

НАСТАВНО-НАУЧНОМ ВЕЋУ
ГРАЂЕВИНСКОГ ФАКУЛТЕТА
УНИВЕРЗИТЕТА У БЕОГРАДУ

Предмет: Покретање поступка за верификацију техничког решења

Према Правилнику о стицању истраживачких и научних звања (Службени Гласник РС, бр. 159/2020) Прилог 2: Критеријуми за одређивање категорије научних публикација, обраћам се Наставно-научном већу Грађевинског факултета Универзитета у Београду са молбом да покрене поступак за верификацију техничког решења категорије М85 под називом:

**ТЕРМОИЗОЛАЦИОНИ ПАНЕЛИ НА БАЗИ БИЉНИХ ВЛАКАНА
*Miscanthus x giganteus***

М85 – Ново техничко решење у фази реализације

АУТОРИ:

В. проф. др Александар Савић, дипл. грађ. инж., Универзитет у Београду, Грађевински факултет, Булевар краља Александра 73, Београд

Др Драги Антонијевић, научни саветник, дипл. инж. маш., Универзитет у Београду, Иновациони центар Машинског факултета, Краљице Марије 16, Београд

Др Ивана Јелић, научни сарадник, дипл. хем., Институт за нуклеарне науке Винча, институт од националног значаја за Републику Србију, Универзитет у Београду, Мике Петровића Аласа 12-14, Винча, Београд

Проф. др Димитрије Закић, дипл. грађ. инж., Универзитет у Београду, Грађевински факултет, Булевар краља Александра 73, Београд

Подносилац захтева



В. проф. др Александар Савић, дипл. грађ. инж.

ТЕХНИЧКО РЕШЕЊЕ

M85 – Ново техничко решење у фази реализације

ТЕРМОИЗОЛАЦИОНИ ПАНЕЛИ НА БАЗИ БИЉНИХ ВЛАКАНА

Miscanthus x giganteus

АУТОРИ:

В. проф. др Александар Савић, дипл. грађ. инж., Универзитет у Београду, Грађевински факултет, Булевар краља Александра 73, Београд

Др Драги Антонијевић, научни саветник, дипл. инж. маш., Универзитет у Београду, Иновациони центар Машинског факултета, Краљице Марије 16, Београд

Др Ивана Јелић, научни сарадник, дипл. хем., Институт за нуклеарне науке Винча, институт од националног значаја за Републику Србију, Универзитет у Београду, Мике Петровића Аласа 12-14, Винча, Београд

Проф. др Димитрије Закић, дипл. грађ. инж., Универзитет у Београду, Грађевински факултет, Булевар краља Александра 73, Београд

Београд, март 2023. године

Садржај

1	Аутори техничког решења	3
2	Назив техничког решења	3
3	Кључне речи	3
4	За кога је решење рађено	3
5	Година када је решење комплетирано	3
6	Година када је решење почело да се примењује	3
7	Област и научна дисциплина на коју се техничко решење односи	4
8	Проблем који се техничким решењем решава	4
9	Стање решености проблема у свету	5
10	Опис техничког решења	8
10.1	Састав и примена материјала	8
10.2	Експериментално испитивање.....	11
10.3	Резултати експерименталног испитивања.....	18
10.4	Закључци и примена техничког решења.....	23
11	Литература.....	24
12	Техничка документација - Прилози	27

1) АУТОРИ ТЕХНИЧКОГ РЕШЕЊА

- В. проф. др Александар Савић, дипл. грађ. инж., Универзитет у Београду, Грађевински факултет, Булевар краља Александра 73, Београд
- Др Драги Антонијевић, научни саветник, дипл. инж. маш., Универзитет у Београду, Иновациони центар Машинског факултета, Краљице Марије 16, Београд
- Др Ивана Јелић, научни сарадник, дипл. хем., Институт за нуклеарне науке Винча, институт од националног значаја за Републику Србију, Универзитет у Београду, Мике Петровића Аласа 12-14, Винча, Београд
- В. проф. др Димитрије Закић, дипл. грађ. инж., Универзитет у Београду, Грађевински факултет, Булевар краља Александра 73, Београд

2) НАЗИВ ТЕХНИЧКОГ РЕШЕЊА

ТЕРМОИЗОЛАЦИОНИ ПАНЕЛИ НА БАЗИ БИЉНИХ ВЛАКАНА *Miscanthus x giganteus*

Техничко решење у категорији М85 - ново техничко решење у фази реализације, тестирано у овлашћеној институцији, погону, производној линији или лабораторији, или је тестирано на одређеном објекту.

3) КЉУЧНЕ РЕЧИ

Топлотна изолација, Енергетска ефикасност, Биокompозити

4) ЗА КОГА ЈЕ РЕШЕЊЕ РАЂЕНО

Техничко решење је рађено за грађевинску фирму Гиконт д.о.о. Београд, са седиштем на адреси: Космајска 29а, 11251 Остружница, Обреновац. Ова грађевинска фирма бави се израдом монтажних кућа израђених од армираног бетона са уграђеном термоизолацијом, што их чини дуговечним и енергетски ефикасним кућама. У својству доказа техничког решења прилаже се потврда о прихватању пружене услуге од стране грађевинске фирме Гиконт д.о.о., као и доказ о публикавању решења у часопису категорије М21а:

Savic, A., Antonijevic, D., Jelic, I., Zakic, D. (2020). Thermomechanical behavior of bio-fiber composite thermal insulation panels. *Energy and Buildings*, 229, 110511, 1-7. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2020.110511>

5) ГОДИНА КАДА ЈЕ РЕШЕЊЕ КОМПЛЕТИРАНО

2022. година (објављени резултати истраживања у М21а публикацији)

6) ГОДИНА КАДА ЈЕ РЕШЕЊЕ ПОЧЕЛО ДА ПРИМЕЊУЈЕ И ОД КОГА

Планирана примена - 2022. година, Гиконт д.о.о. Београд

(техничко решење у реализацији)

7) ОБЛАСТ И НАУЧНА ДИСЦИПЛИНА НА КОЈУ СЕ ТЕХНИЧКО РЕШЕЊЕ ОДНОСИ

Област: Техничко-технолошке науке. Ужа област (научна дисциплина): Грађевински материјали.

8) ПРОБЛЕМ КОЈИ СЕ ТЕХНИЧКИМ РЕШЕЊЕМ РЕШАВА

Енергетски одржива градња представља смањење енергетских потреба у зградарству без смањења квалитета грађења и становања [1]. Она је један од значајних сегмената одрживог развоја и укључује употребу грађевинских материјала који нису штетни по околину и који чувају ресурсе, реконструкцију постојећих и изградњу нових енергетски ефикасних зграда, као и рационално уклањање постојећих објеката и поновну употребу материјала након санације или престанка коришћења и рушења грађевина.

Деценијама уназад, највећа количина финалне енергије троши се у области грађевинарства, посебно у зградарству за загревање, хлађење, вентилацију и осветљење простора. Стамбени сектор у Европској Унији (ЕУ) је извор скоро четвртине емисије угљен диоксида, где се енергија за грејање користи чак 60–80%. Уколико би се енергетска потрошња смањила за 20%, то би довело и до смањења емисије угљен диоксида и других гасова заслужних за ефекат стаклене баште за око 12,5% [1].

Будући изазов енергетски ефикасне градње предствљају нови еколошки термоизолациони материјали, првенствено базирани на природним органским материјалима. Такође, интензиван раст светске популације и недостатак сировина за производњу грађевинског материјала, воде ка повратку употребе скоро заборављених природних материјала у зградарству [1].

Императиви термоизолационих материјала су функција очувања енергије смањењем топлотних губитака (или добитака када је то потребно), контрола температуре површина, спречавање протока паре и кондензације воде на хладним површинама, као и позитиван утицај на рад тзв. *HVAC* система (*Heating, Ventilation, & Air Conditioning*). Поред одговарајућих термоизолационих својстава, овакви материјали морају да задовоље и низ других битних карактеристика и захтева како би били ефикасни и конкурентни на тржишту. То су, на пример, задовољавајућа чврстоћа, висока порозност, мало упијање воде, задовољавајућа проводљивост паре и гасова, отпорност на дејство мраза, хемијска и биолошка постојаност, нетоксичност, задовољавајућа отпорност на дејство пожара, прихватљива цена, могућност рециклаже и слично [2].

Основни циљ овог техничког решења је примена влакана екоремедијационе биомасе *Miscanthus x giganteus*, која током и након санације девастираних земљишта, на пример јаловишта и пепелишта, представља нус-производ, за производњу термоизолационог материјала. Захтев корисника, осим употребе екоремедијационе биомасе *Miscanthus x giganteus*, подразумевао је и израду механички отпорних, лаких за манипулацију и уградњу термоизолационих панела, стабилних карактеристика, као и задовољавајуће економске исплативости и одрживости. Поред тога, било је потребно да панели буду погодни за домаће временске прилике, односно температурне услове.

Производњом и применом оваквог материјала очекује се значајно снижавање трошкова у односу на већину конвенционалних термоизолационих материјала, уз велики допринос захтевима одрживог развоја.

9) СТАЊЕ РЕШЕНОСТИ ПРОБЛЕМА У СВЕТУ

Један од најважнијих изазова зградарства у будућности представља смањење потрошње енергије у свим животним фазама објекта, од изградње до рушења. Према Програму Уједињених нација за животну средину процењено је да се у зградарству искористи око 40% енергије на глобалном нивоу, док је овај сектор одговоран за преко 30% емисије гасова стаклене баште [3]. Грађевински сектор тренутно пролази кроз дубоке трансформације тако да ће бити у позицији да предлаже решења у складу са новим прописима и захтевима корисника који се тичу утицаја на животну средину и здравље. Развој иновативних грађевинских материјала, званих еко- или био-материјали, који поштују здравље и воде ка побољшању комфора у зградарству, са смањеним утицајем на животну средину, представља велики изазов [4].

У Европи је иницирано неколико еколошких политика, нпр. Директива о енергетским перформансама зграда и Директива о енергетској ефикасности, које имају за циљ смањење потрошње енергије за грејање и хлађење за 12% до 2030. год., односно 17% до 2050. године у поређењу са 2005. годином. Захтеви су посебно усмерени ка побољшању термоизолације, односно термичких својстава омотача зграде [3]. Унапређење топлотне изолације зграда је један од најефикаснијих начина уштеде енергије, кроз смањење топлотних губитака кроз термички омотач зграде [5].

Концепт одрживости у сектору зградарства, подразумева производњу термоизолационих материјала од природних или рециклираних материјала. Овакав приступ може да буде посебно користан у земљама у развоју, које често у пракси немају добро спроведене политике рециклаже, као и услед проблема одлагања великих количина пољопривредних и индустријских нуспроизвода или отпада [3]. Већина постојећих термоизолационих материјала представља необновљиве сировине (нпр. они који потичу од петрохемијских производа као што је полистирен), те су обновљиви, еколошки прихватљиви, економични и високо-топлотно отпорни изолациони материјали веома тражени [5]. Решење би могло да буде коришћење обновљивих сировина [4].

У многим земљама у развоју, попут Кине, Индије, Бразила, брз раст пољопривредне производње у комбинацији са смањењем потрошње биомасе за грејање (где је биомаса често замењена природним гасом или течном нафтом) стављају на располагање велике количине биомасе, које тек треба да нађу адекватно искоришћење. Стога, коришћење биомасе као термоизолационог материјала постаје веома интересантна опција која истовремено омогућава избегавање *in situ* сагоревања.

Истраживање и развој тзв. биоизолација за примену у зградарству има релативно кратку историју. Према истраживању аутора на ову тему, већина истраживања спроведена је после 1998. године, али се веома брзо развија у последњих 15 година, привукавши интересовање истраживача из разних земаља [5]. У последњих 30 година рађене су бројне студије у циљу развоја употребе биљних влакана (нпр. лан, сисал и конопља) у циљу ојачања грађевинских материјала као замене за конвенционална синтетичка влакна (метална, минерална или полимерна). Уочен је велики потенцијал ових влакана за смањење пластичног скупљања и побољшање ударне чврстоће и дуктилности код цементних композита, иако се неким детаљима и даље треба позабавити, посебно трајношћу природних влакана у алкалној средини минералног матрикса [4].

Топлотна изолациона својства неких зелених (природних) материјала и неких пољопривредних и индустријских нуспроизвода или се ретко користе у савременој пракси иако су у прошлости имали широку употребу или нису довољно испитана. Употреба оваквих производа није широко распрострањена и, врло често, ограничена је на лабораторијска испитивања [3].

У последње време све је веће интересовање за термоизолационе материјале на бази биомасе. На пример, стабљика пшенице и кукуруза или бале сламе дуго су се користе као грађевински изолациони материјали због своје шупље структуре, ниске цене, мале запреминске масе и ниске топлотне проводљивости [5].

Пољопривредни нуспроизводи би такође могли да обезбеде лаке агрегате који би могли да буду уграђени у минералне матриксе као замена за конвенционалне минералне агрегате. Спроведено је неколико студија о развоју употребе грађевинског материјала, нпр. стабљике конопље, дрвенасти агрегати екстраховани из стабљике конопље, као и нуспроизвод процеса екстракције влакана конопље. Веома добри резултати су постигнути са бетоном од конопље, добијеним уз коришћење креча као везива [4]. Топлотна проводљивост била је компатибилна топлотној проводљивости изолационог зида, али би његове енергетске перформансе могле да буду још боље захваљујући специфичном хигротермалном понашању чији механизам још није прецизно објашњен [4].

Средње вредности топлотне проводљивости чистих целулозних материјала, према литературним подацима, углавном се крећу у опсегу 0,030 – 0,040 W/(m·K) [1,3], што указује на потенцијално веома добре карактеристике термоизолационих материјала сачињених употребом ових сировина. Осим тога, класа запаљивости ових материјала је најчешће Б2 уз додаток борних соли, што значи да припадају нормално горивој групи материјала [1]. Вредности топлотне проводљивости чистих целулозних, односно лигноцелулозних материјала крећу се у интервалу ниских и задовољавајућих вредности [1], што указује на потенцијално веома добра термоизолациона својства материјала сачињених на бази *Miscanthus x giganteus*-а. На основу доступне литературе (Табела 1) према досадашњим искуствима са традиционалним материјалима на бази биљних влакана, као и на основу нових истраживања са сличном биомасом (нпр. трска, слама, рогоз, лан, конопља, јута, кукуруз, сунцокрет, неке врсте *Miscanthus*-а и сл.) [3,6-11], очекивано је да ће термоизолација богата целулозом, односно лигноцелулозним влакнима као што је *Miscanthus x giganteus* бити посебно корисна у Републици Србији, на Балкану, али и шире.

