenje/degradacije iz okruženja (mikroorganizmi, gljivice, itd.)
- dimenzije vlakana i mehanička svojstva variraju od biljke do biljke

Dosadašnje spoznaje u vezi s trajnošću vlakana pokazuju potrebu za temeljitim ispitivanjima prije nego se krene u ozbiljniju proizvodnju cementnih kompozita ojačanih prirodnim vlaknima. Prirodna vlakna imaju visoku vlačnu čvrstoću a nizak modul elastičnosti.

U tablici 2. prikazana su svojstva prirodnih biljnih vlakana kao što su gustoća, duljina, promjer i vlačna čvrstoća.

Tablica 3. prikazuje usporedbu svojstava prirodnih vlakana u odnosu na staklena vlakna.

**Tablica 2.** Svojstva prirodnih biljnih vlakana [15]

MATERIJAL VLAKNA	GUSTOĆA, g/cm <sup>3</sup>		DULJINA, L (mm)		PROMJER, D (mm)		L/D	VLAČNA ČVRSTOĆA (N/mm <sup>2</sup> )
	Vlakno	Snop	Raspon	Sr. vrijed.	Raspon	Sr.vrijed.		
LAN	1,51	1,2	10-65	32	10-25	18	1,778	357
KENAF (list)	-	1,2	1,4-5	2,6	15-23	21	124	406
KENAF (srčika)	0,31	-	0,4-1,1	0,6	18-37	30	20	-
KONOPLJA	1,48	1,2	7-5,5	25	13-30	18	1,087	826
BOR	0,51	-	2,7-4,6	3,7	32-43	38	97	81,2
JELA	0,48	-	2,7-4,6	3,7	32-43	38	97	109,2
JASIKA	0,39	-	0,7-1,6	1,2	20-30	25	48	51,8



**Tablica 3.** Usporedba svojstava prirodnih i staklenih vlakana [15]

SVOJSTVO	PRIRODNA VLAKNA	STAKLENA VLAKNA
GUSTOĆA	niska	dvostruka od prirodnih
CIJENA	niska	niska, ali viša od prirodnih
OBNOVLJIVOST	da	ne
REKLIČNOST	da	ne
UTROŠAK ENERGIJE	niski	visoki
RASPROSTRANJENOST	široka	široka
CO <sub>2</sub> NEUTRALNA	da	ne
ABRAZIVNOST	ne	ne
ODLAGANJE	biorazgradljivo	nije biorazgradljivo

### 3.1. Kemijski sastav celuloznih vlakana

Prirodna vlakna nastaju prirodnim procesom gdje biljka uzima ugljični dioksid a ispušta kisik. Prema sastavu, celulozna vlakna sastoje se uglavnom od celuloze, hemiceluloze, lignina, voska i pektina ( Slika 8.). Svojstva vlakana uvelike ovise o kemijskom sastavu, posebno udjela celuloze, hemiceluloze i lignina.

Celuloza je najkrući i najjači dio vlakna koji ga čini čvršćim, žilavijim i stabilnijim. Celulozna vlakna su polarna i hidrofilna, upijaju veliku količinu vode te imaju i malu otpornost na vlagu. To je često uzrok loše kontaknte zone između vlakna i matrice, a posljedično i loših mehaničkih svojstava kompozita, posebice ako je matrica hidrofobna kao kod polimera.

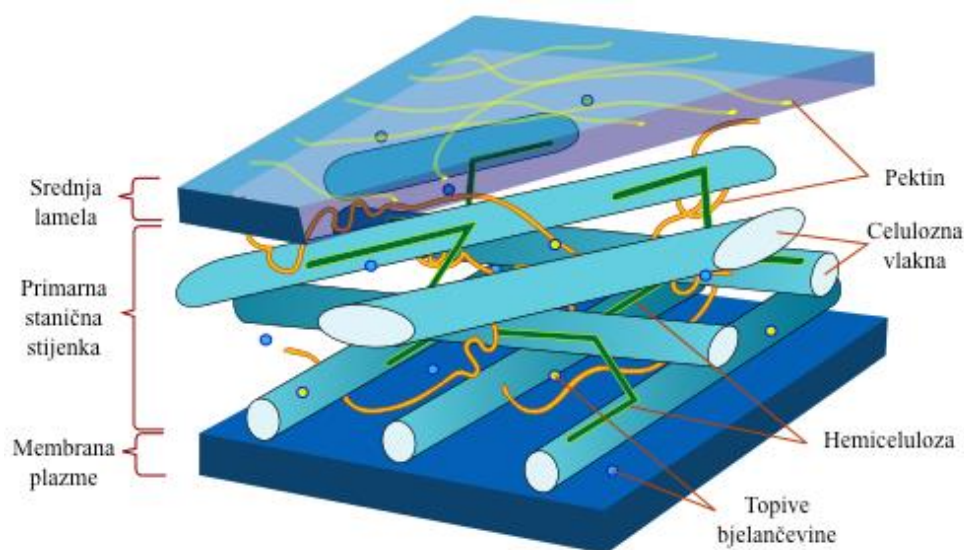
Hemiceluloze su polisaharidi koji su međusobno povezani u relativno kratkim, razgranatim lancima. Blisko su povezani s celuloznim mikro-vlasknima, koji celulozu ugrađuju u matricu. Hemiceluloza je topiva u vodi i higroskopna.

Vezana je za celulozu jakim vodikovim vezama, a može se razgraditi u uvjetima visoke temperature. Hemiceluloza čini vezu između celuloze i lignina. [16]



Lignin je amorfan, visoko složen i uglavnom aromatičan, polimer fenil-propanskih jedinica. Međutim, ima najmanju apsorpciju vode od svih sastojaka celuloznih vlakana. To je složen aromatski ugljikovodični polimer. On biljkama daje krutost, a bez njega, biljke ne bi mogle dostići velike visine. Lignin je trodimenzionalni polimer koji služi kao kemijsko ljepilo unutar i između vlakana. Veća količina lignina negativno utječe na vlačnu čvrstoću i modul elastičnosti. [17]

Pektin je zaslužan za fleksibilnost biljki. I lignin i pektin pružaju funkciju veznih tvari. Većina biljnih voskova su smjese supstituiranih dugih lanaca alifatskih ugljikovodika. Sadrže, između ostalog, alkalne, masne kiseline, primarne i sekundarne alkohole. Vosak u celuloznim vlaknima ima utjecaj na vlažnost i adheziju tih vlakana. [17]



**Slika 8.** Raspored celuloze i drugih polisaharida u staničnoj stijenci biljaka [18]

Industrija je sve više zainteresirana za primjenu materijala male težine, dovoljne trajnosti, koji su ekološki prihvatljivi i imaju zadovoljavajuća mehanička svojstva. Stoga su celulozna vlakna zbog svoje biorazgradljivosti, relativno jednostavnog procesa prerade, male gustoće, sve zanimljivija. Očekuje se da će u idućem razdoblju porasti interes za ojačanje materijala prirodnim vlaknima. [19]

## 4. TRETIRANJE PRIRODNIH VLAKANA

Biljna vlakna su kompoziti sa staničnom strukturom, i zbog svoje kemijske strukture su polarna i hidrofilna u prirodi. Jedan od nedostataka korištenja prirodnih vlakana je to što se razlikuju po svojstvima više od čelika ili staklenih vlakana, što bi moglo dovesti do nepredvidljivih svojstva betona.

Različita vlakna imaju različite sastojke, dakle, očekivano je da se njihovo međusobno ponašanje unutar matrice cementa razlikuje. Obradom vlakana poboljšavaju se svojstva i betona, te prionljivost između matrice i vlakana. [20]

Obrade vlakana mogu biti biološke, kemijske, fizičke ili mehaničke, a izvode se kako bi se postigao jedan ili više od sljedećih ciljeva:

- uklanjanje nepoželjnih vlakna,
- hrapavljenje na površini vlakana,
- odvajanje pojedinačnih vlakana iz snopova,
- kemijsko modificiranje površine vlakana i
- smanjenje hidrofilitnosti vlakana konoplje.

Fizička obrada vlakana podrazumijeva odvajanje vlakana iz konoplje od drvenastog dijela stabljike vodenom parom ili kipućom vodom. Mehaničkom obradom vlakana lomi se stabljika te se vlakna odvajaju specijalnim strojevima. Odvajanje vlakana kemijskom obradom omogućuju lužine i kiseline, a biološkom obradom razgradnja pektina. [20]

### 4.1. Biološka obrada vlakana

#### 4.1.1. Maceracija u morskoj vodi

Močenje ili maceracija je kontrolirana razgradnja biljne stabljike kako bi se oslobodila lako vlakna iz snopova vlakana i odvojila od drvene jezgre i epidermisa. Pektinske tvari povezuju vlakno uz drvenasti dio stabljike, pomoću mikroorganizama (bakterija i gljivica). Tijekom močenja, bakterije i gljivice oslobađaju enzime kako bi razgradile pektin. Pektinske tvari bubre, nastaju pukotine, pa voda prodire u njih i vlakna se odvajaju. [20]

Svježe ubrani izdanci vezuju se u snopove i potapaju u morskoj vodi u periodu od 28 ili 40 dana. Snopovi se vade iz mora, te se u ovisnosti o trajanju močenja ili ispiru vodom, pa se vlakna ručno odvajaju od drvenaste stabljike, ili se odvajaju trljanjem o neku hrapavu površinu, nakon čega su ostavljena da se prirodno suše.

Trajanje močenja je važan parametar, ako je nedovoljno, močenje može dovesti do nepotpunog razdvajanja vlakana, ako je dugo, močenje može oslabiti vlakna i dovesti do većih gubitaka mase vlakana tijekom obrade. [20]

#### **4.1.2. Metoda mikrovalne maceracije**

Mikrovalovima olakšana ekstrakcija (Microwave-assisted extraction, MAE) je metoda koja koristi energiju mikrovalova za zagrijavanje otapala s čvrstom tvari s ciljem izdvajanja komponenti uzorka u otapalo.

U postupku mikrovalnog grijanja kompoziti se zagrijavaju energijom mikrovalova koja prodiru i istodobno zagrijavaju unutrašnjost materijala. Ovim postupkom mikrovalne pećnice brzo opskrbljuju energiju čak i do debelih materijala. [21]

Proces obrade mikrovalnom pećnicom je kraće nego kemijska obrada, te se provodi bez kombinacije kemijske otopine. Nečistoće lignina, voska i površine mogu se ukloniti nakon mikrovalne obrade. Mehanička i toplinska svojstva kompozita na bazi vlakana povećavaju se nakon mikrovalne obrade, pored toga indeks kristalnosti vlakana obično pada nakon obrade. [22]

#### **4.2. Kemijska obrada vlakana**

Kemijski postupci smanjuju apsorpciju vode u vlaknima, poboljšavaju prijanjanje s matricom i utječu na mehanička svojstva vlakana. U kemijskim tretmanima svojstva obrađenih vlakana ovise o sredstvu koje se koristi za tretiranje vlakana, a sredstva koja se najčešće koriste su natrijev hidroksid, natrijev sulfat, kao i za oblaganje vlakana u silanu.

Biljna vlakna sadrže necelulozne komponente, kao što su hemiceluloze, lignin i pektin, od kojih su hemiceluloze i pektini hidrofilni. Ove komponente sadrže mnogo dostupnih hidroksila (OH) i skupina karboksilne kiseline, koje su aktivna mjesta za apsorpciju vode. Celulozna komponenta također sadrži mnoge OH skupine, ali malo vode može biti smješteno unutar vrlo poredanih i visoko kristalnih mikrovlakana. Kao rezultat, samo nevezane OH skupine na površini mikrovlakana su dostupne za apsorpciju vode. Polimeri, plastomeri i duromeri su uglavnom nepolarni i hidrofilni u prirodi.

Nespojivost polarnih celuloznih vlakana i nepolarnih polimernih matrica dovodi do lošeg prijanjanja, koje onda rezultira kompozitnim materijalom s lošim mehaničkim svojstvima.

[20]

Da bi se u potpunosti iskoristila mehanička svojstva ojačanih vlakana i time poboljšala kompozitna svojstva, potrebno je unaprijediti adheziju između vlakana i matrice. To se može postići ili modifikacijom površine vlakana kako bi bila u skladu sa matricom ili modifikacijom matrice. Da bi se poboljšalo površinsko ljepljenje, modifikacije mogu biti izrađene na vlaknima, matrici ili oboje. Modifikacije matrice obično uključuju dodavanje kemijskih sredstava za povezivanje. Kemikalije mogu aktivirati hidroksilne skupine ili uvesti nove dijelove koji mogu učinkovito biti povezani s matricom. Modificiranje vlakana se postiže oblaganjem prirodnih vlakana kako bi se izbjeglo upijanje vode i oslobađanje lužine. [20]

#### **4.2.1. Tretiranje silanom**

Silan je kemijski spoj s kemijskom formulom  $\text{SiH}_4$ . Silani se upotrebljavaju kao sredstva za spajanje kako bi stakleni ostaci pristajali na polimernoj matrici stabilizirajući kompozitni materijal. Sredstva za spajanje silana mogu smanjiti broj hidroksilnih skupina celuloze u unutrašnjosti matrice. Najnovija istraživanja pokazala su da je oblaganje vlakana silanom dobar način za poboljšanje trajnosti betona ojačanog prirodnim vlaknima. [23]

Kemijski sastav silan veziva omogućuje formiranje kemijskih veza između površine celuloznih vlakana i smole stvaranjem siloksanskog mosta. U prisutnosti vlage, skupina hidroliziranih alkoksida dovodi do stvaranja silanola. Zatim, jedan kraj silanola reagira sa hidroksilnom skupinom vlakana, a drugi kraj reagira s funkcionalnom grupom matrice.

Takva djelatnost pruža molekularni kontinuitetu cijelom kompozitu i poboljšava prijanjanje matrice vlakana. Osim toga, obrada silanom smanjuje gustoću, ali povećava masu i vlačnu čvrstoću pojedinog vlakna. [24]

#### 4.2.2. Tretiranje sa NaOH I Na<sub>2</sub>SO<sub>3</sub>

Važna izmjena alkalne obrade je prekid vezanja vodika u mrežnoj strukturi, čime se povećava hrapavost površine, ovim tretmanom uklanja se određena količina lignina, voska i ulja koja prekriva vanjsku površinu staničnih stijenki, depolimerizira celuloza i izlaže kristale kratke duljine. Dodavanjem vodene otopine natrijevog hidroksida u prirodna vlakna, potiče se ionizacija hidroksilne skupine u alkosid. Nadalje, koristi se natrijev sulfit (Na<sub>2</sub>SO<sub>3</sub>) s alkalijom tijekom proizvodnje pulpe za omekšavanje lignina u celulozi. [25]

Prema tome, alkalna obrada izravno utječe na celulozni sjaj, stupanj polimerizacije i ekstrakciju ligninskih i hemiceluloznih spojeva.

Alkalna obrada ima dva učinka na vlak:

- povećava hrapavost površine što rezultira boljim mehaničkim međusobnim spajanjem;
- povećava količinu celuloze izložene na površini vlakna, povećavajući na taj način broj mogućih reakcijskih mjesta

## 5. PRIMJERI UPOTREBE TRETIRANIH BILJNIH VLAKANA OTOPINOM NaOH

Obrada vlakana natrijevim hidroksidom (NaOH) naširoko se koristi za modificiranje celuloznog molekularnog sastava vlakana. Kemijska obrada, posebno izvedena na povišenim temperaturama, može dovesti do selektivne razgradnje lignina, pektina i hemiceluloze u stijenkama vlakana, koji tada daju površini vlakana grubu teksturu, hrapava i čista površina vlakana olakšava mehaničko spajanje i poboljšava sposobnost vlaženja pomoću matrice. [20]

Nekoliko autora koristilo je tehniku na juti i ispitivane su promjene u svojstvima vlakana.

Autori [27] ispitivali su učinke 5% -tne obrade NaOH-om u kratkom trajanju do 8 h na juti kao ojačanom vlaknastom materijalu na vinilestersku smolu. Utvrđena su mehanička svojstva kompozita s različitim težinskim postocima vlakana. Promjena svojstava analizirana je uz pomoć mikrostrukturne analize lomljenih površina.

### **Postupak obrade s NaOH**

Vlakna od jute izrezana su na duljinu od 50 cm i natopljena su u 5% -tnoj otopini NaOH na 30 ° C održavajući omjer tekućine od 15: 1. Vlakna su držana potopljena u alkalnu otopinu 2, 4, 6 i 8 h , zatim su nekoliko puta isprana svježom vodom da bi se uklonio svaki NaOH koji se zalijepio na površini vlakana, neutralizirana razrijeđenom octenom kiselinom i na kraju ponovo isprana destiliranom vodom. Konačni pH održavan je 7. Vlakna su tada sušena na sobnoj temperaturi tokom 48 sati, nakon čega su sušena u peći na 100 ° C 6 sati. [27]

### **Ispitivanje raspršivosti**

Provedeno je jednostavno ispitivanje kako bi se uočila raspršivost neobrađenih i alkalno obrađenih vlakana u vinilesterskoj smoli. Otkriveno je da se tretirana vlakna jute ravnomjernije raspršuju u smoli nego netretirana juta. [27]

### **Metode ispitivanja**

Vlakna nakon različitih vremena namakanja u 5% alkalnoj otopini testirana su na njihovu promjenu težine. Gubitak težine izračunat je vaganjem fiksne količine suhog i očišćenog vlakana (W1). Količina vlakana ponovno se izvaže nakon natapanja u alkalnoj otopini (W2). Postotak gubitka težine izračunato je kao

$$\text{Gubitak težine} = (W1 - W2) / W1 \times 100.$$

Uočeno je da su vlakna izgubila na težini i bila su finija. Finoća vlakana određena je linearnom gustoćom gravimetrijskom metodom iz mase 100 pojedinačnih vlakana duljine 60 mm.

