



УНИВЕРЗИТЕТ У НОВОМ САДУ
ФАКУЛТЕТ ТЕХНИЧКИХ НАУКА
У НОВОМ САДУ



Никола Маодуш

**РАЗВОЈ И ПРИМЕНА
БИОКОМПОЗИТНОГ ПЛОЧАСТОГ
ТЕРМОИЗОЛАЦИОНОГ МАТЕРИЈАЛА
НА БАЗИ БИОМАСЕ И МИЦЕЛИЈУМА
ГЉИВА**

ДОКТОРСКА ДИСЕРТАЦИЈА

Нови Сад, јул 2019

Захвалница

Ова дисертација је резултат великог броја интеракција са различитим људима, институцијама и приватним компанијама које су својим доприносом омогућили њену израду. Овим путем бих да се захвалим свима који су ми помогли око израде дисертације у нади да нико није изостављен:

На првом месту бих да се захвалим свом саветнику и првом ментору проф. др Мирослави Радеки пре свега на указаном стрпљењу (знам да није било лако), а затим на конструктивним критикама, саветима, усмеравањима, несебичној подршци и помоћи током свих фаза докторских студија и израде дисертације. Хвала Вам што сте били покретачка снага и подршка у току ових осам дугих година.

Велику захвалност дугујем редовном професору др Синиши Маркову са Технолошког факултета Универзитета у Новом Саду и научном сараднику др Душанки Бугарски са Института за ратарство и повртарство „НС Семе“, који су својим доприносом имали улогу додатних ментора и без чије помоћи дисертација у овом облику не би била изводљива. Не могу довољно да се захвалим за несебичну помоћ коју су радо пружили, за знање и за вредне и стручне савете и идеје у вези са експерименталним делом дисертације које су свесрдно делили кроз многобројне консултације, имејл преписке и телефонске разговоре.

Професору др Милану Мартинову као другом ментору, који је пре свега својим знањем, критикама, вредним и правовременим саветима и изузетном посвећеношћу значајно допринео свеопштем квалитету ове дисертације. Хвала Вам и за помоћ које нисам био свестан.

Колегиници проф. др Драгани Штрбац и њеном супругу ван. проф. др Горану Штрпцу за свесрдну саветодавну помоћ, помоћ око експерименталних испитивања на материјалу и на искреној пријатељској подршци.

Колегиници и пријатељици др Лидији Ђурђевац Игњатовић и њеном супругу Драгану Игњатовићу за искрену пријатељску и несебичну помоћ код извођења испитивања механичких својстава без којих дисертација не би имала толику вредност.

Колегама и пријатељима Марку Голубу и Миодрагу Живанчеву за све идеје, конструктивна решења, физичку помоћ при извођењу експерименталног дела, али и за сав оптимизам, добро расположење и пријатељство који су ми олакшали ток студија.

Брату Жељку Басарићу који је у критичном моменту пружио своју стручну помоћ и израдио делове опреме који су били неопходни за једно од најважнијих испитивања материјала, испитивања фактора отпора дифузији водене паре.

Колегиници Сенки Вуковић на свим стручним и пријатељским саветима и срдечној помоћи у вези са хемикалијама и лабораторијском опремом без којих би квалитет израде тезе био знатно сиромашнији.

Колеги др Борису Агарском, на несебичној помоћи и практичним саветима приликом извођења LCA студија.

Колегама са грађевинског одсека др Весни Булатовић и др Ивану Лукићу за помоћ око лабораторијске опреме.

Венчаној куми Слађани Маровић за почетну информацију која је покренула даље интересовање за развијање методе примене мицелијума у овом контексту.

Свим колегама са Департмана за инжењерство заштите животне средине и заштите на раду на разумевању, подршци и усмерењима.

Свим пријатељима који су директно или индиректно допринели изради дисертације.

И на крају, неизмерну захвалност дугујем својој породици за све што су ме научили, на свој подршци и разумевању које су ми пружили упркос свим потешкоћама и без чије подршке не бих ни започео докторске студије.

Дисертација је изведена уз велику подршку и помоћ Департмана за грађевинарство и геодезију, Факултета техничких наука Универзитета у Новом Саду у чијим лабораторијама је изведена припрема материјала и део неопходних истраживања; Института за рударство и металургију у Бору који је омогућио испитивање механичких својстава материјала; компаније Knauf Insulation д.о.о. која је омогућила испитивање коефицијента топлотне проводљивости и запреминске масе у оквиру своје лабораторије; Департмана за инжењерство заштите животне средине и заштите на раду, Факултета техничких наука Универзитета у Новом Саду чија лабораторија је омогућила коришћење опреме у финалним фазама експеримента; и Технолошког факултета Универзитета у Новом Саду, у чијој лабораторији је изведено испитивање активности воде. Такође, значајну помоћ пружио је господин Милош Бокоров за анализу узорака у Лабораторији за микробиологију, Универзитетског центра за електронску микроскопију – Нови Сад (UCEM – NS), Природно-математичког факултета Универзитета у Новом Саду.

Овим путем се захваљујем и господину Вуку Раичевићу – за обезбеђену конопљу потребну за извођење експеримента; господину Александру Пиперском из компаније Термика д.о.о. за обезбеђени перлит и компанији Мива д.о.о. за обезбеђену уситњену пшеничну сламу која је коришћена приликом израде појединих серија узорака.

Нови Сад, јул 2019.

Никола Маодуш



КЉУЧНА ДОКУМЕНТАЦИЈСКА ИНФОРМАЦИЈА

Редни број, РБР:	-		
Идентификациони број, ИБР:	-		
Тип документације, ТД:	Монографска публикација		
Тип записа, ТЗ:	Текстуални штампани материјал		
Врста рада, ВР:	Докторска дисертација		
Аутор, АУ:	МСц. Никола Маодуш		
Ментор, МН:	др Мирослава Радека, редовни професор др Милан Мартинов, редовни професор		
Наслов рада, НР:	Развој и примена биокompatитног плочастог термоизолационог материјала на бази биомасе и мицелијума гљива		
Језик публикације, ЈП:	Српски (ћирилица)		
Језик извода, ЈИ:	српски/енглески		
Земља публикавања, ЗП:	Република Србија		
Уже географско подручје, УГП:	Аутономна покрајина Војводина		
Година, ГО:	2019.		
Издавач, ИЗ:	ауторски репринт		
Место и адреса, МА:	Нови Сад, Трг Доситеја Обрадовића 6		
Физички опис рада, ФО: (поглавља/страна/ цитата/табела/слика/графика/прилога)	4/111/169/18/33/0/0		
Научна област, НО:	Грађевинско инжењерство		
Научна дисциплина, НД:	Грађевински материјали		
Предметна одредница/Кључне речи, ПО:	Биокompatит, термоизолациони панели, пшенична слама, конопља, мицелијум, биомаса, својства		
УДК			
Чува се, ЧУ:	У библиотеци Факултета техничких наука, Нови Сад		
Важна напомена, ВН:	Текст лекторисала: Зорана Ловрић-Јухас		
Извод, ИЗ:	Истраживање у оквиру докторске дисертације обухвата анализу могућности производње и примене биокompatитних термоизолационих плоча заснованих на нуспроизводима пољопривредне производње и мицелијума гљиве буковаче као везивног средства. Циљеви истраживања су развој методе за производњу биокompatитних термоизолационих материјала и утврђивање морфолошких, физичко-хемијских, механичких и хигротермичких својстава биокompatита. У складу са резултатима истраживања и закључцима да је могуће произвести и користити биокompatитни термоизолациони материјал заснован на биомаси и мицелијуму гљива изведена је анализа енергетске ефикасности и животног циклуса материјала. Резултати истраживања представљају значајну полазну основу за производњу и даље унапређење биокompatитних термоизолационих материјала у грађевинарству, са позитивном оценом мицелијума гљива као везивног средства.		
Датум прихватања теме, ДП:	25.04.2018.		
Датум одбране, ДО:			
Чланови комисије, КО:	Председник:	др Мирјана Малешев, редовни професор	Потпис ментора
	Члан:	др Властимир Радоњанин, редовни професор	
	Члан:	др Сениша Марков, редовни професор	
	Члан:	др Зоран Грдић, редовни професор	
	Члан, ментор:	др Мирослава Радека, редовни професор	
	Члан, ментор:	др Милан Мартинов, редовни професор	



KEY WORDS DOCUMENTATION

Accession number, ANO :	-		
Identification number, INO :	-		
Document type, DT :	Monograph publication		
Type of record, TR :	Printed text material		
Contents code, CC :	PhD Thesis		
Author, AU :	Nikola Maoduš, MSc		
Mentor, MN :	Prof. dr Miroslava Radeka Prof. dr Milan Martinov		
Title, TI :	Development and utilisation of biocomposite thermal insulation panels based on biomass and mushroom mycelium		
Language of text, LT :	Serbian (Cyrillic)		
Language of abstract, LA :	Serbian/English		
Country of publication, CP :	Republic of Serbia		
Locality of publication, LP :	Autonomous Province of Vojvodina		
Publication year, PY :	2019		
Publisher, PB :	Author's reprint		
Publication place, PP :	6 Trg Dositeja Obradovića, Novi Sad		
Physical description, PD : (chapters/pages/ref./tables/pictures/graphs/appendixes)	4/111/169/18/33/0/0		
Scientific field, SF :	Civil Engineering		
Scientific discipline, SD :	Building materials		
Subject/Key words, S/KW :	Bio-composite, thermal insulation panels, wheat straw, hemp, mycelium, biomass, properties		
UC			
Holding data, HD :	The Library of the Faculty of Technical Sciences, Novi Sad		
Note, N :	Serbian language lector: Zorana Lovrić-Juhás		
Abstract, AB :	Research in the thesis is focused on development and utilisation of biocomposite thermal insulation panels based on agricultural biomass and oyster mushroom mycelium as a binding agent. The goals of the research are development of production method of biocomposite thermal insulation panels and determination of morphological, physical-chemical, mechanical and hygrothermal properties of the biocomposite. Energy efficiency and life cycle assessment were conducted in accordance with the research results and conclusions that it is possible to manufacture and use the biocomposite thermal insulation panels based on biomass and mushroom mycelium. The research results represent significant starting point for manufacturing and further improvement of biocomposite thermal insulation panels used in civil engineering and confirm the use of mycelium as a binding agent.		
Accepted by the Scientific Board on, ASB :	25.04.2018.		
Defended on, DE :			
Defended Board, DB :	President:	Full professor Mirjana Malešev, PhD	Mentor's sign
	Member:	Full professor Vlastimir Radonjanin, PhD	
	Member:	Full professor Siniša Markov, PhD	
	Member:	Full professor Zoran Grdić, PhD	
	Member, Mentor:	Full professor Miroslava Radeka, PhD	
	Member, Mentor:	Full professor Milan Martinov, PhD	

САДРЖАЈ

1	Увод	1
1.1	Грађевински термоизолациони материјали	3
1.1.1	Критеријуми за оцењивање	3
1.1.2	Законска регулатива у ЕУ и у Републици Србији	6
1.1.3	Конвенционални термоизолациони материјали.....	9
1.2	Биополимерни и биокompatитни термоизолациони материјали.....	14
1.2.1	Пшенична слама.....	23
1.2.2	Конопља	25
1.2.3	Гљива буковача (<i>Pleurotus ostreatus</i>).....	27
1.3	Критеријуми за оцену утицаја грађевинских материјала на животну средину.....	30
1.4	Циљеви истраживања и хипотезе	33
2	Материјали и методи.....	34
2.1	Материјали.....	35
2.1.1	Пшенична слама.....	35
2.1.2	Конопља	35
2.1.3	Буковача.....	35
2.2	Методи.....	35
2.2.1	Производња плочастог термоизолационог материјала.....	35
2.2.2	Испитивање својстава биокompatитних плоча као термоизолационог материјала у грађевинарству	38
2.2.3	Моделовање енергетске ефикасности и анализа животног циклуса .	45
3	Резултати и дискусија	49
3.1	Производња плочастог термоизолационог материјала.....	49
3.2	Својства биокompatитних плоча термоизолационог материјала	59
3.3	Моделовање енергетске ефикасности и анализа животног циклуса ...	89
3.4	Препоруке за практичну примену биокompatита.....	94
3.5	Правци даљих истраживања	95
4	Закључци.....	97
5	Литература.....	101

Резиме

У раду се разматра проблематика све већих енергетских захтева за одржавање микроклиме у стамбеним објектима и штетним утицајем мера које се примењују за очување енергетског стања на животну средину и здравље људи који бораве у тим објектима. Циљеви истраживања су производња новог биокомпозитног плочастог термоизолационог материјала употребом биомасе из пољопривредне производње и мицелијума гљиве буковаче као везивног средства, као и да се испитају његове карактеристике и могућност примене у породичним стамбеним објектима. Рад садржи три радне хипотезе. Прва хипотеза претпоставља могућност производње биокомпозита. Друга хипотеза претпоставља погодност примене биокомпозита као термоизолационог материјала, а трећа хипотеза, прихватљивост биокомпозита са аспекта утицаја на животну средину. Применом принципа биоэкономије разматра се и могућност спрегнуте производње здравих и еколошки прихватљивих термоизолационих материјала и прехранбених производа.

Прегледом актуелних литературних навода утврђено је да постоји већи број истраживања усмерених на примену лигноцелулозних сировина за производњу термоизолационих грађевинских материјала уз употребу различитих синтетичких везива. Мањи број истраживања је фокусиран на примену природних везивних средстава, међутим, веома мали број истраживања се бави применом мицелијума као везивног средства, а нарочито код производње термоизолационих материјала.

На основу литературних извора дефинисан је програм експерименталног истраживања дисертације који се састоји из две целине. Прву целину чини испитивање параметара за производњу биокомпозита. Као основна сировина коришћене су пшенична слама и конопља као нуспроизводи из пољопривредне производње. Као везивно средство у плочама коришћен је мицелијум гљиве буковаче. Кроз седамнаест серија експеримента мењано је 11 различитих параметара који утичу на квалитет биокомпозита. Другу целину чине морфолошка, механичка, физичко-хемијска и хигротермичка испитивања према важећим EN и ISO стандардима за термоизолационе материјале. Такође, изведено је моделовање енергетске ефикасности на примеру породичног стамбеног модела и поједностављена компаративна процена утицаја биокомпозита на животну средину.

Резултати прве целине експеримента дефинишу сет параметара за производњу биокомпозитног термоизолационог материјала задовољавајућег квалитета за практичну примену. Резултати испитивања у оквиру друге целине дефинишу биокомпозит као прави термоизолациони материјал са коефицијентом топлотне проводљивости од $0,046$ до $0,049 \text{ W(m K)}^{-1}$, запреминске масе од 128 до 157 kg m^{-3} , механичким својствима упоредивим са експандираним полистиреном и фактором дифузионе отпорности водене паре од $3,3$ до $3,8$. Такође, утврђено је да биокомпозит није погодан за примену на релативним влажностима ваздуха вишим од 75% и да је неопходно заштитити материјал од појаве кондензата и директног квашења. Анализа утицаја на животну средину указује да је материјал прихватљивији од експандираног и екструдираниог полистирена, али не и од минералних вуна, плуте и термоизолације на бази целулозе.

Ово истраживање је показало да је могуће остварити спрегнуту производњу биокомпозитног термоизолационог материјала задовољавајућих термоизолационих карактеристика, безбедног по људско здравље и гљиве буковаче као прехранбеног производа. Биокомпозит може да се примењује као грађевински термоизолациони материјал у стамбеним објектима уколико се обезбеде неопходни услови са аспекта заштите материјала од утицаја влаге. Постоји значајан потенцијал у унапређењу и

оптимизацији производног процеса биокompозита са циљем смањења трошкова производње и утицаја на животну средину, а нарочито са аспекта сушења материјала применом савремених технологија. Такође, утврђено је да биокompозит има значајан научно-истраживачки потенцијал са аспекта примене и других врста биомасе.

Кључне речи: Биокompозит, термоизолациони панели, пшенична слама, конопља, мицелијум, биомаса, својства

Abstract

The thesis analyses issues arising from growing energy demands for maintenance of microclimate conditions in residential buildings, and adverse impact of measures undertaken towards preservation of the building's energy state on environment and health of their residents. Goals of this research are production of a new biocomposite thermal insulation panels from agricultural biomass and oyster mushroom mycelium as a binding agent, and analysis of the characteristics of such manufactured material and its possible utilisation in single-family residential buildings. The thesis consists of three hypotheses. First hypothesis presumes the production possibility of biocomposite material. Second hypothesis presumes the possibility of utilisation of such biocomposite as a thermal insulation material in buildings, and third hypothesis presumes acceptability of biocomposite from environmental aspect. The possibility of joint production of healthy and environmentally friendly thermal insulation materials and food products by application of bioeconomy principles is also considered.

Through review of latest scientific literature, it is determined that there is significant number of research papers oriented towards use of lignocellulose materials for manufacturing thermal insulation materials by use of different synthetic binders. Lesser number of authors are considering the use of natural binders and even lesser number of papers considers mycelium as a binder, especially in production of thermal insulation materials in buildings.

Experimental research for the thesis is based on latest literature sources and it consists of two major parts. The first part consists of analysis of parameters for manufacturing of the biocomposite. Wheat straw and hemp are used as a basis material sourced as an agricultural by-product. Oyster mushroom mycelium is used as a binder in the biocomposite panels. Through seventeen series of experiments, eleven different parameters that have an impact on quality of the biocomposite material were considered. The second major part of experimental research consists of morphological, mechanical, physio-chemical and hygrothermal testing according to current EN and ISO thermal insulation standards. Also, modelling of energy efficiency of a single-family residential building and a simplified comparative life cycle analysis of some conventional materials and biocomposite was performed.

The results of the first part of experimental research define the set of parameters for production of the biocomposite thermal insulation material of satisfactory quality for practical application. The results of the second part of experimental research define the biocomposite as a true thermal insulation material with thermal conductivity coefficient ranging from 0.046 to 0.049 $W(m\ K)^{-1}$, volumetric mass ranging from 128 to 157 $kg\ m^{-3}$, mechanical properties comparable to expanded polystyrene and water vapour resistance factor ranging from 3.3 to 3.8. It is also determined that biocomposite is not suitable for use in relative air humidity values above 75 % and that it is imperative to protect the material from interstitial condensation and direct wetting. Life cycle analysis indicates that biocomposite material is environmentally more acceptable than expanded and extruded polystyrene, but not more acceptable than mineral wool, expanded cork or cellulose thermal insulation.

This research has shown that it is possible to accomplish joint production of biocomposite thermal insulation material with satisfactory thermal performance, harmless for the residents, and oyster mushroom as a food product. Biocomposite can be used as a thermal insulation material in buildings if certain moisture protection conditions are provided. There is a considerable potential in improvement and optimisation of manufacturing process of biocomposite from environmental and cost reduction aspect, especially when it comes to

material drying process using modern techniques. It is also determined that biocomposite has considerable scientific research potential if other sources of biomass are utilised.

Key words: Bio-composite, thermal insulation panels, wheat straw, hemp, mycelium, biomass, properties

Листа симбола и скраћеница употребљених у дисертацији

AAS	– Аерисани аутоклавирани бетон	μ	– Фактор отпора дифузији водене паре
ATR	– Спектроскопија интерне рефлексије (Attenuated Total Reflectance)	a_w	– Активност воде
CBR	– California Bearing Ratio	c_p	– Специфични топлотни капацитет
DSC	– Диференцијална скенирајућа калориметрија	E	– Модул еластичности
DTA	– Диференцијална термална анализа	f_m	– Чврстоћа при савијању
EE	– Енергетска ефикасност	f_p	– Чврстоћа при притиску
EPS	– Експандирани полистирен	f_t	– Чврстоћа при затезању
EU	– Европска унија	m_s	– Маса осушеног узорка
FTIR	– Инфрацрвена спектроскопија са Фуријеовом трансформацијом	M_{sm}	– Удео суве материје у материјалу
GHG	– Гасови са ефектом стаклене баште	m_v	– Маса влажног узорка
HDPE	– Полиетилен високе густине	pH	– Показатељ киселости средине (pH вредност)
LCA	– Процена утицаја на животну средину	$Q_{H,nd}$	– Специфична годишња потребна топлота за грејање
LCI	– Инвентар животног циклуса	$Q_{H,nd,max}$	– Максимално дозвољена годишња потребна топлота за грејање
LCIA	– Процена утицаја животног циклуса	T_s	– Температура размекшавања
MFA	– Угао микрофибрила	U	– Коефицијент пролаза топлоте
PE	– Полиетилен	W_{hig}	– Удео влаге у материјалу
PF	– Фенол-формалдехид	W_{lp}	– Упијање воде
PLA	– Полимлечна киселина	W_m и W_v	– Отпорност на дејство мраза
PP	– Полипропилен	λ	– Коефицијент топлотне проводљивости
PU	– Полиуретан	ρ	– Запреминска маса
PVC	– Поливинил хлорид	$\sigma_{p,10\%}$	– Напон при притиску при 10 % деформације
SEM	– Скенирајући електронски микроскоп		–
SP	– Степен полимеризације		–
TG	– Термогравиметрија		–
TGA	– Термогравиметријска анализа		–
THC	– Тетрахидроканабинол – психоактивна супстанца индијске конопље		–
UF	– Уреа-формалдехид		–
UN	– Уједињене Нације		–
UV	– Ултразубичасто		–
XPS	– Екструдирани полистирен		–
ТИ	– Термоизолациони		–
			–

Листа слика

Сл. 2.1: Механизам за оптерећивање узорака при савијању према EN 12089 стандарду: 1 – цилиндар преко којег се преноси сила на узорак; 2 – узорак ТИ материјала; 3 – цилиндрични ослонаци на које се узорак поставља; а – дужина узорка која прелази ван ослонаца – 25 mm; d – дебљина узорка – 50 mm; L – растојање између цилиндричних ослонаца – 250 mm	40
Сл. 2.2: Опрема за испитивање чврстоће при савијању према стандарду EN 12089.....	41
Сл. 2.3: TA Instruments, LaserComp FOX 600 уређај за испитивање коефицијента топлотне проводљивости према EN 12667, ISO 8301 и ASTM C518 стандардима (TA Instruments, 2018).....	43
Сл. 2.4: Посуда за испитивање фактора отпора дифузији водене паре: 1 – посуда, поглед са горње стране; 2 – шаблон за одређивање центра и наливање заптивне масе; 3 – посуда, поглед са доње стране; 4 – прстен, ослонац за узорак.....	44
Сл. 2.5: Слојеви конструкције спољног зида модела за поређење енергетске ефикасности ТИ материјала	46
Сл. 2.6: Границе система LCA студије одабраних модела	48
Сл. 3.1: Визуелни приказ развоја мицелијума на бочној страни калупа у току времена код узорака без додатка сахарозе (слике на левој страни) и са додатком сахарозе у току пастеризације (слике на десној страни)	50
Сл. 3.2: Слике узорака 18. дана инкубације: узорак без додатка сахарозе (на левој) и узорак са додатком сахарозе (слика на десној страни). Слике су обрађене, при чему им је уклоњена боја ради лакшег визуелног прегледа.	51
Сл. 3.3: Пример оштећења насталог приликом руковања материјалом услед сувише велике кртости	54
Сл. 3.4: Пример неуспешног узорка биокомпозита са супстратом дужине до 8 mm. Развој мицелијума инхибиран у централном делу узорка услед формирања анаеробних услова средине (означено црвеним кругом)	54
Сл. 3.5: Пример прораста мицелијума буковаче соја Б96 старог 30 дана, на Сладном агару након 7 дана инкубације на 25 °C.....	58
Сл. 3.6: Макроскопски приказ структуре узорака биокомпозитног материјала од пшеничне сламе: пре сушења (А) и након сушења (Б)	60
Сл. 3.7: Попречни пресек узорка биокомпозита са конопљом, мицелијумом и перлитом након сушења.....	60
Сл. 3.8: Раст мицелије са унутрашње стране влакна супстрата (увећање 32 x).....	61
Сл. 3.9: Приказ живе мицелије буковаче под микроскопом (увећање 32 x).....	62
Сл. 3.10: Изглед влакана са тањим слојем мицелије на површини (слика лево) и влакана покривених са више слојева мицелије (слика десно)	62
Сл. 3.11: SEM снимак вишеслојног прораста мицелије на супстрату: увећање 100 x (слика лево) и 500 x (слика десно).....	63
Сл. 3.12: Приказ слабог прораста мицелијума на супстрату при увећању од 500 x (слика лево) и 1000 x (слика десно)	63