Табела 1. Главне карактеристике конвенционалних и термоизолационих материјала на бази биомасе [3,6-11]

Материјал	Запреминска маса [kg/m ³]	Топлотна проводљивост [W/(m·K)]	Специфична топлота [kJ/(kg·K)]	μ фактор – отпорност на дифузију водене паре	Запаљивост (на основу EN 13051 и DIN 4102)
Камена вуна	30-200	0,033-0,041	0,8-1,0	<1	A1
Екструдирани полистирен (XPS)	30-45	0,029-0,037	1,45-1,70	80-200	E
Експандирани полистирен (EPS)	15-35	0,028-0,037	1,25	80-200	E
Рециклирано стакло	100-165	0,038-0,05	1,0	Веома висок	A1

Материјал	Запреминска маса [kg/m ³]	Топлотна проводљивост [W/(m·K)]	Специфична топлота [kJ/(kg·K)]	<i>μ</i> фактор – отпорност на дифузију водене паре	Запаљивост (на основу EN 13051 и DIN 4102)
Рециклирана <i>PET</i> амбалажа	15-60	0,034-0,039	1,2	3	B2
Рециклирани памук	25-45	0,039-0,044	1,6	1-2	E
Стабљике памука	150-450	0,059-0,082	N/A*	N/A	N/A
Бала сламе	80-120	0,06-0,10	0,6	<1	B2
Дрво	550-900	0,14-0,70	2,4-2,8	50-70	B2
Дрвена дува	300-350	0,08-0,14	N/A	3-5	B2
Трска	130-190	0,045-0,056	1,2	1-2	E
Целулоза (чиста)	30-60	0,033-0,04	1,3-2,1	1-5	B2
Конопља	20-90	0,04-0,05	1,5-1,8	1-2	B2
Плоче од плуте	130-220	0,04-0,045	1,7-2,1	N/A	B1
Кукурузни клип	170-330	0,10	N/A	N/A	N/A
Пиринчане љуске	105-115	0,05	N/A	3	B2
Мискантус панели (са минералним везивом)	1050-1270	0,06-0,11	1,4-1,8	N/A	B1

* N/A – није доступно (енг. *not available*)

10) ОПИС ТЕХНИЧКОГ РЕШЕЊА

10.1. Састав и припрема материјала

Нови композитни термоизолациони неконструкциони материјал припремљен је мешањем различитих односа биомасе *Miscanthus x giganteus*, чврстих минералних везива, пуцоланских материјала и одговарајуће количине воде за уградњу, уз што мању количину цементног везива с обзиром да је цемент нискоодржив и енергетски неефикасан материјал услед коришћења велике количине топлоте за његову производњу (Слика 1) [12].



Слика 1. Прототип термоизолационог панела [12]

Miscanthus x giganteus спада у породицу трава са бројним карактеристикама трске [12]. *Miscanthus x giganteus* је хибрид настао укрштањем врста *Miscanthus sinensis* и *Miscanthus sacchariflorus* [12]. У току вегетативне сезоне може да нарасте и до висине од око 3 m и у том периоду постижу се први приноси, док је за потпуно успостављање плантажа потребно од 3 до 6 година. Након овог периода постиже се континуална стопа приноса у периоду и до 25 година без икаквих захтевних технологија култивације током датог периода, чинећи ову биљку изузетно економичном и једноставном за гајење [12-13].

Стабљика ове биљке веома је богата лигноцелулозним влакнима. Услед морфолошке структуре, односно постојања шупљина у стабљикама, обезбеђен је континуални процес микро-кондензације и испаравања, те ово природно влакно има одређени ниво саморегулације, што је тешко постићи код синтетичких материјала [14].

С обзиром на то да је производни процес, односно култивација и припрема *Miscanthus x giganteus* влакана за даље коришћење, веома једноставан и кратак, емисија угљен диоксида је изузетно мала уз минималну потрошњу електричне или других видова енергије, што представља далеко мањи утрошак примарне енергије у поређењу са производњом минералне вуне или неких синтетичких органских (полимерних) изолационих материјала [1].

На основу многобројних истраживања, тешке метале из оваквих земљишта *Miscanthus x giganteus* задржава у великој мери у ризому (минималне количине тешких метала доспевају до стабљике биљке и то у мери адекватној акумулацији на недевастираним земљиштима) [15]. Ово управо омогућава коришћење надземних делова уместо њиховог даљег категорисања и третмана као отпадних материја чиме се смањују трошкови потенцијалне даље употребе. Ово се посебно односи на грађевинску индустрију, с обзиром да не постоји правилник који одређује максимално дозвољене количине (МДК вредности) тешких метала у грађевинским материјалима. Треба имати у виду чињеницу да грађевински материјали често садрже одређене количине тешких метала. Наиме, обзиром

да они претежно потичу од материјала заступљених у природи, садржај појединих тешких метала у њима варира у зависности од типа сировине.

Коришћењем овакве биомасе значајно се умањују трошкови производње потенцијалног термоизолационог материјала у односу на стандардно коришћене термоизолационе материјале као што су стаклена и камена вуна или органски полимери (експандирани и екструдирани полистирени). С друге стране, употреба термоизолационих материјала на бази екоремедијационих биљних влакана доприноси принципима одрживог развоја, посебно еколошким параметрима, као што су смањење или рационалније коришћење природних ресурса и генерисање и третман отпада, као и повећање енергетске ефикасности процеса производње.

У сврху овог истраживања коришћене су стабљике *Miscanthus x giganteus-a*, с обзиром да их корисник има на располагању у великим количинама, које жели да употреби за производњу еколошки прихватљивог, економски исплативог и термички ефикасног материјала за изолацију стамбених објеката на домаћем поднебљу.

Коришћена су минерална везива на бази цемента и хидратисаног креча. Комерцијално цементно везиво, примењено је у четири смеше, док је у осталих 12 узорака коришћено везиво на бази креча.

У припреми композита коришћено је цементно везиво произвођача *Lafarge* – Бечин, по спецификацији састава:

1. Гипс (калцијум сулфат дихидрат, $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) – 3-5%,
2. Кречњак (калцит, CaCO_3 са примесама) – 35-45%,
3. Згура високих пећи – 5-10%,
4. Цементни клинкер – остатак до 100%,
5. Аеранти/адитиви – 1000-1500 g/t (водени раствор органских супстанци).

Овако припремљено везиво, за разлику од чистог цементног клинкера, садржи мању количину сировине која се загрева до температуре од 1450°C , на којој почиње енергетски захтеван процес синтеровања. С друге стране, процес производње примењеног везива подразумева и мању емисију угљен диоксида, управо због коришћења мањих количина фосилних горива [16].

Кречно везиво, коришћено у осталим смешама, припремљено је додавањем 30% (масених) воде према спецификацији произвођача, а овај проценат је експериментално проверен сушењем и мерењем сувог остатка. С обзиром да кречни малтери имају ниже топлотне проводљивости ($0,81 \text{ W}/(\text{m K})$) од цементних малтера ($1,40 \text{ W}/(\text{m K})$) [17], разматрано је коришћење кречног везива као повољнијег у односу на енергетску ефикасност процеса производње, али и ефикаснијег у испуњавању задатих циљева. Осим тога, употреба хидратисаног креча као везива стабилизује *Miscanthus x giganteus* стварањем минерализоване мембране, штитећи био-влакна од пропадања, запаљивости или утицаја инсеката и глодара [18].

Употреба природних или вештачких, односно синтетичких пуцолана као делимичне замене Портланд цемента има врло позитиван економски и еколошки ефекат. Иако обично немају везивна (цементна) својства, доприносе повећању обрадивости и способности везивања смеше при хемијској реакцији са калцијум хидроксидом у присуству воде, побољшавају структуру пора и повећавају трајност, односно отпорност композита на различите утицаје [2]. У припреми панела, као пуцолански материјали коришћени су синтетички зеолит и летећи пепео.

Кристали зеолита састоје се од мноштва пора и финих канала, што резултира релативно великом специфичном површином [19]. Зеолити показују добра пуцоланска својства у алкалним суспензијама [20] уз одговарајућу адсорпцију воде и гасова [19], минимизирајући ризик од стварања плесни и ослобађања непријатних мириса [21]. Зеолити такође показују изолациона својства и могу да се користе за термоизолационе премазе [22]. У овом истраживању коришћен је синтетички зеолит гранулације од 4 до 10 mm са следећом хемијском спецификацијом:

- 1) Вода (макс. 22%),
- 2) Алуминијум оксид (34-37%),
- 3) Натријум оксид (21-23%),
- 4) Силицијум диоксид (41-43%),
- 5) Гвожђе (макс. 150 ppm).

Пуцоланска активност коришћеног зеолита претходно је утврђена према стандарду SRPS В.С1.018:2015 [23]. Овај тест је показао да је након третмана достигнута чврстоћа при притиску од 4,7 МПа, што је било врло близу доње границе од 5,0 МПа за класу пуцолана P5 прописане наведеним стандардом.

Летећи пепео је фини аморфни прах, величине честица обично од 1 до 150 μm , добијен као нуспроизвод сагоревања угља у термоелектранама [24]. Као отпад, одлаже се на депонијама које се обично налазе у близини термоелектрана и представља потенцијални хазард [25]. Најчешће се користи као пуцолански материјал у производњи Портланд цемента. Његовим коришћењем смањује се потрошња необновљивих природних пуцолана, што има и економски значај [25]. Коришћени летећи пепео пореклом је из термоелектране „Никола Тесла Б”, Обреновац, Република Србија, са следећом хемијском спецификацијом:

- 1) Силицијум диоксид (64,14%),
- 2) Алуминијум оксид (19,22%),
- 3) Гвожђе(III) оксид (4,35%),
- 4) Титанијум диоксид (0,16%),
- 5) Калцијум оксид (8,32%),
- 6) Магнезијум оксид (0,01%),
- 7) Натријум оксид (0,36%),
- 8) Калијум оксид (0,66%),
- 9) Фосфор пентоксид (0,17%).

Основни услов за употребу летећег пепела као додатка Портланд цементу [24] је да збир силицијум диоксида, алуминијум оксида и гвожђе(III) оксида мора да буде најмање 70% за летећи пепео класе F или 50% за класу C према стандарду ASTM C618 – 22 [26]. У коришћеном летећем пепелу збир наведених оксида задовољавао је прописани услов (> 70%). Претходни тестови пуцоланских својстава, изведених према стандарду SRPS В.С1.018:2015 [23] показали су да је чврстоћа на притисак достигла вредност од 9,1 МПа, што указује на веома добру пуцоланску активност, близу класе P10 пуцолана са 10 МПа као доњом границом [20,23].

10.2. Експериментално испитивање

Експериментални део истраживања неопходних за дефинисање оптималних параметара термоизолационих панела састојао се од:

- 1) Припреме серије смеша композитног термоизолационог материјала.
- 2) Одређивања термичких карактеристика термоизолационих панела (израђених од тих смеша).
- 3) Одређивања физичко-механичких својстава [27] термоизолационог материјала:
 - Запреминска маса – укупна (γ_u), почетна, односно након раскалупљивања (γ_0) и запреминска маса након сушења ван калупа у трајању од 90 дана (γ_{90});
 - Апсолутна влажност узорака (H_a) након 7 дана сушења ван калупа;
 - Упијање воде (u);
 - Чврстоћа материјала при статичким оптерећењима:
 - Чврстоћа при притиску;
 - Чврстоћа при затезању савијањем.
- 4) Процене трајности термоизолационог материјала.

10.2.1. Припрема узорака

Miscanthus x giganteus је пре почетка експеримента посечен и сушен на ваздуху месец дана у летњем периоду. За потребе експеримената овако осушена влакна *Miscanthus x giganteus*-а затим су уситњена и просејана. Коришћено је иверје гранулације 300 mm са примесам дужих тањих влакана, која су вертикално прошла кроз сито наведеног промера (Слика 2). Услед тога, у смеси су присутна и дужа влакна *Miscanthus x giganteus*-а, која могу да обезбеде већу порозност материјала уз задржавање веће количине ваздуха као слабог проводника топлоте, као и већу чврстоћу материјала [28-29].



Слика 2. Уситњени *Miscanthus x giganteus*

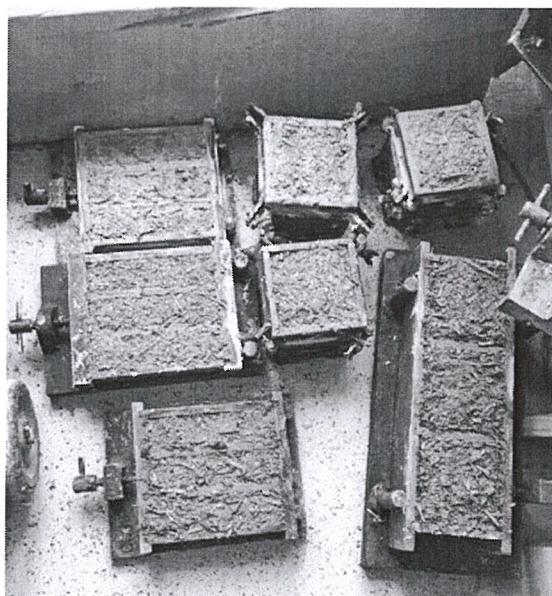
Битно је напоменути да се у претходним истраживањима *Miscanthus x giganteus* показао отпорним на базну средину и присуство силиката, што је од изузетне важности с обзиром да се композит припрема мешањем дате биомасе и базног везива [30-31]. С друге стране, отпорност према силицијум диоксиду је битна због касније употребе панела и њиховог контакта са стандардним грађевинским материјалима као што су нпр. малтер или бетон.