Vlačna ispitivanja pojedinačnih vlakana od jute provedena su korištenjem Instron 1195. Upotrijebljena je duljina profila od 20 mm, brzinom poprečne glave je 10 mm / min u skladu s ASTM D 3822-91. Pedeset pojedinačnih vlakana testirano je nakon svakog tretmana i uzeta je srednja vrijednost.

Ispitivanje savijanja u tri točke izvedena su u stroju Instron 4303 u skladu s ASTM D790M-81 za mjerenje čvrstoće na savijanje kompozita. Ispitni uzorci bili su cilindrične šipke duge 120 mm promjera 6 mm. Raspon od 100 mm korišten je za održavanje brzine poprečne glave od 2 mm / min. Čvrstoća savijanja i modul su izmjereni pomoću sljedećih jednadžbi

$$\text{Čvrstoća savijanja} = 8 \cdot F \cdot L / p \cdot d^3,$$

$$\text{Modul savijanja} = 4 \cdot m \cdot L^3 / 3 \cdot p \cdot d^4, \text{ gdje je:}$$

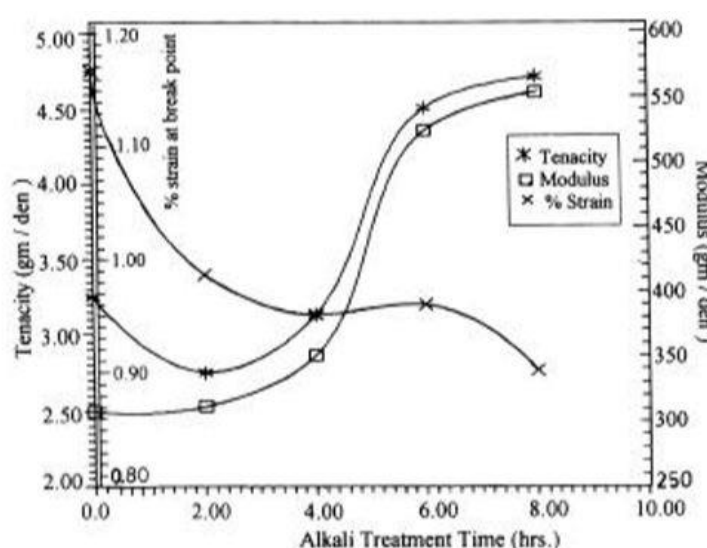
F - opterećenje,

L - raspon,

d - promjer uzorka i

m - nagib početnog dijela ravne linije krivulje pomaka tereta.

Energija loma je izračunata od područja ispod krivulje opterećenja / pomaka do točke prekida, a žilavost je dobivena dijeljenjem energije za lom s volumenom uzorka ( Slika 10.). Fleksibilna interlaminarna smična čvrstoća (LSS) kompozita koja je najveće smično naprezanje koje materijal može izdržati prije nego što pukne, izračunato je u jedinicama naprezanja na temelju područja rezanog ruba. [27]



**Slika 10.** Energija loma i žilavost vlakana jute nakon različite vremenske obrade alkalijama [27]

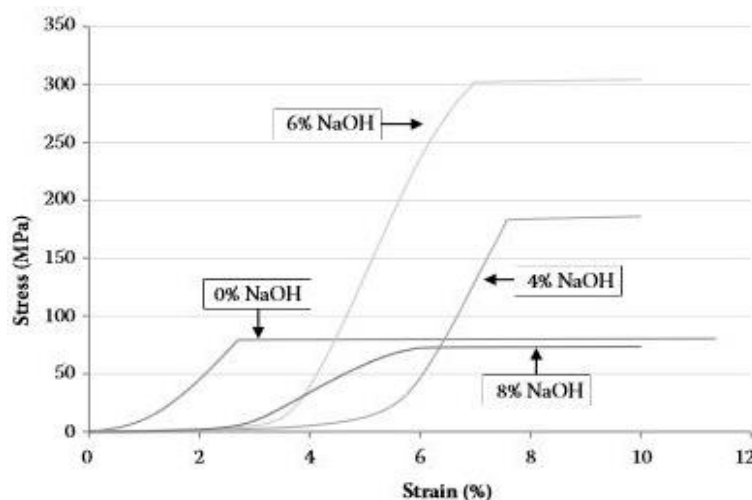
## Rezultati i rasprava

Gubitak težine zabilježen je nakon alkalne obrade vlakana, zbog velikog otapanja sadržaja hemiceluloze. Gubitak se dogodio prvenstveno u roku od 2 sata od obrade. To je rezultiralo padom linearne gustoće vlakana kada su tretirana između 2 i 6 h zbog stvaranja praznina u strukturi vlakana, lanci su se dobro odvojili i raspršili. Otkriveno je da se kristalnost vlakana povećala tek nakon 6 h tretmana. Modul vlakana od jute povećao se za 12% u 4 sata obrade, nakon čega je porast bio za 68% i 79% za vrijeme obrade 6 i 8 h. Čvrstoća na mjestu prekida povećala se za gotovo 46% nakon 6 i 8 h tretmana. Bilo je neophodno da vlakna postanu kruta i krhka zbog velike čvrstoće i male rastezljivosti. [27]

### 5.1. Vlačna čvrstoća i modul elastičnosti

Neobrađena i obrađena bambusova vlakna duljine 10 mm podvrgnuta su vlačnom opterećenju brzinom od 1 N / min, dok se nije postigao potpuni lom prema ASTM D3379 [28]. SFTT izveden na vlaknima daje tipične krivulje naprežanja i opterećenja kao što je prikazano na slici 11. U početku krivulje pokazuju pojačano naprežanje pri vrlo malom opterećenju, što se može zanemariti, jer to može biti uzrokovano pričvršćivanjem stezaljki na cijelu duljinu vlakana. Kad se to utvrdi, može se primijetiti da se sva vlakna ponašaju krhko, pri naglom zaustavljanju linearnog naprežanja raste pri maksimalnom opterećenju.

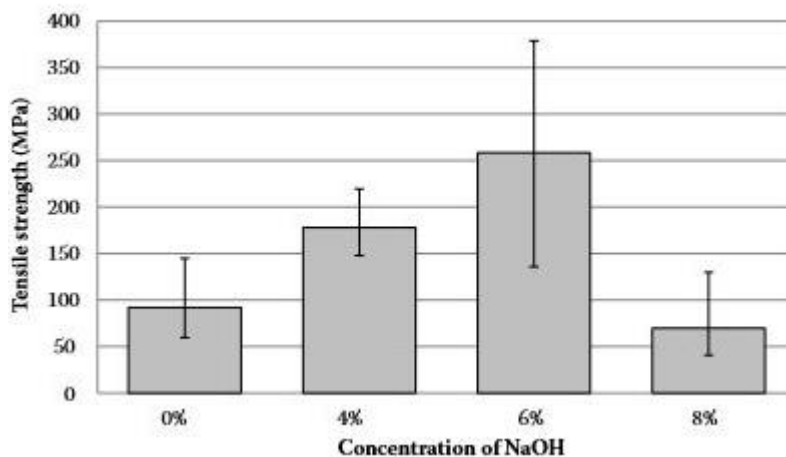
Općenito, vlakna tretirana sa 6% NaOH imala su najveće maksimalno naprežanje, pa slijede vlakna obrađena sa 4,0 i 8% NaOH. Za svaki uzorak vlakana testirano je najmanje deset vlakana. [29]



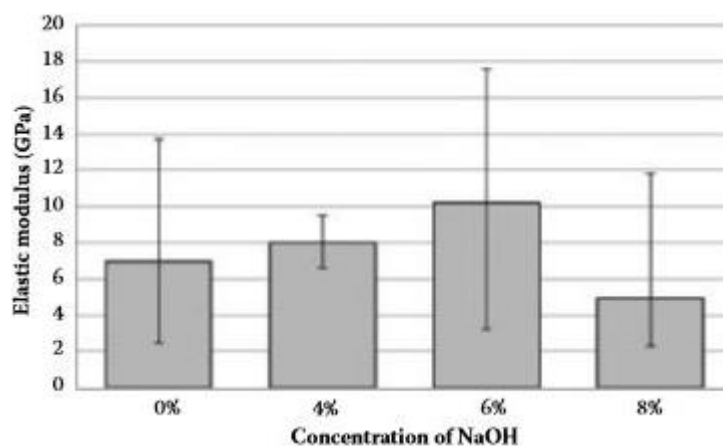
Slika 11. Dijagram naprežanje-opterećenje pri različitim koncentracijama NaOH [29]



Na slici 12. prikazana je prosječna vlačna čvrstoća, dok je na slici 13. prikazan prosječni modul elastičnosti neobrađenih i obrađenih bambusovih vlakana. Vlačna čvrstoća i modul elastičnosti bambusovih vlakana su veći za vlakna tretirana sa 6% NaOH i opadaju pri 8% NaOH. Povećanje vlačne čvrstoće i modula elastičnosti najveće je pri 6% tretmanu NaOH s poboljšanjem od 181 odnosno 47%. [29]



**Slika 12.** Vlačna čvrstoća pri različitim koncentracijama NaOH [29]



**Slika 13.** Modul elastičnosti pri različitim koncentracijama NaOH [29]

Wong i suradnici [31] izvijestili su o poboljšanju čvrstoće bambusovih vlakana tretiranih NaOH-om. Predviđalo se da veća koncentracija NaOH uzrokuje smanjenje kuta mikrofibrila, pri čemu prirodna vlakna sa malim kutom mikrofibrila pokazuju visoku čvrstoću. Međutim, pri većoj koncentraciji NaOH, koja je u ovom slučaju 8%, vlakna su oslabljena većim uklanjanjem matrice i oštećenjem u celuloznim vlaknima.

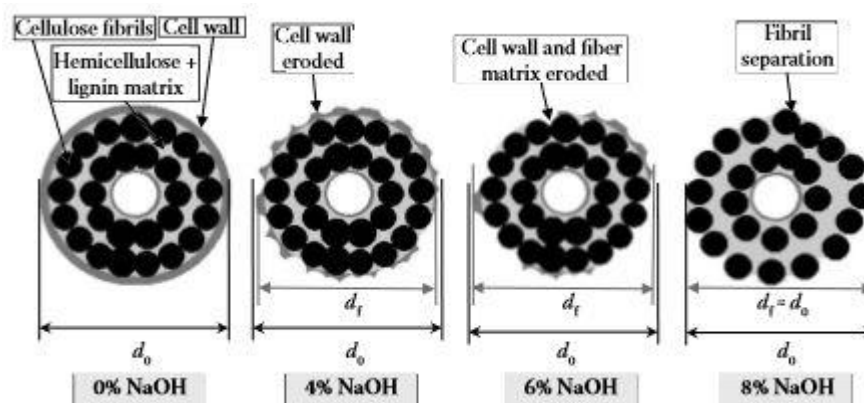
To se opazilo kroz SEM, gdje se na pojedinim može opaziti oštećenje vlakna tretiranog sa 8% NaOH na vlaknastoj površini, što je dodatno smanjilo vlačnu čvrstoću, do 24% u odnosu na neobrađena vlakna. Također je uočeno da se krutost smanjuje za 29%. Neki su istraživači primijetili i porast krutosti obrađenih vlakana, kako je istaknuto vrijednostima modula elastičnosti.

Autori su to pripisali denzifikaciji zidova staničnih vlakana zbog velikog uklanjanja hemiceluloze alkalizacijom, kao i stvaranju novih vodikovih veza između lanca celuloznih vlakana.

## 5.2. Promjena promjera i gustoće vlakana

Obrada sa NaOH također utječe na fizička svojstva vlakana, u pogledu promjene u promjeru i gustoći vlakana. Vlakna su tretirana različitim koncentracijama NaOH kroz uranjanje tijekom 24 sata.

Promjer bambusovog vlakna izmjeren je SEM-om, te je iznosio približno 11,3  $\mu\text{m}$ . U studiji s nanološkim vrijednostima koju su proveli Zou i sur. autori su primijetili da je promjer građevnih blokova bambusovih vlakana oko 5 do 20  $\mu\text{m}$ . To je u skladu s mjerenjem provedenim u ovoj studiji. Prosječni promjer opada kako vlakna prolaze obradu do 6% NaOH. Na slici 14. je pokazano uklanjanje stanične stijenke vlakana, kao i ostale površinske nečistoće, čime se smanjuje promjer obrađenih vlakana. Međutim, opaženo je da se kod 8% NaOH prosječni promjer povećava, što se može pripisati djelomičnom odvajanju fibrila uklanjanjem hemiceluloze i lignina koji djeluje kao matrica za vezanje tih vlakna zajedno. [29]



Slika 14. Shematski prikaz promjene promjera kroz različite obrade sa NaOH [29]

Gustoća vlakana mjerena je pomoću helijum-piknometra. Kako se koncentracija obrade povećava, gustoća vlakana se lagano smanjuje. Bez obrade, sirova bambusova vlakna imaju gustoću  $1,47 \text{ g / cm}^3$ , koja se smanjuje na  $1,39 \text{ g / cm}^3$  pri 8% obradi NaOH. To se može pripisati ekstrakciji topljivih sastojaka vlakana, poput hemiceluloza, lignina, i drugih nečistoća, kao i koroziji stanične stijenke. Iz morfoloških opažanja, količina praznina na tretiranim vlaknima veća je nego na netretiranim vlaknima. Prema tome, to može doprinijeti manjoj gustoći obrađenih vlakana. [29] Helijum piknometar mjeri apsolutnu gustoću vlakana, koja ne uzima u obzir pore; dakle, mjeri samo čvrstu tvar vlakana. Različita prirodna vlakna različito reagiraju na alkalizaciju s obzirom na gustoću, pri čemu su neka vlakna doživjela smanjenje njihove gustoće, neki su doživjeli porast, a drugi nisu pokazali promjene. [30]

### **5.3. Promjena na površini vlakana**

Wong i suradnici su izvijestili da različite koncentracije NaOH omogućuju različitu razinu obrade na vlaknima. Hemikeluloza, lignin, voskovi, ulje i površinske nečistoće bambusovih vlakana topljivi su u vodenoj otopini NaOH, uzrokujući otvaranje stanične stijenke kako su se te tvari rastvarale. Kod 4% NaOH tretmana još se mogu promatrati neke stanične stijenke, ali većina je uklonjena s površine vlakana, a više mikrofibrila je izloženo. Površina vlakana je dodatno pročišćena na 6% -tnom NaOH tretmanu, a neke su praznine uočene i iz optičke mikrografije.