Сл. 3.13: Приказ једне од регија без присуства мицелије при увећању од 1000 x (слика лево) и 2000 x (слика десно)	64
Сл. 3.14 ATR-FTIR спектри испитаних узорака чистог супстрата и биокомпозита – чиста пшенична слама (доња крива) и биокомпозит са пшеничном сламом (горња крива).....	66
Сл. 3.15: ATR-FTIR спектри испитаних узорака чистог супстрата и биокомпозита – чиста конопља (доња крива) и биокомпозит са конопљом (горња крива).....	67
Сл. 3.16 Карактеристичне траке трансмитансе за хитин (Rahman and Halfar, 2015)	70
Сл. 3.17: Резултујући спектар након што се од спектра биокомпозита одузме спектар чистог супстрата (биокомпозит са пшеничном сламом)	71
Сл. 3.18: Узорак биокомпозита са конопљом оптерећеног при притиску у правцу управном на простирање влакана пре (слика лево) и након теста (слика десно)	72
Сл. 3.19: Приказ узорка биокомпозита са конопљом оптерећеног при притиску у правцу простирања влакана пре (слика лево) и након теста (слика десно)	73
Сл. 3.20: Радни дијаграм напон/деформација биокомпозита при оптерећењу узорака при притиску у правцу простирања влакана	74
Сл. 3.21: Приказ лома приликом испитивања чврстоће при савијању биокомпозита са конопљом	75
Сл. 3.22: Резултати испитивања специфичног топлотног капацитета биокомпозита са пшеничном сламом (график означен црном бојом горе) и биокомпозита са конопљом (график означен црном бојом доле). Црвеном бојом је на графицима означен референтни материјал, алуминијум-оксид.	77
Сл. 3.23: Упоредни приказ специфичног топлотног капацитета референтног материјала – алуминијум-оксида (1), биокомпозита са конопљом (2) и биокомпозита са пшеничном сламом (3).....	78
Сл. 3.24 Уопштени DSC дијаграм хемицелулозе, целулозе и лигнина (Yang et al., 2007, делимично прилагођено).....	82
Сл. 3.25: DSC–TGA анализа ТИ материјала заснованог на пшеничној слами као супстрату	84
Сл. 3.26: DSC–TGA анализа ТИ материјала заснованог на конопљи као супстрату	85
Сл. 3.27: Резултати LCA производног процеса биокомпозита и конвенционалних ТИ материјала у категорији климатских промена према <i>IMPACT 2002+</i> методологији	93

Листа табела

Таб. 1.1 Вредности коефицијента топлотне проводљивости за неке грађевинске материјале (Gojković, 1983; Kozić et al., 1979; Muravljov, 2005; Radeka, 2009, делимично прерађено)	4
Таб. 1.2 Вредност специфичног топлотног капацитета за неке материјале (Kozić et al., 1979; Radeka, 2009; Zhang et al., 2011, делимично прерађено)	4
Таб. 1.3 Енергетски разреди зграда (<i>Pravilnik o uslovima, sadržini i načinu izdavanja sertifikata o energetskim svojstvima zgrada</i> ("Sl. glasnik RS", br. 61/2011), 2011, делимично прерађено)	9
Таб. 1.4 Физичка својства појединих природних влакана (Ebnesajjad, 2013; Wertz et al., 2010, делимично прерађено)	15
Таб. 1.5 Термичка својства целулозе (Wertz et al., 2010, делимично прерађено)	16
Таб. 1.6 Испитивани параметри квалитета биокомпозита других аутора	23
Таб. 1.7 Енергетски конзум производног процеса појединих грађевинских материјала (Gvozdenac et al., 2010; Krnjetin, 2004; Yükses, 2015, делимично прерађено)	31
Таб. 2.1: Услови средине за испитивање фактора отпора дифузији водене паре за хигроскопне материјале према стандарду EN 12086	44
Таб. 2.2: Слојеви конструкције елемента спољних зидова одабраних модела ..	46
Таб. 3.1: Активност воде биокомпозита у односу на равнотежну релативну влажност ваздуха	64
Таб. 3.2: Резултати спектралне анализе за биокомпозите и њихове чисте супstrate	68
Таб. 3.3: Табеларне вредности специфичног топлотног капацитета биокомпозита у одабраном температурном опсегу	78
Таб. 3.4: Просечне вредности коефицијента топлотне проводљивости и запреминске масе узорака	79
Таб. 3.5: Резултати испитивања фактора отпора дифузији водене паре за биокомпозит према EN 12086 стандарду	80
Таб. 3.6: Упоредне карактеристике појединих ТИ материјала (Klarić, 2017; Olive, 2016; Radonjanin and Malešev, 2012; Todorović et al., 2012, делимично прерађено) ..	87
Таб. 3.7: Резултати енергетског аудита одабраних модела за лаки тип конструкције	89
Таб. 3.8: Резултати енергетског аудита одабраних модела за средње тешки тип конструкције	91
Таб. 3.9: Резултати енергетског аудита одабраних модела за тешки тип конструкције	91

„Шта је немогуће одређујемо ми“ (Владимир Пиштало – Тесла, портрет међу маскама)

„The nation behaves well if it treats the natural resources as assets which it must turn over to the next generation increased, and not impaired in value“ (Theodore Roosevelt)

„A society is defined not only by what it creates but also by what it refuses to destroy“ (John C. Sawhill)

„The first rule of sustainability is to align with natural forces, or at least not try to defy them“ (Paul Hawken)

1 УВОД

Утицај коришћења фосилних сировина на промену климе, изазвану ефектом стаклене баште, већ дуго је познат и означен као један од највећих проблема савременог света. Како у свету, тако и у Европској унији (EU) јасно су дефинисане мере за смањење емисија гасова са ефектом стаклене баште (GHG), које се, пре свега, односе на коришћење фосилних и већу заступљеност обновљивих извора енергије. Познато је да су фосилна горива, а пре свега нафта, истовремено и извори сировина за бројне производе, те се разматрају могућности њихове замене коришћењем обновљивих сировина, а пре свега биомасе. Из ових глобалних циљева произашли су многи захтеви усмерени ка грађевинарству као индустријској грани која је препозната као велики потрошач енергије, генератор отпадних материјала и емитер гасова са ефектом стаклене баште. Ти захтеви усмерени су на повећање ефикасности у коришћењу природних ресурса и енергетске ефикасности објекта (European Parliament and the Council of the European Union, 2018). Прогнозе су да ће социоекономске промене како у овом тренутку тако и у будућности бити праћене растом броја становника и повећањем степена урбанизације. Последица овог раста води ка повећању броја стамбених и индустријских објекта, развоју инфраструктурне мреже, а тај развој ће бити нарочито изражен у регионима који су у развоју. Све то прати пораст притиска на коришћење природних ресурса, као и повећање количине отпадног грађевинског материјала који се одлаже на депоније комуналног отпада.

Савремени приступ у постизању енергетске ефикасности подразумева да се води рачуна о неколико параметара. Наиме, поред изградње нових објекта енергетске ефикасности у рангу пасивне куће, стари објекти се континуирано реконструишу са све мањим коефицијентом пролаза топлоте (U). Осим задовољења критеријума везаних за смањење енергије потребне за одржавање повољне микроклиме у објекту, једнако је важно да енергија која се уложи у производњу и уградњу грађевинских материјала, посебно термоизолационих (ТИ) материјала, буде сведена на минимум. Овај критеријум се задовољава коришћењем локалних материјала прихватљиве цене, за чију производњу се користе унапређене традиционалне технологије прихватљиве са становишта заштите животне средине. Коришћењем биомасе, пре свега оне која представља жетвени остатак, задовољавају се критеријуми одрживог развоја, смањује загађење и количина материјала која се одложе на депоније. У том смислу говори се и у оквиру биономије, која обухвата бројне области, а поред хране и другог, производњу сировина за разне производе, на пример, биопластику.

За повећање енергетске ефикасности објекта примена термоизолационих материјала у спољашњем омотачу објекта има значајну улогу. Као ТИ материјали најчешће се користе синтетички материјали, а њихова досадашња примена показала је одређене недостатке. Наиме, савремени синтетички ТИ грађевински материјали, попут полимерних пена на бази полистирена и полиуретана, нису подложни процесима органске разградње након употребе. У њиховој производњи користе се синтетичка везивна средства, гасови који се користе за стварање порозне структуре и различити адитиви са циљем унапређења својстава материјала што доказано представља здравствени ризик по станаре и животну средину. Овакви материјали су пореклом из необновљивих извора сировина, захтевају значајније количине топлотне и електричне енергије у току производње и за њих не постоји адекватно решење на крају њиховог животног века. С друге стране, коришћење природних материјала за

производњу ТИ материјала значи напуштање технологија са високим енергетским захтевима и увођење принципа одрживог развоја. Ово нам омогућава коришћење природних органских материја као полазних сировина за производњу ТИ материјала. Досадашња искуства са припремом ових материјала за функцију топлотне изолације указују да код припреме биомасе, која је у облику ситних влакана, постоји проблем њиховог повезивања. Најчешће је у те сврхе коришћен цемент чији утицај на животну средину је негативан и добро образложен у литератури (International Energy Agency, 2015; Van den Heede and De Belie, 2012; Venkatarama Reddy and Jagadish, 2003). Стога је у овом раду, поред биомасе, размотрена могућност коришћења гљиве чији мицелијум има управо улогу везивне компоненте за производњу ове врсте материјала. Увођењем живих организама у науку о материјалима и производњом заснованом на контролисаним процесима њиховог раста, као и нуспроизводима из пољопривредне производње, могуће је заменити постојеће грађевинске ТИ материјале засноване на синтетичким материјалима. Биономија и одрживи развој у градитељству имају сличне циљеве и вредности којима се тежи, а огледају се кроз еколошки прихватљиву градњу. Поред унапређења услова рада и становања, повећања трајности и енергетске ефикасности (ЕЕ) објеката, еколошки прихватљива градња за циљ има заштиту природних ресурса и екосистема, као и да омогући здравији и бољи квалитет живота људске заједнице. Примена обновљивих сировина и еколошки прихватљивих грађевинских материјала представља само један од важних аспеката еколошки прихватљиве градње (Kubba, 2012). Једна од примена обновљивих сировина је њихово коришћење за термоизолационе материјале. Савремени ТИ материјали треба да задовоље бројне захтеве који су јасно дефинисани. Поред техничко–технолошких захтева очекује се да ТИ материјали задовоље и економске захтеве. Такође, ресурси биомасе која би се користила као супстрат треба да буду доступни и у значајним количинама, а не само да се докаже да су применљиви. То је захтев праксе, односно тржишта. О томе је вођено рачуна при избору сировина за израду предметног биокомпозитног плочастог ТИ материјала.

Европска комисија у Стратегији за развој биономије у Европи дефинише биономију као „производњу и конверзију обновљивих биолошких ресурса, као и конверзију њихових нуспроизвода у производе са додатом вредношћу попут хране, хране за животиње, производа заснованих на биомаси и биоенергије. Биономијски сектори и индустрије имају снажан утицај на иновациони потенцијал услед примене сазнања из великог броја научних области које, уз локално и искуствено знање, омогућују и развој индустријских технологија.“ (European Commission, 2018, 2012). Акциони план и стратегија биономије имају за циљ да створе иновативније друштво које ефикасније искоришћава изворе сировина и које успоставља везу између производње хране и одрживог коришћења сировина у индустријске сврхе. Успостављање биономије има велики потенцијал у виду стварања нових радних места и одржавања економског раста руралних предела; смањења зависности од фосилних извора сировина и унапређења економске и еколошке одрживости индустријске примарне производње и прераде. Биономија на овај начин значајно доприноси циљевима Стратегије ЕУ до 2020. године. Стратегија за развој биономије је недавно измењена како би се дао максималан допринос циљевима одрживог развоја ЕУ до 2030. године, циљевима Агенде Уједињених нација (UN) за одрживи развој до 2030. године и циљевима Париског споразума из 2015. године. Нова стратегија за циљ има ојачање веза између економије, друштва и животне средине.

Резултати истраживања приказани у оквиру овог документа фокусирани су на технологију производње и карактеризацију биокомпозитних ТИ плоча. Плоче су

израђене од лигноцелулозног материјала повезаног мицелијумом гљива које могу да разграде такав материјал. У овом случају мицелијум има улогу матрице док лигноцелулозни материјал обезбеђује одговарајућа механичка својства, односно, примена мицелијума има за циљ да замени синтетичка везивна средства која се користе код производње конвенционалних ТИ материјала. Коришћене су две врсте биомасе које представљају жетвене остатке, нуспроизводе пољопривредне производње. То су пшенична слама и конопља. Када се говори о пшеничној слами, потпуно је јасно да се ради о нуспроизводу, жетвеном остатку, који се већ користи као извор енергије, простирка у сточарству, покривка за биљну производњу и друго. Конопља је позната биљка, која се пре свега користи за производњу квалитетних и чврстих влакана. Мање је познато коришћење семена конопље, као хране, али и извора високо квалитетног уља (Clarke, 1996; Karlović et al., 1996; Karlović and Berenji, 1996). При производњи семена остају значајни жетвени остаци, који су мање погодни за издвајање влакана, па се чешће користе као гориво. Претпоставља се да би коришћење овог остатка као супстрата за ТИ било исплативије, те је због тога овај нуспроизвод и коришћен у оквиру истраживања. Истраживањем није обухваћено коришћење остатка након издвајања влакана, такозваног поздера. Познато је да је мицелијум буковаче погодан за разградњу широког спектра лигноцелулозних материјала што није случај са другим врстама гљива које су у широј прехранбеној употреби. Осим тога, мицелијум буковаче је доступан на тржишту, најмање је захтеван у погледу утицаја услова средине на раст и развој гљиве и отпорнији је на присуство плесни и микроорганизама. Због ових својстава одабран је као одговарајуће везивно средство за производњу биокомпозитног ТИ материјала.

Као супстрат могу да се користе бројни лигноцелулозни материјали који воде порекло из процеса прераде дрвета и пољопривредне производње: кукурузовина, окласак кукуруза, слама других житарица, дрвене струготине, пиљевина итд. Осим повољних ТИ карактеристика, материјали за израду супстрата морају да задовоље и основне потребе за гајење гљива како би мицелијум имао могућност да се довољно развије и тиме повеже честице супстрата у једну целину.

1.1 Грађевински термоизолациони материјали

1.1.1 Критеријуми за оцењивање

Сви ТИ материјали имају специфична физичко-механичка својства које одређују њихов квалитет и место примене у спољном омотачу објекта. Подобност неког материјала као топлотног изолатора одређују следећи основни показатељи својстава који се користе у прорачунима преноса топлоте:

- запреминска маса – ρ ;
- коефицијент топлотне проводљивости – λ ;
- специфични топлотни капацитет – c_p ;
- фактор отпора дифузији водене паре – μ ;

Коефицијент топлотне проводљивости (λ)

Својство преноса топлоте кондукцијом је за топлотне прорачуне најважнија физичка карактеристика материјала која се исказује коефицијентом топлотне проводљивости [$W(m K)^{-1}$]. То је количина топлоте, изражена у џулима (J), која прође кроз површину од $1 m^2$ неког материјала, дебљине слоја $1 m$, када температурна разлика између површина износи 1 келвин (K) за временски период од једне секунде

(s) (Muravlјov, 2005). Лигноцелулозни материјали су слаб проводник топлоте што је последица велике порозности материјала и уопштеног својства органских материјала које одликује мањи коефицијент топлотне проводљивости и већи топлотни капацитет. У зависности од степена порозности, садржаја влаге, температуре материјала и правца топлотног градијента у односу на правац пружања влакана, коефицијент топлотне проводљивости може значајно да варира. Са повећањем концентрације влаге у материјалу расте и вредност овог коефицијента, што је последица топлотне проводљивости воде која је до 20 пута већа од ваздуха. Уколико дође до замрзавања воде унутар материјала, додатно се смањује коефицијент топлотне проводљивости јер лед скоро 90 пута боље проводи топлоту него сув ваздух. Уколико материјали имају микро поре, они у својој структури садрже воду чак и када нису у директном контакту са њом. Ова влага је хигроскопна и увек је присутна код лигноцелулозних материјала. Целулоза као главни градивни елемент ћелија лигноцелулозних материјала има велик афинитет према молекулима воде. Поред тога, сама структура грађе ових материјала и тип порозности обезбеђује велико складиште за воду. Лигноцелулозни материјали процесима дифузије водене паре упијају влагу из околног ваздуха како би постигли равнотежу са околином, а упијену влагу користе за засићење ћелијских зидова. У Таб. 1.1 су приказане вредности коефицијента топлотне проводљивости за поједине материјале.

Таб. 1.1 Вредности коефицијента топлотне проводљивости за неке грађевинске материјале (Goјković, 1983; Kozić et al., 1979; Muravlјov, 2005; Radeka, 2009, делимично прерађено)

Материјал	$\lambda, W(m K)^{-1}$	Материјал	$\lambda, W(m K)^{-1}$
Природни камен	2,3 – 3,5	Стакло	0,81
Керамичке плоче	1	Челик	58
Глина	0,7 – 0,9	Алуминијум	204
Обична опека	0,8	Гипсане плоче	0,291 – 0,581
Шупља опека	0,55	Минерална вуна	0,04
Обичан бетон	2,00	Дрво \perp на влакна	0,14 – 0,21
Лаки бетон	0,35	Дрво \parallel влакнима	0,35 – 0,72
Ћелијаста бетон	0,20	Папир	0,14
Цементни малтер	1,40	Шпер-плоча	0,15
Кречни малтер	0,85	Плута у плочама	0,042
Продужни малтер	0,87	Вуна, чиста, растресита	0,04

Специфични топлотни капацитет (c_p)

Познато је да се тела једнаке масе, сачињена од различитог материјала, неједнако загревају када им се преда иста количина топлоте (Satarić et al., 2003). Топлотни капацитет представља количину топлотне енергије коју је потребно довести неком материјалу да би се његова температура повисила за 1 °C, односно за 1 K. Јединица за топлотни капацитет је $J K^{-1}$, а може се специфицирати по јединици масе датог материјала. Познавање ове карактеристике је неопходно за прорачун топлотне стабилности грађевинских конструкција (Radeka, 2009). Органска материја има значајно већу вредност c_p од неорганске што органске материјале чини добрим топлотним изолаторима (Radeka, 2012).

Таб. 1.2 Вредност специфичног топлотног капацитета за неке материјале (Kozić et al., 1979; Radeka, 2009; Zhang et al., 2011, делимично прерађено)

Материјал	$c_p, J(kg K)^{-1}$	Материјал	$c_p, J(kg K)^{-1}$
Алуминијум	896	Полиуретанска (PU) тврда пена	1.400

Материјал	$c_p, \text{J}(\text{kg K})^{-1}$	Материјал	$c_p, \text{J}(\text{kg K})^{-1}$
Челик	480	Дрво: Бор	2.700
Гранит	650	Дрво: Храст	2.400
Глина	840	Дрвена влакна	2.300
Стакло и грађевинска керамика	880	Шпер-плоча	2.510
Обична опека	920	Плоче дрвене вуне	1.470
Бетон	960	Експандирана плута	1.560
Ћелијаста бетон	1.050	Вуна, чиста, растресита	1.680
Малтери	1.050	Целулоза	1.300
Гипс	1.089	Хитин	1.700
Перлит, насут	840		
Минерална вуна	920		

Фактор отпора дифузији водене паре (μ)

Поједини материјали се због броја, величине и распореда пора различито супротстављају проласку водене паре. Да би се карактеристике различитих материјала, везане за супротстављање дифузионом току водене паре, могле упоређивати, уведен је појам паропропусности. Он се дефинише као вредност која показује колико пута је већи отпор неког материјала дифузионом пролазу водене паре од отпора слоја ваздуха исте дебљине, при истим граничним условима. Фактор отпора дифузији водене паре је бездимензиона величина која пружа информацију са колико већом отпорношћу се посматрани грађевински материјал супротставља дифузији водене паре у односу на ваздух при истим граничним условима. Дифузија водене паре кроз материјал зависи од димензија, структурних карактеристика и карактера пора присутних у структури материјала. Већа порозност материјала, удео макроскопских пора и удео пора отвореног карактера омогућавају и бољу дифузију водене паре кроз материјал. Фактор отпора дифузији водене паре за материјале је најчешће већи од 1, јер структура материјала пружа већи отпор дифузији водене паре у односу на слој ваздуха исте дебљине (Radeka, 2009; Vilems et al., 2008).

Секундарне карактеристике ТИ материјала које одређују начин и место примене материјала у спољном омотачу стамбеног објекта су чврстоћа при савијању – f_m (SRPS EN 12089), чврстоћа при притиску – f_p (SRPS EN 826), упијање воде дуготрајним потапањем – W_p и W_{it} (SRPS EN 12087), отпорност на дејство мраза – W_m и W_v (SRPS EN 12091) и отпорност на дејство пожара – класа отпорности (SRPS EN 13501, SRPS EN 13823, SRPS EN ISO 11925).

Улога ТИ материјала долази до изражаја у току зимског и летњег периода када се јављају екстремне температуре ваздуха у спољној средини. У току летњег периода пред грађевинске елементе се поставља захтев топлотне стабилности која се описује као својство одржавања релативно непромењене температуре на својој унутрашњој површини у току периодичних промена температуре спољашњег ваздуха. Уколико елементи спољњег омотача објекта немају довољну топлотну стабилност, температура ваздуха унутар објекта ће знатно варирати у зависности од промена у спољној средини. Избор ТИ материјала зависи од кашњења топлотног флукса, величине која зависи од топлотне инерције, коефицијента топлотне проводљивости и дебљине материјала. Топлотну инерцију можемо да опишемо преко топлотне дифузивности, величине која повезује коефицијент топлотне проводљивости, специфични топлотни капацитет и запреминску масу материјала. У току летњег периода, спољна температура је прихватљива у јутарњим и вечерњим сатима. Најнепријатнији период представљају рани послеподневни сати када дневне температуре достижу свој врхунац. Да би се температура у унутрашњости објекта одржала у прихватљивом опсегу неопходно је да топлотна изолација објекта има што

веће кашњење топлотног флукса. За материјале сличне топлотне проводљивости и исте дебљине, боље је одабрати материјал који има већу топлотну инерцију. Будући да је кашњење топлотног флукса у директној вези са топлотном инерцијом ТИ материјала јасно је да материјали мале запреминске масе нису подобна заштита у току врелих летњих дана. Ипак, на коначан избор ТИ материјала утичу различити фактори: локални микро и макро климатски услови, традиционална решења и популарност неког производа, жељени ниво комфора, специфични захтеви и економски фактори. Дугорочно посматрано, инвестиција у топлотну изолацију објекта је поступак који се финансијски може оправдати већ након три до пет година (Тодоровић et al., 2012).

1.1.2 Законска регулатива у ЕУ и у Републици Србији

На основу убрзаног развоја градова и пратећих ефеката по људско здравље и животну средину, донето је неколико значајних докумената којим се дефинишу захтеви за поједина својства грађевинских материјала и објеката. Најважнији међународни документи о одрживом планирању и грађењу донесени у последње три деценије су (Кrnjetin, 2015):

- Агенда 21 – конференција UN о животној средини у Рио де Женеиру 1992.
- Декларација о међузависности за одрживу будућност – светска конференција Међународног удружења архитеката 1993.
- Директива 89/106/ЕЕС – директива ЕУ у којој су дефинисани еколошки захтеви за грађевинске материјале и производе.
- Директива EPBD 2001/42/EZ – директива Европског Парламента и Савета о процени утицаја појединих планова и програма на животну средину, са дефинисаним поступком прекограничних консултација.
- Директива EPBD 2002/91/EC – о ЕЕ зграда.
- Директива EPBD 2010/31/EU – о ЕЕ зграда.

Најважнији национални документи у вези са енергетском ефикасношћу зграда:

- Закон о планирању и изградњи („Сл. гласник РС”, бр. 72/2009, 81/2009 - испр., 64/2010 - одлука УС, 24/2011, 121/2012, 42/2013 - одлука УС, 50/2013 - одлука УС, 98/2013 - одлука УС, 132/2014 и 145/2014).
- Правилник о енергетској ефикасности зграда (“Сл. гласник РС”, бр. 61/2011).
- Правилник о условима, садржини и начину издавања сертификата о енергетским својствима зграда („Службени гласник РС“ бр. 69/2012).

Статистика наводи да се чак 60 % укупног енергетског конзума у земљама Западног Балкана односи на стамбене објекте за остварење комфора (Klarić, 2017), а у земљама ЕУ он износи око 40 %. У ЕУ је 2010. године било око 75 % енергетски неефикасних објеката старости преко 50 година. У зависности од државе, свега 0,4 – 1,2 % објеката реновирано је на годишњем нивоу.

Смањење енергетског конзума за грејање/хлађење стамбених објеката један је од примарних циљева за све земље чланице ЕУ прописан директивом европског парламента EPBD 2010/31/EU. Овом директивом, између осталог, прописује се да сви објекти који припадају државним институцијама или су у њиховој надлежности до краја 2018. године морају одговарати енергетским стандардима објеката са приближно нултим енергетским конзумом, а до краја 2020. године овим стандардом да се обухвате сви новоизграђени објекти. Један од начина да се ово достигне је примена изузетно ефикасног ТИ омотача објеката, што се постиже повећањем дебљине ТИ материјала. Међутим, за постизање високог степена ЕЕ, не смеју се занемарити ни

остале технике и методе очувања топлотног стања. Поред циља за 2020. годину, државе чланице ЕУ поставиле су и циљ дугорочног смањења емисија CO_2 из овог сектора за 80 – 95 % до 2050. године. Крајем 2016. године предложена је допуна ЕРБД 2010 којом се фаворизује употреба паметних система у грађевинским објектима и постојећи правилници се поједностављују са циљем да се убрза смањење утицаја грађевинских објеката на животну средину. Крајем 2017. године предложена допуна је прихваћена, а почетком 2018. године је ратификована. У оквиру ЕРБД 2010 наводе се најважније одредбе:

- енергетски пасоши морају се издавати приликом продаје или изнајмљивања објеката и морају бити део документације у оквиру свих огласних докумената приликом продаје или изнајмљивања;
- чланице ЕУ дужне су да изнесу план за извођење надзора топлотних и климатизационих јединица или да примене подједнако ефикасне мере;
- чланице ЕУ у обавези су да поставе финансијски оптималне, минималне енергетске захтеве за нове објекте, за реновирање постојећих објеката већег обима и за поновну изградњу или унапређење грађевинских елемената;
- чланице ЕУ дужне су да утврде списак националних финансијских мера за унапређење ЕЕ објеката;
- чланице ЕУ дужне су да изводе унапређење ЕЕ објеката чија површина чини најмање 3 % од укупне површине коју заузимају објекти државних институција;
- чланице ЕУ дужне су да приликом куповине разматрају само ЕЕ објекте;
- чланице ЕУ дужне су да израде дугорочне националне стратегије за реновирање објеката који би требало да су укључени у националне акционе планове о ЕЕ.