За потребе експеримената коришћене су три врсте калупа у складу са стандардима SRPS EN 196-1:2018 [32] и SRPS EN 12390-1:2018 [33]:

- Панел страница $500 \times 500 \times 60$ mm;
- Коцке странице 100 mm;
- Призме страница $160 \times 40 \times 40$ mm.

Сва физичко-механичка испитивања су рађена у дупликату за узорке облика коцке, а за узорке облика призми у трипликату и резултати су представљени као средње вредности.

На Слици 3. приказани су неки од узорака коришћених за физичко-механичка испитивања.



Слика 3. Примери узорака облика коцки и призми испитиваних композита

Направљене су четири групе смеша, а свака се састојала од четири серије, чиме је обезбеђено укупно 16 серија. Смеше изолационих композита различитих састава добијене су мешањем био-влакана *Miscanthus x giganteus* (BF), цементног (C) или кречног (L) везива (B за сва везива/смеше пуцолана), зеолита (Z) или летећег пепела (FA) као пуцолана и воде (W). Портланд цемент коришћен је у само четири серије како би се повећала енергетска ефикасност произведене топлотне изолације.

Масени односи компоненти дати су у Табели 2.

Табела 2. Масени односи компоненти узорака по серијама

Серија	BF [g]	C [g]	L [g]	FA [g]	Z [g]	W [g]	B [g]	BF+B [g]	B:BF [%]	B:BF (масени однос)	BF у пасти [%]
MC1	200	600	-	-	-	300	600	800	33,33	0,67	25,00
MC2	400	420	-	-	180	300	600	1000	66,67	1,33	40,00
MC3	300	480	-	-	180	300	660	960	45,45	0,91	31,25
MC4	200	480	-	-	120	300	600	800	33,33	0,67	25,00
ML1	300	-	880	-	-	300	880	1180	34,09	0,68	25,42
ML2	400	-	680	-	-	300	680	1080	58,82	1,18	37,04
ML3	300	-	680	-	-	300	680	980	44,12	0,88	30,61
ML4	300	-	900	-	-	300	900	1200	33,33	0,67	25,00
MLZ1	300	-	700	-	180	300	880	1180	34,09	0,68	25,42
MLZ2	400	-	480	-	200	300	680	1080	58,82	1,18	37,04
MLZ3	300	-	500	-	180	300	680	980	44,12	0,88	30,61
MLZ4	300	-	500	-	400	300	900	1200	33,33	0,67	25,00
MLFA1	300	-	700	180	-	300	880	1180	34,09	0,68	25,42
MLFA2	400	-	480	200	-	300	680	1080	58,82	1,18	37,04
MLFA3	300	-	500	180	-	300	680	980	44,12	0,88	30,61
MLFA4	300	-	500	400	-	300	900	1200	33,33	0,67	25,00

10.2.2. Одређивање термичких карактеристика

Одређивање термичких карактеристика термоизолационих панела од влакана *Miscanthus x giganteus*-а, и то топлотне проводљивости, λ [W/(mK)] и топлотне дифузивности, a [m²/s], извршено је према стандарду ISO 8302:1991 [34]. Према задатим захтевима наведених стандарда, израђен је узорак димензија 500 × 500 mm, дебљине 60 mm након сушења до константе масе (Слика 1). Након сушења наведени панел испитиван је методом *Hot Plate*, помоћу топлотних флуксметара, у квази-стационарном стању.

Коришћена је следећа мерна и регулациона опрема:

- стандардне испитне коморе – топла и хладна;
- термостат са водом;

- расхладна тела;
- термо-парови Cu-CuNi, пречника жице 0,3 mm;
- топлотни флуksметри, *TNO TH Delft*, број F3g (грејана страна) и F5n (хладнија, негрејана страна);
- дигитални mV-метар, *Keithley*.

Након одређивања топлотне проводљивости на бази појединачних мерења, израчунавана је лабораторијска средња вредност топлотне проводљивости.

Топлотна дифузивност је термичка карактеристика материјала која показује како он променом температуре реагује на провођење топлоте. Она описује понашање слоја изолационог материјала у условима нестационарног провођења топлоте (односно његовог прогревања или охлађивања), у смислу динамике кретања топлотног таласа кроз посматрани материјал. Вредност топлотне дифузивности изолационог материјала кључна је за одређивање термичке инерције спољних зидова зграде и постизање услова комфора унутар зграде.

Топлотна дифузивност одређивана је рачунски, на основу претходно одређених вредности топлотне проводљивости λ [W/(mK)], запреминске масе ρ [kg/m³] и специфичног топлотног капацитета посматраног узорка c [J/(kgK)], као:

$$a = \frac{\lambda}{c \cdot \rho} \quad (1)$$

10.2.3. Одређивања физичко-механичких карактеристика

10.2.3.1. Одређивање запреминских маса и влажности узорка

Након одређивања димензија узорака (ширина, b ; висина, h и дужина, d) након сушења током 7 и 28 дана на ваздуху, израчунате су запреминске масе узорака и то укупна (γ_u) запреминска маса након уградње, почетна (γ_0) запреминска маса (након раскалупљивања после 7 дана) и запреминска маса након сушења ван калуца у трајању од 28 дана (γ_{28}). Поступак је изведен према стандардима SRPS EN 12350-6:2008 [35] и SRPS EN 12390-7:2010 [36].

10.2.3.2. Одређивање влажности узорка и упијања воде

Дефинисана је и апсолутна влажност узорака H_a након раскалупљивања после 7 дана на основу стандарда ASTM C 642 – 97 [37].

Запреминске масе прерачунате су према формулама [27]:

$$\gamma_u = m_u / V \text{ [kg/m}^3\text{]} \quad (2)$$

$$\gamma_0 = m_0 / V \text{ [kg/m}^3\text{]} \quad (3)$$

$$\gamma_{28} = m_{28} / V \text{ [kg/m}^3\text{]} \quad (4)$$

где је:

m_u – укупна (маса узорка након уградње), [kg];

m_0 – почетна маса (након раскалупљивања после 7 дана), [kg];

m_{28} – маса након сушења ван калуна током 28 дана, [kg].

Апсолутна влажност узорака (H_a), односно количина воде коју материјал садржи у свом систему пора, одређена је на основу једначине [27]:

$$H_a = \frac{m_{ov} - m_0}{m_0} \times 100 [\%] \quad (5)$$

где је:

m_{ov} - маса природно влажног узорка (усвојена вредност након раскалупљивања после 7 дана), [g];

m_0 - маса потпуно сувог узорка (усвојена вредност након сушења током 28 дана на ваздуху), [g].

Упијање воде одређено је тзв. методом постепеног потапања, која представља стандардизовану методу према стандарду ASTM C 642 – 97 [37]. Дата метода подразумева доливање воде у одређеним временским интервалима у посуду у којој се налази узорак осушен до константне масе и то до $\frac{1}{4}$ висине узорка, затим до $\frac{1}{2}$, па до $\frac{3}{4}$ и, на крају, до потпуног потапања узорка. Доливање воде се обично врши у двосатним временским интервалима.

Упијање воде представља однос масе упијене воде и масе површински сувог узорка и може да буде изражен у процентима [27]:

$$u = \frac{m_{ov} - m_e}{m_e} \times 100 [\%] \quad (6)$$

где је:

m_{ov} - маса водом засићеног узорка, [g];

m_e - маса потпуно сувог узорка (усвојена вредност након сушења током 28 дана на ваздуху), [g].

10.2.3.3. Одређивање чврстоће при статичким оптерећењима

Испитивањем сила лома материјала при статичким оптерећењима, односно граничног напрезања при притиску и при затезању савијањем одређене су чврстоће узорака коцки и призми [27]. Под чврстоћом материјала подразумева се његова способност да се супротстави дејству унутрашњих напона који се јављају под утицајем спољашњих сила или неких других фактора (скупљање, промена температуре и сл.).

Чврстоћа материјала при притиску, односно при напрезању при примењеној сили до тачке лома израчунава се према формули [27]:

$$f_p = P_{p,gr} / S_0, [N/mm^2, MPa] \quad (7)$$

где је:

f_p – чврстоћа (при притиску), [MPa];

$P_{p.gr}$ – примењена сила до тачке лома, [kN];

S_0 – почетна површина попречног пресека, односно површина на коју делује сила, [cm²].

За утврђивање чврстоће при притиску коришћени су узорци облика коцке почетних димензија странице 100 mm, као и узорци призми димензија 160 × 40 × 40 mm (половине узорака призми након испитивања чврстоће при затезању савијањем, о чему ће бити више речи у даљем тексту) према стандарду SRPS EN 12390-3:2010 [38] за узорке коцке и према стандарду SRPS EN 196-1:2017 [39] за узорке призме.

Испитивање чврстоће материјала при затезању савијањем спроведено је према стандарду SRPS EN 196-1:2017 [39]. При испитивању чврстоће материјала при затезању савијањем, обично се користе узорци призми који се оптереће једном силом у средини распона или двама концентрисаним силама у трећинама распона. У оба случаја чврстоћа материјала израчунава се према формули [27]:

$$f_{zs} = M_{gr} / W, \text{ [kN/cm}^2, \text{ MPa]} \quad (8)$$

где је:

M_{gr} – моменат савијања који одговара максималном (граничном) оптерећењу, [kNcm];

W – отпорни моменат попречног пресека узорка призме, [cm³].

У случају испитивања применом једне силе у средини распона (Слика 4.) израз за моменат савијања може да се прикаже једначином [27]:

$$M = P_{zs} \times l / 4, \text{ [kNcm]} \quad (9)$$

Односно, у граничном случају када долази до лома:

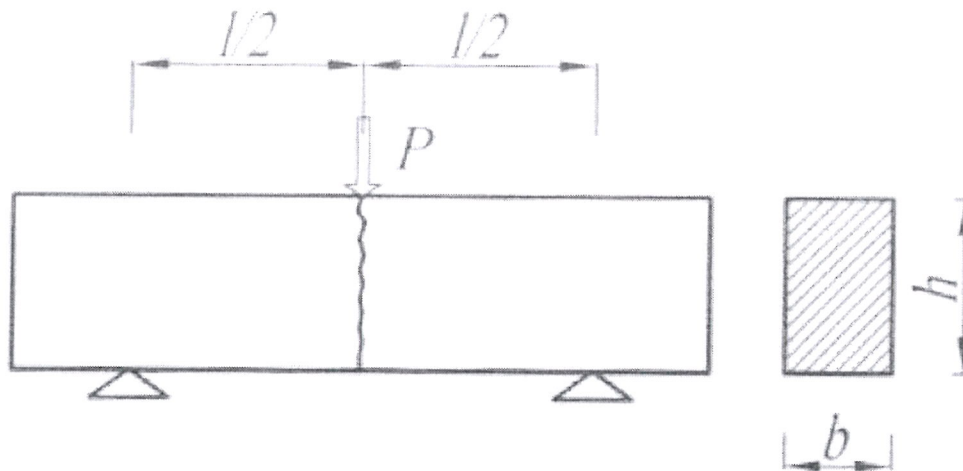
$$M_{gr} = P_{zs.gr} \times l / 4, \text{ [kNcm]} \quad (10)$$

где је:

$P_{zs.gr}$ – примењена гранична сила (до тачке лома), [kN];

l – распон тачака у којима је примењена сила, [$l = 10,67$ cm, према стандарду].

На Слици 4. приказана је шема испитивања чврстоће при затезању савијањем применом једне силе у средини узорка [27].



Слика 4. Испитивање чврстоће при затезању савијањем применом једне силе [27]

Отпорни моменат попречног пресека узорка призме исти је у оба случаја (примена једна или две силе) и рачуна се преко једначине:

$$W = b \times h^2 / 6, [\text{cm}^3] \quad (11)$$

где је:

b – ширина узорка, [cm];

h – висина узорка, [cm].

Убацавањем једначине (10) и (11) у једначину чврстоће материјала при затезању савијањем (8) добија се израз за лако прерачунавање чврстоће при затезању савијањем:

$$f_{zs} = \frac{3}{2} \cdot \frac{P_{zs,gr} \cdot l}{b \cdot h^2}, [\text{kN/cm}^2, \text{MPa}] \quad (12)$$

10.2.4. Процена трајности материјала: Отпорност на замрзавање-одмрзавање и карбонатизацију

Тренутно не постоје стандарди за процену трајности топлотних изолационих материјала на основу мерења отпорности на циклично замрзавање-одмрзавање. Због тога је испитивање изведено према европском стандарду EN 15304:2010 [40] за одређивање отпорности на замрзавање-одмрзавање аутоклавираног гас-бетона. Девет месеци стари узорци призми подвргнути су замрзавању и одмрзавању током 7 циклуса између две температуре: -20°C (18 сати) и $+60^\circ\text{C}$ (6 сати) у клима комори C700BCXPRO, FDM. Након овог третмана, испитивана је чврстоћа при притиску и затезању савијањем. За даљу процену трајности, узорци су потом подвргнути убрзаној карбонатизацији у специјалној комори са параметрима средине: 2% угљен-диоксида, температура 20°C и влажност 50%. Након карбонатизације, извршена је још једна упоредна процена утицаја на чврстоћу при притиску и чврстоћу при затезању савијањем.

10.3. Резултати експерименталног испитивања

10.3.1. Топлотна проводљивост и топлотна дифузивност

Усредњене вредности топлотне проводљивости одређене су у интервалу 0,08 – 0,10 W/(mK), што је у потпуности у складу са очекиваним и литературним вредностима за термоизолационе материјале на бази био-vlakana [1,3,41-42].

Вредности топлотне дифузивности одређене су у интервалу $0,07 - 0,17 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$, што је битно ниже, и тиме у термичком смислу повољније, него у случају комерцијалних синтетичких изолационих материјала.