Kako se koncentracija NaOH dalje povećavala na 8%, više hemikeluloze i lignina uklonjeno je iz vlakana, otkrivajući više vlakana. Ta su vlakna također podložnija napadu alkalija, što može objasniti grubu površinu vlakana. Jednom kada celulozna komponenta vlakana utječe na lužinu, jačina vlakana može biti ugrožena. Mnoge studije variraju koncentraciju NaOH od 1 do 10 % za alkalizaciju vlakana, jer veće koncentracije pogoršavaju mehanička svojstva vlakana. [31]

### **5.4. Promjena boje vlakana**

Tretirana vlakna su tamnija u usporedbi s netretiranim. Dakle, moguće je vizualno razlikovati sirova vlakna i tretirana vlakna. Kaže se da je ligninska komponenta prirodnog vlakna odgovorna za promjene boje. [32]

Elenga i sur. izmjerili su promjene u boji vlakana *Raffia textilis* pomoću spektrokolorimetra. Utvrđeno je da alkalizacija povećava žutost i crvenilo, a smanjuje i svjetlost vlakana. To se može i vizualno promatrati u proučavanim bambusovim vlaknima. [33]

Khan i Ahmad također su izvijestili o smanjenju svjetlosti vlakana od jute za 10 do 20% zbog alkalizacije, što je rezultat uklanjanja lignina. Međutim, određenim vlaknima se smanjila težina nakon tretmana. [34]

## 6. BRNISTRA (*Spartium junceum* L.)

Brnistra ili žuka je grmolika, vlaknasta biljka iz porodice mahunarki. Poput drugih mahunarki obogaćuje tlo dušikom. Podnosi temperature do  $-20^{\circ}\text{C}$  i zagađenja koja nose gradovi. Raste na plitkom i vapnenačkom (krškom) tlu visine grma od 1 do 1,50 m visine, a samo stari primjerci izrastu u manja stabla 4-5 metara visoka i 15-20 cm debela (Slika 15.). Biljka je toplijih krajeva. Stanište brnistre je sjeverozapadna Afrika, jugozapadna Azija te područje Mediterana na južnom dijelu Europe. Dosta je česta u Dalmaciji, raste na obali i na otocima. [35]



**Slika 15.** Grm brnistre ( izvorna fotografija)

Ima jako dobro razvijeno korijenje, čvrste žile dobro ukopane u tlu, zbog čega se brnistra upotrebljava i kao zaštita od erozije. Grane su joj šuplje, okruglaste, vrlo žilave i čvrste. Kora je žutozelene boje i plitko izbrazdana kod debla. Pupovi su rijetki i spiralni, listovi linearni, duljine 2-4 cm i širine 1-1,5cm. Na naličju su dlakavi i rastu samo na mladim izdancima ( Slika 16.). Biljka ih odbacuje tijekom ljeta, a zelene grane vrše daljnji proces fotosinteze. Brnistra cvate intenzivno žutim cvjetovima u vremenu od svibnja do srpnja, a mahune sa sjemenkama dozrijevaju u razdoblju od kolovoza do listopada. Nakon sazrijevanja sjemena, izboji biljke mogu se, kao i konoplja ili lan, koristiti za proizvodnju tekstilnog vlakna. [36,37]



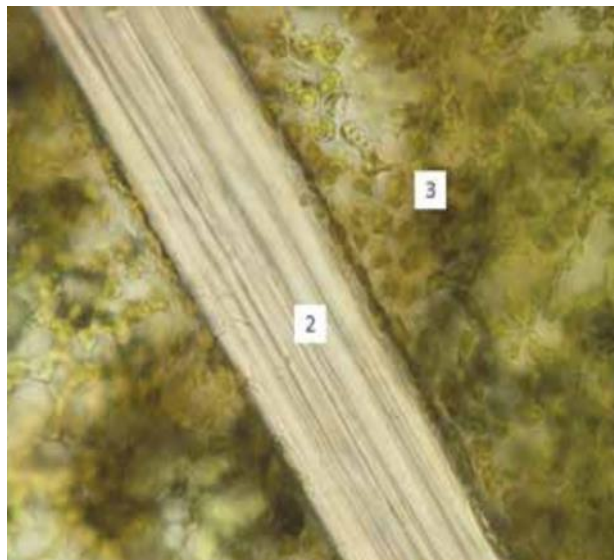
**Slika 16.** Izgled cvijeta, lista i ploda brnistre [38]

## **6.1. Vrijeme rezanja brnistre**

Optimalno vrijeme rezanja izbojaka brnistre (zelenih grančica) je od trenutka kada se sasušene mahune spiralno uviju i izbace sjeme. Količina vlakana u izbojcima brnistre je oko 8 do 12 % u odnosu na masu grančica. Za dobivanje tekstilnih vlakana zeleni izbojci režu se u neposrednoj blizini osnovnih stabljika i vežu u snopiće (ručice) kojima se režu krajevi na jednaku dužinu. Dužina tehničkih vlakana iznosi i do 40 cm. Grane koje se režu moraju biti ravne te ne smiju biti suhe. [40]

## **6.2. Sastav i svojstva brnistre**

Glavni dijelovi ove grmolike biljke iz porodice leguminoza su izdanci unutar kojih možemo pronaći vlakna. Vlakna brnistre manjeg promjera dio su sekundarne kore, dok su vlakna većeg promjera ostaci primarne kore. U presjeku izdanka brnistre vidi se prijelaz s primarne na izgrađenu sekundarnu stabljiku (Slika 17.).



**Slika 17.** Uzdužni presjek stabljike brnistre (2-sklerenhim, 3-parenhim s kloroplastima) [39]

Vlakna brnistre su lagana i gustoća je  $0,95\text{--}1,05\text{ g / cm}^3$ , a njihova vlačna čvrstoća varira između 400 i 980 MPa. Vlakno brnistre je veoma žilavo, otporno na morsku i slatku vodu, dugotrajno i praktički nepoderivo, bijelo, meko, gipko, dobro prima boju te je slabe provodljivosti topline. Kemijski sastav vlakana brnistre je 91,7% celuloze, 3,2% lignina, 4,1% pentozana i nešto pepela. Za dobivanje vlakana u domaćinstvima najbolje je brati dvogodišnje, pa i starije izdanke biljke, jer mladi izdanci brnistre nemaju u sebi vlakna kakva se nalaze u starijim izbojcima. [39]

### 6.3. Provedena istraživanja

Autori [36] su istražili upotrebu vlakana brnistre za ojačanje cementnog morta. Proučavali su se utjecaji metode obrade, duljine i količine vlakana na mehaničke karakteristike cementnog kompozita. Ovisno o duljini vlakana, uzorci su označeni sa B1, B2 i B3 gdje broj označava duljinu vlakna u centimetrima ( 10, 20 i 30 mm). Vlakna su u cementni mort dodana u količini od 0,5 i 1 % volumena. Uzorci sa 0,5 % vlakana označeni su sa -05, a sa 1 % vlakana sa -1. Dvije serije uzoraka s vlaknima duljine 10 mm napravljene su u količini od 0,25 i 0,75 % volumena. Mortu se u svježem stanju ispitala obradivost metodom rasprostiranja.

Određena je srednja vrijednost promjera morta u dva okomita smjera, a dobiveni rezultati prikazani su i ocijenjeni u tablici 4.

**Tablica 4.** Obradivost morta [36]

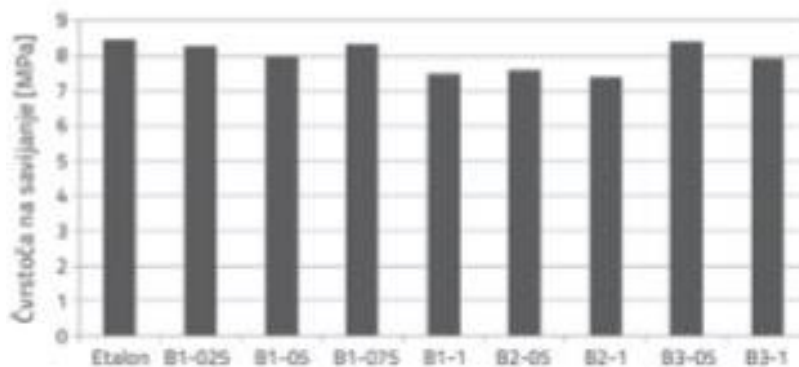
Uzorak	Konzistencija (mm)	Kategorija
Etalon	188	plastična
B1-05	135	kruta
B1-1	140 (rasuto)	kruta
B2-05	138	kruta
B2-1	125	kruta
B3-05	153	plastična
B3-1	130	kruta
B1-025	141	plastična
B1-075	133 (rasuto)	kruta

Na slici 18. vidi se pad obradivosti mortova B1-05 i B1-1 u odnosu na etalon, što je očekivano jer se količina vode u uzorcima držala konstantnom. Rezultati mješavine B1-1 brojčano su bolji u odnosu na B1-05, ali se uočava lošija obradivost, tj. riječ je o suhoj konzistenciji. Prema tablici 4., duljina vlakna ne utječe na obradivost već količina u kojoj se vlakna doziraju. [36]

**Slika 18.** Obradivost morta bez vlakana, 0,5% vlakana, 1% vlakana [36]

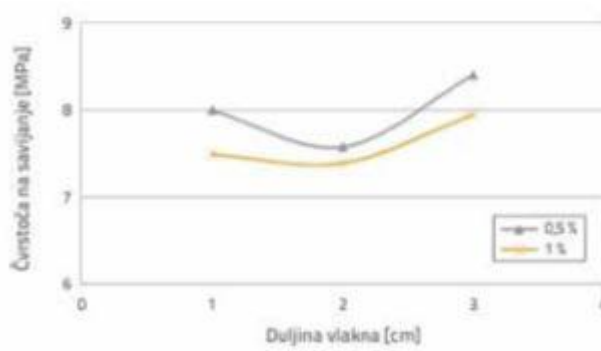
Mort je zatim ugrađen u trodijelni kalup na vibrostolu. Nakon 24 sata čuvanja u vlažnoj komori, uzorci su izvađeni iz kalupa, stavljeni u vodu i tamo njegovani 27 dana do ispitivanja. Rezultati ispitivanja čvrstoće na savijanje prikazani su na slikama 19. i 20. Prema slici 19., uzorci s vlaknima brnistre imaju nešto niže čvrstoće na savijanje u odnosu na etalon. Najniže vrijednosti su ostvarili uzorci B1-1, B2-05 i B2-1, čije su čvrstoće za 10,6 do 12,8 % niže od etalona, a uzorci B3-05, B1-025 i B1-075 su najbliži vrijednosti etalona.





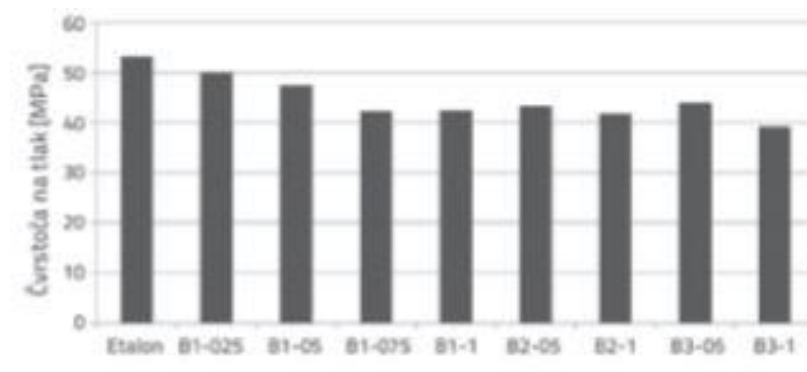
**Slika 19.** Rezultati ispitivanja čvrstoće na savijanje [36]

Na slici 20. prikazan je utjecaj duljine i količine vlakana na rezultate čvrstoće na savijanje. Prema dijagramu, veći udio vlakna ostvaruje niže čvrstoće, a vlakna duga 10 i 30 mm imaju bolje rezultate od vlakana duljine 20 mm.

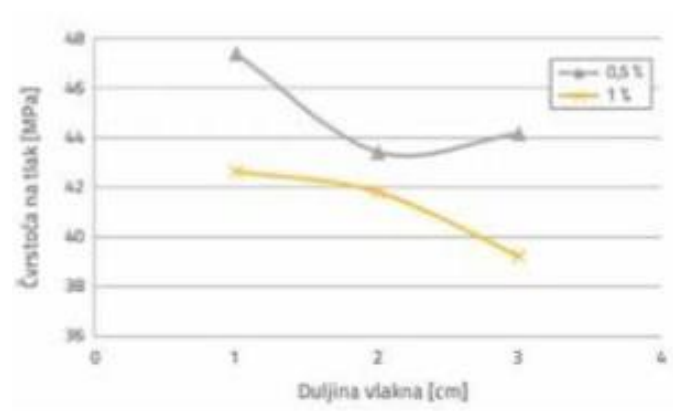


**Slika 20.** Utjecaj količine i duljine vlakana na rezultate čvrstoće na savijanje [36]

Rezultati tlačne čvrstoće, slika 21. i 22., pokazuju da udio vlakana, ali i njihova duljina, utječu na dobivene vrijednosti. Što je udio vlakana veći, to je dobivena čvrstoća manja. Kako se mort s dodatkom vlakana teže zbija i ugrađuje, u takvom betonu je povećana poroznost te je dobiveni rezultat očekivan.

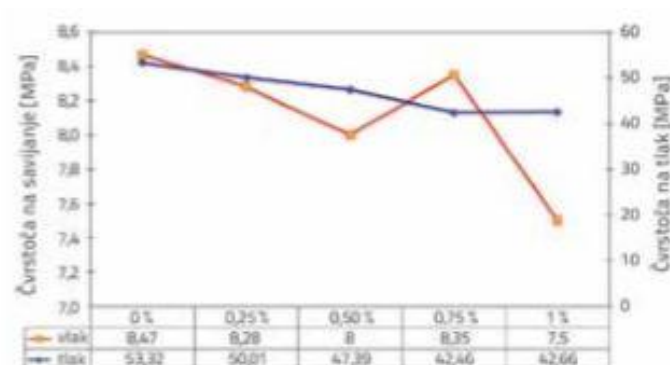


Slika 21. Rezultati ispitivanja čvrstoće na tlak [36]



Slika 22. Utjecaj duljine i količine vlakana na rezultate čvrstoće na tlak [36]

Za uzorke s vlaknima duljine 10 mm na slici 23.prikazana je veza čvrstoće i količine vlakana. Obje čvrstoće kontinuirano opadaju s povećanjem udjela vlakana, samo se kod čvrstoće na savijanje pojavilo odstupanje kod uzorka B1-075. Dobiveni rezultati na uzorcima brnistre nisu lošiji od rezultata koji se inače dobivaju prilikom mikroarmiranja prirodnim vlaknima.



Slika 23. Utjecaj udjela vlakana na rezultate čvrstoće za duljinu vlakna od 10mm [36]

### 6.3.1. Zaključak istraživanja

Uporaba vlakana brnistre ima potencijala kao ojačalo u cementnom kompozitu. Pokazalo se da vlakna duljine 10 i 30 mm imaju najveći potencijal za povećanje čvrstoće na savijanje, ali dulja vlakna su utjecala na veće smanjenje čvrstoće na pritisak. Potrebno je temeljitije istraživanje kako bi se našla optimalna kombinacija količine i duljine vlakna brnistre u cementnoj matrici. [36]

Prema [39], autori su istraživali upotrebu vlakana brnstre za ojačanje cementnog morta. Karakteristike vlakana dobivena različitim metodama proučavana su FTIR i TG/DTG analizom. Proučavali su utjecaj vremena berbe brnistre, vrstu maceracije vlakana, dužinu vlakna i njihovu količinu na mehaničke karakteristike cementnog morta. Tlačna i savojna čvrstoća ispitivana je na uzorcima cementnog morta nakon 28 dana i uspoređena s referentnim uzorkom. Pet uzoraka ispitivano je nakon 56 dana, dobiveni rezultati uspoređeni su sa rezultatima dobiveni na uzorcima ispitivani nakon 28 dana. Utvrđeno je da su vlakna brnistre povoljna za ojačanje cementnog morta i da morska maceracija predstavlja dobru alternativu tretmanu natrijevom hidroksidu, uz svoju ekonomsku i ekološku prihvatljivost. [39]

Za ovo istraživanje odabrane su dvije vrste maceracije, maceracija morskom vodom i maceracija u 5%-tnoj koncentraciji natrijevog hidroksida. Uzorci iz ljetne berbe označeni sa oznakom M, potapani su u morskoj vodi u periodu od 28 dana, zatim se vlakna ispiru vodom te se ručno odvajaju od stabljike. Dio vlakana nakon maceracije morem su potopljeni u otopini 5% NaOH u periodu 7 dana te su označeni sa MN. Dio izdanaka je potopljeno u 5% otopini NaOH u periodu od 14 i 15 dana, te se nakon toga trljaju o hrapavu betonsku površinu. Takvi uzorci su označeni oznakom NU.

Uzorci sa oznakom N su izvađeni iz 5% otopine NaOH nakon 18 i 19 dana te su se takva vlakna lakše odvajala i ispirala vodom. Ostavljena su 7 dana na sobnoj temperaturi, te su nakon toga stavljena u otvorenu kutiju pri standardnoj temperaturi od 20°C i relativnoj vlažnosti zraka 65% do dana rezanja na proizvoljnu duljinu.

Svježe ubrani izdanci brnistre od jesenske berbe potapali su se u 5%-tnoj otopini natrijevog hidroksida u periodu od mjesec dana, takvi uzorci vlakana označeni su sa

oznakom NS. Drugi dio izbojaka ostavljeni su u otopini dva mjeseca, takva vlakna označena su sa oznakom NSS.

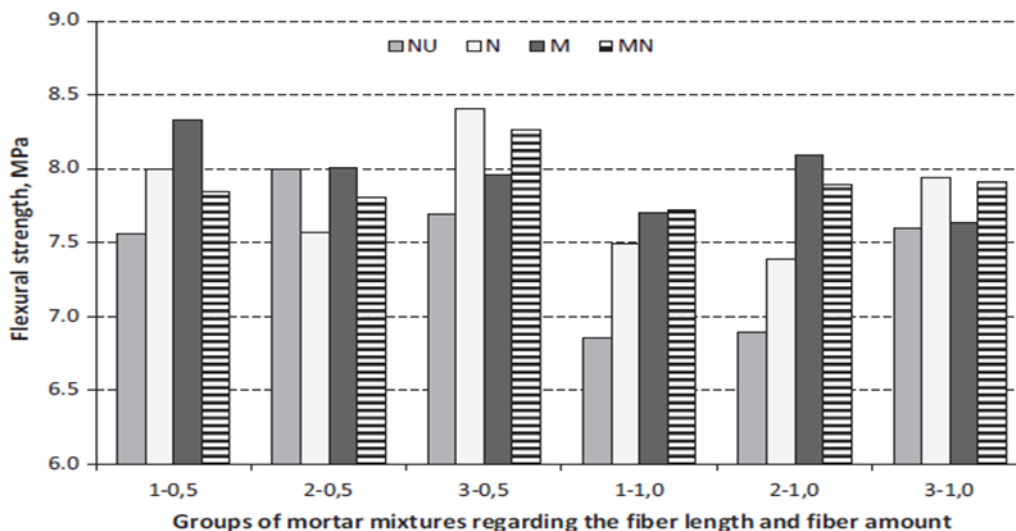
Vlakna dobivena od jesenske berbe lošije su kvalitete od vlakana dobivena iz ljetne berbe, takva vlakna teže se i odvajaju od drvenaste stabljike. Vlakna dobivena morskom maceracijom su zelenija zbog kloroplasta dok vlakna dobivena maceracijom u natrijevom hidroksidu svjetlija su i žuća zbog otklanjanja veće količine lignina. [39]

U tablici 5. prikazan je 31 uzorak cementnog morta ojačanog vlaknima brniste izrađenih u svrhu ispitivanja ponašanja vlakana u cementnom kompozitu. Vlakna dobivena različitim metodama su se rezala na duljine od 10, 20 i 30 mm, i dodavala su se u cementnu mješavinu u količini od 0.5 i 1.0 % od ukupnog volumena. Nakon što je mješavina napravljena po standardnom postupku EN 196, ugrađuje se u trodijelni kalup na vibracijskom stolu, nakon 24 sata uzorci se vade iz kalupa te se ostavljaju u vodi 28 dana.