Иста директива уводи две нове категорије за оцењивање и сертификавање материјала и објеката. Прва категорија је мерење укупног конзума примарне енергије неопходне за сваки материјал или елемент који је уграђен у објекту. Конзум примарне енергије мери се од момента узимања сировина из природе до момента експлоатације материјала. Друга категорија је емисија угљен-диоксида која се мери у току целог животног циклуса материјала.

Према Закону о планирању и изградњи („Сл. гласник РС”, бр. 72/2009, 81/2009 - испр., 64/2010 - одлука УС, 24/2011, 121/2012, 42/2013 - одлука УС, 50/2013 - одлука УС, 98/2013 - одлука УС, 132/2014 и 145/2014), уведена је обавеза издавања сертификата о енергетским својствима зграда. Ови сертификати су саставни део техничке документације која се прилаже уз пријаву за издавање употребне дозволе. Према Правилнику о ЕЕ зграда („Службени гласник РС“ 61/2011) и Правилнику о условима, садржини и начину издавања сертификата о енергетским својствима зграда („Службени гласник РС“ бр. 69/2012) унапређење топлотне изолације објеката је законска обавеза. Законска регулатива у Републици Србији ослања се на прорачун укупног одавања топлотне енергије кроз спољни омотач на основу чега се издаје енергетски пасош објекта. Правилником о ЕЕ зграда дефинисана је и максимална дозвољена вредност коефицијента пролаза топлоте за спољне зидове код старих ($U = 0,40 \text{ W}(\text{m}^2 \text{ K})^{-1}$) и код новоизграђених објеката ($U = 0,30 \text{ W}(\text{m}^2 \text{ K})^{-1}$). У циљу унапређења ЕЕ, при изградњи нових и реконструкцији постојећих објеката примењиваће се законске одредбе и пратећи прописи, а у вези са утврђивањем дозвољених енергетских својстава зграда и енергетском сертификацијом. Унапређење ЕЕ дефинише се као смањење енергетског конзума свих врста, као и примене мера одрживе градње. Објекат који за своје функционисање подразумева одређени енергетски конзум, мора бити пројектован, изграђен, коришћен и одржаван

на начин којим се обезбеђују дефинисана енергетска својства. Ова својства представљају стварни или прорачунати енергетски конзум, а односи се нарочито на енергију неопходну за грејање, припрему топле воде, хлађење, вентилацију и осветљење. Енергетска својства зграда утврђују се издавањем одговарајућег сертификата од стране овлашћене организације која испуњава прописане услове.

Према подацима из 2008. године на објекте у Републици Србији се издваја око 38 % од укупног енергетског конзума. Од тога, удео домаћинстава и стамбених зграда је око 70 %, комерцијалних 18 % и објеката јавне намене 12 % (Todorović et al., 2012).

Енергетски разреди стамбених објеката

Оцењивање енергетског учинка неког објекта је комплексан процес и изводи се према прописаним правилницима и релевантним стандардима. Применом стандарда утврђују се карактеристике уграђених материјала и изграђеног објекта. Процес подразумева математичко моделовање и комплексан прорачун према једначинама дефинисаним у одговарајућим стандардима. Након израчунавања неопходног енергетског конзума за грејање и хлађење, издаје се сертификат, енергетски пасош, чиме се тај објекат категорише према унапред утврђеном критеријуму, који је у Републици Србији дефинисан Правилником о условима, садржини и начину издавања сертификата о енергетским својствима зграда ("Sl. glasnik RS", br. 69/2012). Издавањем енергетског пасоша утврђује се колико посматрани објекат штетно утиче на животну средину кроз енергетски конзум и придружену GHG емисију.

Под термином нискоенергетских објеката подразумевамо објекте који су пре свега енергетски ефикасни, односно, чији конзум за одржавање микроклиме простора, на годишњем нивоу износи мање од 17 kW h m^{-2} . То су објекти који, на скали енергетских разреда (Таб. 1.3) од „G“ до „A+“ припадају енергетском разредима „A“ и „A+“. Можемо да споменемо и пасивне објекте као највишу категорију EE објеката чији енергетски конзум на годишњем нивоу износи $< 10 \text{ kW h m}^{-2}$ и објекте са нултим конзумом. Потоњи објекти су поред малог енергетског конзума карактеристични и по својој независности од класичних извора енергије. То су савремени објекти који су грађени у складу са биоклиматским принципима ради максималног искоришћења предности активних и пасивних система одржања енергетског стања.

Према Правилнику о условима, садржини и начину издавања сертификата о енергетским својствима зграда дефинисано је неколико различитих категорија објеката и енергетских разреда у зависности од енергетског конзума за загревање. Енергетски разред за стамбене објекте одређује се на основу максимално дозвољене годишње потребне финалне енергије за грејање објекта, $Q_{H,nd,max} [\text{kW h(m}^2 \text{ a)}^{-1}]$. Ова енергија је дефинисана посебно за нове и постојеће објекте. $Q_{H,nd,max}$ према овом Правилнику одговара енергетском разреду "C", односно, $65 \text{ kW h(m}^2 \text{ a)}^{-1}$ за ново изграђене објекте и $75 \text{ kW h(m}^2 \text{ a)}^{-1}$ за постојеће објекте (*Pravilnik o uslovima, sadržini i načinu izdavanja sertifikata o energetskim svojstvima zgrada* ("Sl. glasnik RS", br. 61/2011), 2011).

Енергетски разред зграде изражен је преко релативне вредности годишњег конзума финалне енергије за грејање и представља процентуални однос специфичне годишње потребне топлоте за грејање $Q_{H,nd} [\text{kW h(m}^2 \text{ a)}^{-1}]$ и максимално дозвољене годишње потребне топлоте за грејање $Q_{H,nd,max} [\text{kW h(m}^2 \text{ a)}^{-1}]$ за одређену категорију зграда.

Таб. 1.3 Енергетски разреди зграда (*Pravilnik o uslovima, sadržini i načinu izdavanja sertifikata o energetskim svojstvima zgrada* ("Sl. glasnik RS", br. 61/2011), 2011, делимично прерађено)

Енергетски разред	$Q_{H,nd,rel}$, %	Зграде са једним станом		Зграде са више станова	
		Нове	Постојеће	Нове	Постојеће
		$Q_{H,nd}$, kW h(m ² a) ⁻¹			
A+	≤15	≤10	≤12	≤9	≤10
A	≤25	≤17	≤20	≤15	≤18
B	≤50	≤33	≤38	≤30	≤35
C	≤100	≤65	≤75	≤60	≤70
D	≤150	≤98	≤113	≤90	≤105
E	≤200	≤130	≤150	≤120	≤140
F	≤250	≤163	≤188	≤150	≤175
G	>250	>163	>188	>150	>175

Укупно топлотно одавање у стамбеним објектима представља збир појединачних топлотних одавања кроз сваки елемент спољног омотача. Утврђено је да је уобичајени удео одавања кроз појединачне грађевинске елементе следећи (Todorović et al., 2012):

- подна конструкција: 5 – 10 %;
- зидна конструкција: 30 – 35 %;
- подрумске, таванске и кровне плоче: 15 – 20 %;
- прозори и врата: 35 – 40 % и;
- вентилација: 15 – 20 %.

Унапређење ЕЕ објеката представља комплексан проблем који се једино холистичким приступом може решити на правилан начин. Можемо уочити да највеће одавање топлотне енергије имају отвори у спољном омотачу објекта, односно врата и прозори, а затим спољашњи зидови. Тек се заменом прозора, врата и постављањем слоја ТИ на спољашње зидове и таванске плоче постиже значајније смањење емисије топлотне енергије објекта, за 80 до 95 %. Међутим, трошкови унапређења ЕЕ најчешће одређују у којем степену ће се постојећи стамбени објекти унапредити.

Због комплексности процеса енергетске сертификације користе се разни програмски алати који знатно олакшавају процес оцењивања, а такође умањују и могућност појаве грешке приликом извођења прорачуна. Поменути алати раде у складу са националним и међународним законским прописима и релевантним стандардима.

1.1.3 Конвенционални термоизолациони материјали

Материјали се према коефицијенту топлотне проводљивости могу поделити на праве ТИ материјале – $\lambda < 0,06 \text{ W(m K)}^{-1}$ и на ТИ материјале са конструкционим својствима – $0,06 < \lambda < 0,3 \text{ W(m K)}^{-1}$ (Radonjanin and Malešev, 2012). У праве ТИ убрајају се сви порозни материјали који имају малу запреминску масу и коефицијент топлотне проводљивости мањи од $0,3 \text{ W(m K)}^{-1}$. Задатак ТИ материјала у грађевинарству је да успоре пренос топлотне енергије кроз спољни омотач објекта и да спрече појаву кондензације влаге на зидовима у току зимског периода (Helmih and Novaković, 1972; Todorović et al., 2012).

Конвенционални синтетички ТИ материјали имају веома добра ТИ својства са коефицијентом топлотне проводљивости у опсегу од $0,025$ до $0,048 \text{ W(m K)}^{-1}$, дуготрајни су уколико се користе у оквиру препоручених техничких услова и једноставно се уграђују у елементе објекта. Уопштено, недостаци су им: неодрживост

извора сировина, количина утрошених енергената и употреба штетних хемијских средстава по здравље људи и животну средину у току производње. Поједини материјали имају смањену трајност на повишеним температурама, запаљиви су и токсични у условима пожара. Као противпожарно решење користе се бројни успоривачи горења, супстанце које се заснивају на бромираним, халогенованим, фосфатним и хлорисаним једињењима, чији је задатак да спрече или одложе појаву пламена. Успоривачи горења имају двојако штетно дејство на људско здравље. У условима пожара узрокују повећано ослобађање гаражи и иритирајућих гасова, као и повећану токсичност димних гасова. До повећања токсичности продуката сагоревања долази услед ослобађања већих количина угљен-моноксида, бромираних и хлорисаних диоксида и фурана. Због тога се доводи у питање смањење ризика по људски живот приликом пожара. Тодоровић и др. (2012) наводе да чак 89 % смртних случајева у пожарима настаје услед тровања продуктима сагоревања. Ова једињења нису у потпуности везана у структури материјала и под одређеним условима могу да пређу у животну средину. Она припадају групи перзистентних једињења јер не подлежу процесима биолошке трансформације и биодеградације. Биоакумулацијом (таложењем у биљкама и ткиву животиња) и путем ланца исхране ова једињења доспевају у људски организам где ометају развој нервног система, а нарочито штетно утичу на рад ендокриног система (рад штитасте жлезде) и репродуктивних органа (Ezechiáš et al., 2014; Fromme et al., 2016; Hendriks and Westerink, 2015; Kim et al., 2014; Lyché et al., 2015; Stieger et al., 2014).

Као примери ређе примењиваних и еколошки мање штетних материјала могу да се наведу влакнасте дрвене плоче, плоче од прошивене трске, плоче од експандиране плуте, целулозна влакна, овчија вуна, балирана слама и др. Коефицијент топлотне проводљивости ових материјала је виши него код конвенционалних материјала и креће се у границама од 0,037 до 0,14 W(m K)⁻¹. Због слабог познавања материјала, неповољније цене, могућности биолошке деградације, запаљивости, упијања воде и лошије отпорност на временске услове, ређе су примењивани. Уколико се ови материјали примењују на одговарајући начин, предности су им: обновљивост природних ресурса из којих потичу, на крају животног века се биолошки разграђују, не постоје документовани докази да су штетни по животну средину и људско здравље и производе се једноставнијим и енергетски мање захтевним производним процесима.

Експандирани и екструдирани полистирен (EPS и XPS) – EPS и XPS припадају групи пенастих материјала порозности до 98 % са доминантно затвореном структуром пора. EPS упија воду у границама 2 – 8 %, а XPS 0,2 – 0,3 % у односу на своју запремину, а фактор отпора дифузији водене паре 25 – 60 и 80 – 200, респективно, те према томе XPS може да се понаша као парна брана. Дobar су електроизолатор, отпорни су на воду, неке киселине и базе. Материјали нису подложни процесима биолошке разградње и нису погодни као подлога за развој микроорганизама. Нису отпорни према неорганским киселинама, органским растварачима, уљима и мастима. Због успоривача горења слабо су гориви и не дозвољавају ширење пламена по површини. Укупна противпожарна отпорност је лоша због ниске температуре топљења материјала. Приликом сагоревања отпушта токсичне гасове и чађав дим. Користе се за топлотну изолацију свих позиција спољњег омотача објекта. XPS је нарочито погодан за изолацију подних подлога. EPS је крт и дробљив материјал који није отпоран на UV зрачење. Површина јужно оријентисаних фасада може да достигне температуру до 80 °C. EPS и XPS при температури изнад 75 °C почињу да се стањују, што доводи до пуцања фасаде. Дуговечност плоча од EPS-а се дефинише на период до 12 година, након чега материјал губи 15 – 20 % термофизичких карактеристика (Radonjanin and Malešev, 2012; Todorović et al., 2012).

Полиуретан (PU) – по физичким својствима сличан је полистирену, има боља ТИ својства и механичка својства слична XPS-у. PU има порозност > 90 % са доминантном затвореном структуром пора. Материјал није отпоран на UV зрачење, отпоран је на киселине и базе, не упија воду и има низак коефицијент дифузије водене паре. Није подложен процесима биодеградације и није погодан као подлога за развој микроорганизама. Изузетно запаљив материјал који ослобађа токсичне гасове и чађави дим у условима пожара. У стамбеним објектима се код нас ређе користи осим за заптивање спојева код зидних отвора. PU има значајан негативан утицај на животну средину и људско здравље. Хемијска једињења присутна у PU могу да изазову појаву астме, осипа, иритацију очију и респираторног система, повраћање, конвулзије и поремећај у раду централног нервног система. Уколико се унесу у организам могу да доведу до иритација, улцерација или опекотина у грлу, устима, једњаку и гастроинтестиналном тракту (Radonjanin and Malešev, 2012).

Минерална вуна обухвата неколико производа заснованих на минералним влакнима. У зависности од врсте сировине од које се материјал производи, минерална вуна може бити стаклена, камена или на бази шљаке.

- **Камена вуна** – материјал је склон упијању воде, што се умањује третирањем силикатно-органичким једињењима или специјалним уљима. Хемијски стабилан и инертан материјал, има добру димензиону стабилност, постојан је при влажним условима средине и при дејству различитих једињења изузев флуора. Постојан на температурама до 700 °С, негорив је, не привлачи инсекте и не подлеже процесима биолошке разградње. Порозност се креће од 92 до 97 % при чему је доминантан тип отворене порозности због чега материјал добро пропушта водену пару. Камена минерална вуна нашла је примену у ТИ свих позиција спољашњег омотача објекта (Radonjanin and Malešev, 2012; Todorović et al., 2012).
- **Стаклена вуна** – добар је звучни изолатор, хемијски је инертна, није хигроскопна и постојана је на утицај воде, водене паре и различитих једињења. Материјал није горив и не ослобађа токсичне супстанце у условима пожара. Због отворене порозности између 95 и 97 %, добро пропушта водену пару. Иако се влакна третирају средствима за импрегнацију, материјал је склон упијању воде. Примењује се за ТИ свих елемената спољашњег омотача објекта. Материјал има слична физичко-механичка својства као и камена вуна с тим да стаклена вуна има већу еластичност и бољу хемијску отпорност (Radonjanin and Malešev, 2012; Todorović et al., 2012).

Код савремених производа минералне вуне више се не користе лепкови засновани на формалдехиду и фенолним смолама, већ средства заснована на скробу те је материјал еколошки прихватљивији од ранијих производа. Материјали иритирајуће делују на дисајне органе и очи радника који рукују материјалом, имају изразито наглашено својство упијања воде, малу отпорност на дејство мраза, склони су појави буђи. Услед присуства влаге и оксидационих процеса са наизменичним променама влажности средине влакна материјала прелазе у игличасту прашину. Дуговечност минералне вуне дефинише се на период не дужи од 15 година.

ТИ на бази експандиране глине или минерала – засновани су на примени вермикулита, керамзита или перлита. Високо су порозни, отворене структуре и не подлежу процесима биолошке деградације. Хемијски су инертни, нису запаљиви и отпорни су на високе температуре. Слична својства имају и гас-бетонски (аерисани аутоклавирани бетон – ААС) и пено-бетонски елементи за зидање. Материјал има конструктивна својства, па се употребљава за израду спољних и унутарњих зидова и

међуспратних конструкција. Неорганског је порекла, није подложен процесима биолошке разградње, хемијски је инертан, није горив, лако је обрадив и трајан је. Добро пропушта водену пару, а порозност може да износи и до 80 %. Материјал може да упије значајне количине воде. Уколико кисне, након уградње може доћи до пуцања материјала, материјал је крт, те је потребно пажљивије руковање на градилишту. Водоник који настаје у процесу производње доприноси стварању ефекта стаклене баште (Olive, 2016; Todorović et al., 2012).

ТИ материјали на бази експандиране и пресоване плуте – материјал је веома порозан, релативно добро пропушта водену пару, није хигроскопан и не упија влагу. Хемијски је инертан и отпоран на UV зрачење. С обзиром да је отпоран на влагу материјал није подложен процесима труљења иако је у питању органски материјал што га чини постојаним. Плоче од плуте су отпорне на штеточине и нису запаљиве. Дobar је звучни изолатор, димензионо је стабилан при промени температуре и може да се примењује подједнако на врло ниским, као и на температурама до +130 °C. Имају добра механичка својства и могу да се примењују за топлотну изолацију на свим позицијама спољног омотача објекта. Материјал је еколошки прихватљив, нешкодљив по здравље људи и по животну средину. Највећи недостаци плуте су ограничена доступност и релативно висока цена (Filosofov, 1950; Todorović et al., 2012).

ТИ материјали засновани на дрвеним влакнима или дрвеној вуни – материјал је слабо горив, а противпожарна отпорност износи 30 минута. Порозан је, добро пропушта водену пару и добар је звучни изолатор. Због дрвених влакана материјал је хигроскопан и упија воду. Плоче су постојане, а због минералних везива и других адитива нису подложне труљењу нити су добра подлога за раст микроорганизама. Материјал има добру адхезију са малтером и лако се механички обрађују. Примењује се за ТИ подова, зидова, плафона и кровова. Најчешће се користе као оплата код извођења бетонских серклажа (Radonjanin and Malešev, 2012; Todorović et al., 2012).

Трска – плоче од трске имају боља механичка својства од синтетичких материјала, добро се везују са малтером, добро пропуштају водену пару и склоне су упијању воде. Хигроскопне су и подложне развоју микроорганизама. У традиционалној градњи трска је коришћена за покривање кровних конструкција, као једнослојни штукатур повезан жицом за малтерисање зидова и таваница или за ТИ као плоче прошивене жицом, познатије под називом Камишит. У савремено доба, плоче од трске користе се за ТИ подних и међуспратних конструкција, зидова и кровова. Трска се не третира хемијским средствима нити се користе лепкови у производњи. Материјал је еколошки прихватљив и нешкодљив по људско здравље. Горив је и подложен процесима биолошке деградације уколико се за то стекну одговарајући услови (Filosofov, 1950; Radonjanin and Malešev, 2012; Tufegdžić, 1971).

Пшенична слама и конопља – према ÖNORM B6015, коефицијент топлотне проводљивости ваздушно суве балиране сламе запреминске масе од 80 до 120 kg m⁻³, креће се од 0,038 до 0,046 W(m K)⁻¹ (Krnjetin, 2004). Goodhew and Griffiths (2005) утврдили су да коефицијент топлотне проводљивости балиране сламе запреминске масе 60 kg m⁻³ износи 0,067 W(m K)⁻¹. Материјал је хигроскопан због чега може да регулише микроклиме у просторијама. Порозан је, са доминантном отвореном структуром пора, пропушта водену пару и добар је звучни изолатор. Материјал је запаљив, међутим, зид балиране сламе квалитетно омалтерисан има противпожарну отпорност до 90 минута. Материјал је хемијски инертан и отпоран је на UV зрачење. Због органског порекла, подложна је развоју микроорганизама и процесима биолошке разградње. За употребу балиране сламе у грађевинарству не

користе се хемијска средства за заштиту. Слама је привлачна за глодаре као станиште, међутим, бале сламе пресоване на запреминску масу од $\geq 90 \text{ kg m}^{-3}$ нису погодне за њихово настањивање. Слама није погодна за исхрану глодара јер нема хранљиву вредност (Klarić, 2017; Krnjetin, 2004). У случају балиране сламе утврђено је да је могуће градити и носиве зидове, али само за израду приземних објеката. Дуговечан је материјал који се на крају свог радног века може компостирати и тако допринети квалитету животне средине (Ebnesajjad, 2013; Qi, 2017). За разлику од конопље, пшенична слама је знатно заступљенија и нема високу тржишну вредност због чега је приступачнија као сировина за израду ТИ материјала.

Производни процес ТИ плоча од конопљиних влакана подразумева примену са везивним средствима, у овом случају са влакнима полиестера, која остварују везивну улогу при повишеној температури. Израђују се простирке високе порозности које су по карактеристикама сличне простиркама од минералне вуне и примењују се на истоветан начин. Овако произведен материјал има запреминску масу од 30 до 100 kg m^{-3} . Утврђено је да плоче запреминске масе од 40 kg m^{-3} имају коефицијент топлотне проводљивости од $0,050 \text{ W(m K)}^{-1}$ (Bouloc et al., 2013). Поред синтетичких влакана, код ТИ материјала од влакана конопље, могу да се користе и друга везива, попут синтетичких смола или неких еколошки прихватљивијих средстава попут скроба, полимлечне киселине (PLA) и сл. Kirilovs et al. (2015) једна су од група које су истраживале могућност производње ТИ материјала од влакана конопље уз додатак фенол-формалдехидних (PF) и уреа-формалдехидних (UF) везива. Њихова запажања указују да материјал запреминске масе од 243 до 316 kg m^{-3} има коефицијент топлотне проводљивости између $0,051$ и $0,063 \text{ W(m K)}^{-1}$. Прошивене плоче конопље које могу да се нађу на иностраном тржишту имају коефицијент топлотне проводљивости око $0,039 \text{ W(m K)}^{-1}$ (Olive, 2016). Материјал је подложен биолошкој разградњи, хигроскопан је, добро пропушта водену пару и упија воду. Конопља је слабије заступљена и има високу цену као сировина.

Недостаци пшеничне сламе и конопље: горња гранична вредност релативне влажности средине за примену материјала износи 70 %; код завршних радова утрошак малтера може бити и до 50 % већи у односу на класичне материјале.

ТИ на бази целулозе – производи се млевењем отпадног папира који се потом третира борном киселином. Овако самлевен материјал може да се наноси прскањем у влажној смеси са цементом или удубавањем под притиском у шупљине лаких конструкција. Изузетно је порозан при чему је доминантна отворена порозност. Као и сви материјали органског порекла и ТИ на бази целулозе је хигроскопан материјал. Због млевења, при попуњавању преграда лаких конструкција методом удубавања и због присуства незаптивених спојева конструкције, честице прашине могу да уђу у просторије. Уколико шупљине елемената нису довољно густо испуњене, под дејством гравитације може доћи до слегања материјала и формирања делова конструкције без топлотне изолације. Уколико се изолација наноси прскањем, а материјал се не исуши довољно, може да дође до развоја буђи. Потребно је стручно особље за извођење радова. Користи се за ТИ лаких, префабрикованих елемената који се уграђују на свим позицијама спољњег омотача (Radonjanin and Malešev, 2012; Todorović et al., 2012).

ТИ материјали засновани на овчијој вуни – ТИ карактеристике материјала су сличне минералној вуни. Материјал је еластичан, лако обрадив и хигроскопан, те је веома добар регулатор влажности ваздуха у просторијама. Овчија вуна није штетна по околину, нити по људско здравље, а за руковање није потребна заштитна опрема. Материјал је хемијски инертан, може да упија воду и добро пропушта водену пару због велике порозности са доминантном отвореном структуром пора. Подложен је

труљењу уколико прође кроз много циклуса влажења. Такође је добар звучни изолатор. Слабо гори, не ствара токсичне гасове приликом сагоревања, а када се извор пламена уклони, материјал се гаси, те је сврстан у класу противпожарне отпорности В2 (Klarić, 2017). Најчешће се користи као испуна шупљина код префабрикованих елемената, за изолацију међуспратних и кровних конструкција уз редовну употребу парних брана. Материјал није лако доступан.

1.2 Биополимерни и биокompatитни термоизолациони материјали

Тридесетих година XX века започет је развој и нагла експанзија синтетичких полимерних материјала пореклом из фосилних извора сировина. Од тада, захваљујући својим физичко-механичким својствима, ови материјали доминирају тржиштем у свим секторима индустрије. Доказано је да овакви материјали и везивна средства попут цемента и синтетичких смола захтевају значајне количине топлотне енергије у производним процесима, а последично имају и одговарајуће високе GHG емисије. Полимери пореклом из обновљивих извора сировина представљају једно од решења које се намеће у потрази за новим и еколошки мање штетним материјалима. Имајући у виду ограничења ових материјала, истраживања имају за циљ делимичну или потпуну замену конвенционалних, синтетичких материјала на местима примене где је то изводљиво.