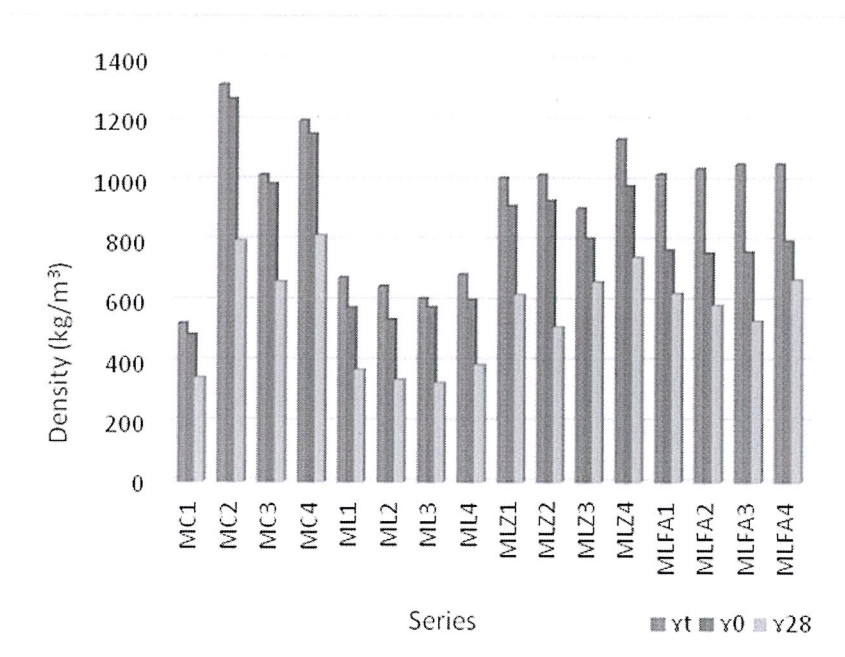
Дакле, установљено је да су термичке особине изолационих панела од vlakana мискантуса повољне и у складу са литературним вредностима сличних композитних биоматеријала, те да не представљају ограничавајући фактор за употребу. Закључено је да главно потенцијално ограничење за ширу употребу предложених изолационих панела, нису њихова топлотна проводљивост или топлотна дифузивност, већ њихове механичке карактеристике.

Стога је процена својстава термоизолационих панела различитих састава и пропорција компоненти усмерена на њихове физичко-механичке особине и отпорност.

10.3.2. Одређивање физичко-механичких карактеристика

10.3.2.1. Одређивање запреминских маса

Резултати мерења запреминске масе приказани су на Слици 5.



Слика 5. Запреминске масе свих серија у свежем стању (γ_t), након вађења из калупа (γ_0) и након сушења на ваздуху (γ_{28}) за узорке у облику коцке

Запреминске масе испитиваних смеша након сушења на ваздуху показале су вредности које су знатно веће од оних код конвенционалних термоизолационих материјала [41], али уобичајене за сличне изолационе композите на бази био-vlakana [43]. Најважнија

последица веће запреминске масе изолационог материјала је то што доприноси способности изолационог слоја да временски помери ширење топлотног таласа. Дакле, биокмпозитни изолациони материјали имају спорији температурни одзив и већу топлотну инерцију од конвенционалних термоизолација. Ова карактеристика је од виталног значаја за топлотни комфор и потрошњу енергије зграда изложених великим дневним температурним разликама.

Ипак, готово сви узорци облика коцке са кречним везивом показали су ниже запреминске масе након 28 дана сушења на ваздуху од узорака са цементним везивом, што указује на њихову већу порозност. Већа порозност може указивати на већи садржај ваздуха, а тиме и на повољну основу за нижу резултирајућу топлотну проводљивост изолационог материјала.

10.3.2.2. Одређивање влажности узорка и упијања воде

Резултати ових испитивања приказани су у Табели 3.

Табела 3. Влажност узорака и вредности упијања воде

Серија	Н _a [%]	u [%]
MC1	47,0	90,6
MC2	58,8	72,9
MC3	53,6	86,3
MC4	51,6	88,8
ML1	55,2	90,3
ML2	58,8	95,7
ML3	75,8	81,8
ML4	55,1	78,4
MLZ1	47,4	94,1
MLZ2	81,4	89,6
MLZ3	22,0	88,6
MLZ4	31,8	80,0
MLFA1	23,3	85,4
MLFA2	29,6	74,2
MLFA3	43,0	89,1
MLFA4	19,3	84,1

Добијени резултати садржаја влаге и упијања воде слични су вредностима других целулозних материјала за топлотну изолацију или грађевинских материјала на бази дрвета [44-45]. Предметне вредности су између вредности за конвенционалне термоизолационе материјале [46], као што је полистирен који се сматра водоотпорним, и минералне вуне (камене или стаклене), која представља материјал који није водоотпоран због високе моћи упијања воде. Повећање садржаја влаге код оваквих материјала, доприноси повећању њихове топлотне проводљивости. Осим тога, хигроскопна својства биокompatитне топлотне изолације резултирају респектабилним капацитетом пуфера за влагу, доприносећи контроли релативне влажности у просторији, топлотном комфору и квалитету ваздуха у затвореном простору, као и укупној трајности изолације [3].

10.3.2.3. Одређивање чврстоће при статичким оптерећењима

Вредности чврстоће при притиску добијене испитивањем узорака коцки, те вредности чврстоће при притиску и затезању савијањем добијене испитивањем узорака призми, приказане су у Табели 4.

Табела 4. Чврстоћа при притиску и савијању испитиваних серија узорака у облику коцке и призме

Група	Серија	Чврстоћа при притиску, коцке [кПа]	Чврстоћа при притиску, призме [кПа]	Чврстоћа при савијању, призме [кПа]
Серија израђена са цементним везивом	MC1	300	292	159
	MC2	728	518	111
	MC3	214	284	135
	MC4	1116	1349	631
Серија израђена од креча	ML1	33	205	263
	ML2	31	205	131
	ML3	32	188	135
	ML4	39	253	272
Серија справљена са кречом и зеолитом (слаба пуцоланска реакција)	MLZ1	33	211	135
	MLZ2	44	208	138
	MLZ3	40	139	138
	MLZ4	34	244	135

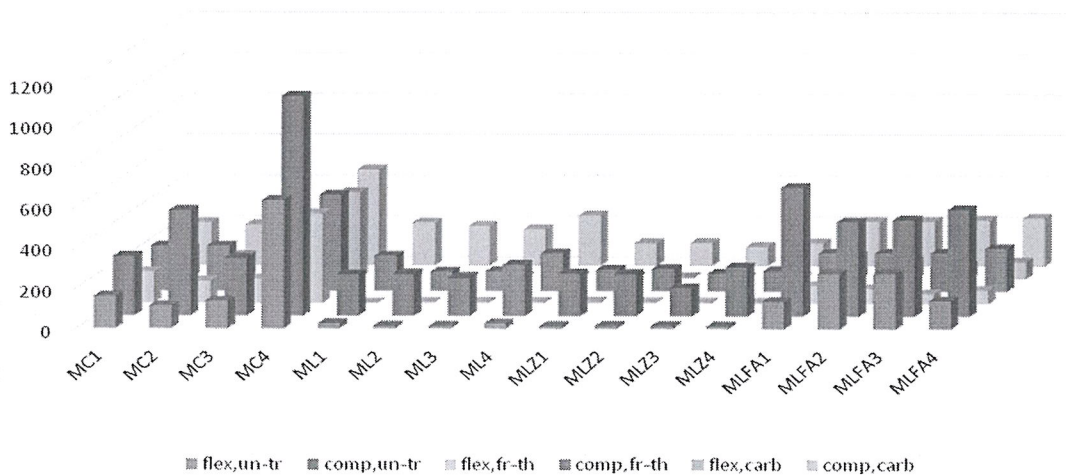
Група	Серија	Чврстоћа при притиску, коцке [кПа]	Чврстоћа при притиску, призме [кПа]	Чврстоћа при савијању, призме [кПа]
Серија справљена са кречом и летећим пепелом (добра пуцоланска реакција)	MLFA1	207	633	135
	MLFA2	273	465	274
	MLFA3	270	475	274
	MLFA4	353	526	139

У групама MC и MLFA, матрица калцираних силикатних хидратисаних минерала обезбеђује боља механичка својства [46]. У друге две групе, креч је створио карбонатну (CaCO_3) кору лошијих механичких својстава, комбиновану са још нереагованим кречом $\text{Ca}(\text{OH})_2$, док зеолит није показао значајнији утицај на механичка својства због свог слабог пуцоланског ефекта [19-20,46].

Ови резултати су очекивани, на основу поређења са сличним термоизолационим материјалима на био-бази [47-48]. Такође, треба напоменути да су добијене вредности биле сличне или боље од познатих чврстоћа конвенционалних изолационих материјала као што су полистирен и камена/стаклена вуна [49].

10.3.3. Процена трајности: Отпорност на замрзавање-одмрзавање и карбонатизацију

Резултати испитивања трајности приказани су на слици 4, а представљени су као вредности чврстоће при притиску и затезању савијањем у три фазе: пре третмана трајности, након третмана замрзавањем-одмрзавањем, и након третмана замрзавањем-одмрзавање и убрзаном карбонатизацијом. Резултати су приказани на Слици 6.



Слика 6. Резултати испитивања трајности: чврстоћа при савијању (*flex*) и притиску (*compr*) нетретираних (*un-tr*), третираних замрзавањем-одмрзавањем (*fr-th*), и третираних замрзавањем-одмрзавањем и карбонатизацијом (*carb*), [кПа]

Што се тиче механичких својстава узорака након излагања горе наведеним третманима, резултати су показали различите ефекте процеса замрзавања-одмрзавања и процеса карбонатизације, на које је доминантно утицао тип везива које се користи. Забележено је смањење од приближно 40% механичких својстава након третмана замрзавањем-одмрзавањем за цементну везујућу групу (MC). За три групе везива креча (ML, MLZ, и MLFA), примећен је пад од приближно 50%, што се може приписати самом третману замрзавањем-одмрзавањем [50]. Тестирање малих узорака показало је минимални губитак механичких својстава након циклуса замрзавања-одмрзавања.

Након третмана замрзавањем-одмрзавањем, узорци су подвргнути убрзаној карбонатизацији. Значајно повећање (приближно 27%) и чврстоће при притиску и савијању забележено је у свим групама справљеним са кречом, што се може приписати процесу карбонатизације. Реакција карбонатизације у малтерима, односно свим алкалним материјалима, представља дифузију угљен диоксида кроз структуру пора материјала и његову реакцију са капиларном порном водом и CaO, стварајући калцијум хидроксид и његово пратеће везивање угљен диоксида праћено таложењем калцијум карбоната. Овај процес је познат као механизам побољшања чврстоће (механизам очвршћавања) композита на бази креча [51]. Повећани садржај CO₂ у комори за карбонатизацију стимулисао је карбонатизацију креча и побољшао механичка својства узорака.

Мала трајност услед променљивих услова (замрзавање-одмрзавање) и карбонатизације угљен-диоксидом из ваздуха током периода експлоатације, може довести до лоших механичких карактеристика изолационог материјала и утицати на његову будућу позицију на тржишту. Ипак, студије о трајности у погледу отпорности на замрзавање-одмрзавање и карбонатизацију топлотне изолације на биолошкој основи не постоје или су ограничене. Постоје неке студије о отпорности на замрзавање и одмрзавање композита од дрвених влакана и пластике [25,52] и трајности био-бетона [52]. Међутим, протоколи старења биокомпозита су још увек различити, што отежава поређење резултата [47].

10.3.4. Анализа решења

С обзиром да су се средње вредности топлотне проводљивости свих узорака кретале у уском интервалу од 0,08 – 0,10 W/(m·K), као критеријум за одабир смеше са најбољим карактеристикама узете су физичко-механичке особине и трајност материјала.

Анализом механичких карактеристика и аспеката трајности мешавина справљаних са кречом и са зеолитом, закључено је да су ове мешавине, иако са најнижим вредностима запреминске масе, па самим тим и топлотним проводљивостима, показале скромна механичка својства. Стога је фокус померен на мешавине са цементом и са летећим пепелом.

Поређењем својстава унутар серија са цементом, фаворизоване су мешавине MC2 и MC3 због бољих механичких својстава. Међутим, узимајући у обзир вредности запреминске масе, као оптимална се показала мешавина MC3. У серији мешавина са летећим пепелом, уз прихватљиве вредности запреминске масе и прихватљиво понашање у контексту трајности, најбоља механичка својства показала је мешавина MLFA2.

10.4. Закључци и примена техничког решења

Ово техничко решење односи се на фазу реализације композитне топлотне изолације на бази био-влакана *Miscanthus x giganteus*, пре свега намењене за употребу у спољашњим зидним панелима. Топлотна проводљивост посматраних узорака кретала се у опсегу сличних изолационих материјала од био-влакана на бази целулозе, са вредностима у распону од 0,08 – 0,10 W/(m·K). Осим топлотне проводљивости, испитивана су следећа својства: топлотна дифузивност, запреминска маса, влажност, упијање воде, чврстоћа при притиску, чврстоћа при савијању и трајност, односно отпорност на замрзавање-одмрзавање и карбонатизацију. Запреминске масе испитиваних смеша након сушења на ваздуху кретале су се између 330 kg/m³ и 819 kg/m³, што представља знатно веће вредности од оних које се срећу код конвенционалних термоизолационих материјала, али уобичајене за термоизолационе био-композите. Због повећане запреминске масе композитног материјала, вредности температурне дифузивности су прилично ниске у поређењу са уобичајеним изолационим материјалима од биомасе, односно у опсегу од 0,07 – 0,17 × 10⁻⁶ m²/s. Ово доприноси повећању топлотне инерције изолованог зида и минимизирању температурних осцилфлукуација унутар зграде. Резултати испитивања влажности (19,3 – 81,4 %) и упијања воде (72,9 – 95,7 %) били су задовољавајући и близу вредности регистрованих код других целулозних термоизолационих материјала или грађевинских материјала на бази дрвета, остајући између вредности за конвенционалне термоизолационе материјале који могу да буду водоотпорни или не, у зависности од врсте материјала. Забележене вредности чврстоће при притиску и савијању биле су задовољавајуће у поређењу са сличним топлотним изолацијама на бази био-влакана и сличне или боље од чврстоћа конвенционалних изолационих материјала као што су полистирен и минерална вуна.

На основу резултата испитивања поменутих својстава, извршена је анализа и усвојено оптимално решење термоизолације на бази био-влакана. Узимајући у обзир чињеницу да је (за прихватљиве вредности запреминске масе и прихватљиво понашање у контексту трајности) најбоља механичка својства показала мешавина MLFA2, она је и усвојена за оптимално техничко решење. Очекује се примена техничког решења описаног у овом документу од стране партнера пројекта, а резултати су објављени у научном раду категорије M21a.