**Tablica 5.** Detalji mješavine morta [39]

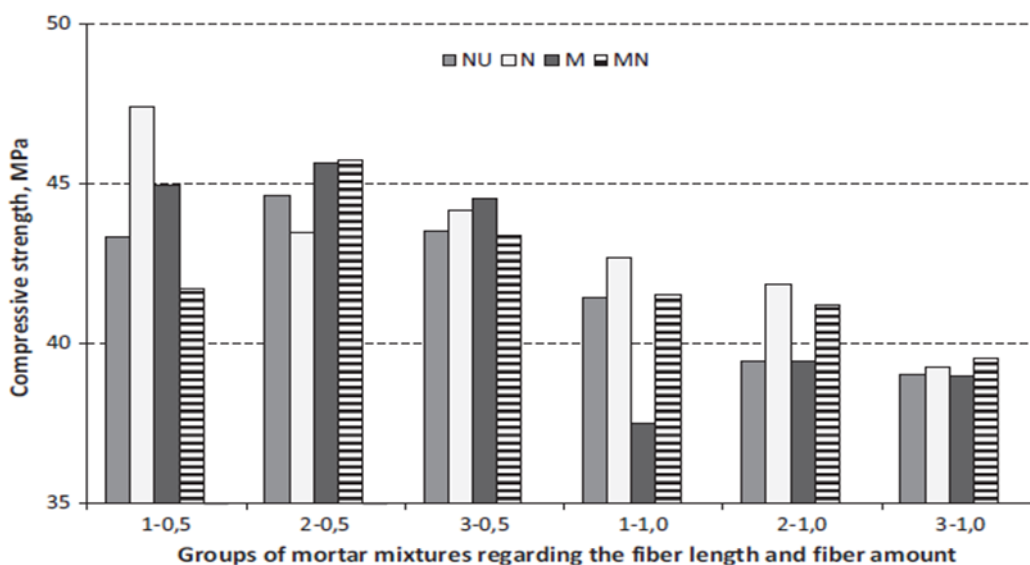
Mixtures	Spanish Broom fiber separation methods	Fiber length (cm)	The amount of fibers (% by volume)	Cement (g)	Water (ml)	w/c	Standard quartz sand (g)
E	-	-	-	450	225	0.5	1350
NU1-0.5	Maceration of summer harvesting in 5% NaOH for period of 14 and 15 days	1	0.5				
NU1-1.0			1.0				
NU2-0.5		2	0.5				
NU2-1.0			1.0				
NU3-0.5		3	0.5				
NU3-1.0			1.0				
N1-0.5		Maceration of summer harvesting in 5% NaOH for period of 18 and 19 days	1	0.5			
N1-1.0			1.0				
N2-0.5	2		0.5				
N2-1.0			1.0				
N3-0.5		3	0.5				
N3-1.0			1.0				
M1-0.5		Maceration in sea water during 28 days	1	0.5			
M1-1.0			1.0				
M2-0.5	2		0.5				
M2-1.0			1.0				
M3-0.5		3	0.5				
M3-1.0			1.0				
MN1-0.5		Treatment with 5% NaOH during 7 days after 28 days of maceration in sea water	1	0.5			
MN1-1.0			1.0				
MN2-0.5	2		0.5				
MN2-1.0			1.0				
MN3-0.5		3	0.5				
MN3-1.0			1.0				
NSS1-0.5		Maceration of fall harvesting in 5% NaOH for period of one month	1	0.5			
NSS1-1.0			1.0				
NSS2-0.5	2		0.5				
NSS3-0.5			0.5				
NSS1-0.5	Maceration of fall harvesting in 5% NaOH for period of two month	1	0.5				
NSS1-1.0			1.0				

Na slikama 24. i 25. prikazani su rezultati ispitivanja savojne i tlačne čvrstoće, za različite uzorke s oznakama NU, N, M i MN i različite duljine vlakana.



**Slika 24.** Savojna čvrstoća morta, ovisno o vrsti maceracije [39]

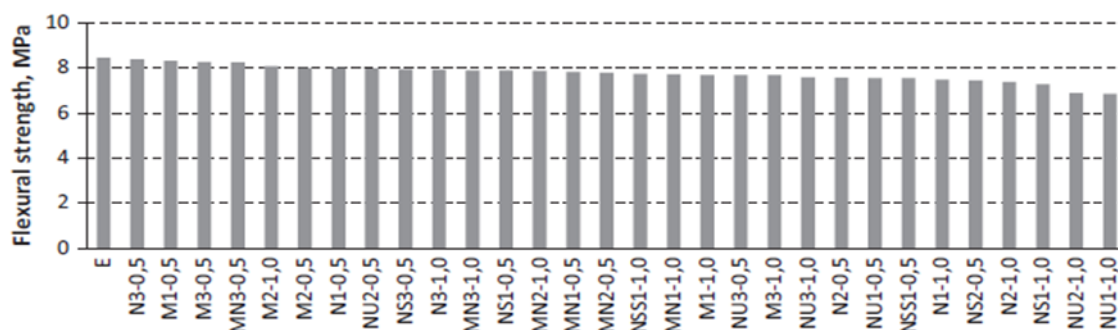
Iz slike 24, vidljivo je da je savojna čvrstoća najviše je ujednačena kod morske maceracije odnosno kod uzoraka M i MN. Najlošije rezultate pokazali su uzorci NU, pogotovo u slučaju kod vlakana duljine 10 i 20 mm u količini od 1% ukupnog volumena. Morska maceracija ima pozitivan učinak na uzorke s vlaknima duljine 10 i 20 mm u količini od 0.5 i 1.0% ukupnog volumena. Kod vlakna duljine 30mm bolje rezultate su pokazali uzorci MN i N. Najbolji rezultat savojne čvrstoće javlja se kod uzorka N kod vlakana duljine 30 mm u količini od 0.5% ukupnog volumena.



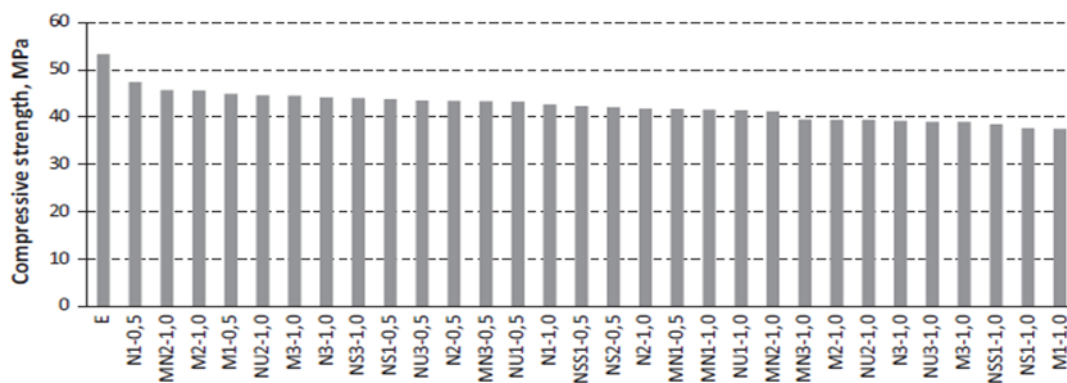
**Slika 25.** Tlačna čvrstoća morta, ovisno o vrsti maceracije [39]

Iz slike 25. vidljivo je da tlačna čvrstoća ne ovisi toliko o vrsti maceracije već o duljini vlakana i njihovoj količini u uzorku. Uzorci kod kojih su duljine i količine vlakana povećane imaju manju tlačnu čvrstoću. Svi uzorci s vlaknima duljine 30mm u količini od 1.0% ukupnog volumena dali su približno iste rezultate. [39]

Postignute čvrstoće u odnosu na etalon su prikazane na slikama 26. i 27. Oba dijagrama pokazuju da nijedan od uzoraka armiran vlaknima nije premašio vrijednost čvrstoće koju je postigao etalon. Najbližu vrijednost savojne i tlačne čvrstoće uzorku etalona, postigli su uzorci M ili N.

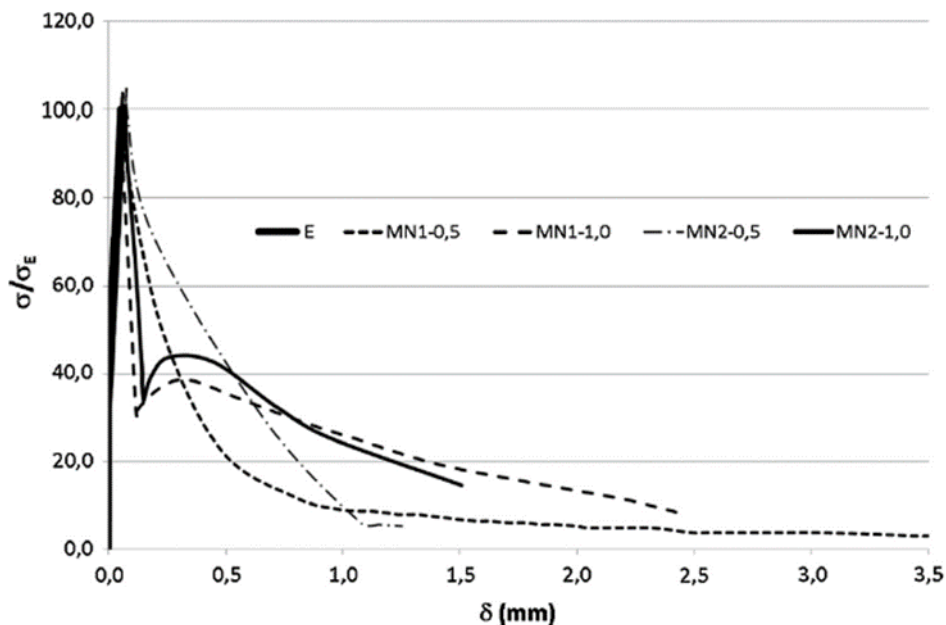


Slika 26. Usporedba savojne čvrstoće uzoraka morta i etalona [39]



Slika 27. Usporedba tlačne čvrstoće uzoraka morta i etalona [39]

Pet serija uzoraka, odnosno etalon i MN1-0,5; MN-1,0; MN2-0,5 i MN2-1,0, su 56 dana bili u vodi na temperaturi 20°C. Nakon navedenog vremena, uzorci su očvrstnuli i provela su se ispitivanja. Utvrđene su njihove savojne i tlačne čvrstoće. Savojna se čvrstoća odredila prema EN 12390-4, a rezultati su prikazani na slici 28., na  $\sigma/\sigma_E - \delta$  dijagramu. [39]

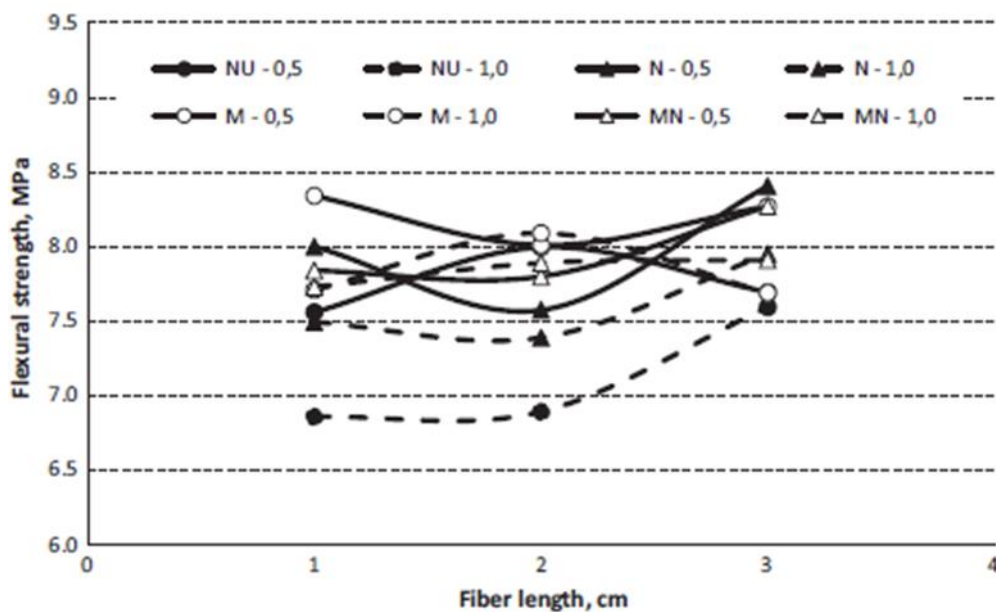


Slika 28.  $\sigma/\sigma_E - \delta$  dijagram [39]

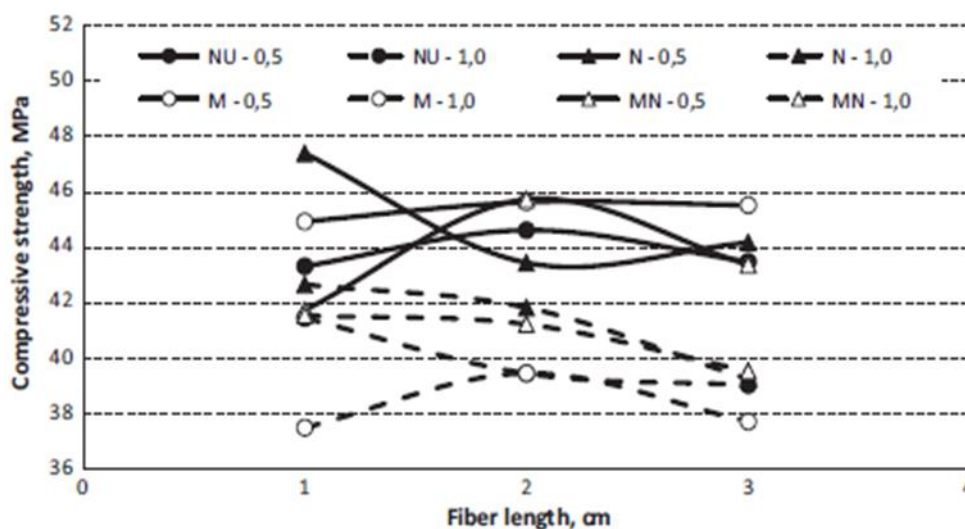
Uzorci s dodanim vlaknima u količini 0,5% volumena, tj. MN1-0,5 i MN2-0,5, pokazali su veću savojnu čvrstoću u odnosu na onu koju ima etalon, u iznosu od 103% i 104%.

Dodavanjem i povećanjem duljine vlakana, osim savojne, povećava se i tlačna čvrstoća. Rezultati su pokazali da je čvrstoća na pritisak 107%, i to za uzorak s vlaknima duljine 1 cm, a za vlakna od 2 cm iznosi 110% iste čvrstoće koju ima etalon. Uzorci koji sadrže 1% vlakana pokazali su nešto nižu čvrstoću od uzoraka sa sadržajem 0,5%, čije su čvrstoće slične etalonskima. Prema dijagramu relativnog omjera naprezanja uzorka u usporedbi s maksimalnim naprežanjem etalona, vidljivo je da kod uzoraka bez ojačanja odmah dođe do sloma, dok oni ojačani i dalje imaju nosivost. [39]

Autori su naveli da se uzorcima sa duljim vlaknima povećava otpornost na slom. Slike 29. i 30. prikazuju utjecaj duljine vlakana na mehaničke karakteristike svih uzoraka. Najbolji rezultati savojne čvrstoće većinom se dobivaju za uzorke duljine 30 mm, što prikazuje slika 29. Čvrstoća na tlak je bolja za uzorke koji imaju kraća vlakna (Slika 30.).