Постоји неколико подела полимера у зависности од порекла, механизма полимеризације и карактеристичних својстава. У складу са темом од интереса је подела према пореклу, па се полимери деле на:

1. синтетичке полимере:
 - синтетички органски (полиетилен, полипропилен, полистирен, полиамид, полиуретан...),
 - синтетички неоргански (полифосфати, полисиликати...);
2. природне полимере:
 - природни органски (целулоза, хемицелулоза, лигнин, хитин, скроб, протеини...),
 - природни неоргански.

У биополимере се убрајају полисахариди као што су целулоза и скроб, хитин, хитозан које производе биљке, бактерије и гљиве, као и биополимери животињског порекла попут вуне и свиле (Johnson et al., 2003; Mohanty et al., 2005). Биополимери су мање штетни по животну средину од синтетичких с обзиром да је сваки полимер који је синтетизован од стране биолошког система и биоразградив. Са аспекта трајности, биоразградивост није позитивно својство материјала. Да би материјал био трајан, неопходно је обезбедити специфичан сет услова средине. Ово се најчешће постиже контролом влажности и присуства микроорганизама у материјалу (Carlan, 1998). Захтеви који се намећу савременим материјалима у одређеним сферама примене не могу бити задовољени од стране само једног материјала. Комбинацијом више различитих материјала добијају се нови, композитни материјали, са бољим карактеристикама. Биополимери су компатибилни за спрегнуту производњу са другим материјалима, а нарочито са другим биополимерима, због чега су од нарочитог интереса за примену у савременим, еколошки прихватљивим, композитима.

Композити чије компоненте чине природни материјали називају се биокомпозитни материјали. Биокомпозити представљају мешавину најмање два материјала који се, са једне стране, састоји од биоразградивих биополимерних влакана која имају улогу ојачања и са друге стране биополимерних система као матрице (Antić, 2016; Callister, 2007; Graham, 2010). Овај назив се у ширем смислу примењује и на композите код којих је једна или више компоненти природног порекла, што су најчешће природна влакна. Термин биокомпозитни материјал се, у ужем смислу, у оквиру овог истраживања односи на онај који се у потпуности састоји од природних компоненти и које подлежу процесима биодеградиције.

Постоји неколико основних аспеката које је потребно узети у обзир уколико се лигноцелуозна влакна разматрају као потенцијални инжењерски материјали. Прво, лигноцелуозна влакна су хигроскопна. Друго, ова влакна су рециклабилна биолошком, термичком, фотохемијском, хемијском и механичком деградацијом. Механичка својства ових влакана су по правилу лошија у поређењу са стакленим или угљеничким влакнима. Са друге стране, природна влакна имају мању запреминску масу те самим тим и добар однос запреминске масе и својстава, попут чврстоће и крутости, што их чини адекватним заменским материјалом за синтетичка влакна (Ebnesajjad, 2013).

Таб. 1.4 Физичка својства појединих природних влакана (Ebnesajjad, 2013; Wertz et al., 2010, делимично прерађено)

Влакно	Запреминска маса, g cm ⁻³	Модул еластичности, GPa	Затезна чврстоћа, MPa	Издужење, %	Угао микрофибрила ¹ , °
Памук	1,5	5,5 – 27,6	300 – 600	3 – 8	–
Јута	1,3 – 1,5	13 – 65	393 – 800	1,2 – 1,8	8
Лан	1,5	27 – 100	345 – 1.500	2,7 – 3,2	5 – 10
Конопља	1,5	70	690	1,6	2 – 6,2
Рамија	1,55	61,4 – 128	400 – 938	1,2 – 3,8	7,5
Агава	1,45	9,4 – 22	468 – 700	2 – 7	10 – 22
Влакно кокоса	1,15 – 1,46	4 – 6	130 – 220	15 – 40	30 – 49
Целулоза четинара	1,5	40	1.000	–	–
Е-стаклена влакна	2,5	70	2.000 – 3.500	2,5	–
С-стаклена влакна	2,5	86	4.570	2,8	–
Арамидна влакна	1,4	63 – 67	3.000 – 3.150	3,3 – 3,7	–
Угљенична влакна	1,4	230 – 240	4.000	1,4 – 1,8	–

Лигноцелуозна влакна мање су коришћена у композитима због потешкоћа у погледу везивања са различитим матрицама. Молекули природних влакана су поларни и слабо се везују са већином неполарних молекула матрица термопластичних полимера те је тешко постићи одговарајућу дисперзију. Лигноцелуозна влакна су хидрофилна због чега се лако везују са водом, што даље доводи до бубрења и слабљења њихових механичких својстава. Такође, у поређењу са неорганским влакнима минералног порекла, лигноцелуозна влакна нису постојана при високим температурама што ограничава њихову употребу до 200 °C. Према Ebnesajjad (2013) лигноцелуозна влакна је могуће применити и при вишим температурама, иако само краткотрајно.

¹ Угао који целулозне микрофибриле заклапају са дужом осом ћелије код биљака. Мањи угао микрофибрила пружа већу чврстоћу при затезању, већи угао већу чврстоћу при притиску.

Развој биополимерних и биокомпозитних материјала је у претходном периоду био отежан, компликован, неефикасан и скуп због примене технологија које су прилагођене производњи синтетичких материјала. Услед тога су биополимери, иако имају могућност да разреше поједине проблеме у вези са животном средином, имали високу цену и ограничену примену. Да би се остварила шира примена биокомпозитних материјала једноставног производног процеса, малог утицаја на здравље људи и животну средину и који не захтевају значајну накнадну обраду, одабран је мицелијум гљива, односно, вегетативно тело гљива као везивно средство и пшенична слама и конопља као супстрати за израду биокомпозита.

Целулоза, хемицелулоза и лигнин као биополимери

Целулоза се среће у виду влакана која имају функцију ојачања у матриксу аморфног лигнина и хемицелулозе. Целулоза је хемијски стабилан, биоразградив, нетоксичан, чврст, високо кристалан и термостабилан биополимер. Не може се термички обрађивати због деградације која наступа пре топљења, што је последица великог броја водоничних веза. Температура топљења је далеко изнад температуре на којој долази до њене термичке декомпозиције која започиње на око 180 °C. До 180 °C аморфне регије целулозе налазе се у стакластом стању и без значајне молекуларне покретљивости. Иако се састоји од великог броја хидроксилних група, није растворљива у води, базама и већини органских растварача. Полимер бубри у многим поларним течностима укључујући воду, при чему се вода сматра као најефикаснији пластификатор целулозе. Она је хигроскопан супстрат који апсорбује 8 до 14 % воде на температури од 20 °C и при релативној влажности од 60 %. Целулозна влакна су уобичајено беле боје и непровидна. Степен полимеризације (SP) износи приближно 10.000 до 15.000 и увелико зависи од методе изолације молекула и третмана. Затезна чврстоћа целулозних влакана расте са степеном полимеризације, кристаличности и са опадањем угла који микрофибриле заклапају са главном осом влакана (MFA – *microfibril angle*). Код лана, јуте и агаве, микрофибриле формирају спирале које су позициониране под углом од 10 ° у односу на главну осу влакана, док је код памука овај угао 21 ° због чега памук има мањи модул еластичности. За разлику од влакана животињског порекла или синтетичких влакана, чврстоћа влакана целулозе у мокрој стању је око 25 % већа у односу на влакна у сувом стању. Ово је објављено у бројним публикацијама (Đikanović Golubović, 2013; Dragičević, 2016; Fakirov and Bhattacharyya, 2007; Johnson et al., 2003; Kaplan, 1998; Karimi, 2015; Lenz, 1993; Mohanty et al., 2005; Qi, 2017; Wertz et al., 2010).

Таб. 1.5 Термичка својства целулозе (Wertz et al., 2010, делимично прерађено)

Карактеристика	Вредност
Термичка декомпозиција	> 180 °C
Температура остакљивања	230 – 245 °C
Температура паљења	> 290 °C
Специфични топлотни капацитет	1.000 – 1.210 J(kg K) ⁻¹
Коефицијент топлотне проводљивости	0,071 – 0,258 W(m K) ⁻¹

Хемицелулоза припада типу разгранатих биополимера. Основна улога хемицелулозе је да везује хидрофилну целулозу са хидрофобним лигнином. Основна градивна јединица су хексозе (маноза, глукоза, галактоза и др.) и пентозе (ксилоза и арабиноза). Хемицелулоза се разлаже у температурном интервалу од 210 до 370 °C. Структура јој је аморфна и хаотична са много споредних структурних јединица.

Садржај лигнина у биљкама може значајно да варира и износи око једне трећине њихове суве масе. У случају дрвета садржај лигнина варира од 29 до 39 % код

четинарских и 16 до 22 % код листопадних врста. Лигнини су хидрофобни и имају температуру остакљивања (T_s) у сувом стању између 127 и 193 °C, док у влажном стању тај опсег се креће од 72 до 128 °C. Лигнини су нетоксични полимери. Немају увек исту структуру као што је то случај са целулозом, већ су физички и хемијски хетероген материјал. Термичка разградња лигнина почиње на 200 °C, док на 500 °C резидуална маса износи 45 % при чему долази до кондензације фенолних група. Отпоран је на нападе већине микроорганизама, а анаеробни процеси не оштећују ароматичне прстенове његовог молекула. Аеробна разградња лигнина је спора и може да потраје неколико година. Наведени подаци о хемицелулози и лигнину објављени су у бројним публикацијама (Akihiro et al., 2010; Calvo-Flores et al., 2015; Dragičević, 2016; Hu, 2002; Irvine, 1985; Johnson et al., 2003; Kaplan, 1998; Omar and Mohini, 2016; Praskalo, 2010; Youssefian and Rahbar, 2015).

Протеини такође припадају групи биополимера. У састав протеина улазе аминокиселине које садрже три функционалне групе: амино, карбоксилну и бочну групу (радикали или R-остатак). Код свих аминокиселина које улазе у састав протеина амино и карбоксилна група су везане за исти угљеников атом и то су α -аминокиселине. Амино и карбоксилна група су исте за све аминокиселине, док се бочне групе разликују. Аминокиселине се међусобно повезују и образују пептидну везу повезивањем амино групе једне аминокиселине и карбоксилне групе друге аминокиселине уз издвајање воде. При томе се формира функционална група са четири атома, $-C(=O)NH-$. Велики број аминокиселина повезаних пептидним везама граде дугачке полипептидне ланце који граде тродимензионалну структуру преко дисулфидних и водоничних веза дајући молекулску масу од 300.000 до 600.000 Da. Формирањем полипептидних ланаца настаје примарна структура протеина. Протеини имају четири нивоа организације (примарна, секундарна, терцијарна и кватернерна).

За протеине је карактеристично да загревањем долази до структурних и конформацијских промена, односно, долази до исправљања полимерних ланаца које је праћено ендотермним ефектима. Протеини могу загревањем да изгубе своју биолошку функцију. Ова појава се зове денатурација, а код већине полимера се одвија на температури од око 70 °C. Денатурација је последица раскидања секундарних нековалентних веза у молекулу протеина услед чега долази до одмотавања полипептидног ланца. Многи радови показују да денатурација може бити изазвана хемијским средствима и загревањем, при чему водоничне, секундарне, везе између ланаца пуцају. Захваљујући денатурацији долази до бољег слагања протеина у јединици запремине, односно бољем контакту, што при даљем загревању може довести до умрежавања и повећања механичких својстава. (Wool and Sun, 2005)

Хитин и хитозан као биополимери

Хитин се сматра трећим полимером по доступности после целулозе и лигнина, а присутан је у виду егзоскелета код морских бескичмењака и инсеката или као влакна у ћелијском зиду код одређених гљива и квасаца. Хитин је хомополимер састављен од 2-ацетоамидо-2-дезоксид- β -1,4-D-глюкопиранозе, иако се неки глюकोпиранозни остаци налазе у деацетилисаном облику као 2-амино-2-дезоксид- β -1,4-D-глюкопираноза, односно, хитозан. Постоји аналогија између његове функције код гљива и инсеката и целулозе код биљака (Dragičević, 2016; Kaplan, 1998; Wertz et al., 2010). У природи се јавља у виду високо уређених микрофибрила, а синтетизују га филаментозне гљиве као саставни део зидова ћелија где игра улогу ојачања и одржавања структурног интегритета. Гљиве се сматрају највећим извором његовог влакнастог облика (Kaplan, 1998). Услед високо кристалне структуре није растворљив у води нити у органским растварачима. Биоразградив је, нетоксичан и термостабилан

полимер. Нема дефинисану тачку топљења, али се угљенише приликом прекомерног загревања. Термичка деградација хитина настаје пре почетка топљења, што је карактеристично за полисахариде, а почиње да се одвија на око 280 °C. Најчешће се јавља као нуспроизвод прераде морских љускара (Gross and Scholz, 2001; Kaplan, 1998).

Хитозан је полимер који настаје деацетилацијом хитина. Када се хитин деацетилише до 50 %, тада постаје растворан у слабије концентрованим киселинама и та супстанца се назива хитозан. Хитозан се синтетизује упоредо са хитином као саставни део ћелијског зида код појединих гљива. Попут хитина, нема дефинисану тачку топљења и угљенише се приликом прекомерног загревања. Термичка деградација до пиразина и карбоксилних киселина кратких ланаца се одвија на око 270 °C, на основу чега се може закључити да конверзија хитина до корисних облика, без деградације полимера, захтева технологију обраде у облику раствора. Хитозан има својства коагуланта/флокуланта док у односу на остале полимере попут синтетичких смола, активног угља, чак и самог хитина, исказује супериорна својства као агенс за пречишћавање воде и адсорпцију метала. Подаци о хитозану преузети су из литературних извора (Gross and Scholz, 2001; Kaplan, 1998; Wertz et al., 2010).

Стање у области

Различити аутори (Dodoo et al., 2011; Sedláková et al., 2015) и Међународна агенција за енергију (International Energy Agency, 2015) указали су да стамбени објекти доприносе са 30 до 40 % у укупној количини генерисаног CO₂. Стамбени објекти су значајан конзум енергије и сировина са уделом од чак 40 % у укупно конвертованој количини енергије и око 60 % утрошених сировина на светском нивоу (Pacheco-Torgal et al., 2016; Zabalza Bribián et al., 2011). Смањење у трансформацији примарне енергије представља значајан корак у политици управљања климатским променама (Monahan and Powell, 2011), а повећање енергетске ефикасности (EE) у грађевинском сектору представља један од главних циљева енергетске политике ЕУ (Motuziene et al., 2016). Многи аутори дошли су до закључка да је најефикаснији приступ овом проблему смањење енергетских потреба у току периода експлоатације објекта што може да се изведе пажљивим одабиром система градње. Израдом енергетски ефикаснијег спољног омотача стамбених објекта могуће је смањити енергетски конзум за више од 50 % (International Energy Agency, 2015). Аутори прегледног рада (Chau et al., 2015) указују да у току животног циклуса породичних објекта од 15 до 40 % чини укупна конзумирана примарна енергија тих објекта (укупна енергија уложена у производњу материјала, транспорт и извођење грађевинских радова). Преостали удео утицаја ових објекта на животну средину чине свакодневне енергетске потребе у току периода експлоатације објекта (током 50 до 60 година). Енергија неопходна у току целог животног циклуса стамбених објекта најчешће је пореклом из фосилних извора. Имајући у виду факторе који утичу на квалитет животне средине, а који су у вези са фосилним изворима енергије и принципе одрживог развоја, оправдано и пожељно је окренути се обновљивим изворима сировина за производњу грађевинских материјала (Pacheco-Torgal et al., 2016).

Израдом ТИ материјала заснованих на биокompatитним и биополимерним сировинама може да се задовољи потреба за повећаном потражњом ове врсте грађевинског материјала, да се значајно допринесе очувању природних ресурса, да се смањи GHG емисија и унапреди квалитет животне средине. На тржишту је могуће наћи ТИ материјале који су еколошки прихватљиви, међутим, они најчешће нису ценовно конкурентни конвенционалним. Незнатно већи коефицијент топлотне проводљивости у односу на конвенционалне ТИ материјале, недовољна

заступљеност материјала на тржишту и специфичности уградње и одржавања су додатни разлози због којих ови материјали немају значајнију примену. Да би се превазишли поменути недостаци, предлаже се развијање технологије израде ТИ грађевинских материјала од обновљивих и локално доступних природних сировина прихватљиве цене. За ове материјале постоји затворени циклус кружења материје у природи и нису познате последице по здравље људи.

Прегледом до сада објављених истраживања, објављених патената и карактеристика других ТИ материјала заснованих на обновљивим сировинама, утврђено је да резултате није могуће применити на предметни биокомпозитни плочасти материјал. Обзиром да је ова област недовољно истражена, доступна литература се углавном своди на патенте и мањи број до сада објављених радова. Не постоје јасни показатељи да се предметни тип материјала налази у широј употреби, стога постоји потреба за даљим развојем овог биополимерног, биокомпозитног, плочастог ТИ материјала. У последњих десет година постоји тенденција интензивног пораста интересовања за израдом ТИ материјала који су мање штетни по животну средину и који се заснивају на примени биомасе. Врста примењене сировине и начини њене примене су разноврсни и зависе од поднебља са којег сировина потиче, међутим, углавном су испитивани материјали који као везивно средство користе постојећа синтетичка везива. Тренутно актуелне методе које се користе за производњу ТИ материјала заснованих на слами подразумевају примену префабрикованих елемената балиране сламе или плоча пресоване сламе уз употребу природних везивних средстава, синтетичких смола или минералног везива.

Различити истраживачи испитивали су могућност производње плоча ТИ материјала пресовањем на повишеним температурама разних лигноцелулозних материјала попут мешавине сунцокрета, протеина и лигноцелулозних влакана без додатка везивних средстава (Evon et al., 2014); стабљике сунцокрета и хитозана (Mati-Baouche et al., 2014); влакана кокоса и стабљика шећерне трске (Panyakaew and Fotios, 2011) и микроталасним пресовањем влакана стабљике памука (Zhou et al., 2010). Њихова истраживања су резултовала материјалима са коефицијентом топлотне проводљивости од око $0,089 \text{ W(m K)}^{-1}$; $0,056 \text{ W(m K)}^{-1}$; $0,046$ и $0,068 \text{ W(m K)}^{-1}$ и између $0,059$ и $0,082 \text{ W(m K)}^{-1}$, респективно. Резултати истраживања пресованих плоча без додатка везивних средстава указују да материјали произведени на овај начин имају лошија механичка својства и осетљивији су на присуство влаге, него материјали са везивним средствима. Постоји још неколико радова, (Collet et al., 2017; Lertsutthiwong et al., 2008; Quintana et al., 2009; Xu et al., 2004) у којима се истражује могућност производње ТИ материјала заснованог на лигноцелулозном материјалу употребом методе пресовања на повишеним температурама, са сличним резултатима.

Korjenic et al. (2011) испитивали су могућност производње ТИ материјала у облику вуне који се заснива на примени влакана јуте, лана или конопље (68 %), њиховог поздера (20 %) у мешавини са бикомпонентним влакнима (12 %) као везивним средством. Резултат њиховог истраживања су материјали са коефицијентом топлотне проводљивости од $0,039$ до $0,049 \text{ W(m K)}^{-1}$ и механичким својствима (напон при притиску при 10 % деформације $\sigma_{p,10\%}$ од $0,4$ до $11,2 \text{ kPa}$ и чврстоћа при затезању f_t у границама између $6,3$ и $23,5 \text{ kPa}$). Утврђено је да се овакав материјал у потпуности може упоређивати са класичним ТИ материјалима. Wei et al. (2015) истраживали су могућност производње ТИ материјала од сламе пиринча методом пресовања на повишеној температури применом микроталаса за загревање материјала уз додаток синтетичких смола. Резултати њиховог истраживања показали су да материјал има коефицијент топлотне проводљивости између $0,051$ и

$0,053 \text{ W}(\text{m K})^{-1}$, релативно малу запреминску масу ($200 - 350 \text{ kg m}^{-3}$) и да се употребом оваквог пресовања значајно скраћује време производње материјала. Осим поменутих, постоји још неколико група аутора које су истраживале могућност употребе лигноцелулозног материјала као ТИ уз додатак синтетичких везивних средстава (Binici et al., 2016; Paiva et al., 2012). Поједине групе аутора су као везивно средство успешно користили природна и синтетичка везива попут лепкова заснованих на протеинима из соје, кукурузном скробу, UF лепковима и хибридним органско-неорганским везивима (Ali and Alabdulkarem, 2017; Bourdot et al., 2017; Fernea et al., 2017; Kremensas et al., 2017; Martinez, 2017; Miron et al., 2017; Sassoni et al., 2014; Thiebleson et al., 2017; Wang and Sun, 2002; Yang et al., 2003).

Истраживачи Лајбницевог института пољопривредног инжењерства и биекономије, АТВ, у Потсдаму, у Немачкој, дуже време су се бавили истраживањем нових, једноставнијих и ефикаснијих начина жетве, прераде и примене конопље код израде биокompatibilних влакнастих и ТИ плоча (E. Kirilovs et al., 2015; Lühr et al., 2018; Recenka et al., 2008; Recenka and Gusovius, 2011; Radosavljevic et al., 2008). Они су проучавали начине припреме конопље са циљем повећања ефикасности и смањења цене процеса издвајања влакана за производњу плочастих материјала. У току истраживања утврђено је да се уситњавањем и складиштењем конопље у влажним анаеробним условима (припрема силирањем) на временски период од годину дана постиже лакша обрада и одвајање влакана, међутим, у току складиштења долази до делимичног губитка механичких својстава влакана. Такође је утврђено да се биљни сокови приликом пресовања материјала на високим температурама полимеризују и на тај начин остварују улогу везивног средства. Резултати њихових истраживања су обећавајући у домену примене конопље за производњу композитних материјала, пресованих плоча са и без додатних везива. Постоји још неколико група аутора који су предложили употребу других врста пољопривредног лигноцелулозног материјала попут пшеничне и јечмене сламе, влакана урмине палме, семенки маслина и кокоса као ојачавајућих влакана у ТИ композитима. Ови аутори такође предлажу употребу глине, бетона, цементно кречних малтера и гипса као матрице за производњу тих композита (Aksogan et al., 2018; Ashour et al., 2010; Azhary et al., 2017; Barreca and Fichera, 2013; Belhadj et al., 2014; Chikhi et al., 2013; Djoudi et al., 2014; Khedari et al., 2001; Lamrani et al., 2017; Liuzzi et al., 2017).

Примена мицелијума као везивног средства није сасвим нова. Yamanaka and Kikuchi (1991) направили су прве кораке у овом правцу са патентом „*Complex of fibers and fungi and a process for preparation thereof*“ у којем је описан процес производње влакнастог материјала гајењем мицелијума на подлози од природних и синтетичких влакана са назнаком да материјал има потенцијал за употребу у грађевинској индустрији у облику влакнастих дрвених плоча, ТИ материјала и слично.

Пре око девет година у Сједињеним Америчким Државама Eben Bayer и Gavin McIntyre употребили су мицелијум као везивно средство за израду биоразградивог амбалажног материјала и заштитили производ патентом (Bayer and McIntyre, 2009). Штавише, утврдили су да је на овај начин могуће произвести материјал практично било којег облика уколико се он гаји у одговарајућем калупу и да је могуће комбиновање минералних материјала попут перлита или вермикулита са основном смешом биокompatibilног композита. Такође су тврдили да је осим вегетативног мицелијума гљиве на истоветан начин могуће искористити и њено плодно тело (Bayer and McIntyre, 2016). Сва четири аутора (Yamanaka и Kikuchi као и Bayer и McIntyre) утврдили су да је у производњи материјала на овај начин могуће користити и неорганска, односно, синтетичка влакна и примесе у циљу побољшања одређених карактеристика материјала. Од тада, пријављено је неколико патената за производњу различитих

предмета и производа (Bayer and McIntyre, 2015a, 2009; Greetham et al., 2015; McIntyre et al., 2015; Ross, 2012; Winiski, 2016; Winiski and Van Hook, 2015), створена је компанија „*Ecovative Design, LLC*“ која се бави производњом амбалажног материјала „*EcoCradle*“ и „*MycoFoam*“. Осим тога компанија се бави и истраживањем нових могућности примене мицелијума међу којима се налази и идеја израде сендвич зидова директним гајењем материјала унутар префабрикованог монтажног елемента као и производња танких влакнастих плоча које могу да замене лесонит у производњи намештаја. Тренутно се употреба мицелијума на сличан начин и у сличне сврхе испитује на холандском универзитету *Utrecht* у оквиру засебног програма „*Officina Corpuscoli*“. Правац истраживања је усмерен на уметничка дела и употребу мицелијума као заменског средства за синтетичке полимерне материјале. Истраживана је и могућност примене пшеничне сламе као пуниоца код термопластичних материјала с тим да су мицелијум гљиве користили као посредно средство за остваривање боље адхезије између полиетилена високе густине (HDPE) и сламе (Schirp et al., 2006). Том приликом утврђено је да слама може да се користи као замена за дрво у улози пуниоца код термопластичних материјала. Arifin and Yusuf (2013) истраживали су развој биокompatитног материјала од љуски пиринча и пшеничних зрна при чему су закључили да материјал има предиспозиције као замена за полистиренску амбалажу. До истих закључака су дошли Abhijith et al. (2018). Holt et al. (2012) испитивали су могућност употребе отпадних чаура семена биљке памука као сировине за гајење мицелијума и производњу амбалажног материјала који би се користио као замена за полистирен. Утврђено је да произведени материјал има чврстоћу при савијању од 10 до 26 kPa, модул еластичности од 200 до 396 kPa, чврстоћу при притиску измерену у границама између 2 и 11 kPa и коефицијент топлотне проводљивости између 0,13 и 0,18 W(m K)⁻¹. Pelletier et al. (2013) испитивали су својства акустично апсорпционог материјала заснованог на слами пиринча, шећерној трски, ланени поздер, кенафа и конопље. Резултати испитивања су показали обећавајуће резултате у поређењу са класичним акустичним апсорберима заснованим на пенама нафтних деривата. Материјали са најслабијим акустичним својствима од наведених, показали су редукуцију буке од чак 70 – 75 % на фреквенцији од 1000 Hz.