11 Литература

- [1] Шимуновић Т., Колић Д. (2009). *Економске и еколошке карактеристике енергетски учинковите градње*. Завод за Материјале Грађевинског факултета, Свеучилишта у Загребу.
- [2] Pfundstein M., Gellert R., Spitzner M., Rudolphi A. (2008). *Insulating Materials – Principles, Materials, Applications*. Aumüller Druck Regensburg.
- [3] Мурављов М. (2007). *Грађевински материјали*. Грађевинска књига, Београд.
- [4] Asdrubali F., D'Alessandro F., Schiavoni S. (2015). A review of unconventional sustainable building insulation materials. *Sustainable Materials and Technologies* 4, 1-17.
- [5] Magniont C., Escadeillas G., Coutand M., Oms-Multon C. (2012). Use of plant aggregates in building ecomaterials. *European Journal of Environmental and Civil Engineering* 16, 17-33.
- [6] Liu L.F., Li H.Q., Lazzaretto A., Manente G., Tong C.Y., Liu Q.B., Li N.P. (2017). The development history and prospects of biomass-based insulation materials for buildings. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 69, 912-932.
- [7] Walker R., Pavía S. (2014). Moisture transfer and thermal properties of hemp–lime concretes. *Construction and Building Materials* 64, 270-276.
- [8] Carbonaro C., Tedesco S., Thiebat F., Fantucci S., Serra V., Dutto M. (2016). An integrated design approach to the development of a vegetal-based thermal plaster for the energy retrofit of buildings. *Energy and Buildings* 124, 46-59.
- [9] Mati-Baouche N., De Baynast H., Lebert A., Sun S., Lopez-Mingo C.J.S., Leclair P., Michaud P. (2014). Mechanical, thermal and acoustical characterizations of an insulating bio-based composite made from sunflower stalks particles and chitosan. *Industrial Crops and Products* 58, 244-250.
- [10] Nagl K., Barbu M., Schnabel T., Petutschnigg A., Jäger A., Huber H. (2015). Use of annual and perennial plants for dimensionally stable insulation panels. *ProLigno*, 181-186.
- [11] Le Ngoc Huyen T., Queneudec T'Kint M., Remond C., Chabbert B., Dheilily R. (2011). Saccharification of *Miscanthus x giganteus*, incorporation of lignocellulosic by-product in cementitious matrix. *C. R. Biologies* 334, 837-837.
- [12] Savic A., Antonijevic D., Jelic I., Zakic D. (2020). Thermomechanical behavior of bio-fiber composite thermal insulation panels. *Energy and Buildings* 229, 110511, 1-7.
- [13] Lewandowski I., Clifton-Brown C., Scurlock O., Huisman W. (2000). *Miscanthus: European Experience with a novel energy crop*. *Biomass and Bioenergy* 19, 209-227.
- [14] Бабовић Н., Дражић Г., Ђорђевић А. (2012). Могућности коришћења биомасе пореклом од брзорастуће трске *Miscanthus x giganteus*. *Хемијска индустрија* 66(2), 223-233.
- [15] Dzeletovic Z., Mihailovic N., Glamoclija Dj., Drazic G., Djordjevic S., Milovanovic M. (2009). Harvest And Storage *Miscanthus x giganteus* Greef et Deu. *Agricultural Technology* 3, 9-16.
- [16] Drazic G., Milovanovic J., Stefanovic S., Petric I. (2017). Potential of *Miscanthus x Giganteus* for Heavy Metals Removing from Industrial Deposol. *Acta Regionalia et Environmentalica* 2, *Slovaca Universitas Agriculturae Nitriae*, 56-58.
- [17] Скендеровић Б., Кекановић М. (2011). *Грађевински материјали*. АГМ књига, Београд.

- [18] Правилник о енергетској ефикасности зграда ("Сл. гласник РС", бр. 61/2011). https://www.paragraf.rs/propisi/pravilnik_o_energetskej_efikasnosti_zgrada.html
- [19] Pidlisnyuk V., Erickson L., Kharchenko S., Stefanovska T. (2014). Sustainable Land Management: Growing Miscanthus in Soils Contaminated with Heavy Metals. *Journal of Environmental Protection* 5, 723-730.
- [20] Kalló D., In: D.L. Bish and D.W. Ming, Eds. (2001). Natural Zeolites: Occurrence, Properties, Applications. *Reviews in Mineralogy and Geochemistry, Mineralogical Society of America*, 45, 519-550.
- [21] Najimi M., Sobhani J., Ahmadi B., Shekarchi M. (2012). An experimental study on durability properties of concrete containing zeolite as a highly reactive natural pozzolan. *Construction and Building Materials* 35, 1023-1033.
- [22] Sircar S., Myers A. (2003). *Handbook of Zeolite Science and Technology*. Ch. 22: Gas Separation by Zeolites. Marcel Dekker, Inc.
- [23] Song H., Zheng N., Xue F., Cheng F. (2014). Study on Thermal Insulation Zeolite by Coal Fly Ash. *Journal of Nanomaterials*, 1-6.
- [24] SRPS B.C1.018:2015, Non-metallic mineral raw materials – Pozzolanic materials – Cement-production ingredients – Classification, technical conditions and test methods.
- [25] SRPS EN 450-1:2014, Fly ash for concrete – Part 1: Definition, specifications and conformity criteria.
- [26] Wang W, Morrell J.J. (2004). Water sorption characteristics of two wood-plastic composites. *Forest Products Journal* 54(12), 209-212.
- [27] ASTM C618 – 22, Standard Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use in Concrete.
- [28] Закић Д., Савић А., Радевић А., Ашкрабић М. (2016). *Практикум за вежбе и репетиторијум из грађевинских материјала*. Академска мисао. Београд.
- [29] Ahmad Z., Saman H.M., Tahir P.M. (2010). Oil palm trunk fiber as a bio-waste resource for concrete reinforcement. *International Journal of Mechanical and Materials Engineering* 5(2), 199-207.
- [30] Belhadj B., Bederina M., Makhloufi Z., Dheilly R.M., Montrelay N., Quéneudéc M. (2016). Contribution to the development of a sand concrete lightened by the addition of barley straws. *Construction and Building Materials* 113, 513-522.
- [31] Boix E., Georgi F., Navard P. (2016). Influence of alkali and Si-based treatments on the physical and chemical characteristics of miscanthus stem fragments. *Industrial Crops and Products* 91, 6-14.
- [32] SRPS EN 196-1:2018, Methods of testing cement – Part 1: Determination of strength.
- [33] SRPS EN 12390-1:2018, Testing hardened concrete – Part 1: Shape, dimensions and other requirements for specimens and molds.
- [34] ISO 8302:1991, Thermal insulation – Determination of steady-state thermal resistance and related properties – Guarded hot plate apparatus.
- [35] SRPS EN 12350-6:2008, Testing fresh concrete – Part 6: Density for fresh state.
- [36] SRPS EN 12390-7:2010, Testing hardened concrete – Part 7: Density of hardened concrete.
- [37] ASTM C 642 – 97, Standard Test Method for Density, Absorption, and Voids in Hardened Concrete.

- [38] SRPS EN 12390-3:2010, Testing hardened concrete – Part 3: Compressive strength of test specimen.
- [39] SRPS EN 196-1:2017, Methods of testing cement – Part 1: Determination of strength.
- [40] EN 15304:2010, Determination of the freeze-thaw resistance of autoclaved aerated concrete.
- [41] Antonijević D. (2019). Energetic and Environmental Adequacy of Biomass Thermal Insulation Materials, *14th International Conference on Heat Engines and Environmental Protection*, Matrafured, Hungary 1–9.
- [42] Palumbo M., Lacasta A.M., Giraldo M.P., Haurie L., Correal E. (2018). Bio-based insulation materials and their hygrothermal performance in a building envelope system (ETICS). *Energy and Buildings* 174, 147-155.
- [43] Braiek A., Karkri M., Adili A., Ibos L., Nasrallah S.B. (2017). Estimation of the thermophysical properties of date palm fibers/gypsum composite for use as insulating materials in building, *Energy and Buildings* 140, 268-279.
- [44] Veitmans K., Grinfelds U. (2016). Wood Fiber Insulation Material. *Research for Rural Development* 2, 91-98.
- [45] Ducoulombier L., Lafhaj Z. (2017). Comparative study of hygrothermal properties of five thermal insulation materials. *Case Studies in Thermal Engineering* 10, 628-640.
- [46] Osanyintola F., Simonson C. (2006). Moisture buffering capacity of hygroscopic building materials: Experimental facilities and energy impact. *Energy and Buildings* 38(10), 1270-1282.
- [47] Walker R., Pavia S., Mitchell R. (2014). Mechanical properties and durability of hemp-lime concretes. *Construction and Building Materials* 61, 340-348.
- [48] Brouard Y., Belayachi N., Hoxha D., Ranganathan N., Méo S. (2018). Mechanical and hygrothermal behavior of clay – Sunflower (*Helianthus annuus*) and rape straw (*Brassica napus*) plaster bio-composites for building insulation. *Construction and Building Materials* 161, 196-207.
- [49] Insulation – Materials, Science and Application, Gass Mineral Fibre & Rockwool, https://local.college.ie/Content/APPRENTICE/liu/ind_insulation/mod4/m4_u5.pdf
- [50] Pilarski J.M., Matuana L.M. (2006). Durability of wood flour/plastic composites exposed to accelerated freeze-thaw cycling, Part I Rigid PVC matrix. *Journal of Vinyl and Additive Technology* 11(1), 1-8.
- [51] Van Balen K., Van Gemert D. (1994). Modelling lime mortar carbonation. *Materials and Structures* 27, 393-398.
- [52] Amziane S., Sonebi M. (2016). Overview on bio-based building material made with plant aggregate, *RILEM Tech. Lett.* 1, 31-38.

12) ТЕХНИЧКА ДОКУМЕНТАЦИЈА

- Уговор о пословно-техничкој сарадњи у прилогу

- Листа техничких решења свих аутора.

Антонијевић, Д, Коматина, М, Манић, Д, Коматина, Б, Јовановић, М: Размењивач топлоте за искоришћавање отпадне топлоте отпарка у парно-котловским постројењима, Министарство науке просвете и технолошког развоја Републике Србије, 2015. (М83)

Маринковић, С, **Савић, А**, Драгаш, Ј, Игњатовић, И, Тешић, К: Технолошки поступак производње бетона са високим садржајем филера за примену у конструкцијама, Министарство науке, просвете и технолошког развоја Републике Србије, 2020. (М85)

Аутори решења:

В. проф. др Александар Савић, дипл. инж. грађ.

Др Драги Антонијевић, научни саветник, дипл. инж. маш.

Др Ивана Јелић, научни сарадник, дипл. хем.

Проф. др Димитрије Закић, дипл. инж. грађ.

Прилози:

Прилог 1: Уговор о пословно-техничкој сарадњи

Прилог 2: Копија М21а публикације: Savic, A., Antonijevic, D., Jelic, I., Zakic, D. (2020). Thermomechanical behavior of bio-fiber composite thermal insulation panels. Energy and Buildings, 229, 110511, 1-7. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2020.110511>

ПРИЛОГ 1

Уговор о пословно-техничкој сарадњи

GIKONT DOO BEOGRAD

Br. V-02-22-1

10:02 2022 год.

УНИВЕРЗИТЕТ У БЕОГРАДУ

-ГРАЂЕВИНСКИ ФАКУЛТЕТ

Бр. 132129/9-19

19 FEB 2022 20 год.

БЕОГРАД

Булевар краља Александра 73

На основу обострано изражене воље, а у циљу преношења научних достигнућа и повезивање са радом у пракси, као и ради остваривања оптималних резултата пословања кроз заједнички рад:

Универзитет у Београду – Грађевински факултет ПИБ 100251144, улица Булевар краља Александра бр. 73, 11000 Београд, кога заступа декан проф. др Владан Кузмановић (у даљем тексту ГРФБ).

и

"Гиконт" д.о.о. ПИБ: 105401641, Краинска 37, кога заступа Жељко Бабић, директор (у даљем тексту Партнер)

Закључују

УГОВОР О ПОСЛОВНО-ТЕХНИЧКОЈ САРАДЊИ

Предмет уговора

Члан 1.

Предмет овога уговора је сарадња Уговорних страна у стручним и научним областима грађевинарства од заједничког интереса, у циљу унапређења производа, вештина, компетенција и угледа уговорних страна.

Принципи сарадње

Члан 2.

Уговорне стране су сагласне да ће се међусобна сарадња одвијати уз уважавање обостраних пословних интереса на принципу равноправности, савесности и поштења, као и уз обавезу поступања по стандарду доброг привредника, уз нужне толеранције које због промењених околности или потешкоћа у пословању могу бити изазване током трајања овога Уговора. У реализацији овог Уговора, уговорне стране се обавезују да примењују позитивне домаће прописе, прописане техничко-технолошке стандарде, домаћа и инострана научна достигнућа, као и да међусобно уважавају сопствена општа акта и пословне одлуке органа управљања.

Уговорне стране се обавезују да максимално штите пословне, економске и моралне интересе партнера из овог Уговора и да обострано чувају и уздижу пословни углед који су стекли пре закључења овог Уговора.

Члан 3.

Сваки од потписника овог уговора може да одреди координатора задуженог за дефинисање заједничких активности, њиховог обима и динамике спровођења.

Заједничке активности

Члан 4.

Уговорне стране ће дефинисати заједничке активности у духу добрих односа и сарадње, и оне могу укључивати:

- истраживања савремених материјала применљивих у изградњи грађевинских објеката,
- истраживања система материјала у оквиру фасадних елемената грађевинских објеката,
- истраживања у области енергетске ефикасности тзв “пасивних кућа”.

Обим и динамика појединих активности ће бити периодично договоран и усклађиван између Уговорних страна, преко координатора (члан 3), а све у циљу обезбеђења ефикасне и обострано корисне сарадње.

Поверљивост информација

Члан 5.

У складу са интерним актима Партнера и његовим посебним захтевима и добрим пословним обичајима, ГРФБ је дужан да као пословну тајну чува сваки документ или информацију коју добије од Партнера, а које као такве одреди Партнер.