Slika 29. Utjecaj duljine vlakana na savojnu čvrstoću uzoraka morta [39]

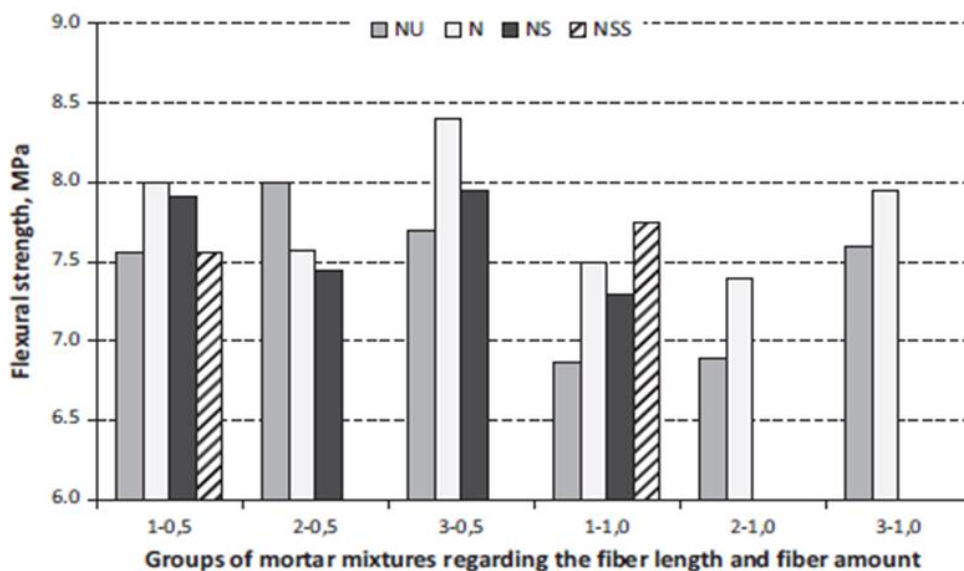


Slika 30. Utjecaj duljine vlakana na tlačnu čvrstoću uzoraka morta [39]

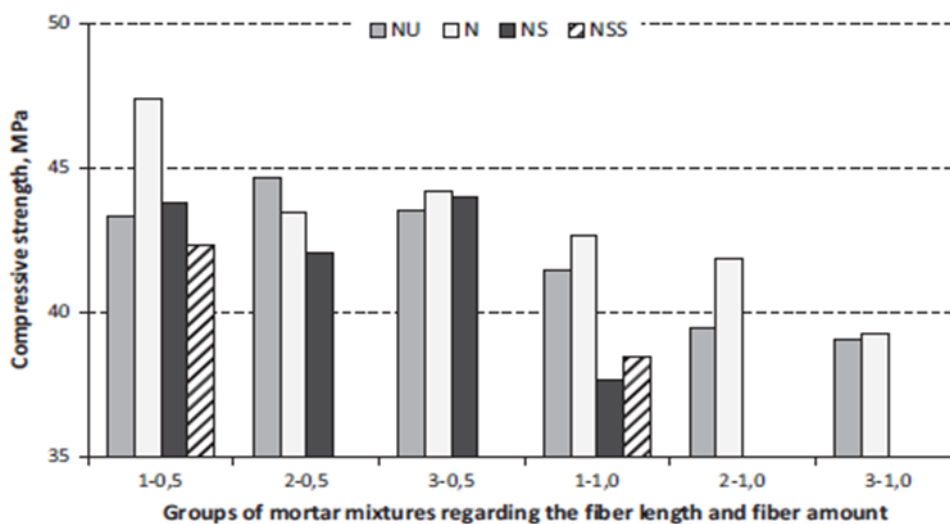
Tlačne i savojne čvrstoće uzoraka NS i NSS prikazane su na slikama 31. i 32. Rezultati su uspoređeni sa vlaknima iz ljetne berbe. Savojna čvrstoća starijih vlakana pokazala je nešto niže rezultate od serije N. Uzorak NSS1-1,0 postigao je najveću čvrstoću za vlakna duljine 10 mm u količini od 1%, a taj rezultat bi mogao biti uzrokovan manjim brojem uzoraka do kojih je došlo zbog nedostatka vlakana.



Slika 31. prikazuje da su rezultati savojne čvrstoće uglavnom lošiji u odnosu na rezultate dobivenih za uzorke koji imaju sadržana vlakna biljke iz ljetne berbe. Uzrok loših rezultata može biti odstupanje od preporučenog vremena berbe. Također, uzrok može biti i predug vremenski period uronjenosti vlakana u 5%-tnu koncentraciju NaOH. [39]



Slika 31. Utjecaj vremena berbe na savojnu čvrstoću morta [39]



Slika 32. Utjecaj vremena berbe na tlačnu čvrstoću morta [39]

Kao zaključak navedenih istraživanja, autori [39] su naveli sljedeće:

- Najbolje rezultate mehaničkih svojstava uzoraka pokazale su mješavine s vlaknima nastalima kao rezultat ljetne berbe, 28-dnevne maceracije u moru i 19-dnevne maceracije u 5%-tnoj otopini NaOH.
- Uzorci koji su dobiveni maceracijom u moru, a zatim uronjeni u NaOH su, prema ispitivanju, rezultirali boljom tlačnom čvrstoćom uzorka u slučaju većeg udjela vlakana u kompozitu.
- Maceracija vlakana morskom vodom, u usporedbi s kemijskim tretmanima, je jeftiniji postupak, bolji za okoliš, a rezultati dobiveni ispitivanjem uzoraka s ovakvim ojačanjem daju zadovoljavajuće rezultate.
- Jesenja berba daje dvostruko manju količinu vlakana, otežano je njihovo vađenje, ali i lošija mehanička svojstva kompozita.
- Rezultati na uzorcima koji su stari 56 dana pokazali su bolje rezultate u odnosu na uzorke bez ojačanja, što nije slučaj kod uzoraka starih 28 dana. Potrebno je ispitati veći broj uzoraka.
- Uzorci s vlaknima duljine 30 mm su dali nabolje vrijednosti savojne čvrstoće, a s time je došlo i smanjenje tlačne čvrstoće.
- U usporedbi s različitim prirodnim vlaknima, vlačna čvrstoća brnistre je jako velika, a prema provedenim istraživanjima zaključeno je da njena vlakna treba uzeti u obzir kao potencijalno ojačanje betonskih kompozita.

## 7. EKSPERIMENTALNI DIO

Cilj ovog rada je utvrđivanje svojstva morta ojačanog vlaknima brnistre. Vlakna služe kao ojačanja u cementnom mortu na način da sprječavaju širenje mikropukotina. Vlakna su dobivena maceracijom brnistre u 5% otopini natrijevog hidroksida (NaOH) u periodu od 20 do 38 dana. Izrađeno je šest uzoraka koji se razlikuju po količini vlakana u mortu i duljini vlakana. Naime, radilo se sa tri duljine vlakana ; 1cm, 2cm i 3cm, a količina vlakana koja se stavljala u mješavinu je 0,5% volumena ili 1% volumena. Na taj način su se i označavali ispitani uzorci.

19N51 -0,5 znači:

- 19 – godina berbe 2019.
- N5 – uzorci koji su stajali 20 dana u 5% otopini natrijevog hidroksida (NaOH)
- 1 – 0,5 – prvi broj označava duljinu vlakana u cm ( 1, 2 i 3cm)  
– drugi broj označava količinu vlakana u mortu

Eksperimentalni dio sastoji se od pripreme vlakana, izrade i ispitivanja morta, što je detaljno obrađeno u sljedećim poglavljima.

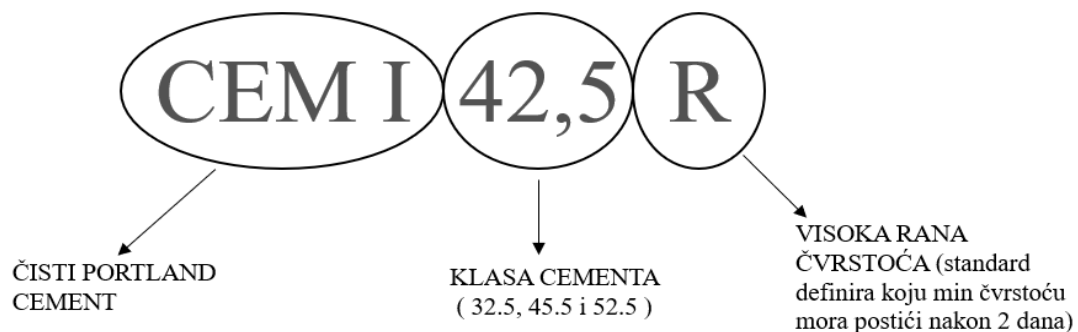
### 7.1. Materijali

Uzorci su izrađeni od uobičajene smjese za beton uz dodatak određene količine vlakana brnistre. Dakle materijali korišteni za izradu uzoraka su:

- Cement
- Standardni kvarcni pijesak
- Voda
- Vlakna brnistre

### 7.1.1. Cement

Kao vezivo korišten je CEM I 42.5 R, odnosno portlandski cement s udjelom 95% - 100% klinkera ( Slika 33.). Koristi se za opću upotrebu u proizvodnji betona, morta, estriha i žbuke. Ova vrsta cementa ima nisku potrebu za vodom, bolja je obradivost i dugotrajno održanje ugradljivosti. Betoni postižu visoke čvrstoće. Svjetlije je boje i kao takav je pogodan za završne obrade i kombinaciju s pigmentima.



Kod betonskih radova pri niskim temperaturama je kraći period podložnosti svježeg betona smrzavanju. Služi za izradu betona otpornih na mraz i soli za odmrzavanje – duži je vijek trajanja konstrukcije, za izradu visokokvalitetnih betonskih podova i estriha otpornih na habanje.



Slika 33. Korišteni portland cement

### 7.1.2. Standardni kvarcni pijesak

Za potrebe izrade morta korišten je CEN Standardni pijesak, EN 196 – 1. To je prirodni, silikatni pijesak najfinijih frakcija. Čist je, čestice su izometrične i zaobljenog oblika. Proizvođač navodi da se spomenuti pijesak suši, pregledava i priprema u modernoj radionici koja nudi svako jamstvo u pogledu kvalitete i konzistentnosti. Pijesak je dostupan u pakiranjima od polietilenske vrećice, od kojih svaka sadrži količinu  $1\,350 \pm 5$  g (slika 34).



Slika 34. Upotrebjeni pijesak

Sastav veličine čestica određen prosijavanjem udovoljava zahtjevima normi EN 196 – 1 i ISO 679 : 2000, što je prikazano u Tablici 6.

Tablica 6. Kumulativni prikaz ostataka na situ dobivenih prosijavanjem [41]

VELIČINA SITA (mm)	KUMULATIVNI OSTATAK NA SITU (%)
0,08	99 ± 1
0,16	87 ± 5
0,50	67 ± 5
1,00	33 ± 5
1,60	7 ± 5
2,00	0

### 7.1.3. Voda

Za izradu uzoraka korištena čista voda iz slavine.

### 7.1.4. Vlakna brnistre

Za dobivanje vlakana koriste se grančice ubrane u ljeto 2019.-te godine. Te grančice su odrezane na određenu dužinu (Slika 35.) te stavljene u posude s 5% - tnom otopinom NaOH.



Slika 35. Grančice brnistre pripremljene za obradu

#### 7.1.4.1. Obrada vlakana brnistre

U posudi od 10 litara, stavi se 502,6 g NaOH, promiješa, poklopi i ostavi jedan dan da odstoji, da se zrnca NaOH potpuno otope u vodi. Kako bi se vlakna brnistre odvojila od drvenastog dijela biljke, a ujedno i poboljšala kvaliteta i trajnost vlakana, grančice se potapaju u prethodno pripremljenu otopinu natrijevog hidroksida i demineralizirane vode ( Slika 36.). [41]

Količine natrijevog hidroksida u 1L vode prikazane su na Slici 37.



Slika 36. Način obrade grančica brnistre u 5%-tnoj otopini NaOH [41]

**NATRIJEV HIDROKSID**

Specifične težine vodenih otopina NaOH kod  $\frac{20^{\circ}}{40}$  C

Bé	Spec. težina	% NaOH	g u 1 litri	Bé	Spec. težina	% NaOH	g u 1 litri
1,4	1,0095	1	10,10	28,2	1,2411	22	275,0
2,9	1,0207	2	20,41	30,2	1,2629	24	305,1
4,5	1,0318	3	30,95	32,1	1,2848	26	334,0
6,0	1,0428	4	41,71	34,0	1,3064	28	365,8
7,4	1,0538	5	52,69	35,8	1,3279	30	398,4
8,8	1,0648	6	63,89	37,5	1,3490	32	451,7
10,2	1,0758	7	75,31	39,1	1,3696	34	465,7
11,6	1,0869	8	86,95	40,7	1,3900	36	500,4
12,9	1,0979	9	98,81	42,2	1,4101	38	555,8
14,2	1,1089	10	110,9	43,6	1,4300	40	572,0
16,8	1,1309	12	135,7	45,0	1,4494	42	608,7
19,2	1,1530	14	161,4	46,3	1,4685	44	646,1
21,6	1,1751	16	188,0	47,5	1,4873	46	684,2
23,9	1,1972	18	215,5	48,8	1,5065	48	723,1
26,1	1,2191	20	245,8	49,9	1,5253	50	762,7

Slika 37. Količina natrijevog hidorksida u 1 litri vode

Izbojci brnistre stajali su u 5%-tnoj otopini NaOH tijekom 20 dana. Nakon toga se grančice vade iz otopine, ručno odvajaju od drvenastog dijela biljke, ispiru čistom vodom iz slavine (Slika 38. i 39.), i suše na sobnoj temperaturi dva do tri dana, nakon čega se skladište u otvorene kutije na istoj temperaturi (Slika 40.)





**Slika 38.** Vlakna brnistre isprana vodom te ručno odvajanje vlakana [41]



**Slika 39.** Odvojena vlakna spremna za sušenje [41]



**Slika 40.** Vlakna nakon sušenja



Za potrebe ispitivanja vlakna su se rezala u tri različite dužine; 1cm, 2cm i 3cm (Slika 41.), a količina upotrebljenh vlakana u mortu iznosi 0,5% volumena ili 1% volumena, odnosno 480g i 960g po mješavini (Slika 42.).



**Slika 41.** Osušena i izrezana vlakna brnistre



**Slika 42.** Izvagana vlakna brnistre ( 480g i 960g )

## **7.2. Izrada i ispitivanje uzoraka morta**

### **7.2.1. Izrada morta**

Izrađene su cementne mortne prizmice koje su ojačane vlaknima brnistre. Napravljeno je 7 serija od tri prizmice dimenzija 40x40x160 mm: referentni mort i mortovi ojačani vlaknima (3 duljine vlakana i 2 količine) . Za sve mješavine korišten je cement CEM I 42.5 R i CEN standardni pijesak, EN 196-1. Potrebne količine za izradu serije od tri prizmice su 450 g cementa, vrećica standardnog pijeska mase 1350g i 225 g vode. Mješavine su pripremljene u standardnoj laboratorijskoj miješalici. ( Slika 43.).



**Slika 43.** Standardna laboratorijska miješalica

Cement i voda se miješaju 30 sekundi, zatim se automatski dodaje pijesak uz neprekidno miješanje od 30 sekundi te se nakon toga povećava brzina miješanja koja traje 30 sekundi. Nakon miješanja posuda se vadi iz miješalice, u nju se dodaju vlakna brniste, te se sve skupa dodatno ručno miješa pri čemu se pazi da su vlakna jednoliko raspoređena kako se ne bi stvorili snopovi koje kasnije umanjuju svojstva očvrslog morta (Slika 44.).

Za izradu referentnog uzorka (etalona), cement i voda se miješaju 30 sekundi, zatim se automatski dodaje pijesak uz neprekidno miješanje od 30 sekundi, nakon čega se smjesa dodatno izmiješa većom brzinom dodatnih 30 sekundi. Zatim slijedi pauza od 90 sekundi nakon čega se mješavina ponovno izmiješa 60 sekundi većom brzinom kako bi se homogenizirala. Nakon što se mješavina napravila, ugrađuje se u trodijelni kalup na vibracijskom stolu. Referentni uzorak (etalon) označen je sa E.



**Slika 44.** Vlakna dodana u mješavinu

Nakon izrade, mort je ugrađen u trodijelni kalup na vibrostolu, radi bolje ugradnje. Uzorci su označeni sa: - 19N51 – 0,5, 19N51 – 1, 19N52 – 0,5, 19N52 – 1, te 19N53 – 0,5, i 19N53 – 1.

Nakon 24 sata čuvanja u vlažnoj komori ( Slika 45.), uzorci su izvađeni iz kalupa, stavljeni u vodu i tamo njegovani 27 dana do ispitivanja ( Slika 46.).



**Slika 45.** Komora za čuvanje uzoraka



**Slika 46.** Uzorci njegovani u vodi do ispitivanja



### 7.2.2. Ispitivanje svježih uzoraka morta

Nakon 28 dana starosti prizmica, pristupa se njihovom ispitivanju. Uzorci u obliku prizmica ispituju se u hidrauličkoj preši na savijanje ( Slika 47.) i tlak ( Slika 48.).