Почетком 2017. године објављена су нова истраживања која говоре о могућностима примене материјала заснованог на мицелијуму и све већем интересу научне заједнице за исти. Pelletier et al. (2017) су даље испитивали могућност производње пресованих акустично изолационих панела заснованих на остацима цвета памука, пиринчаног слами, шећерној трсци, кукурузним стабљикама и кенафу. Резултати показују да се материјал може примењивати као звучна изолација међуспратних конструкција и као акустично рефлексивни материјал. Bajwa et al. (2017) испитивали су подложност биокompatита заснованог на мицелијуму три типа гљива и три различите подлоге (конопља, кукурузовина и кенаф) нападу од стране термита. Утврђено је да је материјал, због присуства целулозе у подлогама за гајење, подложен нападу термита. Такође, утврђено је да се, уместо хемијских средстава, као алтернатива за одбијање ових штеточина веома ефикасно може примењивати смола биљке *Parthenium argentatum*, кедрово уље и уље биљке ветивер. Jiang et al. (2017) испитивали су својства композитног материјала чије језгро је израђено од мицелијума гајеног на одређеном супстрату, обмотаног спољним омотачем од платна импрегнираног лепком компатибилног са гљивама. У истраживању су коришћена платна од лана, јуте и целулозе, а испитивана је чврстоћа при савијању. Резултати указују да је укупна чврстоћа при савијању зависна од степена колонизације гљиве на платну, док је крутост материјала зависна од чврстоће самог језгра. Утврђено је да, од поменутих влакана, гљива формира најјачу везу са влакнима лана и да су узорци

са ланеним платном показала највеће вредности чврстоће при савијању $f_m = 1.500$ kPa, док су вредности чврстоће узорак са јутом и целулозом износиле 762 и 926 kPa, респективно. Вредности модула еластичности за узорке са ланеним, јутаним и целулозним платном су 4.650, 4.654 и 6.567 kPa, респективно. Yang et al. (2017) су користили мицелијум као везивно средство за производњу материјала заснованог на мешавини различитих супстрата попут дрвене пулпе, зрнима проса, пшеничним мекињама, природним влакнима и калцијум сулфату. Материјал је узгајан у периоду од две недеље до шест недеља да би утврдили утицај дужине прораста на испитивана физичко-механичка и термичка својства материјала. Такође је испитано и неколико начина мешања компоненти, калупљења и инкубације како би се утврдио најподеснији протокол. Резултати овог истраживања показују да произведени материјал има запреминску масу од 160 до 280 kg m⁻³, коефицијент топлотне проводљивости у границама 0,05 – 0,07 W(m K)⁻¹, модул еластичности од 15 до 60 МПа, модул смицања до 24 МПа. Вредности модула еластичности и модула смицања већи су и до 60 % у правцу управном у односу на смер паковања материјала у калупе, што је објашњено постојањем хоризонтално јачих слојева (ламела) насталих паковањем материјала у калупе и постојањем дебљег површинског омотача мицелијума. Такође је утврђено да модул еластичности и модул смицања имају тенденцију опадања са джимом временом инкубације узорак, што се објашњава трошењем супстрата приликом раста мицелијума. Резултати мерења Поасоновог коефицијента за поменути материјал износе између 0,15 и 0,5. Чврстоћа при притиску се креће између 350 kPa за узорке инкубиране две недеље и око 570 kPa за узорке инкубиране 6 недеља, што је резултат стварања гушће мреже мицеларног ткива узрокованог джимом прорастом. На крају, аутори упоређују квалитет произведеног материјала са два конвенционална ТИ материјала *Insulfoam* и EPS. При томе је утврђено да је произведени материјал слабији топлотни изолатор, међутим запреминска маса и чврстоћа материјала при притиску превазилазе вредности у односу на ова два конвенционална материјала. Haneef et al. (2017) спровели су велики број испитивања на танкослојном материјалу који се састоји од мицелијума гајеног на супстратима од целулозе и целулозе са додатком хранљивих материја. Морфолошки састав је испитан скенирајућом електронском микроскопијом (SEM), структурна карактеризација помоћу спектрометра са инфрацрвеном Фуријеовом трансформацијом (FTIR), а понашање на високим температурама помоћу термогравиметријских (TG) метода. Осим тога испитивали су и упијање влаге и угао квашења материјала. Резултати њиховог истраживања указују да постоје разлике у структури и хемијском саставу мицелијума у зависности од супстрата на којем је узгајан, да је материјал термички стабилан на температурама до 225 °C, да материјал слабо упија влагу при релативним влажностима испод 50 % и да поседује велик угао квашења због чега слабо упија воду. У раду из октобра 2017. године Islam et al. (2017) аутори наводе резултате истраживања морфолошких и механичких својстава мицелијума при чему је утврђено да је запреминска маса материјала између 30 и 50 kg m⁻³ и да механичка својства материјала зависе од његове запреминске масе. Нарочита пажња посвећена је испитивањима механичких својстава у области еластичних деформација.

Таб. 1.6 Испитивани параметри квалитета биокомпозита других аутора

	Запреминска маса материјала, kg m^{-3}	Чврстоћа при савијању, kPa	Чврстоћа при затезању, MPa	Чврстоћа при притиску, kPa	Јунгов модул еластичност, MPa	Модул смицања, kPa	Пواسонов коефицијент	Коефицијент топлотне проводљивости, $W(m K)^{-1}$
Holt et al. (2012)	66,5 – 224	7 – 26	–	1,1 – 72,2	0,12 – 0,66	–	–	0,10 – 0,18
Jiang et al. (2017)	–	762 – 1.500	–	–	4,65 – 6,57	–	–	–
Yang et al. (2017)	160 – 280	–	–	350 – 570	15 – 60	$24 \cdot 10^3$	0,15 – 0,5	0,05 – 0,07
Islam et al. (2017)	30 – 50	–	0,1 – 0,3	–	0,6 – 2	–	–	–

Најновије истраживање на биополимерним материјалима заснованим на мицелијуму и лигноцелулозним материјалима обогаћених силицијумом са аспекта заштите од пожара (Jones et al., 2018) показује да је биокомпозит безбеднији од традиционалних синтетичких грађевинских материјала попут екструдираног полистирена и влакнастих плоча. Аутори рада су у производном процесу користили млечено стакло као додатак смеси биокомпозита са циљем смањења запаљивости материјала. Утврђено је да се приликом пожара код биокомпозита касније појављује пламен и да приликом сагоревања емитује мање дима и угљен-диоксида од материјала са којима је поређен. Такође је утврђено да је биокомпозит економски повољнији од поменутих материјала.

1.2.1 Пшенична слама

Под лигноцелулозним влакнима пољопривредних биљака подразумевају се жетвени остаци као што су кукурузовина, делови биљке конопље, слама стрних жита (пре свега пшенице) и соје. Потенцијално би могли да се користе жетвени остаци и других биљних врста. Овде се разматрају својства сламе пшенице као жетвоног остатка који после кукурузовине има највећи потенцијал. Слама при убирању најчешће има садржај влаге близак равнотежном, а у потпуности је решен поступак убирања, па и складиштења. У АП Војводини пшеница обично заузима 28 до 30 % ратарских површина, те је на другом месту, одмах после кукуруза. Слама представља, пре свега, мешавину целулозе, хемицелулозе и лигнина. Од наведених, једино је целулоза хемијски добро дефинисана при чему она представља чисти линеарни полимер глукозе (Akihiro et al., 2010; Gidley et al., 2002).

У зависности од типа земљишта, климатских услова, аграрних мера у току производње и врсте пшенице која се користи, период вегетације износи од 110 до 130 дана. Стабљика биљке је шупља, цилиндрична, и састављена од 5 – 6 чланака (интерноди) међусобно раздвојених коленцима (ноди). Стабљика има две основне функције: да пружа потпору и да проводи хранљиве материје и воду. Састоји се од проводног ткива које заузима централни део стабљике (механичка, проводна, па и складишна функција), као и ћелија епидермиса чија је основна функција заштита унутрашњих органа од спољних утицаја. Влакна целулозе исказују анизотропна

својства. Утврђено је да влакна која имају велик MFA имају већу чврстоћу при притиску. Насупрот томе, влакна која имају мањи MFA исказују већу чврстоћу на затезање. Оријентација микрофибрила у сваком слоју ћелијског зида код пшеничне сламе је различита. Микрофибриле примарног ћелијског зида исказују мрежасту структуру. Микрофибриле S₁ слоја секундарног ћелијског зида имају велик MFA (скоро трансверзалан положај). Микрофибриле слоја S₂ имају MFA од 20 до 30 ° (Run-Chang Sun, 2010).

Хемијски састав

Више од 80 % суве материје сламе чине целулоза, хемицелулоза и лигнин. Поред поменутих компоненти, слама садржи и мање количине протеина, воскова који штите епидермис, шећера, соли и нерастворног пепела. Хемијски састав сламе зависи и од других фактора попут старости биљке, дела стабљике из којег је узет узорак, типа земљишта на којем је узгајана и аграрних мера гајења. Хемијски састав влакана житарица је сличан саставу влакана дрвета с тим да се однос удела појединих полимера у влакнима разликује. Пшенична слама садржи 29 – 35 % целулозе, 26 – 32 % хемицелулозе и 16 – 21 % лигнина, односно, садржи мање целулозе, много више хемицелулозе и мање лигнина од дрвета. Пшенична слама такође садржи и око 0,6 – 3,6 % протеина. Хемијски састав осталих житарица је сличан пшеничној слами.

Од укупног садржаја минерала, 65 – 70 % чини SiO₂ (силицијум-диоксид). Утврђено је да има позитиван утицај на раст биљке, да пружа заштиту од инсеката и гљива и да повећава механичку чврстоћу ћелијског зида. Присуство силицијума у биљкама отежава и механичку прераду сировина с обзиром на то да оштрице машина за уситњавање убрзано губе оштрину (Cárdenas-R et al., 2018; Ebnesaajad, 2013; Omar and Mohini, 2016; Praskalo, 2010; Qi, 2017; Run-Chang Sun, 2010).

Доступност

Разликују се три врсте приноса сламе: теоретски, технички и одрживи. Слама чини око 50 % надземне масе овог усева, а уобичајеним поступцима убире се око 50 % од тога (Golub et al., 2011; Martinov et al., 2014). Процењује се да одрживи принос износи око 33 % од укупног или 66 % техничког приноса, односно једна трећина надземне резидуалне масе.

Процењује се да је укупна годишња светска производња зрна пшенице у 2018. износила око $0,7 \cdot 10^9$ t (UN (FAO), 2018). Одрживи потенцијал ваздушно суве пшеничне сламе би према тим подацима износио око $0,23 \cdot 10^9$ t на светском нивоу. Теоретски принос ваздушно суве сламе на територији АП Војводине, у одличним климатским условима износи око $4,6$ t ha⁻¹ (Gvozdenac et al., 2010), мада је то екстремно висока вредност. На основу одрживог приноса, за даљу употребу на располагању остаје, при повољним агроколошким условима, дакле, продуктивног земљишта и добрих временских услова, те при примени савремене агротехнике, око 3 t ha⁻¹ сламе. Ово су оријентационе вредности које се могу мењати у зависности од засејаних површина и временских услова, али представљају добру теоретску основу за грубе прорачуне доступне количине масе сламе као сировог материјала. Мартинов et al. (2014) су проценили да у сушним сезонама долази до смањења приноса биомасе код пшенице и до 45 %, те се може очекивати количина од свега $1,4$ t ha⁻¹ ваздушно суве сламе коју је могуће даље употребити. Такође треба имати у виду да се слама користи као простирка, енергент и за друге сврхе.

У току убирања пшеничне сламе њен садржај влаге, у нашим климатским условима, често је нижи од равнотежног, а достиже га након одређеног временског периода складиштења. Средња вредност равнотежног садржаја влаге током лета и

ране јесени износи 13 до 14 %, а у току касне јесени, зиме и раног пролећа 14 до 15 %. Слама се из збоја који се формира при жетви зрна пресује у бале. Конвенционалне бале, мале четвртасте, због трошкова утовара, истовара, транспорта и складиштења нису примењиве за употребу сламе као индустријске сировине. Примењиве су велике ваљкасте и велике четвртасте бале. Пречник ваљкастих бала обично је 1,5 m, а ширина 1,2 m. Запреминска маса бале може да се подешава, а најчешће је, за наведене садржаје влаге, 80 до 100 kg m⁻³. За велике четвртасте бале постоје различите димензије у зависности од конструкције канала за пресовање, а најповољније су 1,2 x 0,9 x 2,4 m (Ш x В x Д). Запреминска маса оваквих бала, при истим условима, износи око 120 kg m⁻³, а код нових решења преса достиже и до 160 kg m⁻³. Велике четвртасте бале представљају најповољније решење са становишта утрошка везивног средства, трошкова транспорта и складиштења, па и са становишта фазе припреме материјала за производњу плочастог ТИ материјала. Убирањем се сматрају операције до формирања примарног складишта, у близини површина са којих се слама прикупља. Након тога следе операције утовара на транспортно средство, транспорт до складишта постројења и складиштење. При складиштењу је најважније да се слама заштити од падавина и земљишне влаге, што се најчешће изводи слагањем балираног материјала на платформе издигнуте од земље и покривањем паропропусним, водо-непропусним фолијама.

1.2.2 Конопља

Постоји неколико ботаничких подела рода *Cannabis*, али је општеприхваћена она коју су предложили Сизов и Серебрајкова и која род дели на две култивисане врсте: обична или индустријска конопља (*Cannabis sativa*) и индијска конопља (*Cannabis indica*). Разлика између ове две врсте је пре свега у погледу психоактивне супстанце тетрахидроканабинол (ТНС). Индустријска конопља на нашем поднебљу садржи највише до 0,5 % ТНС-а (у ЕУ до 0,3 %), док индијска може да садржи и до 13 % (Berenji and Sikora, 1996; Bouloc et al., 2013; Praskalo, 2010). Циљ гајења конопље је производња влакана, папира и семена. Фокус рада је на употреби индустријске конопље која се узгаја због влакана и других својстава. При томе би се користили резидуални делови, жетвени остаци.

C. Sativa је једногодишња биљка висине 1,6 до 5 m и пречника 6 до 45 mm у зависности од варијетета биљке и расположивог животног простора. Вегетациони период биљке траје од 90 до 140 дана. Конопља може да се узгаја без употребе пестицида што значајно доприноси квалитету животне средине, а сама конопља делује као природни хербицид. Морфолошке карактеристике биљке зависе од услова гајења (густина сетве, плодност земљишта и друго). Мале густине сетве резултују развојем разгранатих стабљика, док већа густина резултује формирањем дугих, неразгранатих стабљика. Густином сетве условљена је и намена биљке. Већа густина примењује се за производњу влакана, а ређи склоп сетве за папирну индустрију и производњу семена (Bouloc et al., 2013; Lühr et al., 2015; Martinov et al., 1996; Praskalo, 2010; Šunjka et al., 1996).

Стабљика конопље састоји се од два дела: од централног дрвенастог (поздера) и екстерног епидермалног дела (коре) које заједно обављају велики број функција. Средишњи део стабљике (поздер – шупљи цилиндар пречника од 1 до 5 mm) обезбеђује структурну носивост и служи за пренос минералних материја дуж биљке, као и за складиштење. Око поздера су формирана два прстена која се састоје од примарних и секундарних влакана. Примарна влакна се од секундарних разликују по дужини (секундарна влакна су краћа), дебелом ћелијском зиду и специфичном

хемијском саставу (висока концентрација целулозе и ниска концентрација хемицелулоза и лигнина). Примарна влакна изузетно су тражена у индустрији због специфичних физичких, морфолошких и хемијских карактеристика. Од 92 до 95 % влакана конопље потиче од примарних влакана. Секундарна влакна су кртија од примарних и најчешће остају након процеса издвајања због мале дужине. Усмереност целулозних микрофибрила у примарном ћелијском зиду код конопље је слична као и код пшеничне сламе. Главни извор влакана је секундарни ћелијски зид, а карактерише га висок садржај целулозе и усмереност целулозних микрофибрила у сваком од два подслоја. У S_1 слоју MFA износи од 70 до 90 °. S_2 слој се састоји од два подслоја. У спољашњем подслоју, MFA износи од 25 до 30 ° док је овај угао у унутрашњем подслоју од 0 до 5 °. Просечна вредност MFA у конопљи износи 4 ° (Bouloc et al., 2013; Nunes, 2017; Praskalo, 2010).

Хемијски састав и карактеристике

Осим целулозе, хемицелулоза и лигнина у састав конопље улазе и други полисахариди попут пектина, минералних супстанци, воскова, протеини и други олигомери шећера и фенола. Њихов релативни однос зависи од дела биљке са којег потичу, старости и врсте биљке, начина гајења, квалитета земљишта и климатских фактора. На основу тога хемијски састав конопље разликује се у зависности од агроколошких (агроеколошких и агроклиматских) услова места гајења. Однос целулозе, хемицелулоза и лигнина у саставу конопље пореклом са простора Велике Британије у просеку износи 52, 14 и 7 %, респективно, што је у делимичној сагласности са литературним подацима за индијско-кинеско-аустралијски тип конопље од 67 – 78,3 %, 5,5 – 16,1 % и 2,9 – 3,3%, респективно. Конопља пореклом са простора АП Војводине садржи квалитетнија влакна због повећаног садржаја целулозе, а могу да садрже 77 – 78 % целулозе, 18 – 22 % хемицелулоза и 4 – 8 % лигнина. Структура и састав влакана значајно утичу на њихове карактеристике. Пречник и дужина елементарних влакана варирају у зависности од врсте биљке и услова у којим је гајена. Дужина влакана може да износи и до неколико метара, пречника од 10 до 40 μm . Запреминска маса влакана конопље ($1,5 \text{ g cm}^{-3}$) је знатно нижа од запреминске масе стаклених влакана ($2,5 \text{ g cm}^{-3}$). Чврстоћа влакана конопље при затезању износи око 580 МПа (за 20 % више него код лана), слично као и код меког челика, међутим, модул еластичности је мањи и износи око 12,7 МПа. Конопља скоро у истој мери упија влагу као и памук или лан. Влакна конопље имају велику чврстоћу – највећу у односу на друге пољопривредне врсте; нису подложна појави статичког наелектрисања; имају добра сорпциона својства; постојана су на сунчевој светлости и приликом прања због чега се користе за велики број намена. Запреминска маса конопљиног поздера износи од 55 до 115 kg m^{-3} (мерена након 48 часова сушења на 105 °С без сабијања масе), а порозност насуте масе креће се између 93 и 96 %. Релативна влажност ваздушно сувог поздера износи између 12 и 15 %, а максимално упијање воде након 48 часова потапања између 356 и 406 %. Три својства конопље су од великог значаја за сектор грађевинарства: механичка чврстоћа влакана, ТИ карактеристике и запреминска маса (од 80 до 160 kg m^{-3}). Уколико се изузму семенке које немају употребну вредност као грађевински материјал, конопља обезбеђује две врсте материјала за грађевинарство: влакна и поздер који се користе за производњу ТИ материјала и лаких бетона и малтера. Наведени подаци у овом пасусу се налазе у бројним публикацијама (Bouloc et al., 2013; Lühr et al., 2015, 2013; Martinov et al., 1996; Nguyen et al., 2009; Nunes, 2017; Recenka et al., 2012, 2007; Praskalo, 2010).

Доступност

Принос конопље у зависности од начина гајења може да износи око 15 t ha^{-1} ваздушно суве масе. Конопља је генерално знатно мање заступљена од пшенице. Наша земља је била један од највећих светских произвођача конопље, а у оквиру СФР Југославије, Србија је била највећи произвођач. Врхунац производње ове биљке је достигнут 1949. године када је под конопљом било чак 108.215 ha земљишта. 1968. године је производња конопље опала за 80 %, док је у наредних 20 година опала за додатних 80 %. У новије време површине под овом врстом врло су скромне. Површина под конопљом је 2004. године износила око 200 ha, а 2016. године 250 ha (Bouloc et al., 2013; Müssig, 2010).

Депозиција лигнина најинтензивнија је у време цветања биљке и највише утиче на спољне слојеве секундарног зида. Уколико је циљ да се прикупе високо квалитетна влакна неопходно је извести жетву одмах након цветања. Влакна конопље се издвајају у вишестепеном процесу који се састоји од намакања стабљика у води, одлежавањем у одређеном временском периоду, сушења и накнадном механичком обрадом. Након намакања, биљке се суше ради изједначавања влаге у стабљикама, а потом се влакна издвајају са стабљике. Издвајање влакана изводи се ломљењем, трљењем и гребенањем. Код савремених врста конопље удео влакана може да се креће од 18 па чак до 30 %. Поздер који остаје након процеса издвајања влакана категорише се као индустријски отпад који може да се искористи за производњу других биополимера и биокомпозита. Због процеса издвајања влакана, поздер је уситњен, те га није могуће балирати због чега се његов транспорт изводи у џамбо врећама. Код конопље која се користи за производњу семенског материјала, постоје значајни жетвени остаци који се не користе у производњи влакана због лошег квалитета. У овом случају, маса произведеног семена износи од $0,5$ до $0,8 \text{ t ha}^{-1}$, а сав преостали материјал, са аспекта одрживог приноса, могуће је користити као гориво и сировину за индустријске производе, па тако и ТИ материјала.

Поступак убирања жетвених остатака семенске конопље није у потпуности решен, али је изводљив уколико за то постоји економски оправдан интерес. Код гајења конопље за потребе папирне индустрије нема жетвених остатака које би било могуће искористити за производњу биокомпозитних грађевинских ТИ материјала. Цена конопљиних влакана је виша од цене сировина за израду класичних грађевинских и ТИ материјала због трошкова одвајања и припреме влакана. Иако је цена конопљиних влакана висока (и до 500 € t^{-1}), једва да је довољна да фармерима покрије трошкове производње, због чега се ова биљка све мање узгаја у ову сврху. Цена конопљиног поздера је повољна и износи око 50 € t^{-1} код произвођача влакана, без трошкова транспорта, што је слично као и код пшеничне сламе. Истраживачи са Лајбницевог института АТВ у Потсдаму спроводили су експерименте у којима су испитиване методе складиштења конопљиних стабљика до момента издвајања влакана. Утврдили су да се силирањем конопље може остварити уштеда и до 30 % у односу на друге третмане јер се олакшавају накнадни процеси одвајања влакана (Idler et al., 2011; Recenka et al., 2012, 2007; Recenka and Gusovius, 2011).

1.2.3 Гљива буковача (*Pleurotus ostreatus*)

Гљиве могу да разграђују скоро сву неживу органску материју у природи, а посебну групу гљива чине оне врсте које могу да разграђују лигноцелулозни материјал. Присуство лигнина у дрвенастој материји отежава микроорганизмима да продру у структуру дрвета да би се хранили ћелијским садржајем и целулозним влакнима. Гљиве које могу да разграђују дрвенасту материју деле се у три групе:

гљиве беле трулежи, гљиве смеђе трулежи и гљиве меке трулежи (Lenz, 1993). Буковача (*Pleurotus ostreatus*) припада групи гљива беле трулежи, разделу базидиомикотина, групи правих гљива које нису штетне по људско здравље. Оне могу да луче ванћелијске ензиме који садрже водоник пероксид, пероксидазе, помоћу којих разграђују лигнин и у мањој мери целулазе које разграђују полисахариде до простих шећера. Постоји велики број подврста и сојева буковаче. То је полупаразитна гљива која не напада здраво дрвенасто ткиво већ само оштећена и одумрла стабла и то најчешће стабла и пањеве буковог дрвета по којима је и добила одомаћени назив. Такође може да се развија и размножава на великом броју других врста лигноцелулозних супстрата који садрже азот. Ово је значајно са аспекта гајења буковаче у вештачким условима где је као супстрат могуће примењивати све жетвене остатке из пољопривредне производње. Гљиве рода *Pleurotus* сматрају се најефикаснијим разлагачима лигноцелулозног материјала због чега је буковача и одабрана за испитивање у оквиру овог рада. Иако може да разграђује компактну дрвену материју, овај процес се одвија релативно споро, 3 – 5 година у зависности од тврдоће дрвета. Обзиром да разграђује одумрлу органску материју биљног порекла, буковача има важну улогу у кружењу материје у природи (Baysal et al., 2003; Bugarski, 2016, 2001).

Услови средине који утичу на развој

Услови спољне средине који утичу на животни циклус микроорганизама деле се у четири основне групе (Kovačević et al., 2004; Markov, 2012):

- Физички – температура, енергија зрачења и атмосферски притисак;
- Физичко-хемијски – влажност средине, концентрација растворених материја и површински напон;
- Хемијски – рН вредност, оксидо-редукциони услови и хемијске материје и;
- Биотички – симбиоза, конкуренција и предаторство.