ГРФБ је одговоран за свако неовлашћено давање информације и података у смислу претходног става, изузев и само оним лицима која су непосредно ангажована на реализацији активности по овом Уговору, а одговоран је за евентуалне трошкове и/или штету коју услед тога претрпи Партнер.

Партнер је одговоран за свако неовлашћено давање информација коју добије од ГРФБ, до којих дође приликом реализације активности по овом Уговору, и одговоран је за евентуалне трошкове и/или штету коју услед тога претрпи ГРФБ.

Трајање уговора

Члан 6.

Уговор о пословно-техничкој сарадњи се закључује на неодређено време и сваки од потписника га може отказати.

Започети послови завршиће се у роковима предвиђеним планом активности које утврде координатори, односно прихваћеним писменим налозима, без обзира што би евентуално дошло до отказивања овог уговора.

Решавање спорова и раскид уговора

Члан 7.

Све евентуалне спорове који настану из овог Уговора уговорне стране ће покушати да реше Уговорно.

Уколико спорови између уговорних страна не буду решени, уговорне стране су сагласне да ће сваки такав спор бити решаван пред стварно надлежним судом у Београду.

Завршне одредбе

Члан 8.

Овај Уговор се може изменити само писаним анексом потписаним од стране овлашћених заступника уговорних страна.

Члан 9.

Уговор се сматра закљученим и ступа на снагу када га потпишу оба овлашћена лица уговорних страна, а што ће се документовати датумом на заводном печату.

Овај Уговор је сачињен у 4 (четири) истоветна примерака, од којих по 2 (два) за сваку уговорну страну.

Уговорне стране сагласно изјављују да су овај Уговор прочитале, разумеле и да уговорне одредбе у свему представљају израз њихове стварне воље.

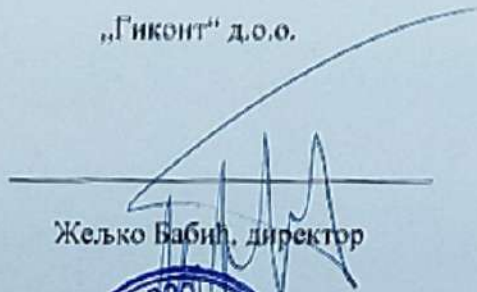
Универзитет у Београду
Грађевински факултет

„Гиконт“ д.о.о.

УР


Проф. др Владан Кузмановић, декан




Жељко Бабић, директор



ПРИЛОГ 2

Копија М21а публикације



Thermomechanical behavior of bio-fiber composite thermal insulation panels



Aleksandar Savic^a, Dragi Antonijevic^b, Ivana Jelic^{c,*}, Dimitrije Zakic^a

^a University of Belgrade, Faculty of Civil Engineering, Bulevar kralja Aleksandra 73, 11000 Belgrade, Serbia

^b University of Belgrade, Innovation Center of Faculty of Mechanical Engineering, Kraljice Marije 16, 11000 Belgrade, Serbia

^c University of Belgrade, Vinca Institute of Nuclear Sciences, National Institute of The Republic of Serbia, P.O. Box 522, 11000 Belgrade, Serbia

ARTICLE INFO

Article history:

Received 26 May 2020

Revised 16 September 2020

Accepted 23 September 2020

Available online 28 September 2020

Keywords:

Thermal insulation

Biocomposite

Energy savings

Experimental investigation

Compressive/flexural strength

Freeze-thaw

Carbonation

ABSTRACT

The thermomechanical properties of the bio-fiber composite, as material for the production of thermal insulation panels, were evaluated. The observed mixtures were composed of *Miscanthus × giganteus* bio-fibers, mineral binders (cement or lime), pozzolanic materials (zeolite and fly ash), and water. The favorable heat transfer behavior of composites based on *Miscanthus × giganteus* bio-fibers was already affirmed by literature data of similar natural bio-fiber materials, the author's previous experimental results, and consideration of dynamic heat transfer processes in the insulated outer wall exposed to variable ambient conditions. The experimental assessment was focused on the bearing capacity (i.e. compressive and flexural strength), water absorption, and durability (i.e. resistance to freeze-thaw and carbonation), because there is scarce literature data regarding these properties, whose thorough understanding and systematization are highly important for a wider application of biomass-based thermal insulation materials. The obtained results were evaluated through the comparison to published data from similar bio-based thermal insulations, as well as from conventional thermo-insulation materials such as polystyrene and stone or glass wool.

© 2020 Elsevier B.V. All rights reserved.

1. Introduction and motivation

The building sector generates a considerable environmental impact through the exploitation of non-renewable materials and energy resources, air, water and soil pollution, land use, biodiversity losses, and waste generation [1,2]. The construction sector is responsible for approximately 36% of global final energy consumption and 39% of carbon dioxide emissions [3], implying imminent challenges: increased energy-efficiency and utilization of sustainable building materials. Efficient thermal insulation reduces energy consumption, yet different insulation materials vary in their environmental impact [4].

The most important, and customarily the only considered property of thermal insulation material, responsible for heat flow and temperature distribution in the building envelope subjected to steady-state heat transfer conditions is thermal conductivity, λ [W/(mK)]. Nevertheless, the outer walls of a building are fre-

quently exposed to complex quasi-periodic heat transfer boundary conditions resulting from fluctuations of ambient air temperature, humidity, and flow, as well as the intensity of received solar radiation. The insulated wall, then, behaves as a dynamic heat transfer system with a certain thermal inertia and time-dependent temperature change propagation. The thermo-physical property that describes the spread of transient heat flow is thermal diffusivity, a [m²/s]. It is calculated as a ratio between thermal conductivity and product of density and specific heat capacity [5] and takes into account how much energy is absorbed in the wall during its heating to the temperature gradient. In other words, the thermal diffusivity determines how quickly a wall of a certain density and heat capacity, under transient heat conduction, converges to steady-state heat transfer. The outer walls, composed of thicker and more thermally resistive layers, slow down the heatwave and make its amplitude inside the building considerably smaller, which is especially important in climates with high diurnal temperature variation. Although the cumulative amount of heat transferred conductively through the wall during 24 h is independent of the wall's dynamic thermal behavior and is determined principally by its thermal conductivity, the reduction of cyclical temperature fluctuation at the inner surface of the building envelope, compared to its outer surface, is crucial for both comfort and energy effi-

* Corresponding author at: University of Belgrade, Vinca Institute of Nuclear Sciences, National Institute of The Republic of Serbia, P.O. Box 522, 11000 Belgrade, Serbia.

E-mail addresses: sasha@grf.bg.ac.rs (A. Savic), dantonijevic@mas.bg.ac.rs (D. Antonijevic), ivana.jelic@vin.bg.ac.rs (I. Jelic), dimmy@imk.grf.bg.ac.rs (D. Zakic).

ciency of the building. Thus, it should be noted that the density of the thermal insulation material plays an important role in the building envelope's dynamic heat flow.

Generally-used synthetic insulation materials, e.g. extruded and expanded polystyrene, have low and favorable values of thermal conductivity, often in the range of 0.029 – 0.040 W/(mK), while biomass-based insulations and their composites rarely reach thermal conductivity values lower than 0.060 W/(mK) [5]. Nevertheless, synthetic insulations have lower density and substantially higher thermal diffusivity than biomass-based insulations [5–8], which reduces their thermal inertia and weakens their ability to time-shift thermal waves and minimize temperature fluctuations inside the building envelope. Therefore, biomass-based thermal insulations and their composites with mineral binders could perform better than the prevailing synthetic insulations in the case of dynamic ambient temperature changes and sun load conditions [5]. This, in addition to the clear environmental benefits of the utilization of biomaterials [5–8] in building practice, yields a sufficient motivation for a closer thermomechanical examination of various types of biomass-based thermal insulation products.

The main objective of this study was to evaluate the thermomechanical properties of *Miscanthus × giganteus* based insulation. Since mechanical properties of thermal insulation, especially bearing capacity and durability, are often missing in the literature data, this study intended to analyze and shed more light on these overlooked features. Likewise, the authors have addressed the advantages of the *Miscanthus × giganteus* plant as a promising source of biomass for thermal insulation.

2. Bio-fiber composite preparation

The investigated mixtures were composed of *Miscanthus × giganteus* bio-fibers, mineral binders, pozzolanic materials, and sufficient water.

A positive contribution of *Miscanthus × giganteus* bio-fibers in thermal insulation materials was expected based on the data for similar natural materials (reed, straw and hay types, hemp, corn stalks, cotton, flax, etc.) that have already shown a convenient thermal behavior when used as insulation [9–11], and because of its high lignocellulosic fiber content [12,13]. Although it is but one of many biomaterials suitable for application in thermal insulation materials, *Miscanthus × giganteus* excels with its high potential resulting from a spectrum of favorable properties: this plant was tailored to provide a range of environmental benefits, e.g. eco-remediation in poor quality soils, resulting in perennial and frequent harvests of inexpensive and processable biomass, as well as potential post-remediation use instead of downstream disposal as waste material. It is resistant to alkali- and Si-based mixtures, which is important since the composite was prepared by mixing with alkali binders [14]. Resistance to silicon dioxide is vital for its later usage and potential contact with standard building materials such as mortar or concrete.

The binders used for the preparation of samples were based on cement and hydrated lime (Ca(OH)₂). The commercial cement-based binder, applied in the first four mixtures, was low containing cement mixture of gypsum (3 – 5%), limestone (35 – 45%), blast furnace slag (5 – 10%), and cement clinker (40 – 57%). The lime-based binder, used in the rest of the mixtures, was prepared by adding 30% of water (by mass) according to the producer's specification, and this percentage was experimentally checked by drying and weighing the dry residue. Given that lime-mortars have lower thermal conductivity (0.81 W/(m·K)) than cement mortars (1.40 W/(m·K)) [15], the utilization of a lime binder was considered more efficient in fulfilling the purpose of this study. In addition, the use of hydrated lime as a binder stabilizes *Miscanthus × giganteus*

by creating a mineralized membrane, protecting the bio-fibers from decay, flammability, or attacks by insects and rodents [16].

The addition of pozzolan materials, which usually do not have binding (cementitious) properties but tend to increase the workability and binding of a mixture when reacting chemically with calcium hydroxide in the presence of water, improves the pore structure and increases the durability and resistance of composites [17]. Synthetic zeolite and fly ash were used as pozzolanic materials. The zeolite crystals consist of a multitude of pores and fine channels, resulting in a substantially large specific surface [18]. Zeolites exhibit good pozzolanic properties in alkaline suspensions [19] with adequate water and gas adsorption [18], minimizing the formation of mold and reducing the release of unpleasant odors [20]. Zeolite also shows insulation properties and can be used for thermal insulation coatings [21]. In this research, a synthetic zeolite was used. Zeolite granulation was 4 – 10 μm with the following chemical specification: water (max. 22%), aluminum oxide (34 – 37%), sodium oxide (21 – 23%), silicon dioxide (41 – 43%), and iron (max. 150 ppm). Investigation of the pozzolanic properties of this zeolite was previously done according to the pozzolanic material standard SRPS B.C1.018:2015 [22]. This test showed that a compressive strength of 4.7 MPa was achieved after the treatment, which was very close to the lower limit of 5.0 MPa for the class of pozzolan P5 prescribed by the standard SRPS B.C1.018:2015 [22]. Still, it may be concluded that the used zeolite possibly had weak pozzolanic activity. The fly ash is a fine powder of amorphous particles (usually 1 – 150 μm), obtained as a by-product of coal combustion in thermal power plants [23]. As waste, it is deposited in landfills that are typically located near thermal power plants, representing a global concern [24]. Most commonly, it is used as a supplementary cementitious material in the production of Portland cement concrete due to its pozzolanic properties. Its utilization reduces the consumption of non-renewable natural pozzolans and has economic significance [24]. In this study, fly ash from the thermal power plant “TE Nikola Tesla B”, Obrenovac, Serbia with chemical specification: SiO₂ (64.14%), Al₂O₃ (19.22%), Fe₂O₃ (4.35%), TiO₂ (0.16%), CaO (8.32%), MgO (0.01%), Na₂O (0.36%), K₂O (0.66%), and P₂O₅ (0.17%), was used. The basic chemical requirement for the use of fly ash as an addition to Portland cement concrete [23] is that the sum of silicon dioxide, aluminum oxide, and iron(III) oxide must be a minimum of 70% for fly ash class F or 50% for class C. In the fly ash used in this study, the sum of silicon dioxide, aluminum oxide, and iron(III) oxide was higher than 70%, according to the ASTM C618 standard [25], thus fulfilling the prescribed requirements [23]. Previous tests of the fly ash pozzolanic properties performed according to the standard SRPS B.C1.018:2015 [22] showed that the compressive strength following treatment reached 9.1 MPa, indicating a very good pozzolanic activity, close to the P10 pozzolan class with 10 MPa as the lower limit of compressive strength [19,22].

The experimental samples were produced by mixing dried, chopped, and sieved *Miscanthus × giganteus* bio-fibers (Fig. 1) with mineral binders, pozzolanic materials, and water (in sufficient quantity for the workability of the mixture).

The *Miscanthus × giganteus* bio-fiber sample represents a mixture of various sizes with a continuous distribution, incorporating both short fibers, approximately 3 mm thick, and longer, thinner fibers. The longer fibers significantly contribute to the flexural strength of the composite material, its porosity, and its ability to retain an increased amount of air (with thermal conductivity of only 0.026 W/(m·K), thus decreasing the resulting thermal conductivity of the material [26,27]. The shorter fibers fill the voids, thus increasing mechanical properties and density.

Four groups of mixtures (each consisting of four series) were made, thus providing a total of 16 series. Insulation material mixtures of different compositions were obtained by mixing bio-fibers



Fig. 1. The used *Miscanthus x giganteus* bio-fibers and an insulation panel prototype.

(BF), cementitious (C) or lime (L) binders (B for all binders/pozzolans mixtures), zeolite (Z) or fly ash (FA) as pozzolans, and water (W). Portland cement was used in only four series in order to increase the energy efficiency of the produced thermal insulation. The composition and mass ratios of the composites are given in Table 1.