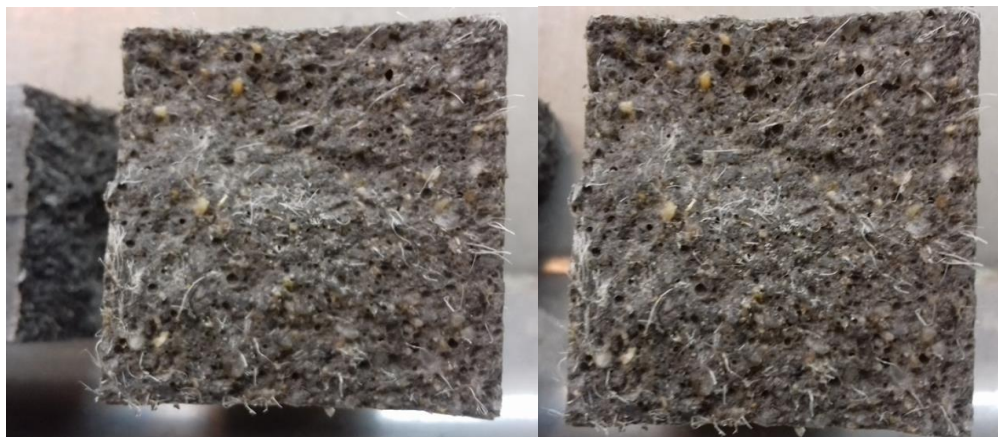


Slika 47. Hidraulička preša za savijanje



Slika 48. Hidraulička preša za tlak

Na slikama 49., 50. prikazani su presjeci uzoraka, gdje su vidljiva vlakna brnistre. Vlakna su duljine 1cm te udio vlakana je 0.5 i 1% volumena. Iako se nastojalo postići što bolju raspoređenost vlakana po volumenu, u nekim uzorcima je došlo do pojave „balling effect“, odnosno do grupiranja snopova vlakana u presjeku, zbog loše ugradnje morta sa vlaknima.



Slika 49. Presjek uzorka 19N5 -1 -0,5 nakon sloma



**Slika 50.** Presjek uzorka 19N5 -1 -1,0 nakon sloma

Na slici 51. je vidljivo kako duljina i količina vlakana utječe na ugradnju morta, odnosno teže je postići bolju raspoređenost vlakana kada su ta ista vlakna veće duljine.

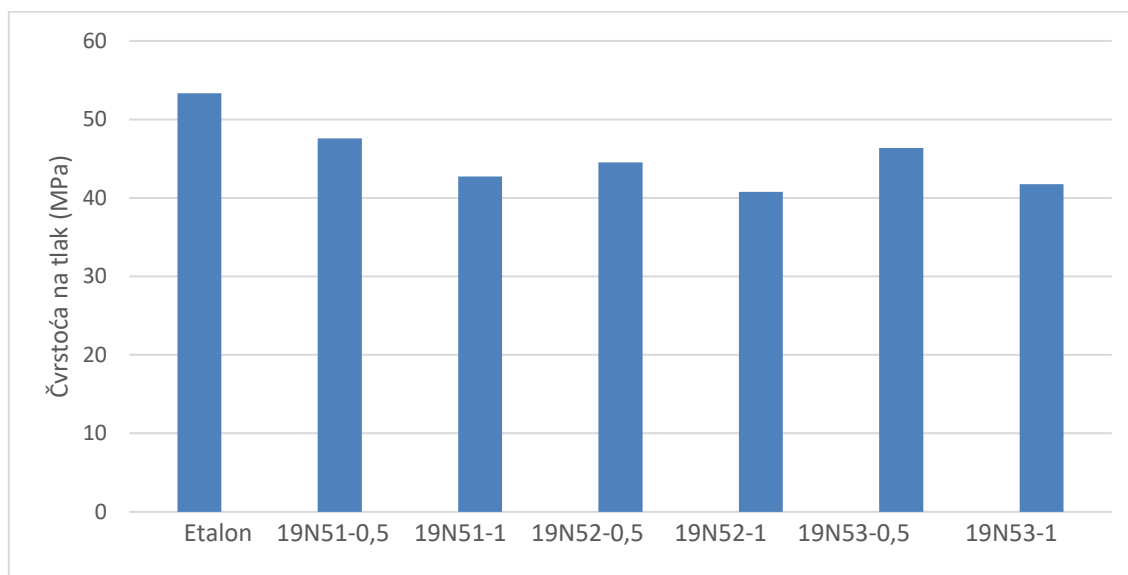


**Slika 51.** Usporedba uzoraka u odnosu na količinu i duljinu vlakana  
( lijevo 19N5-1-0,5, desno 19N5 -3-1,0 )

Dobiveni rezultati ispitivanja čvrstoće na savijanje i tlak prikazani su u obliku srednjih vrijednosti. Slika 52. prikazuje rezultate tlačne čvrstoće, što je udio vlakana veći, to je dobivena čvrstoća manja. To je i za očekivat iz razloga što se mort s dodatkom vlakana teže zbija i ugrađuje, a poroznost takvog betona je povećana. Vlakna povećavaju žilavost morta, a zbog lošije ugradnje morta sa vlaknima, nastaje veća poroznost, te je tlačna čvrstoća nešto niža u odnosu na referentni mort.

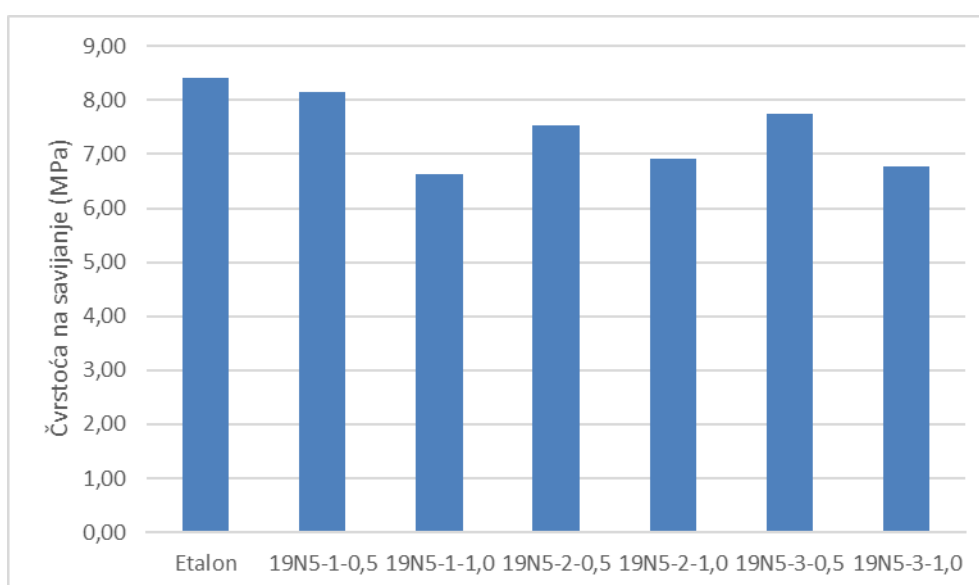
Rezultati ispitivanja čvrstoće na tlak također su pokazali da uzorak s oznakom 19N51 – 0,5 ima najveću vrijednost koja iznosi 47,59 MPa. Slijede uzorci 19N53 – 0,5 i

19N52 – 0,5 s vrijednostima 46,35 MPa i 44,53 MPa. Najnižu tlačnu čvrstoću pokazao je uzorak 19N52 – 1,0 i iznosi 40,76 MPa.



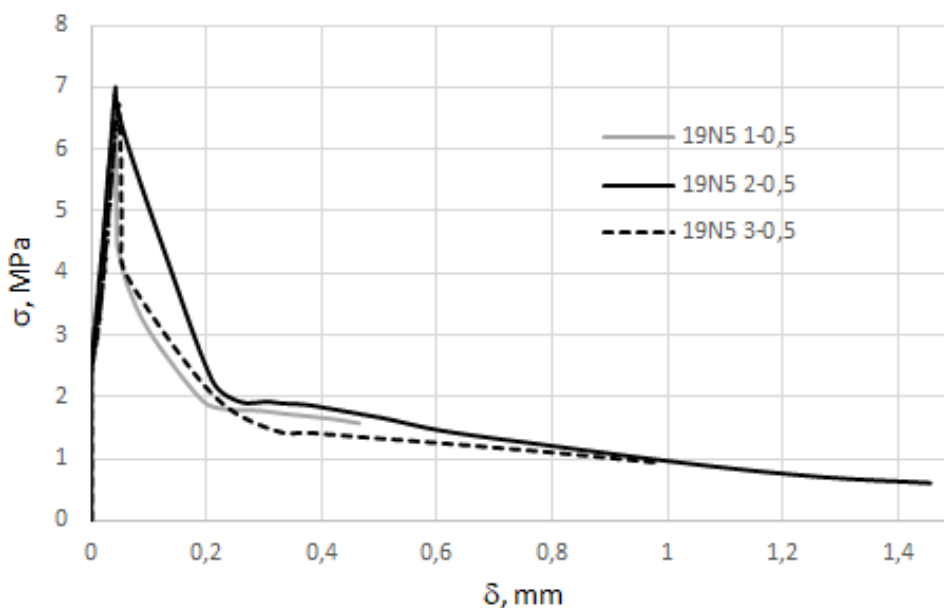
**Slika 52.** Rezultati ispitivanja čvrstoće na tlak

Sa slike 53., vidljivo je da uzorci s vlaknima brnistre imaju niže čvrstoće na savijanje, u odnosu na etalon. Najniže vrijednosti su ostvarili uzorci 19N51 – 1,0 i 19N53 – 1,0 sa 6,62 MPa i 6,78 MPa dok je uzorak 19N51 – 1,0 najbliži vrijednosti etalona sa 8,14 MPa. Iz dijagrama se jasno vidi da veći udio vlakana ostvaruje niže čvrstoće. Također je vidljivo da povećanjem udjela vlakana, čvrstoća je manja, što je posljedica teže obradivosti i ugradnje morta.

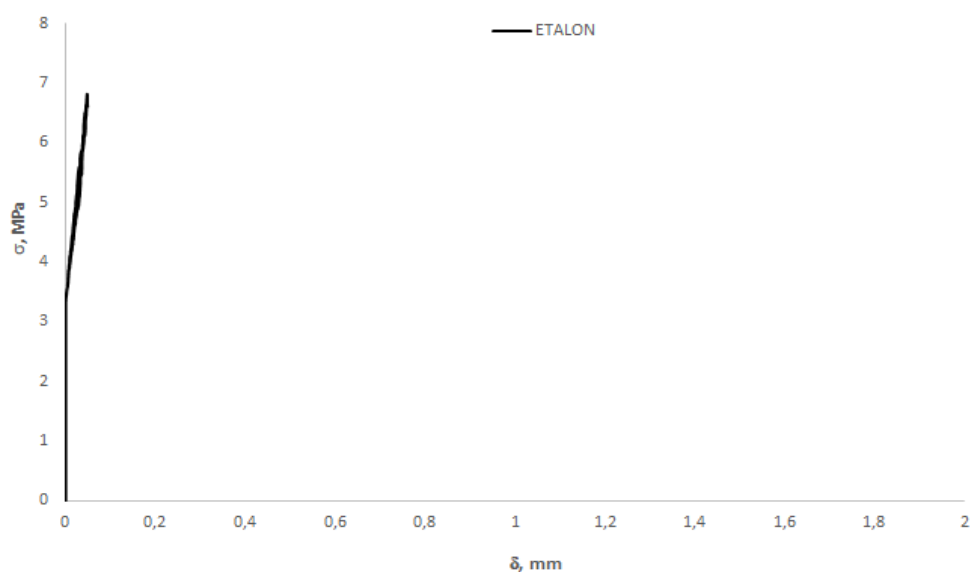


**Slika 53.** Rezultati ispitivanja čvrstoće na savijanje

Na slikama 54. i 55. prikazani su  $\sigma - \delta$  dijagrami. Na slici 54. su uzorci tretirani sa 5% NaOH, i to uzorci 28-dnevnog morta sa 0.5 % vlakana duljine 1, 2 i 3 cm, a na slici 55. je prikazan uzorak 56-dnevnog etalona. Vidljivo je da se kod uzoraka koji nisu ojačani vlaknima, krivulja nakon loma prekine, dok kod uzoraka sa vlaknima, i nakon loma još uvijek postoji nosivost, čemu je razlog povećana žilavost zbog dodatka vlakana. Iz prikazanih dijagrama mogla bi se izračunati energija loma kao što je to napravljeno u istraživanju [27]. Jasno je da je kod ojačanih uzoraka površina ispod krivulje, kao i duljina pomaka puno veća nego kod prikazanog etalona.



Slika 54.  $\sigma - \delta$  dijagram za uzorke tretirane sa 5% NaOH

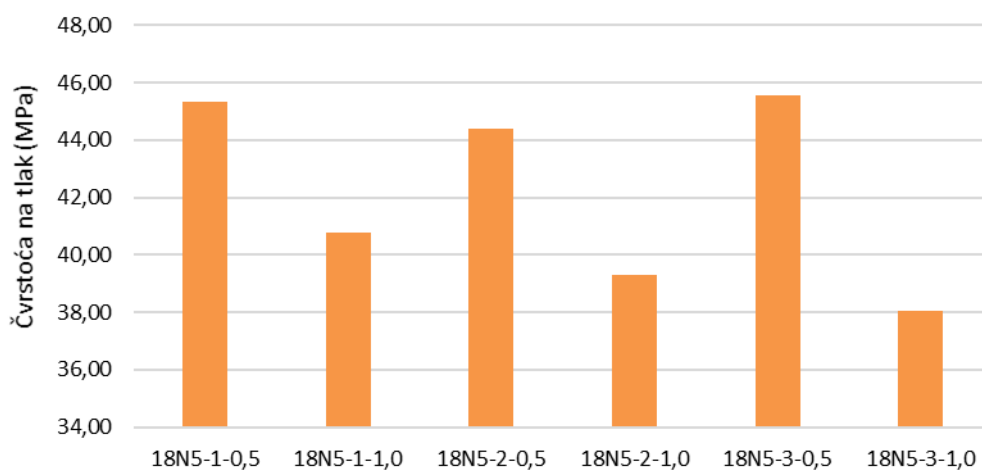


Slika 55.  $\sigma - \delta$  dijagram za uzorke etalona

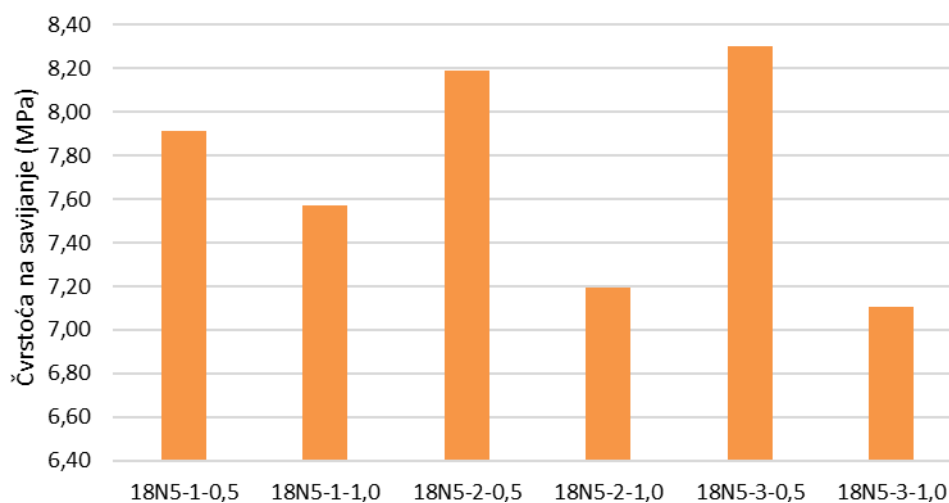
### 7.2.3. Usporedba rezultata ispitivanja iz 2019.godine sa prijašnjim ispitivanjima iz 2018. i 2017.godine

#### 7.2.3.1. Usporedba rezultata ispitivanja sa 2018. godinom

Zadatak ovog poglavlja je usporedba ovogodišnjih dobivenih rezultata sa ispitivanjima u 2018. i 2017.godini. Na slikama 56. i 57. su prikazani rezultati vlakana brnistre iz 2018.godine dobivena maceracijom tijekom 32 dana u 5% otopini natrijevog hidroksida. Ovisno o duljini vlakana, načinu tretiranja i količini vlakana u cementu, uzorci su označeni sa 18N5-1-0,5, 18N5-1-1,0, 18N5-2-0,5, 18N5-2-1,0, 18N5-3-0,5, 18N5-3-1,0, gdje 18 označava godinu berbe 2018. [42]



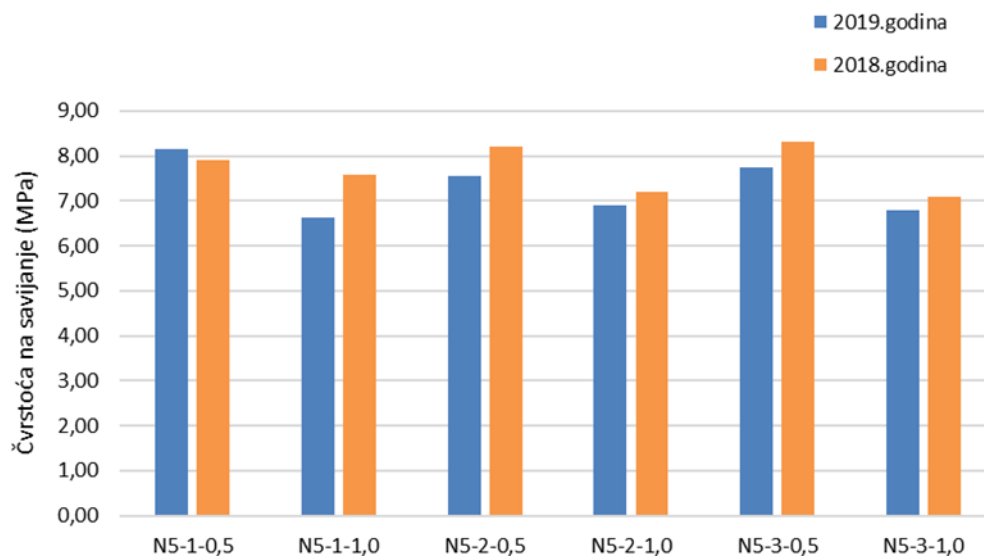
Slika 56. Čvrstoća na tlak, rezultati iz [42]