Физички услови – температура

Температура средине представља један од основних фактора за развој било ког микроорганизама. Високе температуре изнад максималних за дати микроорганизам увек су смртоносне. Аспорогени организми углавном одумиру приликом излагања температури 60 до 70 °C у трајању 15 до 30 минута. При загревању на 80 – 100 °C интервал у којем микроорганизми одумиру скраћује се на 1 до 2 минута. Квасци и плесни одумиру на температурама 50 до 60 °C, а њихове споре на 65 до 85 °C. На основу дејства температуре на микроорганизме, а са циљем њиховог уништавања, изводе се две операције: пастеризација и стерилизација. Пастеризација се изводи при температури 65 – 80 °C у трајању 20 до 40 минута. Процес пастеризације преживљавају терморезистентне бактерије и њихове споре. Стерилизација је загревање материјала са циљем да се униште сви вегетативни облици и споре микроорганизама. Изводи се прегрејаном воденом паром у аутоклавима на температури 112 до 130 °C, у трајању 20 до 60 минута. Стерилизацију је могуће изводити и сувим врелим ваздухом при температури 160 до 180 °C и у трајању 60 до 120 минута (Chang and Miles, 2004; Kovačević et al., 2004; Markov, 2012).

Дејство температура нижих од минималне разликује се од дејства температура које прелазе максималне вредности за одређене микроорганизме. Смањивањем температуре испод минималне, микроорганизми прелазе у стање прикривене активности тј. анабиотичко стање. Температуре испод минимума за одређене микроорганизме нису увек смртоносне за њих. Многи одумиру након дужег периодаведеног у замрзнутом стању, међутим одумирање на ниским температурама је

вишеструко спорије него што је то случај са повишеним температурама (Kovačević et al., 2004; Markov, 2012).

Физичко-хемијски услови – Влажност средине

Вода која је на располагању микроорганизмима у некој средини исказује се величином која се назива активност воде, а означава се симболом a_w . То је такође и равнотежна количина воде доступна за хидратацију материјала. Активност воде је бездимензиона величина која се дефинише као однос притиска водене паре средине P (подлога, раствор) и притиска водене паре чистог растварача P_0 (воде) на истој температури (Kovačević et al., 2004; Markov, 2012). Уколико се водена пара посматра као реалан гас, активност воде можемо дефинисати и као однос фугасности воде и фугасности воде при референтним условима. При томе, фугасност реалног гаса је еквивалент парцијалном притиску код идеалних гасова. Активност воде је у вези и са хемијским потенцијалом. У стању равнотеже хемијски потенцијал воде је једнак у свим деловима система услед успостављања равнотеже кретањем воде од зоне са високом активношћу воде ка зони са нижом активношћу воде. Вредности скале активности воде крећу се од 0 – средина у којој апсолутно нема воде, до 1 – дестилована вода. Раст микроорганизма се одвија у распону вредности 0,61 до 1 (Markov, 2012). Уопштено, вредности активности воде $> 0,8$ указују на влажне средине, а вредности $< 0,7$ указују на сувље средине. Множењем вредности активности воде са 100 добија се вредност равнотежне релативне влажности из чега произилази да се активност воде може израчунати и на основу познавања вредности равнотежне релативне влажности средине. Активност воде одражава комбинацију интеракције воде са површином материјала, капиларним силама и супстанцом од које је материјал израђен.

Површине материјала могу да контролишу активност воде у свом окружењу. На хидрофобним површинама водоникови атоми у молекулу воде усмерени су ка површини што повећава активност воде у окружењу. На хидрофилним површинама формирају се јаке водоничне везе у површинском слоју што смањује активност воде у окружењу материјала. На овај начин се формира тенденција кретања воде ка унутрашњости материјала чиме се изазива повећање осмотског притиска у окружењу материјала.

Физичко-хемијски услови – концентрација растворених материја

Концентрација у којој се угљеник налази игра битну улогу приликом гајења. У већини случајева његова концентрација не би требала да пређе 2 %, мада постоје изузеци, тј. гљиве које су прилагођене високим концентрацијама шећера. Осим угљеника, гљивама је неопходан и извор азота. Целулозни биљни материјал садржи различите концентрације азота: пиринчана слама садржи око 0,58 %, пшенична слама око 0,62 %, јечам око 1,18 %, памучни отпад 0,65 до 1 %. За оптималан развој гљива неопходан је одређени однос C:N. Оптимална вредност C:N износи између 75:1 и 80:1, али су за поједине врсте прихватљиви и односи између 32:1 и 150:1 (Chang and Miles, 2004; Markov, 2012).

Основне карактеристике

Мицелијум се код већине гљива састоји од мреже цевастих тј. кончастих (филаментозних) структура тј. хифа. Мицелија која се развија у супстрату назива се супстратна или вегетативна, а постоји и ваздушна или репродуктивна мицелија која се формира када гљива уђе у плодноносну фазу развоја (Markov, 2012). Домаћи истраживачи буковаче утврдили су да, за локалне сојеве и у зависности од услова средине, време неопходно за развој до плодноносне фазе износи 18 ± 3 дана. Сматра се да је мицелија потпуно развијена након 26 до 28 дана од инокулације и да након

овог периода почиње да стари и одумиру. Репродуктивна фаза настаје уколико се за то стекну неопходни услови. Тада се раст вегетативне мицелије своди на минимум. Температура средине за нормалан развој и раст буковаче је између 20 и 30 °C, а оптимална температура износи 25 °C (Bugarski et al., 1997). Буковача може да се развија и при ниским температурама од приближно 3 °C, међутим њен развој је тада значајно успорен. Температуре средине преко 36 °C, у трајању 5 до 10 дана, изазивају смрт мицелије буковаче. За развој плодноносних тела потребна је нижа температура у односу на температуру развића вегетативне мицелије. Буковача припада ацидофилним микроорганизмима и за оптималан развој углавном је потребна рН вредност супстрата између 5 и 6,5. Припада групи аеробних микроорганизама, а у току развоја вегетативне мицелије може да толерише повишене концентрације CO₂ и до 1,2 %. Буковача има релативно кратак период раста, није захтевна у погледу услова средине и отпорна је на болести, што је важна карактеристика у индустријској производњи (Bugarski, 2016, 2001; Chang and Miles, 2004; Đurovka et al., 2001).

1.3 Критеријуми за оцену утицаја грађевинских материјала на животну средину

Појам одрживог развоја се дефинише као развој који омогућава да се задовоље данашње потребе за енергијом и материјалима, без угрожавања могућности да и будуће генерације остваре своје потребе (Brundtland, 1991).

Енергетски аспекти грађевинских материјала

Један од значајнијих сегмената одрживог развоја представља одржива градња под чиме подразумевамо примену грађевинских материјала који нису штетни по људско здравље и животну средину, градњу енергетски ефикасних објеката и одговорно руковођење отпадом који настаје у току целог животног циклуса објекта. Под појмом одрживе градње, поред функционалности, трајности и здравствених аспеката, у обзир се узима и укупни енергетски биланс материјала, односно његова укупно конзумирана примарна енергија. Прецизирање података о укупном енергетском билансу материјала или објекта, подразумева дефинисање енергетског конзума за (Krnjetin, 2004):

- прибављање и транспорт сировина;
- израду грађевинских материјала;
- транспорт материјала до градилишта и у оквиру градилишта;
- извођење грађевинских радова;
- поновну употребу или рециклажу;
- очување топлотног стања у објекту.

Принципима енергетски одрживог градитељства тежи се:

- смањењу топлотних губитака из објеката унапређењем топлотне заштите спољашњих елемената и грађењем објеката са повољним односом површине и запремине објекта;
- повећању степена искоришћења топлотне енергије и смањењу топлотних добитака путем биоклиматске градње и других система у објектима;
- повећаној или искључивој примени обновљивих извора енергије у грађеним објектима;
- повећању ЕЕ термоенергетских система у објектима;

- примени мање енергетски захтевних материјала и процеса приликом изградње објеката.

Енергетски ефикасном градњом смањује се енергетски конзум кроз примену енергетски мање захтевних материјала и процеса, као и дугорочно смањене потребе за топлотном енергијом у одржавању топлотног комфора унутар објекта.

Грађевински материјали могу да се класификују на нискоенергетске и високоенергетске. Оваква подела указује на укупну конзумирану примарну енергију неког материјала и на његов потенцијални утицај на животну средину. У Таб. 1.7 приказани су примери уобичајених количина енергије које се конзумирају приликом производње појединих грађевинских материјала.

Таб. 1.7 Енергетски конзум производног процеса појединих грађевинских материјала (Gvozdenc et al., 2010; Krnjetic, 2004; Yüksek, 2015, делимично прерађено)

Материјал	kW h t^{-1}	kW h m^{-3}	Материјал	kW h t^{-1}	kW h m^{-3}
Алуминијум	32.000	85.000	Бетон	320	770
Челик	10.500	82.000	Гасбетон	500	250
Бакар	8.000	71.000	Минерална вуна	6.000	180
Цемент	1.400	1.900	Пластичне масе	11.000	11.000
Песак	9	15	Черпић	0,12	0,19
Стакло	5.700	15.000	Дрво	190	100
Керамика	6.200	14.900	Пшенична слама*	~30	~3

* – просечна количина енергије изведена на основу података из студије (Gvozdenc et al., 2010) која подразумева прикупљање, балирање, утовар и транспорт балиране сламе

Процена утицаја материјала на животну средину (LCA)

С обзиром да се ЕЕ објеката не процењује само на основу енергетског конзума за грејање/хлађење објеката, већ и на основу примарне енергије потребне за производњу материјала, од значаја је и утицај материјала на животну средину и здравље људи. Приликом избора грађевинског материјала, важно је посматрати могуће утицаје и последице примене ових материјала на околину у свим фазама животног циклуса. Ови утицаји су многобројни и могу бити физичког, хемијског, или психолошког карактера, дуготрајни и краткотрајни, директни и индиректни (Krnjetic, 2004). Индикатори антропогеног порекла класификовани су у три групе: према изворима загађења; према стању основних елемената животне средине и према последицама које изазивају на флору, фауну, људе и створене вредности.

Код LCA и оцењивања погодности материјала за грађење треба уважити следеће критеријуме:

- степен нарушавања животне средине приликом узимања сировина из природе;
- обновљивост нарушених делова природе;
- степен загађења средине, током израде и прераде грађевинских материјала;
- ниво и трајање буке, потреба за употребом заштите и могућност механичких оштећења суседних објеката током производње материјала и његове уградње;
- емисија штетних материја и зрачење из материјала;
- трајност грађевинског материјала;
- енергетски аспекти материјала;
- могућност поновне употребе или рециклаже материјала.

Код опредељења за примену неког грађевинског материјала сви наведени критеријуми морају бити процењени. На основу збирне оцене рангирања критеријума може да се изведе укупна еколошка оцена грађевинског материјала. За ову сврху користе се програмски алати за унапређење и управљање утицајем неког материјала на животну средину. За процену и утврђивање оптерећења неког производа или процеса на животну средину користи се LCA (Crawford, 2011). Утицаји на животну средину током животног циклуса неког процеса или производа могу да се повежу са релевантним улазно-излазним подацима посматраног случаја. Као улазно-излазни подаци могу да се користе екстраховани сирови материјали; енергетски конзум; емисија загађујућих супстанци у ваздух, земљу или воду; чврсти отпад; нуспроизводи и сл. Свака LCA студија састоји се из четири основне фазе које су дефинисане међународним стандардом ISO 14040:

1. циљ и обим анализе животног циклуса – разлог за извођење студије и циљне групе аудиторину;
2. анализа инвентара животног циклуса (LCI – Life Cycle Inventory) – прикупљање података и прорачуни неопходни за квантификовање улаза и излаза система у току целог његовог животног циклуса;
3. процена утицаја животног циклуса (LCIA - Life Cycle Impact assessment) – информације и резултати прикупљени у претходној фази превод се у нумеричке индикаторе према специфичним категоријама. Циљ LCIA је да прикаже потенцијалне утицаје на животну средину квантитативно и да их категорише према важности тог утицаја;
4. интерпретација резултата – резултати из LCI и LCIA се комбинују како би се утврдили најважнији улази, излази и потенцијални утицаји на животну средину за посматрани процес или производ.

То је итеративни процес код којег се сваки наредни корак ослања на излазне информације претходне фазе, али такође може и да даје улазне информације за претходну фазу. Постоје три основна типа анализе животног циклуса (Crawford, 2011):

- Основна LCA – примењује се за процену процеса или производа са циљем да се идентификују зоне могућег смањења утицаја на животну средину;
- Компаративна LCA – примењује се за поређење утицаја на животну средину за два или више процеса/производа који обављају исту функцију;
- Рационална LCA – Код овог типа анализе животног циклуса циљ и обим истраживања који су дефинисани на почетку, из одређених разлога, редукују број утицаја на животну средину који се испитују. Најчешће се изводи након претходних основних и компаративних LCA.

Ограничења анализе животног циклуса материјала

Ограничења и проблеми на које се наилази у току израде студије резултат су субјективних одлука. Најчешћи недостаци који се појављују приликом израде студије су (Crawford, 2011):

- недостатак знања и свести о анализи животног циклуса;
- методолошки пропусти;
- проблеми географског порекла података;
- доступност и квалитет података инвентара животног циклуса;
- дуг временски период извођења анализе животног циклуса;
- неадекватна процена и интерпретација утицаја на животну средину.

Најосетљивија фаза студије је прикупљање података, а од њиховог квалитета зависи квалитет целе LCA студије. Употребом поузданих и проверених информација и база података омогућава се одабир одговарајућег приступа процени и избегавају се нереални резултати. За квалитетније извођење LCA студије неког стамбеног објекта од кључног је значаја да се у оквиру анализе укључе све фазе животног циклуса објекта.

Највећа употребна вредност LCA студија се исказује уколико се оне изводе у фази пројектовања нових стамбених објеката или у току фазе планирања реконструкције постојећих објеката. На овај начин знатно је повећана вероватноћа да се изведе правилан одабир материјала. Да би се смањила вероватноћа појаве грешке у процени, од изузетног значаја је да се студија изводи и у кључним фазама животног циклуса. Такође, временом може доћи до промене приоритета, захтева или унапређења технологије што може да се обухвати приликом одабира најбољих решења са аспекта заштите животне средине. Управо због комплексности објеката, времена потребног за израду студије и смањења могућности од појаве грешака, сматра се да је рационална LCA студија прихватљива за стамбене објекте и друге сложене производе у грађевинарству. Додатно, за LCI анализу прихваћена је хибридна техника обраде улазно-излазних података јер пружа систематски најкомплетнију процену у поређењу са другим техникама.

1.4 Циљеви истраживања и хипотезе

Један од циљева истраживања био је да се утврде параметри који утичу на производњу квалитетног плочастог, биокompatитног ТИ материјала састављеног од биомасе и мицелијума гљиве буковаче. Додатни циљ био је да се утврди подобност употребе биомасе за производњу ТИ материјала у дефинисаним условима. Након производње материјала задовољавајућег квалитета испитане су физичко-механичка и хигротермичка својства релевантна за ТИ материјале. Према томе, могу се издвојити два основна циља истраживања:

1. развој методе за производњу плочастог, биокompatитног ТИ материјала, заснованог на биомаси као основном супстрату и мицелијуму гљиве буковаче као везивног средства;
2. утврђивање морфолошких, физичко-хемијских, механичких и хигротермичких својстава плочастог, биокompatитног ТИ материјала.

На основу дефинисаних циљева истраживања постављене су следеће хипотезе:

1. **Хипотеза 1:** Могуће је произвести плочасти, биокompatитни термоизолациони материјал заснован на биомаси као основном супстрату и мицелијуму гљиве буковаче као везивном средству.
2. **Хипотеза 2:** Биокompatитне плоче су погодне, са аспекта хигротермичких својстава, да се користе као термоизолациони материјал у грађевинарству.
3. **Хипотеза 3:** Са становишта утицаја на животну средину, биокompatитни термоизолациони материјали повољнији су, са аспекта GHG емисија, од конвенционалних.

2 МАТЕРИЈАЛИ И МЕТОДИ

Истраживања се састоје из две засебне целине:

1. Прва целина је гајење мицелијума на одабраним супстратима са циљем производње узорака плоча задовољавајућег квалитета. Параметри који су праћени и варирани су:
 - оптерећења којима је инокулисани супстрат изложен у току фазе прораста материјала;
 - време до почетка оптерећивања инокулисаног супстрата;
 - додавање сахарозе у току фазе пастеризације;
 - трајање фазе инкубације;
 - масени удео инокулума који се меша са супстратом;
 - супстрати различитих дужина влакана и њихово међусобно комбиновање;
 - начин мешања инокулума и супстрата;
 - инкубација са фазом плодоношења, или без ње;
 - начин сушења материјала;
 - врста супстрата, тј. биомасе;
 - могућност производње материјала веће дебљине.
2. У другом делу истраживања су у лабораторијским условима, на одабраним узорцима, испитана морфолошка, физичко-хемијска, механичка и хигротермичка својства материјала релевантна за ТИ материјале:
 - морфолошка својства;
 - запреминска маса материјала – ρ ;
 - напон при притиску при 10 % деформације, $\sigma_{p,10\%}$;
 - чврстоћа при савијању – f_m ;
 - коефицијент топлотне проводљивости – λ ;
 - специфични топлотни капацитет – c_p ;
 - фактор отпора дифузији водене паре – μ ;
 - активност воде – a_w ;
 - структурна карактеризација помоћу ATR–FTIR и
 - термичка карактеризација помоћу DSC–TGA.

У оквиру прве експерименталне целине, изведено је укупно 17 серија експеримента. У свакој серији испитан је и утврђен утицај нових параметара који утичу на квалитет произведених узорака, након чега су параметри са позитивним утицајем примењивани у наредним експериментима. Критеријум за избор узорака је квалитет прораста мицелијума на супстрату. Кроз првих 12 серија су варирани различити параметри чији утицај на квалитет биокомпозита је утврђен. Последњих 5 серија су оне у којима су, на основу претходно утврђених услова, произведени узорци за испитивање својстава. На основу вредности параметара утврђених у другом делу експеримента спроведена је LCA зидних конструкција и моделовање ЕЕ на моделу породичног стамбеног објекта.

Друга фаза експеримента, односно испитивање карактеристика биокомпозита, изведена је у лабораторијама различитих институција и на опреми погодној за сваки тип испитиваног параметра.

2.1 Материјали

2.1.1 Пшенична слама

Парцела на којој је слама сакупљана налази се на јужној падини Фрушке горе, у атару села Бешеново. Сорта пшенице је једна од најчешће коришћених за овај локалитет *Симонида*. То је средње рана озима сорта, висине од 900 до 950 mm. Слама је набављена убрзо након жетве 2016. године у облику конвенционалних малих четвртастих бала и складиштена у добро проветреном и наткривеном простору.

2.1.2 Конопља

Конопља је пореклом са пољопривредног газдинства у атару насеља Палић код Суботице. Сорта конопље је *Комполти хибрид ТЦ*. Уобичајен укупан надземни принос, изнад висине кошења, је 10 до 11 t(ha)⁻¹ при садржају влаге 14 %. Удео влакана у стабљници се креће од 20 до 30 %. Прибављена конопља највећим делом представља балирани жетвени остатак из вршног дела биљке гајене за производњу семена. Конопља потиче из жетве 2016. године, а складиштена је на исти начин као и слама. Стабљика конопље је коришћена у природном стању, без издвајања влакана што значајно поједностављује производни процес биокомпозита.

2.1.3 Буковача

Коришћена је гљива буковача (*Pleurotus ostreatus*). За инокулацију је коришћена комерцијална, чиста култура мицелијума буковаче, који је добро развијен на зрнима пшенице или на сладу. За израду биокомпозита је потребно да мицелијум што брже развије вегетативну мицелију, због чега је одабран сој гљиве буковаче *Б96* код којег је ова фаза нешто наглашенија него код других комерцијалних сојева. Чување мицелије до употребе се изводи у расхладним коморама при температури од око 3 °C.

2.2 Методи

2.2.1 Производња плочастог термоизолационог материјала

Поступак се изводи у шест засебних фаза:

1. припрема сировина;
2. припрема просторија и опреме;
3. припрема супстрата – пастеризација;
4. колонизовање супстрата мицелијумом – инокулација;
5. прорастање мицелијума – инкубација и;
6. превођење мицелијума у инертно стање – сушење материјала.

У свакој серији експеримента је израђено 12 узорак, а варирано је највише два параметра по серији како би се смањио ризик међусобног утицаја варираних параметара. Такође на овај начин је обезбеђен довољан број узорака да се резултати варирања параметра могу статистички потврдити. Редослед приказаних параметара који су варирани није хронолошки, већ су варијације параметара приказане у зависности од припадности одговарајућој фази израде материјала.

Припрема сировина

Коришћена је слама различите дужине да би се утврдило која је најпогоднија:

- слама која није уситњавана након издвајања из бале;
- уситњена слама дужине до 8 mm;
- уситњена слама дужине од 30 до 70 mm.

Супстрат који се користи за гајење мицелијума мора бити што бољег квалитета. Сировине не смеју бити изложене штетном утицају временских прилика чиме се губи на квалитету у погледу присуства компетиторских микроорганизама и мање количине целулозе и хемицелулозе за развој мицелијума. У првобитним експериментима употребљен је несецкани супстрат и супстрат дужине до 8 mm, међутим, утврђено је да овакав материјал није погодан за руковање. Због тога је супстрат за израду биокомпозита уситњаван на дужину од 30 до 70 mm, након чега је пакован у мрежасте вреће до захтеване масе. Уколико се захтева употреба више различитих дужина влакана или више врста супстрата, и они се припремају у овој фази. Припрема је извођена на отвореном простору најмање један дан пре фазе пастеризације.

Припрема просторија и опреме

Све просторије су пре спровођења наредних фаза детаљно очишћене, дезинфиковане и припремљене за рад. На исти начин припремљени су калупи и сва помоћна опрема. У просторијама је одржавана температура од 20 до 30 °C. Релативна влажност ваздуха у фази развоја мицелијума није од пресудног значаја с обзиром на то да се супстрат налази у затвореним калупима који имају вентилационе отворе те је губитак влаге из супстрата смањен, а неопходна влага за развој мицелијума је обезбеђена у процесу пастеризације. За потребе развоја мицелијума, најповољније су просторије са повишеним вредностима релативне влажности ваздуха, од 70 до 75 %, јер је при томе губитак влаге из супстрата путем вентилационих отвора минималан. Такође, просторија је повремено проветравана да би се смањила концентрација угљен-диоксида.

Припрема супстрата – пастеризација

С обзиром да је за развој мицелијума, поред повећаног садржаја влаге, потребно сузбити и развој контаминирајућих микроорганизама присутних у супстрату, изведена је његова влажна пастеризација. За потребе пастеризације коришћен је резервоар запремине 80 литара са поклопцем на којем су отвори за постављање термометра. Слама је у току пастеризације и накнадног цеђења држана у мрежастим *Рашел* врећама. У суд је насуто 45 до 50 l воде са 0,5 % (масено) шећера (сахарозе – C₁₂H₂₂O₁₁). Раствор је измешан до хомогенизовања смеше, а затим су у воду убачени мрежасте џакови са сламом. На суд су затим постављени поклопац са отворима за мерење температуре и термометри за праћење температуре супстрата и воде. Сви нутријенти и друге компоненте биокомпозита, попут перлита и сахарозе, који се додају у току производног процеса су пастеризовани.

Пастеризација је извођена при температури 90 °C током 45 минута. Температура воде и сламе унутар резервоара праћене су помоћу аналогних и дигиталних убудних термометара. Након наливања воде, суд је постепено загреван. Температура воде унутар резервоара је након достизања 90 °C одржавана 45 минута. Након пастеризације, мрежасте џакови извађени су из воде, а слама остављена да се оцеди и хлади. Цеђење сламе у почетку је извођено гравитационо, а накнадно употребом пресе за воће, да би се поступак убрзао. Слама је оцеђена до достизања садржаја

влаге 66 до 73 %. Након цеђења, слама је остављена да се охлади на температуру од око 25 °C.

Колонизовање супстрата мицелијумом – инокулација

На основу претходно утврђених димензија, масе и броја узорака, одмеравана је маса појединачних компоненти, а затим су оне измешане до постизања хомогене смеше. Све компоненте су мешане у одговарајућој сразмери заснованој на жељеном масеном уделу у материјалу. Одмеравање масе сламе и мицелијума извођено је на аналогној ваги опсега мерења од 0 до 5 kg и вредности подеока 20 g. За мешање компоненти биокомпозита коришћене су дезинфиковане HDPE посуде запремине 50 и 60 l.

Инокулисан супстрат смештан је у полипропиленске (PP) посуде димензија 330x220 mm које су имале улогу калупа. На калупима су бушени отвори пречника 10 mm за доток ваздуха и оцеђивање издвојеног кондензата (12 отвора по посуду). За сваки узорак коришћене су по две идентичне посуде од којих је једна имала улогу калупа, а друга је преносила оптерећење на узорак. За производњу финалних узорака (коришћених за утврђивање параметара) димензија 750 x 750 и 500 x 500 mm дебљине сса 50 mm коришћени су калупи од иверице дебљине 18 mm. И на њима су бушени вентилациони отвори пречника 10 mm са међусобним размаком од 100 mm на свих 6 страна калупа. Пре пуњења посуда са смешом биокомпозита, у калупе је на дно постављен лист масног (пеко) папира са циљем да се спречи прекомерна адхезија мицелијума за калуп у каснијим фазама инкубације. Затим је преко папира убачена претходно измешана и измерена маса биокомпозита. Маса је потом поравната и сабијена. Преко овако припремљене смеше постављен је нови лист пеко папира.