Two types of molds (Fig. 2), complying with the standards SRPS EN 196-1:2018 [28] and SRPS EN 12390-1:2018 [29] were used for the sample preparation: cubic (100 mm) and prismatic (160 × 40 × 40 mm). Tests were performed with two and three repetitions for cubic samples and prismatic samples, respectively, and the results were calculated as the mean values.

3. Experimental results

3.1. Density calculation

Following sample dimension and weight measurements and volume calculation, the densities of the sample mixtures were calculated: the total density in the fresh state (ρ_f), the initial density after 7 days drying in the mold (ρ_7), and the density after demolding and drying for 28 days (ρ_{28}). The procedure was performed according to the standards SRPS EN 12350-6:2008 [30] and SRPS EN 12390-7:2010 [31]. The results of the density measurements are presented in Fig. 3.

The densities of the tested mixtures after air-drying showed values that are considerably higher than those of conventional thermal insulation materials [5], but common for similar bio-based insulating composites [32]. The most important consequence of the increased density of an insulation material is that



Fig. 2. Cubic and prismatic sample examples.

it contributes to the ability of the insulation layer to time-shift the thermal wave propagation. Thus, the biocomposite insulation materials have a slower temperature response and higher thermal inertia than conventional thermo-insulations. This feature is vital for the comfort and energy consumption of buildings exposed to large diurnal temperature differences.

Nevertheless, almost all cubic samples with lime binder showed lower densities after 28 days of air drying than samples with the cementitious binder, which indicates their higher porosity. A

Table 1

Composition with mass ratios of samples by series.

Series	BF (g)	C (g)	L (g)	FA (g)	Z (g)	W (g)	B (g)	BF + B (g)	B:BF (%)	B:BF (by weight)	BF in paste (%)
MC1	200	600	–	–	–	300	600	800	33.33	0.67	25.00
MC2	400	420	–	–	180	300	600	1000	66.67	1.33	40.00
MC3	300	480	–	–	180	300	660	960	45.45	0.91	31.25
MC4	200	480	–	–	120	300	600	800	33.33	0.67	25.00
ML1	300	–	880	–	–	300	880	1180	34.09	0.68	25.42
ML2	400	–	680	–	–	300	680	1080	58.82	1.18	37.04
ML3	300	–	680	–	–	300	680	980	44.12	0.88	30.61
ML4	300	–	900	–	–	300	900	1200	33.33	0.67	25.00
MLZ1	300	–	700	–	180	300	880	1180	34.09	0.68	25.42
MLZ2	400	–	480	–	200	300	680	1080	58.82	1.18	37.04
MLZ3	300	–	500	–	180	300	680	980	44.12	0.88	30.61
MLZ4	300	–	500	–	400	300	900	1200	33.33	0.67	25.00
MLFA1	300	–	700	180	–	300	880	1180	34.09	0.68	25.42
MLFA2	400	–	480	200	–	300	680	1080	58.82	1.18	37.04
MLFA3	300	–	500	180	–	300	680	980	44.12	0.88	30.61
MLFA4	300	–	500	400	–	300	900	1200	33.33	0.67	25.00

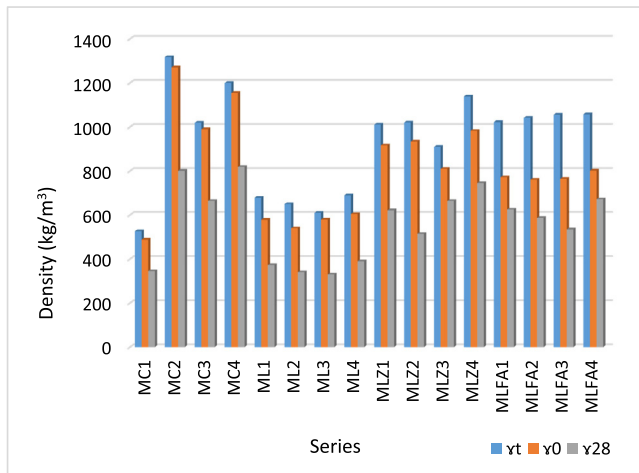


Fig. 3. Densities of all series in the fresh state (γ_t), after demolding (γ_0), and after air drying (γ_{28}) recorded on cubic samples.

higher porosity might indicate a higher air content, and thus a favorable basis for a lower resulting thermal conductivity of the insulation material.

3.2. Thermal conductivity and temperature diffusivity

The thermal conductivity of the observed *Miscanthus × giganteus* bio-fiber, mineral binders, and pozzolanic materials composite insulation panels was determined according to ISO 8302 standard [33]. Sample panels with dimensions of 500 × 500 mm, and a thickness of 60 mm, were made. Panels were tested by the Hot Plate method, using the thermal heat fluxmeters TNO TH Delft, number F3g (heated side) and F5n (colder, unheated side), in a quasi-stationary state in standard test chambers (hot and cold) in a thermostat with water, Cu-CuNi thermocouples (0.3 mm wire diameter) and a digital mV-meter, Keithley. After determining the thermal conductivity of individual measurements, the laboratory mean value of thermal conductivity was calculated.

The mean values of thermal conductivity of all samples stayed in the range of 0.08 – 0.10 W/(m·K), while the calculated values of thermal diffusivity remained in the range of 0.07 – 0.17 · 10⁻⁶ [m²/s]. This range of thermal conductivity was expected, and is close to similar biomass-based thermal insulations [5–8]. The values of temperature diffusivity of the observed composites are rather low due to the increased density of the composite material. Therefore, it may be claimed that the main constraint for a wider use of biomass-based insulation panels is not their thermal conductivity, but rather their mechanical features. Hence, the assessment of the properties of the insulation panels of different compositions and component proportions is focused on their bearing capacity, resistance to freeze-thaw and carbonation, and water absorption.

3.3. Water content and absorption determination

Sample water content (H_a), i.e. the amount of water that the material contains in its pore system in laboratory ambient conditions, was calculated for the cubic samples according to the procedure defined by ASTM C 642 – 97 [34]. It represents the ratio between the water content in the sample and the mass of the dry sample (after 28 days of free-air drying). The water content in the sample was recorded as the difference between the mass of the sample in ambient conditions after 7 days curing in the mold and the mass of the dry sample.

Samples for the water absorption test were prepared by “Gradual Immersion Method”, which involves an incremental immersion of a cubic sample, previously dried to a constant mass. The immersion occurs in a container, at defined time intervals, and in up to four steps: ¼, ½, ¾ of the sample height, until the entire sample is immersed in water. The immersion procedure is usually carried out at two-hour intervals. Water absorption was calculated as the ratio of the mass of the water-saturated sample and the mass of the completely dry sample, i.e. after drying for 28 days in the air, and expressed as a percentage, obtained according to the standard ASTM C 642 – 97 [34].

The results of water content and water absorption tests for all the series are shown in Table 2.

The obtained results for water content and absorption are similar to the values of other cellulose thermal insulation materials or wood-based building materials [35,36] and remain between the values for conventional thermal insulation materials [17], such as polystyrene which is considered to be waterproof, and stone or glass wool that represent non-waterproof materials due to their high water absorption. The materials increasing moisture content contributes to the rise of its thermal conductivity. Besides, the hygroscopic properties of the biocomposite thermal insulation result in a respectable moisture buffering capacity, contributing to the building’s indoor relative humidity control, thermal comfort, and indoor air quality, and also to the overall durability of the insulation [37].

3.4. Mechanical behavior testing

As there are no standardized procedures for the measurement of compressive and flexural strengths of thermal insulation materials based on bio-fibers, the tests were guided by the good practice in testing the compressive and flexural strength of mortars. The strength of the cubic and prismatic samples was determined by recording the fracture point load of the materials in static load conditions. Cubic samples were tested for compressive strength by automated hydraulic press Cyber-plus Evolution, Matest, while the prismatic samples were examined for compressive and flexural strength by a manual hydraulic press (manual correction of oil pressure in press) CMC, Amsler.

The compressive strength tests were performed according to the standard SRPS EN 12390-3:2010 [38] for cubic samples, and according to the standard SRPS EN 196-1:2017 [39] for the prismatic sample halves, following the flexural strength test. The compressive strength was calculated as [17,38,39]:

Table 2
Water content and water absorption values.

Series	H_a (%)	u (%)
MC1	47.0	90.6
MC2	58.8	72.9
MC3	53.6	86.3
MC4	51.6	88.8
ML1	55.2	90.3
ML2	58.8	95.7
ML3	75.8	81.8
ML4	55.1	78.4
MLZ1	47.4	94.1
MLZ2	81.4	89.6
MLZ3	22.0	88.6
MLZ4	31.8	80.0
MLFA1	23.3	85.4
MLFA2	29.6	74.2
MLFA3	43.0	89.1
MLFA4	19.3	84.1

$$f_p = P_{p,gr}/S_0, [\cdot 1000 \text{ kPa}] \quad (1)$$

where $P_{p,gr}$ was the load measured at the fracture point, [kN] and S_0 represents the initial cross-section area, [cm²].

The flexural strength determination was conducted through a “three-point bending” test on the prismatic samples, with a span of 10.67 cm (l) according to SRPS EN 196-1:2017 [39], and the results were calculated as [17,39]:

$$f_{zs} = 1.5 \cdot (P_{zs,gr} \cdot l) / (b \cdot h^2), [\cdot 1000 \text{ kPa}] \quad (2)$$

where $P_{zs,gr}$ represents the applied limit force (up to the breaking point), [kN], l was the span (10.67 cm), and b and h were the sample width and height, [cm], respectively.

Values of compressive strength obtained from the cubes, and those of compressive and flexural strength obtained from the prisms are shown in Table 3.

In the groups MC and MLFA, a matrix of calcined-silicate hydrated minerals provided higher mechanical properties [17]. In the other two groups, lime created a carbonate (CaCO₃) crust of lower mechanical properties, mixed with still un-carbonated lime Ca(OH)₂, while zeolite showed no substantial influence on the mechanical properties due to its weak pozzolanic effect [17–19].

These results were expected, based on a comparison to similar bio-based thermal insulation materials [40,41]. Likewise, it should be noted that the obtained values were similar to or better than the known strengths of conventional insulation materials such as polystyrene and stone or glass wool [42,43].

3.5. Durability assessment: resistance to freeze-thaw and carbonation

Currently, there are no standards for measuring the freeze-thaw resistance of thermal insulation materials. Therefore, the test was performed according to the European standard EN 15304:2010 [44] for the determination of the freeze-thaw resistance of autoclaved aerated concrete. Nine-months-old prismatic samples of the materials were subjected to 7 freeze-thaw cycles between two temperatures: −20 °C (18 h) and +60 °C (6 h) in the Climatic chamber C700BCXPRO, FDM. Following this treatment, compressive and flexural strength were investigated. For further durability evaluation, the samples were afterward subjected to accelerated carbonation in a carbonation chamber with a climate containing 2% carbon dioxide and 50% humidity. Following the carbonation, another comparative assessment of the effects on both the compressive and flexural strength was performed. The results of the durability tests are shown in Fig. 4, represented as compressive and flexural strength values in three stages: before durability treat-

ment, after the freeze-thaw treatment only, and after both the freeze-thaw and the accelerated carbonation treatments.

In terms of mechanical behavior after exposure to the above-mentioned treatments, the results showed different effects of freeze-thaw and carbonation processes, influenced dominantly by the type of binder used. There was a decrease of approximately 40% in the measured mechanical properties after the freeze-thaw treatment for the cementitious binder group (MC). For the three lime binder groups (ML, MLZ, and MLFA), a drop of approximately 50% was observed, which can be attributed to the freeze-thaw treatment [45,46]. The testing of small samples showed a limited loss in mechanical properties after freeze-thaw cycling.

Following the freeze-thaw treatment, the samples were subjected to accelerated carbonation. A substantial increase (approximately 27%) in both compressive and flexural strengths was recorded in all groups made with lime, which can be attributed to the carbonation process. The carbonation reaction in mortars, i.e. all alkaline materials, represents the diffusion of carbon dioxide through the material's pore structure and its reaction with capillary pore water and CaO, making calcium hydroxide and its accompanying uptake of carbon dioxide followed by precipitation of calcium carbonate. This process is known as the mechanism of strength improvement (hardening mechanism) of lime-based composites [47]. The increased CO₂ content in the carbonation chamber stimulated the lime carbonation and improved the sample's mechanical properties.

Low durability in the face of changing weather conditions (freeze-thaw) and carbonation by carbon dioxide from the air during the exploitation period may lead to poor insulation material's mechanical characteristics and influence its future market position. Nevertheless, the studies on durability regarding resistance to freeze-thaw and carbonation of bio-based thermal insulation do not exist or are limited. There are some studies of freeze-thaw resistance of wood fiber-plastic composites [45,46] and the durability of plant concrete [9]. However, the aging protocols for bio-composites are yet diverse, making a comparison of the results difficult [40].

4. Summary and conclusions

Thermomechanical characterization of various types of biomass-based thermal insulation materials is imperative for their wider application. In this study, the properties of *Miscanthus × giganteus* bio-fiber composite thermal insulation intended for use in outer wall panels were investigated. A total of sixteen mixtures (four groups of four mixtures) with different

Table 3
Compressive and flexural strength of the investigated series for the cube and prism-shaped samples, [kPa].