Slika 57. Čvrstoća na savijanje, rezultati iz [42]

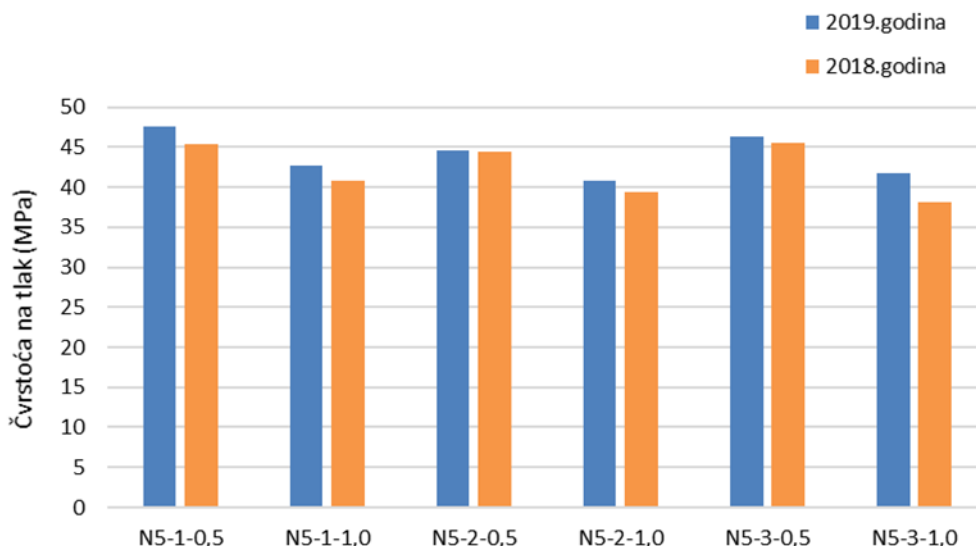


Slika 58. i slika 59. prikazuju odnos rezultata čvrstoće na savijanje i tlak za uzorke berbe 2019. godine i 2018. godine objavljenih u [42]. Slika 58. pokazuje da je kod uzoraka berbe 2018. godine čvrstoća na savijanje veća u odnosu na uzorke iz 2019., osim kod prvih uzoraka gdje je čvrstoća na savijanje 19N5-1-0,5 veća od 18N5-1-0,5.



**Slika 58.** Rezultati čvrstoće na savijanje za uzorke brane 2018. [42] i 2019.

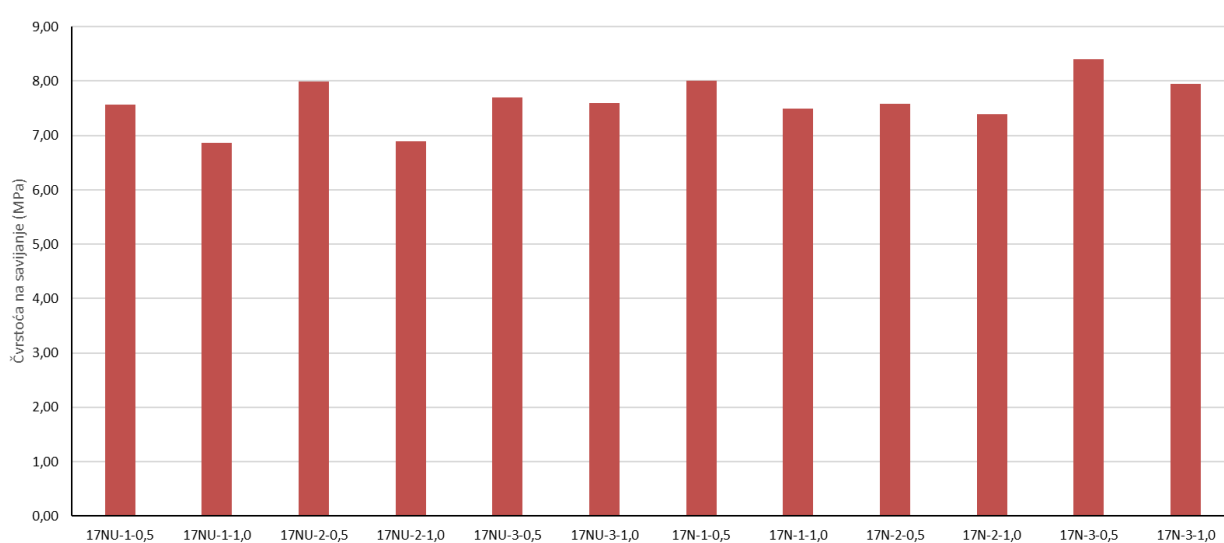
Slika 59. prikazuje odnose rezultata čvrstoće na tlak za uzorke brane 2018. iz [42] i uzorke brane 2019.godine. Može se primjetiti da uzorci brani 2019.godine, koji sadrže veću količinu vlakana imaju veću čvrstoću na tlak u odnosu na godinu starije uzorke. Međutim, pri manjoj količini vlakana, čvrstoća na tlak je približno ista za obe berbe, osim za uzorak 19N5-1-0,5 koji ima veću čvrstoću u odnosu na uzorak 18N5-1-0,5.



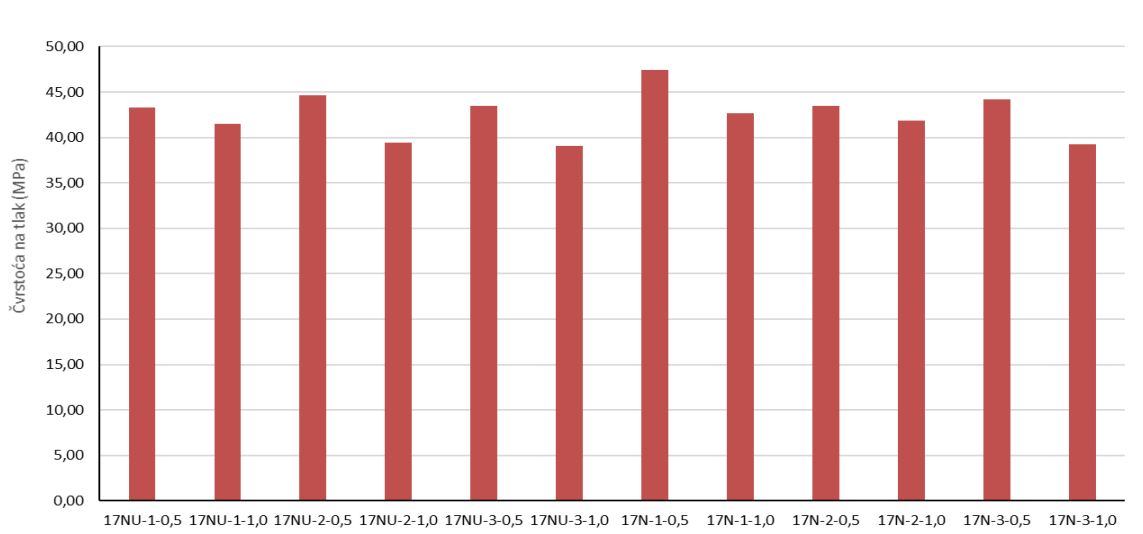
**Slika 59.** Rezultati čvrstoće na tlak za uzorke brane 2018. iz [42] i 2019.

### 7.2.3.2. Usporedba rezultata ispitivanja sa 2017.godinom

Brnistra ubrana 2017. godine podijelila se na 2 dijela. Prvi dio vlakana dobiven je maceracijom tijekom 15 dana u 5% otopini natrijevog hidroksida, a drugi dio vlakana 19 dana u 5% otopini natrijevog hidroksida (Slike 60. i 61.). Ovisno o duljini vlakana, načinu tretiranja i količini vlakana u cementu, uzorci su označeni sa 17NU-1-0,5, 17NU-1-1,0, 17NU-2-0,5, 17NU-2-1,0, 17NU-3-0,5, 17NU-3-1,0, 17N-1-0,5, 17N-1-1,0, 17N-2-0,5, 17N-2-1,0, 17N-3-0,5, 17N-3-1,0, gdje 17 označava godinu berbe 2017, a oznake N i NU su u skladu sa literaturom [41], odakle su i preuzete vrijednosti.

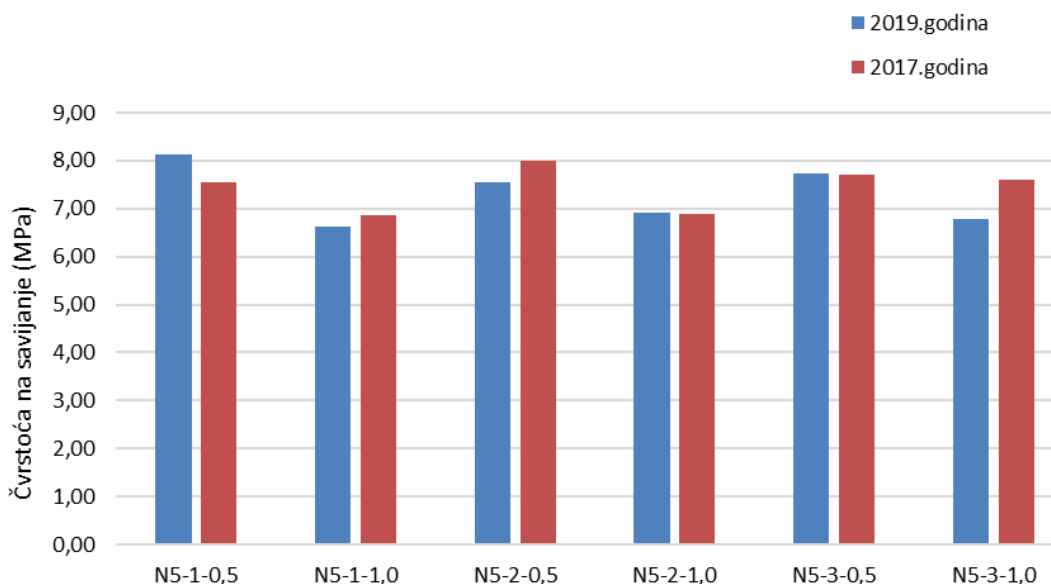


**Slika 60.** Čvrstoća na savijanje, rezultati iz [39]



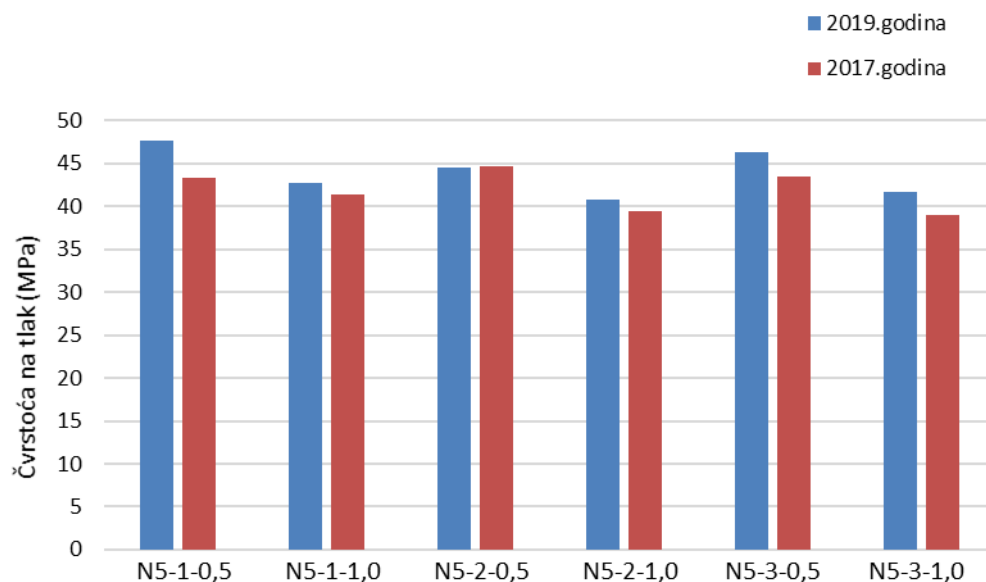
**Slika 61.** Čvrstoća na tlak, rezultati iz [39]

Na slici 62. uzorci koji su stajali u natrijevom hidroksidu 15 dana, iz 2017.-te godine, imaju uglavnom veću čvrstoću na savijanje od uzoraka iz 2019.-te godine. Što je udio vlakana veći, samim tim je i čvrstoća veća, u oba slučaja. Kod vlakana većih duljina, tlačna čvrstoća je podjednaka, osim za zadnji uzorak, gdje je čvrstoća uzorka iz 2017.te godine veća u odnosu na uzorak iz 2019.-te godine.



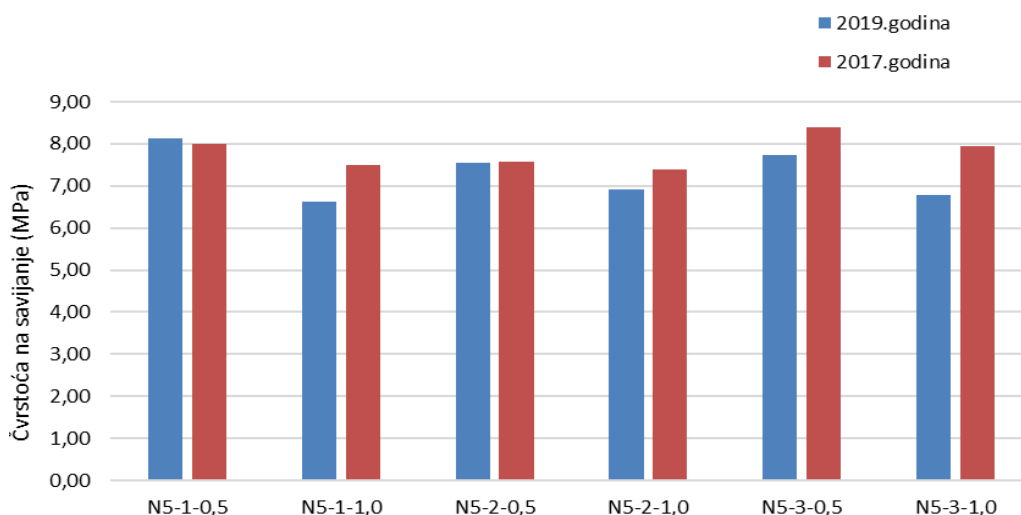
**Slika 62.** Rezultati čvrstoće na savijanje za uzorke brane 2017. [39] i 2019.godine

Uzorci iz 2017.-te godine koji su stajali 15 dana u otopini natrijevog hidroksida imaju manju čvrstoću na tlak, u odnosu na uzorke iz 2019.-te godine koji su stajali 20 dana u otopini natrijevog hidroksida (Slika 63.). S većim udjelom vlakana, čvrstoća je manja u oba slučaja.



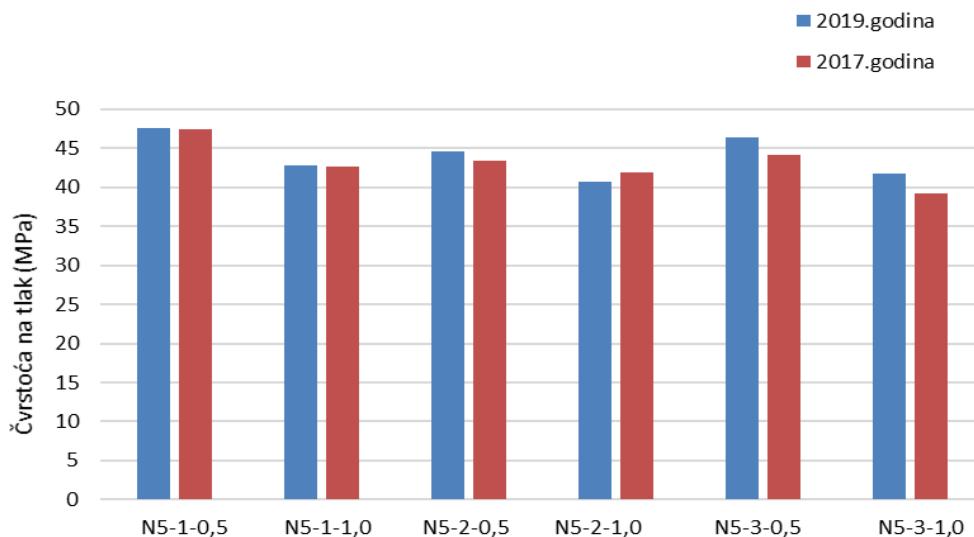
**Slika 63.** Rezultati čvrstoće na savijanje za uzorke brane 2017. [39] i 2019. godine

Na slici 64. su prikazani rezultati za uzorke iz 2017.-te godine koji su stajali 19 dana u otopini natrijevog hidroksida te za uzorke iz 2019.-te godine koji su stajali 20 dana u otopini. Sa dijagrama je vidljivo da je čvrstoća na savijanje veća za uzorke iz 2019. te godine, osim za prvi uzorak, gdje je čvrstoća veća za uzorak iz 2019.-te godine. Povećanjem udjela vlakana u uzorku čvrstoća pada, što je slučaj za obe godine berbe. Što su vlakna veće duljine, čvrstoća je manja za 2019. godinu, dok je čvrstoća uzoraka iz 2017. godine gotovo jednaka za svaku duljinu, osim za uzorak N5-3-0,5.