Након попуњавања калупи су остављени у претходно припремљеној просторији где су држани у току фазе инкубације. Неопходни притисак обезбеђен је помоћу претходно одмерених врећа са водом и песком као теговима. За финалне узорке је због димензија било неопходно веће оптерећење, те су коришћени тегови са песком, након чега су постављене стеге које су преузеле улогу оптерећења. Вреће са песком су након постављања стега уклоњене да се ослободе вентилациони отвори на поклопцу.

Прорастање мицелијума – инкубација

За инкубацију мицелијума обезбеђени су следећи услови:

- температура ваздуха у опсегу између 20 и 30 °C;
- релативна влажност супстрата у опсегу између 66 и 73 %;
- рН вредност супстрата од 6,4 до 7,9;
- повремена осветљеност просторије;
- повремено проветравање просторије.

Период инкубације мицелијума је износио најмање 18, а највише 30 дана. У току експеримента утврђено је да је продужени период резултовао бољим квалитетом биокомпозита, те је усвојен период инкубације од 30 дана. Биокомпозит је првих 18 дана излаган притиску од 140 до 285 kg m⁻², односно, од 1.370 до 2.780 Pa. Након тог периода, оптерећење је уклоњено, а инкубација формираних плоча продужена је још 12 дана. У овом периоду формиран је површински, заштитни слој мицелијума, али је развој вегетативне мицелије настављен и у унутрашњости плоче. Након 30 дана инкубације, мицелија је почела да стари, поприма жућкасту боју, а даљи развој се одвијао смањеном брзином.

Превођење мицелијума у инертно стање – сушење материјала

Након 30 дана инкубације прекидана је фаза прораста материјала. Излагањем биокомпозита повишеним температурама постигнут је двоструки ефекат: прекидане су животне функције гљиве и из материјала је истовремено уклањан вишак влаге. Сушење материјала извођено је у конвективној сушари која омогућава кондензацију издвојене влаге из материјала, при температурама у интервалу од 45 до 60 °C. Режим сушења биокомпозита је био следећи: 24 часа сушења при температури од 45 °C, затим 24 часа на 50 °C и на крају 96 часова при температури од 60 °C. Материјал је сушен до константне масе, што представља око 30 до 35 % од масе влажних узорака. Укупно време сушења материјала дефинисано је на основу губитка масе узорака што је најчешће износило 144 часа, односно 6 дана. Након сушења, биокомпозит је спреман за даља испитивања или употребу. До даљих испитивања материјал се складишти у сувој просторији са релативном влажношћу од приближно 50 % и температуром од око 20 °C. Поменути услови су приближни условима који се захтевају за складиштење материјала пре испитивања према релевантним стандардима за ТИ материјале.

2.2.2 Испитивање својстава биокомпозитних плоча као термоизолационог материјала у грађевинарству

Морфолошка својстава

Морфолошке карактеристике биокомпозита испитане су посматрањем унутрашње структуре на макроскопском нивоу и узимањем узорака супстрата обраслог мицелијумом посматраних на микроскопском нивоу. За микроскопска посматрања коришћен је *Carl Zeiss SteREO Discovery* стереоскопски микроскоп максималног увећања до 80 x. Стереоскопски микроскоп је опремљен камером са моторизованим увећањем које се контролише путем ZEN програмског пакета и омогућаје сликање узорка у високој резолуцији. За детаљнију анализу структуре филаментозне мреже узорци су снимљени на SEM, Универзитетског центра за електронску микроскопију – Нови Сад (UCEM – NS) Универзитета у Новом Саду. Узорци су на SEM снимљени при увећањима од 100 x до 2.000 x. Критеријуми за оцењивање и анализу морфолошких својстава су степен развијености и покривеност супстрата филаментозним структурама, распоред и очуваност структуре влакана супстрата, присутност макроскопских пора и шупљина у структури.

Физичко-хемијска својства

Активност воде (a_w) – отпорност осушеног биокомпозита на утицај микроорганизама дефинише се преко параметра активности воде (a_w). Параметар је испитан на Технолошком факултету Универзитета у Новом Саду применом *LabSwift* - a_w уређаја произвођача *Novasina Ag*. Мерни опсег уређаја износи од 0,030 до 1,000 са мерном резолуцијом од 0,001 подеок.

Испитивање активности воде спроведено је на уситњеним узорцима масе неколико грама, дужине од 2 до 30 mm у растреситом стању. Узорци су кондиционирани при температури од 21 °C и при вредностима релативне влажности ваздуха од 55, 65, 70, 75, 85 и 95 %. За одржавање услова са релативном влажношћу од 55 % коришћена је клима комора са аутоматизованом регулацијом релативне влажности и температуре. За одржавање осталих вредности релативне влажности средине од 60 до 95 % коришћени су ексихатори уз помоћ засићених водених раствора соли амонијум-нитрата (NH_4NO_3 – 65 и 70 %), натријум-хлорида (NaCl – 75 %), калијум-хлорида (KCl – 85 %) и калијум-нитрата (KNO_3 – 95 %).

Припремљено је 46 узорака који су постављени у посуднице пречника 35 mm, након чега је измерена почетна вредност масе узорака. По 5 узорака од сваке врсте биокompозита је постављено у клима комору/ексикаторе ради успостављања равнотеже. Узастопним мерењем масе у интервалима не краћим од 24 часа утврђено је да је маса достигла константну вредност након приближно 10 дана. Након истека тог периода, узорци су подвргнути тесту активности воде.

Структурна карактеризација биокompозита – За потребе структурне карактеризације биокompозита изведена је анализа помоћу ATR–FTIR спектроскопије (спектроскопија интерне рефлексije у спектру инфрацрвеног зрачења) на прашкастим узорцима биокompозита и чистог супстрата. Испитивања су изведена у лабораторији за физичку хемију, Природно математичког факултета Универзитета у Новом Саду. Испитивање је изведено применом Thermo-Nicolet Nexus 670 уређаја. За испитивање применом ATR–FTIR уређаја довољно је неколико милиграма прашкастог узорка, те је припремљено неколико грама узорка од сваке врсте биокompозита, као и чистог супстрата са којим је изведено поређење биокompозита. Испитивање је изведено на узорцима који су самлевени, просејани кроз лабораторијско сито димензија отвора 160 μm и сведени на прашину у лабораторијском авану. Узорци чистог супстрата припремљени су на истоветан начин као и супстрат за потребе производње биокompозита, са разликом да супстрат није колонизован мицелијумом, већ је након пастеризације осушен на истоветан начин као и биокompозити.

Механичка својства

Механичка својства биокompозита испитана су у Лабораторији за геомеханичка испитивања, Рударско металуршког института у Бору. Коришћена је преса за испитивање носивости тла *Controls Group – CBR Tester 34 - TO106/A*. Поменута преса остварује максималну силу од 50 kN, минимални подеок за очитавање остварене силе износи 0,001 mm, а брзина хода клипа износи 1,27 mm min⁻¹. За мерење деформација узорка коришћен је компаратор са минималним подеоком од 0,01 mm и дужином хода 30 mm. На овој преси изведена су испитивања притисне чврстоће биокompозита при деформацији од 10 % и чврстоћа при савијању до лома, према стандардима за ТИ материјале EN 826 и EN 12089, респективно. Преса је прилагођена за рад према стандардима. То се односи на коришћење полуцилиндричних ослонаца на којима се узорак постављао и додатног полуцилиндричног притискивача.

Узорци за испитивање чврстоће при притиску при 10 % деформације сечени су из плоча дебљине 50 mm на димензије 50x50 mm. Узорци за испитивање чврстоће при савијању сечени су из плоча исте дебљине на димензије 300x150 mm. Сечење узорака изведено је оштрим и равним сечивом да би се што мање реметила унутрашња структура узорака.

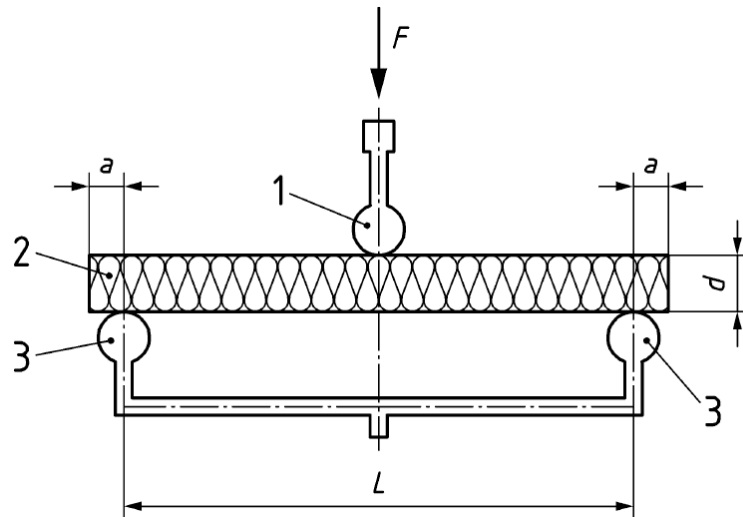
Напон при притиску при 10 % деформације ($\sigma_{p,10\%}$) – за испитивање чврстоће при притиску припремљено је по 7 узорака од сваке врсте биокompозита. На 5 узорака од сваког материјала су горња и доња површина припремљене брзо везујућом цементном смесом, док је на преостала два узорка ова припрема изостављена. Након сушења утврђено је да цементни малтер није погодан због дугог времена очвршћавања и да су узроци упили влагу из малтера. Стога су надаље припремани узорци са гипсаном површином. Сви узорци су аклиматизовани у условима средине наведеним у стандарду EN 826.

Испитивање чврстоће при притиску изведено је на узорцима у правцу управном на распоред влакана у биокompозиту, односно, у правцу оптерећења материјала приликом инкубације. То је истовремено и правац у којем је материјал намењен да се

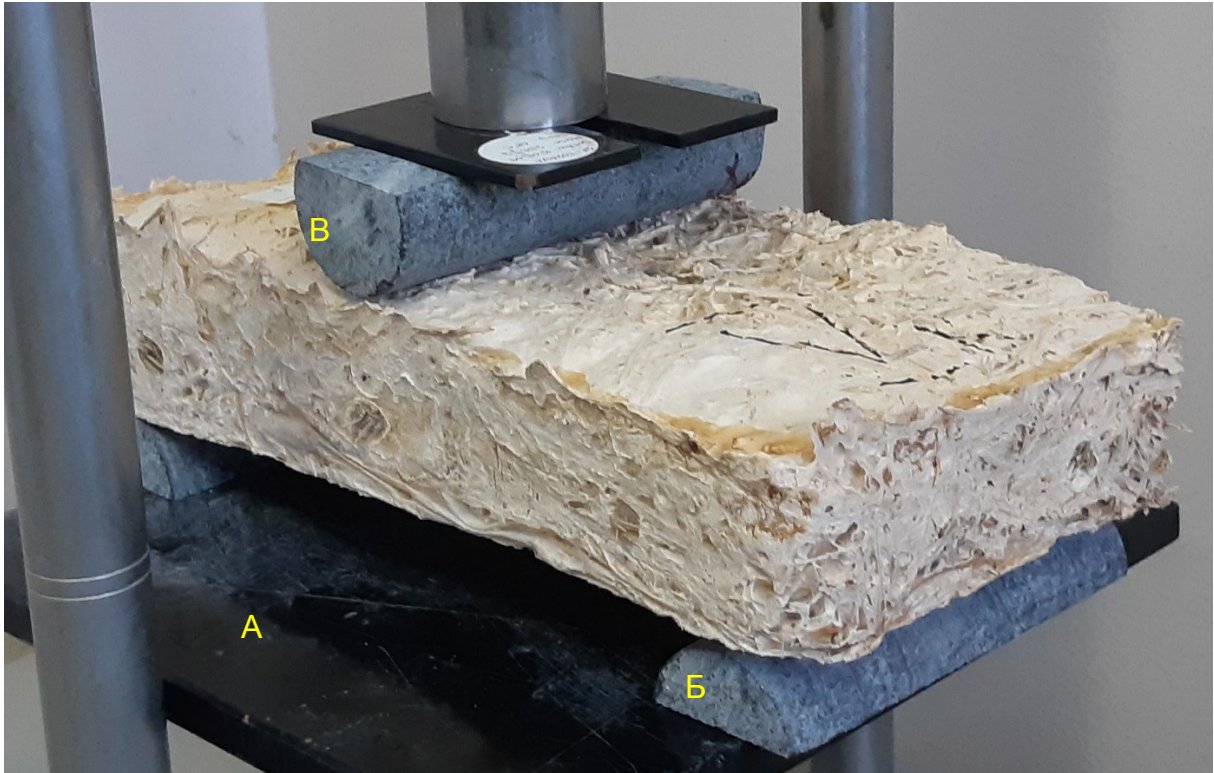
оптерећује приликом примене. С обзиром да је материјал анизотропан, испитивање је изведено и у правцу влакана биокомпозита. Ово је изведено са циљем да се утврди понашање материјала приликом излагања силама које делују на површине које нису примарно намењене за директно оптерећење.

Чврстоћа при савијању (f_m) – за испитивање чврстоће при савијању, узорци нису припремани на посебан начин, већ су само исечени на захтеване димензије и остављени да се аклиматизују као што је дефинисано у стандарду EN 12089. Припремљено је по 5 узорка димензија 300x150 mm дебљине 50 mm сечених из плоча димензија 330x220 mm. Коришћена је иста преса као и за притисну чврстоћу уз модификацију постоља како би се узорци оптеретили на начин дефинисан стандардом (Сл. 2.1).

Имитација механизма изведена је у виду круте челичне плоче (А) постављене на доњу потисну плочу СBR уређаја, на којој су постављена два гранитна полу-цилиндра (Б) пречника 40 mm и дужине 150 mm као ослонци узорка. Међусобно растојање полуцилиндара (L) износило је 250 mm. За горњу притисну плочу уређаја, лепком и магнетом, фиксиран је трећи полуцилиндар (В) преко којег се сила преносила на централни део узорка. Поставка опреме приказана је на Сл. 2.2.



Сл. 2.1: Механизам за оптерећивање узорка при савијању према EN 12089 стандарду: 1 – цилиндар преко којег се преноси сила на узорак; 2 – узорак ТИ материјала; 3 – цилиндрични ослонци на које се узорак поставља; a – дужина узорка која прелази ван ослонаца – 25 mm; d – дебљина узорка – 50 mm; L – растојање између цилиндричних ослонаца – 250 mm



Сл. 2.2: Опрема за испитивање чврстоће при савијању према стандарду EN 12089

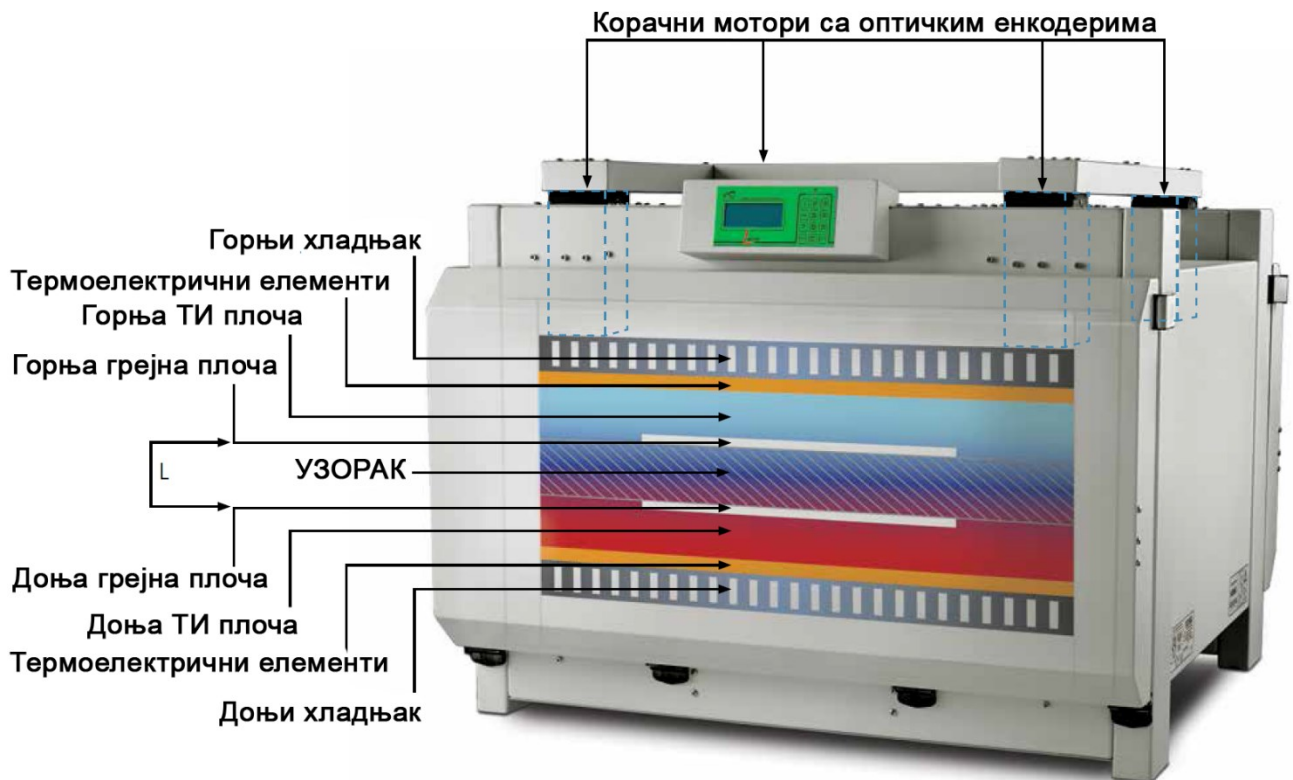
Хигротермичка својства

Специфични топлотни капацитет (c_p) – испитиван је на Природно математичком факултету Универзитета у Новом Саду. Испитивање је изведено на уређају за диференцијалну скенирајућу калориметрију (DSC) произвођача *Mettler Toledo*, типа *DSC822e* према стандарду DIN 51007. Према стандарду, испитивање би требало да се спроведе поређењем специфичног топлотног капацитета узорка са сафиром као референтним материјалом. На основу искуствених података утврђено је да, уместо сафира, може као референтни материјал да се користи алуминијум - оксид (Al_2O_3), те је то спроведено. Према методи прво су бележени подаци позадинског шума бележењем криве бланка. Затим се, при истоветним условима, бележи крива референтног материјала и на крају бележи се крива испитиваног узорка од којих се изузимају резултати испитаног бланка. Резултати се приказују у графичком и табеларном облику у одређеном температурном опсегу. Одабрани температурни опсег најчешће зависи од температура на којима ће се материјал примењивати. Специфични топлотни капацитет ТИ материјала долази до изражаја при повишеним спољним температурама, те су за испитивање одабране температуре које могу да се јаве на спољној површини елемента у току топлог дела године. За извођење методе довољно је 30 mg прашкастих узорка, те су узорци биокомпозита након фазе сушења самлевени и просејани кроз лабораторијска сита са крајњом величином честице 160 μm . Прашката маса је насута у алуминијумске посуде пречника 35 mm и аклиматизована у стандардним лабораторијским условима.

Коефицијент топлотне проводљивости (λ) – испитан је у лабораторији компаније *Knauf Insulation d.o.o.* која се налази у оквиру производног постројења у Сурдулици. Коришћен је уређај произвођача *TA Instruments*, типа *LaserComp FOX 600*, који функционише по принципу изоловане грејне плоче на коју се постављају узорци димензија до 610 x 610 mm, висине до 200 mm. Температурни опсег уређаја за испитивање узорка креће се од -15 до $+65$ °C, а температурна подешавања при

којима се испитивања изводе зависе од намене ТИ материјала. Вредност најмањег подеока износи $0,01\text{ }^{\circ}\text{C}$. Мерни опсег уређаја износи од $0,001$ до $0,35\text{ W(m K)}^{-1}$ са тачношћу од $\pm 1\%$. Уређај је приказан на Сл. 2.3. Принцип рада уређаја заснива се на мерењу количине топлотне енергије која се пренесе у стању стационарног тока кондукцијом са једне грејне плоче на другу. Узорак дебљине „L“ постављен је између две грејне плоче на којима се контролише температура. Између плоча је успостављена температурна разлика која се унапред подешава, услед чега се ствара топлотни флуks кроз испитивани материјал. Топлотни флуks, остварен у стању стационарног тока топлотне енергије мерен је помоћу два термоелектрична сензора који покривају велику површину са горње и доње стране узорка. Испитивање је извођено са 10 понављања на основу којих су утврђене минималне, максималне и средње вредности испитиваног параметра. На основу просечне вредности топлотног флуksа израчунат је коефицијент топлотне проводљивости и топлотна отпорност елемента. С обзиром да је тачна дебљина узорка веома битан параметар, уређај је опремљен оптичким енкодерима који омогућују мерење дебљине узорка са тачношћу до $25\text{ }\mu\text{m}$.

За утврђивање коефицијента топлотне проводљивости произведено је по 2 узорка од сваке врсте биокмпозита димензија $500 \times 500\text{ mm}$ и дебљине приближно 50 mm . Узорци су након фазе сушења чувани на сувом месту при условима средине $25\text{ }^{\circ}\text{C}$ и релативне влажности ваздуха 50% . Посебна припрема узорака за испитивање није неопходна. Узорци су аклиматизовани на услове средине наведене у стандарду EN 12667. Непосредно пре испитивања, утврђене су димензије и маса узорака, на основу чега је израчуната запреминска маса. Испитивање је изведено при средњој температури $10\text{ }^{\circ}\text{C}$, према важећем стандарду за испитивање коефицијента топлотне проводљивости код ТИ материјала, EN 12667. Испитивање је спроведено након што је достигнут стационарни ток топлотне енергије кроз узорак. Након 15 дана аклиматизације узорака на услове средине температуре $21\text{ }^{\circ}\text{C}$ и релативну влажност ваздуха 50% , односно, након достизања константне масе узорака при поменутиим условима, спроведено је поновно испитивање ради провере првобитно измерених вредности.

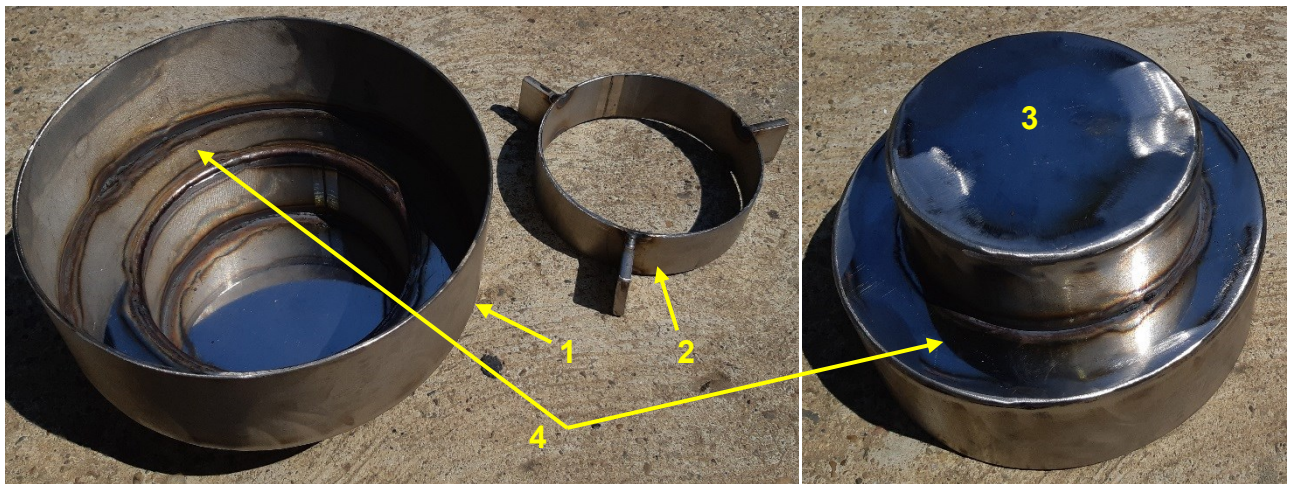


Сл. 2.3: TA Instruments, LaserComp FOX 600 уређај за испитивање коефицијента топлотне проводљивости према EN 12667, ISO 8301 и ASTM C518 стандардима (TA Instruments, 2018)

Фактор отпора дифузији водене паре (μ) – испитиван је у лабораторији Одсека за Грађевинарство, Факултета техничких наука Универзитета у Новом Саду. За потребе испитивања фактора отпора дифузији водене паре коришћена је клима комора домаћег произвођача *Електрон с.з.р.* Тип клима коморе је *ККТ300*, са регулацијом температуре у опсегу од -40 до $+160$ °C и регулацијом релативне влажности од 0 до 95 %. За мерење масе узорка коришћена је лабораторијска вага *Чуо MR2200*, мерног опсега до 2.200 g и вредности најмањег подеока од 0,01 g. За потребе испитивања направљено је 10 цилиндричних посуда према захтевима стандарда. Посуде су променљивог пречника (101 и 154 mm), висине 40 + 50 mm и један шаблон за одређивање центра и насипање заптивне смесе.