Group	Series	Compressive strength, cubes	Compressive strength, prisms	Flexural strength, prisms
Series made with a cementitious binder	MC1	300	292	159
	MC2	728	518	111
	MC3	214	284	135
	MC4	1116	1349	631
Series made with lime	ML1	33	205	263
	ML2	31	205	131
	ML3	32	188	135
	ML4	39	253	272
Series made with lime and zeolite (weak pozzolanic reaction)	MLZ1	33	211	135
	MLZ2	44	208	138
	MLZ3	40	139	138
	MLZ4	34	244	135
Series made with lime and fly ash (good pozzolanic reaction)	MLFA1	207	633	135
	MLFA2	273	465	274
	MLFA3	270	475	274
	MLFA4	353	526	139

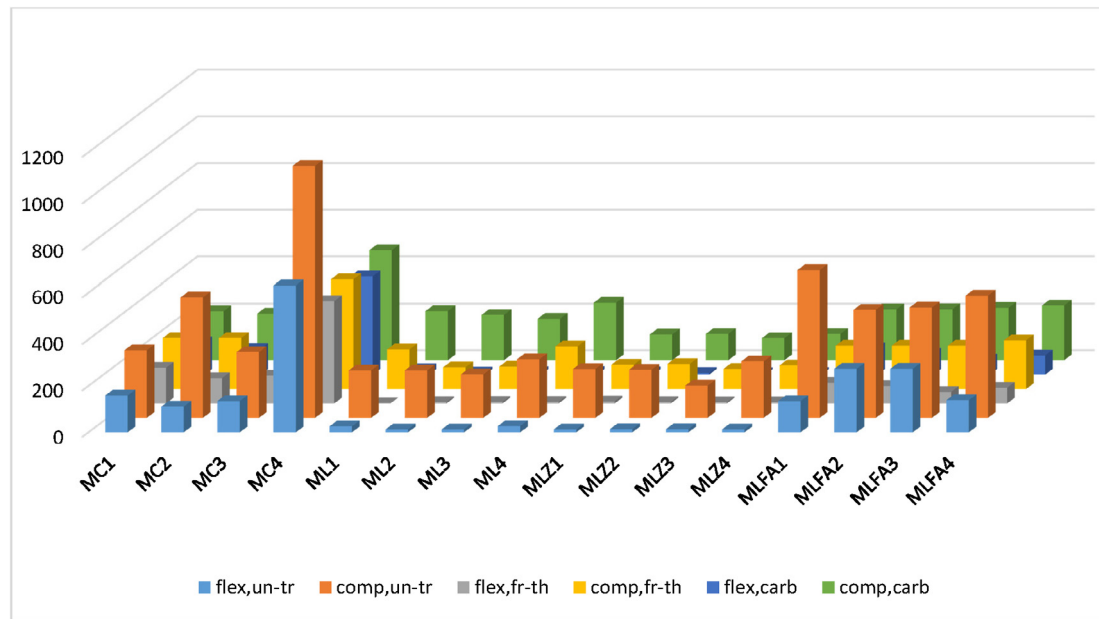


Fig. 4. Durability investigation results, flexural (flex) and compressive (compr) strength of un-treated (un-tr), treated by freeze–thaw (fr-th), and treated by freeze–thaw and carbonation (carb), [kPa]

component proportions were examined. The components included: *Miscanthus × giganteus* fibers, mineral binders, pozzolanic materials, and water. The observed properties were thermal conductivity, temperature diffusivity, density, water content, water absorption, compressive and flexural strength, and durability, i.e. resistance to freeze–thaw and carbonation.

The densities of tested mixtures after air-drying ranged between 330 kg/m³ and 819 kg/m³, representing the values considerably higher than those of conventional thermal insulation materials, but common for similar bio-based insulating composites.

The thermal conductivity of the observed samples stayed in the range of similar cellulose-based bio-fiber insulation materials with values in the range of 0.08 – 0.10 W/(m·K). Due to the increased density of the composite material the values of temperature diffusivity are rather low, i.e. in the range of 0.07 – 0.17·10⁻⁶ [m²/s], compared to the commonly considered biomass insulation materials. This strongly contributes to the increased thermal inertia of the insulated wall and the minimization of temperature fluctuations inside the building.

The results of water content (19.3 – 81.4%) and water absorption (72.9 – 95.7%) were satisfactory and close to the values of other cellulose thermal insulation materials or wood-based building materials, remaining between the values for conventional thermal insulation materials which might be waterproof or non-waterproof depending on the type of the material.

The compressive strength for the cube- and prism-shaped samples and the flexural strength for prism-shaped samples were in the range of 31 – 1116 kPa, 139 – 1349, and 111 – 631 kPa, respectively. The recorded values of compressive and flexural strengths were satisfactory compared with similar bio-based thermal insulation, and similar or better than the known strengths of conventional insulation materials such as polystyrene and stone or glass wool.

The series with a cementitious binder (MC) demonstrated a decrease in the compressive and flexural strength after these two treatments, while the lime-only series (ML) showed a different behavior. The freeze–thaw treatment of the ML series resulted in a drop in compressive and flexural strengths (40–50%), but

subsequent carbonation led to an increase in both strengths of approximately 27%. The level of resistance to freeze–thaw treatment and carbonation, i.e. durability, was observed to be highly dependent on the type of binder used.

Declaration of Competing Interest

The authors declare that they have no known competing financial interests or personal relationships that could have appeared to influence the work reported in this paper.

Acknowledgement

This work was supported by the Ministry of Education, Science and Technological Development of the Republic of Serbia.

References

- [1] S. Proietti, P. Sdringola, U. Desideri, F. Zepparelli, F. Masciarelli, F. Castellani, Life Cycle Assessment of a passive house in a seismic temperate zone, *Energy Build.* 64 (2013) 463–472, <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2013.05.013>.
- [2] N.K. Arora, T. Fatima, I. Mishra, M. Verma, J. Mishra, V. Mishra, Environmental sustainability: challenges and viable solutions, *Environ. Sustain.* 1 (2018) 309–340, <https://doi.org/10.1007/s42398-018-00038-w>.
- [3] Global Alliance for Buildings and Construction, Global Status Report 2018, <https://www.globalabc.org/uploads/media/default/0001/01/f64f6de67d55037cd9984cc29308f3609829797a.pdf>, 2018.
- [4] C. Hilla, A. Nortonc, J. Dibdiakova, A comparison of the environmental impacts of different categories of insulation materials, *Energy Build.* 162 (2018) 12–20, <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2017.12.009>.
- [5] D. Antonijević, Energetic and environmental adequacy of biomass thermal insulation materials, in: 14th International Conference on Heat Engines and Environmental Protection, Matrafured, Hungary, 2019, pp. 1–9.
- [6] M. Palumbo, A.M. Lacasta, M.P. Giraldo, L. Haurie, E. Correal, Bio-based insulation materials and their hygrothermal performance in a building envelope system (ETICS), *Energy Build.* 174 (2018) 147–155, <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2018.06.042>.
- [7] M. Pfundstein, R. Gellert, A. Rudolphi, M. Spitzner, in: *Insulating Materials – Principles, Materials, Applications*, Birkhäuser, Basel, Switzerland, 2007, p. 112.
- [8] F. Asdrubali, F. D'Alessandro, S. Schiavoni, A review of unconventional sustainable building insulation materials, *Sustain. Mater. Technol.* 4 (2015) 1–17, <https://doi.org/10.1016/j.susmat.2015.05.002>.
- [9] S. Amziane, M. Sonebi, Overview on bio-based building material made with plant aggregate, *RILEM Tech. Lett.* 1 (2016) 31–38, <https://doi.org/10.21809/rilemtechlett.2016.9>.

- [10] A.M. Papadopoulos, State of the art in thermal insulation materials and aims for future developments, *Energy Build.* 37 (2005) 77–86, <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2004.05.006>.
- [11] L.F. Liu, H.Q. Lia, A. Lazzaretto, G. Manente, C.Y. Tong, Q.B. Liu, N.P. Li, The development history and prospects of biomass-based insulation materials for buildings, *Renew. Sust. Energy Rev.* 69 (2017) 912–932, <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.11.140>.
- [12] I. Lewandowski, C. Clifton-Brown, O. Scurlock, W. Huisman, Miscanthus: European Experience with a novel energy crop, *Biomass Bioenergy* 19 (2000) 209–227, [https://doi.org/10.1016/S0961-9534\(00\)00032-5](https://doi.org/10.1016/S0961-9534(00)00032-5).
- [13] I. Jelic, D. Zakic, A. Savic, D. Antonijevic, I. Petric, Mechanical properties of a new insulation material based on Miscanthus x Giganteus, in: XXVI International Conference Ecological truth & Environmental Research – EcoTER'18., Bor Lake Serbia, 2018, pp. 306–312.
- [14] E. Boix, F. Georgi, P. Navard, Influence of alkali and Si-based treatments on the physical and chemical characteristics of miscanthus stem fragments, *Ind. Crop. Prod.* 91 (2016) 6–14, <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2016.06.030>.
- [15] Rule Book on the Energy Efficiency of the Buildings. Official Gazette of the Republic of Serbia, No. 61/2011. https://www.paragraf.rs/propisi/pravilnik_o_energetskoj_efikasnosti_zgrada.html, 2011. Accessed 13 Sept 2019.
- [16] V. Pidlisnyuk, L. Erickson, S. Kharchenko, T. Stefanovska, Sustainable land management: growing miscanthus in soils contaminated with heavy metals, *J. Environ. Prot.* 5 (2014) 723–730, <https://doi.org/10.4236/jep.2014.58073>.
- [17] M. Muravljov, Construction materials, The Construction book, Belgrade, Serbia (2007) 397.
- [18] D. Kalló, In: D.L. Bish, D.W. Ming, (Eds.), Natural Zeolites: Occurrence, Properties, Applications. Reviews in Mineralogy and Geochemistry, Mineralogical Society of America 45 (2001) 519–550. DOI:10.2138/rmg.2001.45.15.
- [19] M. Najimi, J. Sobhani, B. Ahmadi, M. Shekarchi, An experimental study on durability properties of concrete containing zeolite as a highly reactive natural pozzolan, *Constr. Build. Mater.* 35 (2012) 1023–1033, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.04.038>.
- [20] S. Sircar, A. Myers, in: Handbook of Zeolite Science and Technology. Chapter 22: Gas Separation by Zeolites, Marcel Dekker, Inc., New York, USA, 2003, p. 1526.
- [21] H. Song, N. Zheng, F. Xue, F. Cheng, Study on thermal insulation zeolite by coal fly ash, *J. Nanomater.* (2014) 1–6, <https://doi.org/10.1155/2014/875940>.
- [22] SRPS B.C1.018:2015, Non-metallic mineral raw materials – Pozzolanic materials – Cement-production ingredients – Classification, technical conditions and test methods.
- [23] SRPS EN 450-1:2014, Fly ash for concrete – Part 1: Definition, specifications and conformity criteria.
- [24] P. Wang, J. Wang, Q. Qian, H. Wang, Life cycle assessment of magnetized fly-ash compound fertilizer production: a case study in China, *Renew. Sust. Energy Rev.* 73 (2017) 706–713, <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.02.005>.
- [25] American Society for Testing and Materials, standard ASTM C618, Standard Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use in Concrete.
- [26] Z. Ahmad, H.M. Saman, P.M. Tahir, Oil palm trunk fiber as a bio-waste resource for concrete reinforcement, *Int. J. Mech. Mater. Eng.* 5 (2) (2010) 199–207.
- [27] B. Belhadj, M. Bederina, Z. Makhloufi, R.M. Dheilily, N. Montrelay, M. Quéneudéc, Contribution to the development of a sand concrete lightened by the addition of barley straws, *Constr. Build. Mater.* 113 (2016) 513–522, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.03.067>.
- [28] SRPS EN 196-1:2018, Methods of testing cement – Part 1: Determination of strength.
- [29] SRPS EN 12390-1:2018, Testing hardened concrete – Part 1: Shape, dimensions and other requirements for specimens and molds.
- [30] SRPS EN 12350-6:2008, Testing fresh concrete – Part 6: Density for fresh state.
- [31] SRPS EN 12390-7:2010, Testing hardened concrete – Part 7: Density of hardened concrete.
- [32] A. Braiek, M. Karkri, A. Adili, L. Ibos, S.B. Nasrallah, Estimation of the thermophysical properties of date palm fibers/gypsum composite for use as insulating materials in building, *Energy Build.* 140 (2017) 268–279, <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2017.02.001>.
- [33] ISO 8302:1991, Thermal insulation – Determination of steady-state thermal resistance and related properties – Guarded hot plate apparatus.
- [34] ASTM C 642 – 97, Standard Test Method for Density, Absorption, and Voids in Hardened Concrete.
- [35] K. Veitmans, U. Grinfelds, Wood fiber insulation material, *Res. Rural Dev.* 2 (2016) 91–98.
- [36] L. Ducoulombier, Z. Lafhaj, Comparative study of hygrothermal properties of five thermal insulation materials, *Case Stud. Therm. Eng.* 10 (2017) 628–640, <https://doi.org/10.1016/j.csite.2017.11.005>.
- [37] F. Osanyintola, C. Simonson, Moisture buffering capacity of hygroscopic building materials: experimental facilities and energy impact, *Energy Build.* 38 (10) (2006) 1270–1282, <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2006.03.026>.
- [38] SRPS EN 12390-3:2010, Testing hardened concrete – Part 3: Compressive strength of test specimen.
- [39] SRPS EN 196-1:2017, Methods of testing cement – Part 1: Determination of strength.
- [40] R. Walker, S. Pavia, R. Mitchell, Mechanical properties and durability of hemp-lime concretes, *Constr. Build. Mater.* 61 (2014) 340–348, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.02.065>.
- [41] Y. Brouard, N. Belayachi, D. Hoxha, N. Ranganathan, S. Méo, Mechanical and hygrothermal behavior of clay – sunflower (*Helianthus annuus*) and rape straw (*Brassica napus*) plaster bio-composites for building insulation, *Constr. Build. Mater.* 161 (2018) 196–207, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.11.140>.
- [42] Australian urethane & styrene, Expanded Polystyrene (EPS), https://www.thermalps.com.au/imagesDB/wysiwyg/TDS_Expanded_Polystyrene.pdf.
- [43] Insulation – Materials, Science and Application, Gass Mineral Fibre & Rockwool, https://local.college.ie/Content/APPRENTICE/liu/ind_insulation/mod4/m4_u5.pdf.
- [44] EN 15304:2010, Determination of the freeze-thaw resistance of autoclaved aerated concrete.
- [45] W. Wang, J.J. Morrell, Water sorption characteristics of two wood-plastic composites, *Forest Prod. J.* 54 (12) (2004) 209–212.
- [46] J.M. Pilarski, L.M. Matuana, Durability of wood flourplastic composites exposed to accelerated freeze-thaw cycling, part I Rigid PVC matrix, *J. Vinyl Addit. Techn.* 11 (1) (2006) 1–8, <https://doi.org/10.1002/vnl.20029>.
- [47] K. Van Balen, D. Van Gemert, Modelling lime mortar carbonation, *Mater. Struct.* 27 (1994) 393–398, <https://doi.org/10.1007/BF02473442>.