**Slika 64.** Rezultati čvrstoće na savijanje za uzorke ubrane 2017. [39] i 2019.godine

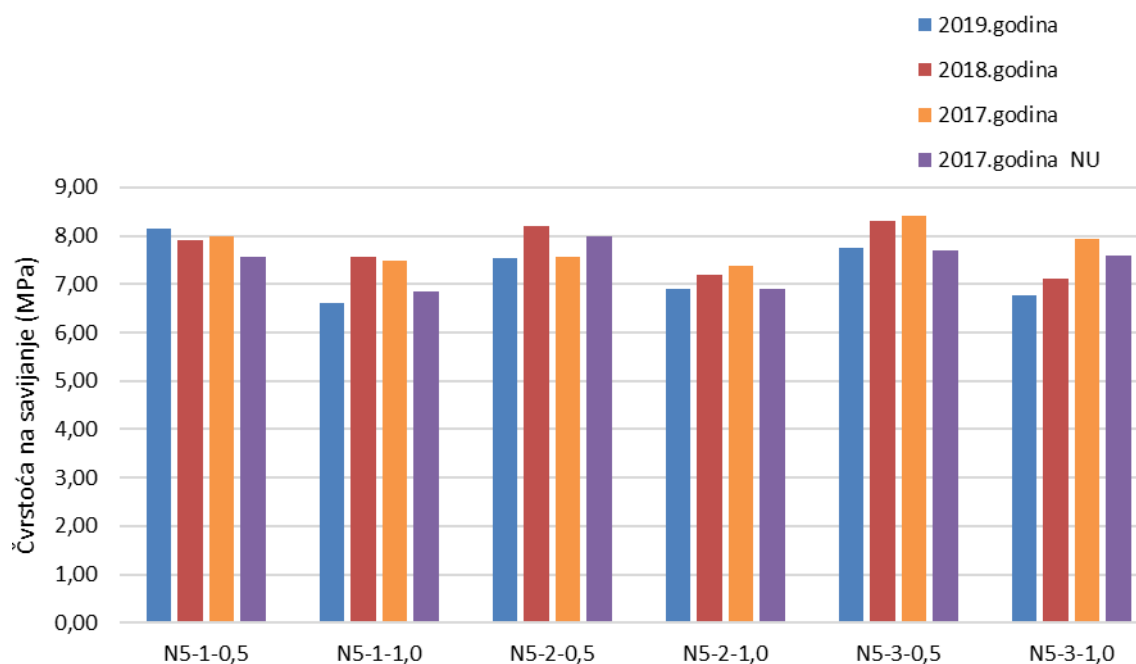
Sa slike 65. je uočljivo kako je čvrstoća na tlak za 2017.godinu u većini slučajeva gotovo identična čvrstoći za 2019.godinu.,osim za uzorke N5-3-0,5 i N5-3-1,0 gdje je čvrstoća veća za uzorke iz 2019.godinu. Povećanjem udjela vlakana u uzorcima,čvrstoća se smanjuje u oba slučaja. Duljina vlakana neznatno utječe na čvrstoću, međutim sve dobivene razlike mogu biti uzrokovane i kvalitetom izrade samih uzoraka.



**Slika 65.** Rezultati čvrstoće na tlak za uzorke ubrane 2017. [39] i 2019.godine

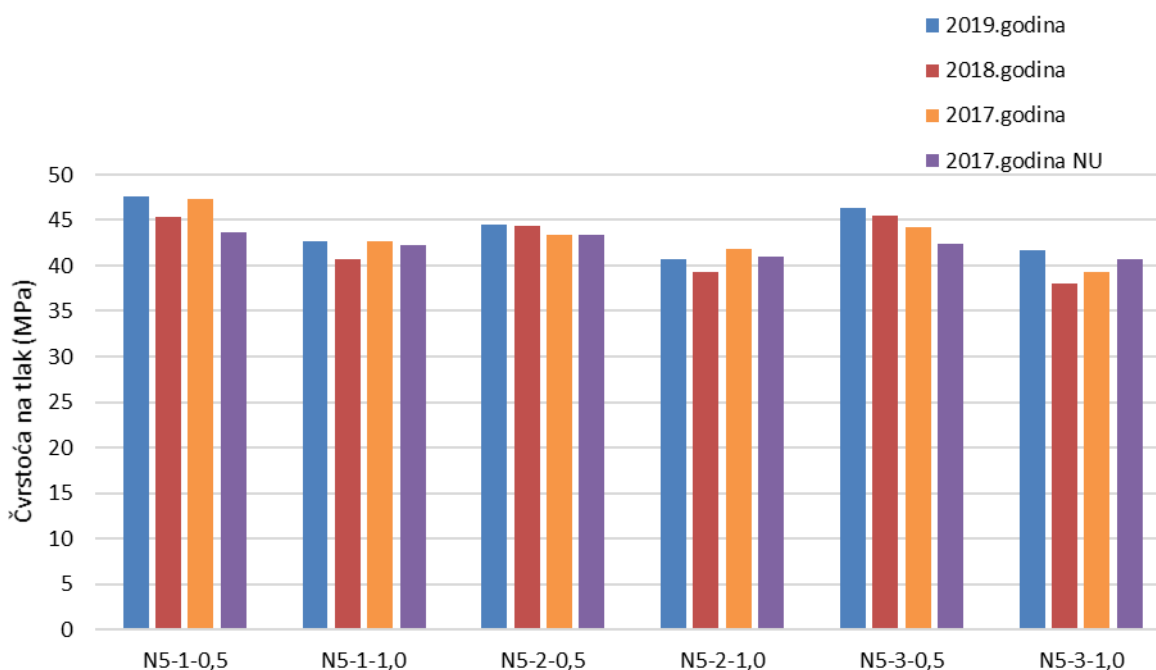
### 7.2.3.3. Rezultati za sve 3 godine berbe

Na slici 66 su prikazane čvrstoće na savijanje svih uzoraka. Razlike među rezultatima se kreću od 0.50 do 1.17MPa, pa može se zaključiti da su rezultati poprilično ujednačeni.



**Slika 66.** Rezultati čvrstoće na savijanje za sve 3 godine berbe

Na slici 67. prikazani su rezultati tlačne čvrstoće za sva provedena ispitivanja. Razlike u rezultatima su u granicama 1.18 do 4.28 MPa. S obzirom na izrađeni broj uzoraka (72 prizmice) i nehomogenost mješavina, može se reći da je rezultat očekivan.



**Slika 67.** Rezultati čvrstoće na tlak za sve 3 godine berbe

## 8. ZAKLJUČAK

Mikroarmirani beton, uz uobičajene sastojke za obični beton, sadrži diskontinuirana vlakna koja imaju veliku vlačnu čvrstoću. Beton je materijal koji odlično podnosi tlačnu čvrstoću, dok mu je vlačna čvrstoća znatno manja. Stoga se u beton dodaju vlakna koja služe kao ojačanja, ona sprječavaju nastanak pukotina, povećavaju vlačnu čvrstoću, poboljšavaju žilavost, itd., prednosti u odnosu na konvencionalni beton odnose se i na deformabilnost, umor materijala, plastično skupljanje i otpornost prema abraziji.

Vlakna korištena za mikroarmiranje mogu biti čelična, sintetička i prirodna. Zbog sve veće brige za okoliš i zahtjevima za ekološki prihvatljivijim i energetski učinkovitijim materijalima, čelična i sintetička nastoje se zamijeniti prirodnim, odnosno celuloznim vlaknima. Prirodna vlakna imaju mnoge prednosti u odnosu na prve dvije spomenute vrste, a između ostalog, to je dostupnost u gotovo svim zemljama, jeftin način dobivanja, sigurna su za proizvodnju i rukovanje i nisu abrazivna, a uz sve to imaju dovoljno dobra mehanička svojstva koja su usporediva s ostalim vlaknima

U ovom radu ispitivana je mogućnost ojačanja cementnog kompozita vlaknima brnistre, koja su tretirana u 5% otopini natrijevog hidroksida. Vlakna su, nakon razdvajanja, ispiranja u vodi i sušenja na sobnoj temperaturi, odrezana na duljine od 1,2 i 3 cm i takva su se dodala mortu. Napravljeno je 6 mješavina ojačanim vlaknima te jedna standardna mješavina morta (etalon). Ispitala su im se svojstva u očvrslom stanju, čvrstoća na savijanje i tlačna čvrstoća.

Rezultati ispitivanja, tlačne čvrstoće, pokazali su da standardna mješavina morta ima bolje rezultate.

Dodavanje vlakana u mješavinu značajno utječe na povećavanje žilavosti morta, što se vidi iz dijagrama naprezanje – pomak. Rezultati ispitivanja također pokazuju da se povećanjem količine vlakana, čvrstoća na savijanje i tlak smanjuje.

Uspoređeni su rezultati ispitivanja berbe brnistre iz 2017. i 2018. godine sa 2019. godinom. Vlakna su u sva 3 slučaja tretirana u 5 % otopini NaOH. Čvrstoća na savijanje i tlak ne odstupaju značajno u dobivenim rezultatima. Razlike mogu biti uzrokovane kvalitetom i starosti ubranih grančica brnistre, kao i kvalitetom izrade samih uzoraka.

Prema ovom istraživanju ovakav mort ojačan vlaknima brnistre daje dobre izgled u daljnoj upotrebi, međutim potrebno je još utvrditi optimalnu količinu i duljinu vlakana kao i način njihove obrade.



## 9. LITERATURA:

- [1] <https://www.podovi.org/evolucija-betona-u-armirani-i-mikroarmirani-beton/>
- [2] <https://www.podovi.org/armiranje-i-mikroarmiranje-bolje-performanse-betona-i-usteda-materijala/>
- [3] Petitjean, J.; Resplendino, J.: French recommendations for UltraHigh PerformanceFiber-Reinforced Concretes, Proceeding of 6th International Symposium on Utilization of High Strength/High Performance Concrete, Leipzig, Germany, 2002, 485-499
- [4] Ukrainczyk, V.: Beton - struktura, svojstva tehnologija, Alcor, Zagreb, 1994.
- [5] GFOS: Predavanje-Betoni- posebnih- namjena-3.pdf Mikroarmirani beton, 2017./18
- [6] <https://hr.urspraha-stavebnictvi.cz/uporaba-betona-ojacanog-vlaknima-proucavamo-nijanse-proizvodnje-i-opseg-armiranog-materijala-400>
- [7] <https://www.bitpromet.hr/polipropilenska-vlakna-za-glazuru-900-gr/prid/628>
- [8] Marčelja, V., Beton i komponente, Tehnička knjiga, Zagreb, 1986.
- [9] Beslač, J., Halavanja, I., Priručnik za beton, DGKH, Zagreb, 1990.
- [10] IPCC, Intergovernmental panel on climate change, climate change 4th assessment report; 2007.
- [11] Rujnić- Sokele M., Šercer, M., Bujanić, B. Utjecaj recikliranja na mehanička svojstva drvno- plastomernoga kompozita
- [12] Amar K. Mohanty, Manjusri, M., Drzal, L.T., Selke, S.E., Harte, B.R., and Hinrichsen, G.: Natural Fibers, Biopolymers, and Biocomposites
- [13] [https://www.goglas.com/search?q=jute&price=400\\_699&sort=cdn](https://www.goglas.com/search?q=jute&price=400_699&sort=cdn)
- [14] <https://www.lackovic.hr/sisal-vlakna.html>
- [15] Marić, G. Biokompoziti, PP predavanja
- [16] Komuraiah, A., Shyam Kumar, N., Durga Prasad, B.: Chemical composition of natural fibers and its influence on their mechanical properties, Mechanics of Composite Materials, 50 (2014) 3, pp. 359-376, <https://doi.org/10.1007/s11029-014-9422-2>.

- [17] L. Yan, Kasal, B., Huang, L.: A review of recent research on the use of cellulosic fibres, their fibre fabric reinforced cementitious, geo-polymer and polymer composites in civil engineering, 04/2016, <https://www.researchgate.net/publication/292604769>
- [18] [https://hr.wikipedia.org/wiki/Hemiceluloza\\_raspored\\_celuloze](https://hr.wikipedia.org/wiki/Hemiceluloza_raspored_celuloze)
- [19] [https://hr.wikipedia.org/wiki/Hemiceluloza\\_raspored\\_celuloze](https://hr.wikipedia.org/wiki/Hemiceluloza_raspored_celuloze) Natural Fiber Composites, Taylor & Francis Group, LLC, Boca Raton, FL, USA, 2016.
- [20] [https://hr.wikipedia.org/wiki/Hemiceluloza\\_raspored\\_celuloze](https://hr.wikipedia.org/wiki/Hemiceluloza_raspored_celuloze) V. K. Thakur, Green composites from natural resources, CRC Press, Taylor & Francis Group, Boca Raton, London, New York, 2013
- [21] Blekić, M. Režek Jambrak, A., Chemat, F.: Mikrovalna ekstrakcija bioaktivnih spojeva, Croat. J. Food Sci. Technol. (2011) 3 (I) 32-47
- [22] Bakri, B., Naharuddin, A.E.E. Putra, I., Renreng, H. Arsyad, A.A. Mochtar: Effect of microwave treatment on mechanical properties of coir fibers. Ser: Earth Environ. Sci. 175 012001.
- [23] Agrawal R, Saxena NS, Sharma KB, Thomas S, Sreekala MS (2000). Mater Sci Eng: 277: 77
- [24] Xue Li, Lope g. Tabil, Satyanarayan Panigrahi: Chemical treatments of natural fiber for use in natural fiber-reinforced composites: A review, J Polym Environ (2007) 15:25-33
- [25] J.C.F. Walker, Wood chemistry and cell wall ultra structure in primary wood processing. 1993, London: Chapman and Hall. 44-45.
- [27] Ray, D., Sarkar, B.K., Rana, A.K. et al. Effect of alkali treated jute fibres on composite properties. Bull Mater Sci 24, 129–135 (2001).  
<https://doi.org/10.1007/BF02710089>
- [28] ASTM, ASTM D3379 - 75(1989)e1 Standard Test Method for Tensile Strength and Young's Modulus for High Modulus Single Filament Materials. 1989, ASTM International: West Conshohocken, PA.
- [29] R.D.S.G. Campilho - Natural Fiber Composites 2016 by Taylor & Francis Group, LLC

- [30] Mwaikambo, L., Sustainable Composite Materials: Exploitation of Plant Resourced Materials for Industrial Application. 2009, VDM Publishing: Saarbrücken, Germany.
- [31] Wong, K.J., Yousif, B.F., and Low, K.O., Effects of alkali treatment on the interfacial adhesion of bamboo fibres. *Journal of Materials: Design and Applications*, 2010. 224: p. 139–48.
- [32] Mohanty, A., Misra, M., and Hinrichsen, G., Biofibres, biodegradable polymers and biocomposites: An overview. *Macromolecular Materials and Engineering*, 2000. 276(1): p. 1–24
- [33] Elenga, R.G., Djemia, P., Tingaud, D., Chauveau, T., Maniongui, J.G., and Dirras, G., Effects of alkali treatment on the microstructure, composition, and properties of the *Raffia textilis* fiber. *BioResources*, 2013. 8(2): p. 2934–49.
- [34] Khan, F. and Ahmad, S., Chemical modification and spectroscopic analysis of jute fibre. *Polymer Degradation and Stability*, 1996. 52(3): p. 335–40.
- [35] Šatović, F.: Brnistra (*Spartium junceum* L.) celulozovlaknata mediteranska biljka, *Poljoprivreda i šumarstvo*, XXXIV, 2-3 (1988), pp. 61-77.
- [36] Juradin, S., Boko, I.: Mogućnost ojačanja cementnog kompozita vlaknima brnistre, *Građevinar* 6/2018, DOI: <https://doi.org/10.14256/JCE.2293.2017>
- [37] <https://www.plantea.com.hr/brnistra/>
- [38] <https://www.panteek.com/CurtisFirst/pages/cfe298-4c2.htm>
- [39] Juradin, S., Boko I., Netinger Grubeša, I., Jozić, D., Mrakovčić, S.: Influence of harvesting time and maceration method of Spanish Broom (*Spartium junceum* L.) fibers on mechanical properties of reinforced cement mortar; *Construction and Building Materials* 225 (2019) 243–255; 2019 <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.07.207>
- [40] Kovačević, Z.; Krnčević, M.; Katović, A.; Katović, D.
- Brnistra - zaboravljena tekstilna sirovina // *Tekstil : časopis za tekstilnu tehnologiju i konfekciju*, 59 (2010), 9; 410-421 (međunarodna recenzija, pregledni rad, znanstveni)

[41] Vukojević, I. (2019). Svojstva morta i betona ojačanih vlaknima brnistre : diplomski rad (Diplomski rad). Preuzeto s <https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:123:383049>

[42] Grgurica, P. (2020). Prirodna vlakna brnistre u cementnom mortu : završni rad (Završni rad). Preuzeto s <https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:123:591709>