Димензије и облик узорка дефинисани су стандардом EN 12086. Цилиндрични узорци сечени су из плоча дебљине 50 mm равним, оштрим сечивом на пречник од 154 mm, а затим су смештени у посуде, на чијем дну се налази хигроскопна супстанца или засићен водени раствор соли. Узорци нису у контакту са супстанцом која се налази у посуди. Једна страна узорка изложена је условима средине у клима комори, а друга условима које остварују супстанце у посуди. У клима комори одржаване су одређена температура и релативна влажност средине дефинисани стандардом. Према стандарду, хигроскопни материјали као што су биокомпозити испитују се при два сета услова средине. Параметри при којима се изводи испитивање приказани су у Таб. 2.1. За сет услова *A* се на дно посуде поставља калцијум-хлорид (CaCl_2) који унутар посуде остварује релативну влажност од 0 %. За овај сет услова је у комори остварена вредност релативне влажности од 50 ± 3 %. Сет услова *A* се још назива и *dry cup test* или тест суве шоље због ниске релативне влажности унутар посуде. Тест суве шоље осмишљен је да симулира услове које грејани објекат по кишовитом времену има на ТИ материјал. Код овог теста се влага креће из спољне средине ка грејаном простору

и првенствено је намењен материјалима примењеним у објектима код којих се у унутрашњости не очекује дуготрајна појава високих вредности релативне влажности. За сет услова *Б* на дно посуде се поставља засићен водени раствор натријум-дихромата ($\text{Na}_2\text{Cr}_2\text{O}_7 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) који унутар посуде остварује релативну влажност од 52 %. Вредност релативне влажности у комори се одржава на 93 ± 3 %. Овај сет услова се назива и *wet cup test* или тест мокре шоље због високе релативне влажности која се остварује унутар посуде. Осмишљен је за симулацију објекта код којег се појављује висока вредност релативне влажности у унутрашњости и где се та влага креће ка спољној средини кроз омотач објекта. Резултати тестова мокре и суве шоље могу значајно да се разликују, с тим да тест мокре шоље увек резултује вишим вредностима у односу на вредности теста суве шоље.



Сл. 2.4: Посуда за испитивање фактора отпора дифузији водене паре: 1 – посуда, поглед са горње стране; 2 – шаблон за одређивање центра и наливање заптивне масе; 3 – посуда, поглед са доње стране; 4 – прстен, ослонац за узорак

Таб. 2.1: Услови средине за испитивање фактора отпора дифузији водене паре за хигроскопне материјале према стандарду EN 12086

Сет	Услови	Температура, °C	Релативна влажност, %	
			сува страна	влажна страна
А	23 – 0/50	23 ± 1	0	50 ± 3
Б	23 – 50/93	23 ± 1	50 ± 3	93 ± 3

Припремљено је по 5 узорака од сваке врсте биокмпозита за сваки сет услова, односно, припремљено је укупно 20 узорака. На дно посуде постављена је одговарајућа супстанца, а затим је на прстен на који се узорак ослања нанета заптивна смеша састава 60 % пчелињег воска и 40 % парафина. Заптивна смеша наносена је у течном стању да би се остварио што бољи контакт са узорком и посудом. Након тога у посуду је постављен узорак, а са спољне стране постављен је шаблон за центрирање и насипање заптивне смесе. Шаблон и дно посуде идентичног су пречника, а његова улога је да обезбеди површину за размену водене паре са горње стране узорка, идентичну површини отвора унутар посуде. Додатна улога шаблона је да обезбеди и правилно позиционирање те површине. Затим је, по површини узорка између шаблона и ивице посуде нанета течна заптивна смеша. Након хлађења заптивне смесе, посудама је измерена маса, а затим су посуде пренете у претходно припремљену клима комору. Када је достигнут стационарни ток водене паре, периодично је мерена маса посуде са циљем утврђивања брзине дифузије водене

паре кроз узорке. Интервал у којем је маса посуда мерена није био краћи од 24 часа. Испитивање је трајало све док кроз 5 узастопних мерења масе и утврђивањем просечне вредности (G) није установљена константна вредност прираста масе узорка ($G_{1,2}$). Уколико свако појединачно мерење $G_{1,2}$ има одступање вредности до 5 % у односу на G , експеримент се сматра завршеним.

Термичка стабилност биокомполита – испитивање понашања биокомполита на високим температурама изведено је у лабораторији Одсека за грађевинарство, Факултета техничких наука Универзитета у Новом Саду. Симултана DSC–TGA анализа изведена је на узорцима биокомполита у облику праха масе око $30 \text{ mg} \pm 5 \text{ mg}$, који су припремљени на истоветан начин као што је изведено и за потребе хемијске карактеризације помоћу ATR–FTIR спектроскопије. Испитивање биокомполита изведено је применом уређаја Labsys evo, француског произвођача SETARAM, намењеног за симултану DSC и термогравиметријску анализу (TGA). Загревање узорака извођено је брзином од $10 \text{ K}(\text{min})^{-1}$ у условима сагоревања у атмосфери инертног гаса аргона, у температурном опсегу од 20 до $600 \text{ }^\circ\text{C}$, док је брзина струјања гаса износила $50 \text{ ml}(\text{min})^{-1}$.

2.2.3 Моделовање енергетске ефикасности и анализа животног циклуса

Моделовање енергетске ефикасности

За прорачун утицаја биокомполита на ЕЕ објекта, дефинисана су три модела приземног стамбеног објекта правоугаоне основе, спољних димензија $8,5 \times 8 \text{ m}$, бруто површине 68 m^2 . Модели су изведени у три типа конструкције: лаки тип – израђен од префабриковане монтажне дрвене конструкције, средње тешки тип – са зидом израђеним од блокова аерисаног аутоклавираног бетона и тешки тип – са зидом од пуне грађевинске опеке. За упоредни приказ понашања биокомполита и конвенционалних материјала дефинисане су варијације модела које се разликују само према врсти термоизолационог материјала примењеног у спољашњем зиду. Остали параметри попут локације, система грејања и осталих елемената омотача модела су идентични. Сви зидови су пројектовани да задовољавају захтеве законске регулативе за новоизграђене објекте без појаве унутрашње или спољашње кондензације водене паре. Прорачун ЕЕ и израда енергетског пасоша одабраног породичног модела изведена је уз помоћ програма *URSA Građevinska Fizika 2*. Сви прорачуни изведени су према SRPS EN ISO 13790, SRPS EN ISO 15316, SRPS EN ISO 15243, SRPS ISO 13788, SRPS EN ISO 13789, EN ISO 13370, SRPS EN ISO 6946 стандардима и *Правилнику о енергетској ефикасности зграда*, Републике Србије. Поред поменутих стандарда, програм се ослања на стандардизоване једначине преузете из SRPS EN 15315; SRPS EN 15217; SRPS.U.J5.520; и SRPS.U.J5.530. У оквиру укупног енергетског конзума за грејање узети су у обзир и оријентација модела, вентилациони губици, топлотни мостови, соларни и други добици топлотне енергије. Вентилација модела је природна, без рекулперације топлотне енергије. Грејање модела је дисконтинуално због мале окупираности објекта у току радног времена и у току ноћи. Према томе, за целокупну грејну сезону дисконтинуитет у грејању је дефинисан у периоду од 10 сати дневно, 7 дана у недељи. Енергетски захтеви за хлађење објекта нису део програмског прорачуна, међутим, постоји могућност ручног уноса вредности. Претпостављено је да се као најмање повољна опција за хлађење објекта користи клима уређај од 18.000 BTU , енергетског разреда *D*. Конзум електричне енергије израчунат је на основу 8 часова рада дневно у току најтоплијег дела године. Утврђено је да просечни, месечни конзум електричне енергије износи

око 480 kWh, укупно у току сезоне око 1.200 kWh, односно 96.000 kWh у току 80 година колико износи предвиђени животни век објекта.

Одабрани су модели са конструкцијом зидова приказаним на Сл. 2.5 као примери три честа типа конструкције на простору југоисточне Европе. Да би се ближе одредиле перформансе биокомпозита са аспекта енергетске ефикасности одабрано је пет класичних ТИ материјала за поређење: EPS (код лаког типа конструкције одабрана је комбинација EPS/минерална вуна), експандирана плута, прошивена трска, целулоза и овчија вуна.



Сл. 2.5: Слојеви конструкције спољног зида модела за поређење енергетске ефикасности ТИ материјала

У Таб. 2.2 приказани су слојеви конструкције елемента спољних зидова модела и њихове дебљине у конструкцији. Приликом прорачуна утврђено је да код појединих материјала код модела са лаким и тешким типом конструкције одабрана дебљина ТИ материјала од 50 и 120 mm, респективно, не задовољава захтеве законске регулативе за максимално дозвољеном вредности коефицијента пролаза топлоте $U_{max} = 0,3 W(m^2K)^{-1}$. Да би се задовољили ови захтеви, повећана је дебљина ТИ материјала, што је наведено у табелама са резултатима енергетског аудита, Таб. 3.7 и Таб. 3.9.

Таб. 2.2: Слојеви конструкције елемента спољних зидова одабраних модела

Лаки префабриковани зид	Дебљина зида (mm)	Зид од аерисаног аутоклавираног бетона	Дебљина зида (mm)	Зид од пуне грађевинске опеке	Дебљина зида (mm)
1. Гипс картон плоча	12,5	1. Продужни кречни малтер	15	1. Продужни кречни малтер	15
2. ОСБ 3 плоча	10	2. Блокови аерисаног аутоклавираног бетона	250	2. Пуна грађевинска опека	250
3. PVC парна брана	0,2	3. ТИ материјал	100	3. ТИ материјал	120 – 150
4. Дрвени стуб	100	4. Спољни завршни малтер	5	4. Спољни завршни малтер	5
5. ТИ материјал	100	Укупна дебљина зида	370	Укупна дебљина зида	390
6. ОСБ 3 плоча	10				
7. ТИ материјал	50 – 70				
8. Спољни завршни малтер	5				
Укупна дебљина зида	187,7 – 207,7				

Резултати енергетског учинка свих модела приказани су у Таб. 3.7, Таб. 3.8 и Таб. 3.9 у оквиру поглавља 3.3.

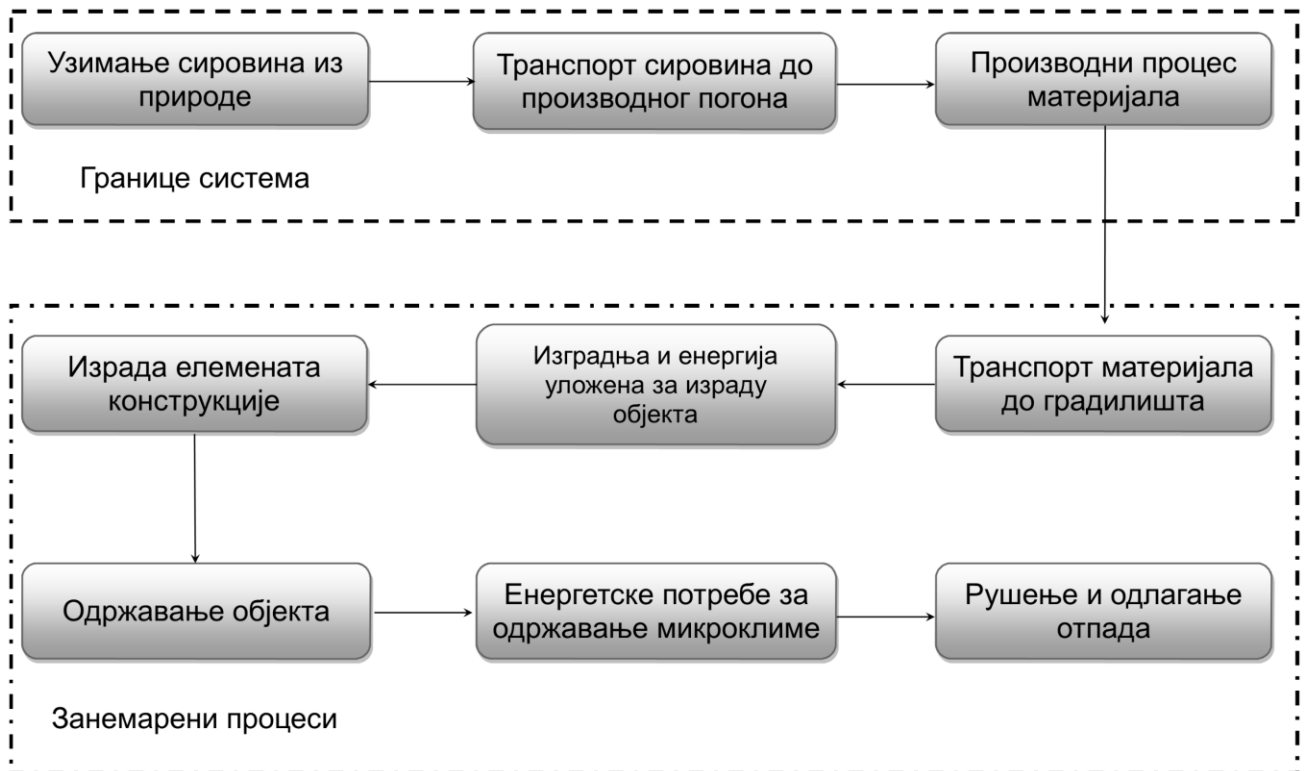
Анализа животног циклуса

Обзиром да се модели објекта за прорачун енергетске ефикасности разликују искључиво на основу ТИ материјала, занемаривање утицаја осталих материјала у моделима је оправдана. Због комплексности сваке LCA студије, за потребе овог истраживања изведена је поједностављена компаративна анализа животног циклуса биокомпозита и класичних ТИ материјала за које постоје информације у бази података. Биокомпозит је поређен са ТИ заснованом на целулозним влакнима, плочама од плуте, стакленом и каменом вуном, као и са EPS и XPS. За LCA моделовање, употребљен је програмски пакет *SimaPro 8*. Програм се ослања на информације из *Ecoinvent 3* базе података. Због непотпуности информација за све посматране материјале, изведено је поређење производних процеса ових ТИ материјала. Како би се избегла неравноправност, транспорт материјала до градилишта није узет у разматрање с обзиром на то да је транспорт категорија променљивог карактера и да се поједини материјали транспортују са много већих удаљености. Параметри попут помоћних материјала и енергије коју је неопходно уложити за изградњу, одржавање, рушење и финално одлагање, такође су изузети из LCA анализе због великог броја непознатих параметара. Фактори у вези са трошковима изградње, структурним карактеристикама, сеизмичким карактеристикама и сл, нису предмет овог истраживања.

На основу граница система (Сл. 2.6), из *Ecoinvent 3* базе података преузети су подаци о пописаним LCI материјалима и одговарајућим процесима. LCIA се заснива на прикупљеним LCI подацима, информацијама из базе података и одабраног метода процене утицаја. Одабрани метод за LCIA је *IMPACT 2002+* код којег се резултати класификују у четири категорије штетног утицаја: *Људско здравље, Квалитет екосистема, Климатске промене и Ресурси*. Због ограничења у доступности података и поједностављења студије укупан утицај на животну средину анализираних модела посматран је само са аспекта категорије климатских промена, односно, са аспекта GHG емисија изражених у еквивалентним јединицама угљен-диоксида. Функционална јединица анализе представља $\text{kgCO}_{2\text{eq}}$ сведена на један килограм биокомпозита. Процеси који улазе у састав инвентара животног циклуса биокомпозита су GHG емисије из производње инокулума, енергија уложена у жетву и балирање сламе/коноплје, транспорт супстрата и мицелијума, енергија уложена у процесу пастеризације супстрата, емисије из производње воде потребне за пастеризацију, енергија уложена у одржавање микроклиме у току фазе инкубације и енергија уложена за потребе сушења материјала.

За GHG емисије из процеса производње инокулума искоришћени су литературни подаци из LCA студије о производњи инокулума шампињона (*Agaricus bisporus*). Производња инокулума шампињона је због сличности производног процеса коришћена као апроксимација производње инокулума буковаче. Вредност GHG емисија у категорији климатских промена за производњу три килограма инокулума наведена је вредност $9,21 \cdot 10^{-1} \text{ kgCO}_{2\text{eq}}$, односно, за производњу једног килограма инокулума потребно је $3,07 \cdot 10^{-1} \text{ kgCO}_{2\text{eq}}$ (Leiva et al., 2015). Енергија уложена у жетву и балирање пшеничне сламе/коноплје износи око 30 kWh(t)^{-1} , а транспорт супстрата и мицелијума је дефинисан на удаљености до 50 km помоћу комби превоза носивости до 3,5 t. Енергија уложена у пастеризацију супстрата је прорачуната на основу утрошеног гаса који је коришћен за загревање воде и износи око 3 W по килограму супстрата. Количине потребне воде су дефинисане на основу вредности из поставке експеримената, а вредности GHG емисија су преузете из *Ecoinvent 3* базе података. Енергија уложена у одржавање микроклиме је такође апроксимирана с обзиром да је температура у просторији одржавана помоћу гасног котла централног грејања и није

могуће утврдити уложену енергију само за дату просторију. Апроксимација се састоји од претпоставке да је за одржавање температуре у просторији коришћен клима уређај топлотне моћи 9.000 BTU. С обзиром да је за рад овог уређаја потребно уложити већу количину енергије за хлађење него што је то потребно за грејање, претпостављено је да је уређај коришћен за хлађење просторије у периоду трајања инкубације, што износи око 396 kWh електричне енергије. Такође је претпостављено да су димензије просторије у којој се одвијала инкубација одговарајуће за дати уређај и да је просторија попуњена оптималном количином биокомпозита. Након тога је количина уложене електричне енергије сведена на килограм биокомпозита. На крају је на основу капацитета сушаре и њених топлотних карактеристика израчуната количина уложене електричне енергије у току периода од 144 часа, колико траје сушење биокомпозита, што износи око 0,72 kWh по килограму биокомпозита.



Сл. 2.6: Границе система LCA студије одабраних модела

3 РЕЗУЛТАТИ И ДИСКУСИЈА

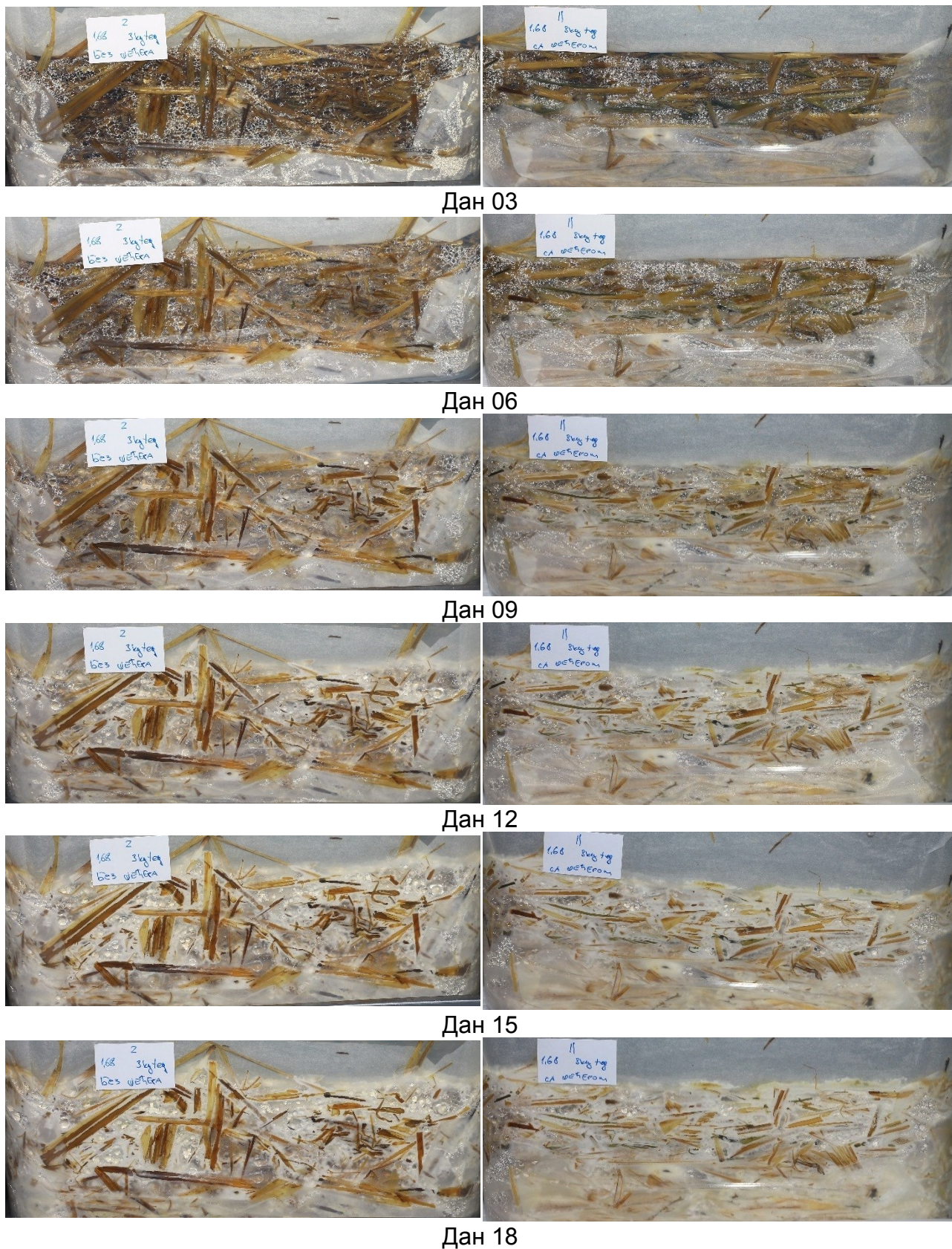
3.1 Производња плочастог термоизолационог материјала

Оптерећења којима је супстрат изложен у току фазе прораста материјала и време до почетка оптерећивања супстрата

Испитани су притисак којем је материјал изложен и време када је оптерећење отпочето. Оптерећење у трајању инкубације варирано је од 0 до 995 kg m⁻², односно, од 0 до 9.750 Pa. За почетне услове експеримента је одабрано оптерећење са вредностима од 50 до 65 kg m⁻², односно, 490 и 638 Pa. Један део узорака оптерећен је непосредно након инокулације материјала, док је остатак оптерећен након 5 дана. Утврђено је да су узорци оптерећени непосредно након инокулације, имали значајно бољи развој вегетативне мицелије у односу на узорке оптерећене након 5 дана, што је резултовало механички бољим биокомпозитом. Оптерећење од момента инокулације смањује међупростор између појединачних влакана супстрата који је потребно премостити, па се филаментозна мрежа хифа брже развија. На овај начин се ствара већи броја хифа и остварује се чвршћа веза унутар биокомпозита. С обзиром да се развој хифа одвија експоненцијалним брзином, почетна предност од 5 дана од великог је значаја. За тај период се формира велики број филаментозних структура из којих се даље развијају нове хифе. Временом је повећавано оптерећење којима су узорци изложени са циљем утврђивања граничних вредности оптерећења и његовог утицаја на механичка својства.

Резултати излагања узорака притиску у току инкубације указују да је материјал, који није био оптерећен, имао слабу кохерентност и лако се кидао приликом прегледа. Са друге стране, материјал изложен високим оптерећењима показао је одлична механичка својства, међутим, смањена је порозност плоче. Повећањем притиска смањен је међупростор између честица и влакана биокомпозита и истиснут ваздух, чиме се смањује ефикасност оваквог материјала као топлотног изолатора. Након дужег испитивања, усвојено је да се у току инкубације материјал првих 18 дана излаже притиску од 140 до 285 kg m⁻², односно, од 1.370 до 2.780 Pa. С обзиром да за ТИ материјале механичка својства нису од примарног значаја, одабрано је оптерећење које обезбеђује задовољавајућа механичка својства уз одржавање релативно малих запреминских маса и добрих ТИ карактеристика.

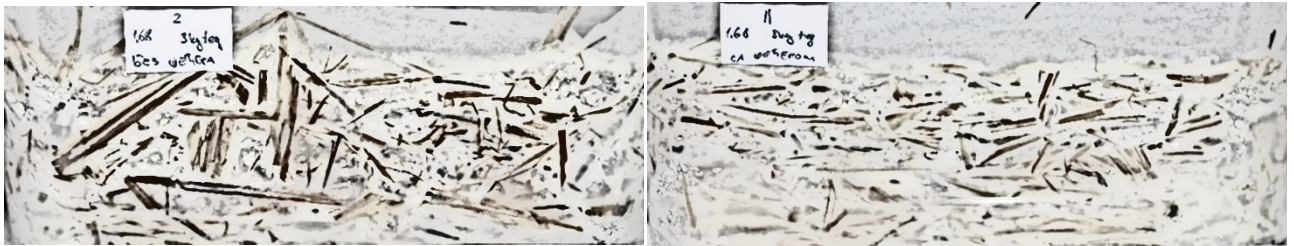
У току истраживања није утврђена максимална вредност оптерећења при којој мицелијум може да се развија јер су притисци којима су узорци изложени били приближно једнаки граничним вредностима калупа. Литературни подаци указују и на знатно веће вредности притиска којима је могуће изложити супстрат (Ross, 2012) са циљем производње материјала бољих механичких својстава. Постоји значајан потенцијал у оптимизацији оптерећења материјала на резултујуће ТИ карактеристике, што није обухваћено обимом и временским оквиром истраживања. Даља истраживања у смеру оптимизације се предлажу за будуће студије.



Сл. 3.1: Визуелни приказ развоја мицелијума на бочној страни калупа у току времена код узорка без додатка сахарозе (слике на левој страни) и са додатком сахарозе у току пастеризације (слике на десној страни)

Додавање сахарозе у току фазе пастеризације

Испитана је могућност убрзања развоја мицелијума са циљем производње материјала бољих механичких својстава за утврђени период инкубације. За извођење експеримента, коришћен је раствор воде заслађен сахарозом, концентрације 0,5 %. Додатком сахарозе, буковачи је на располагању лако доступан извор почетне енергије за развој мицеларне масе, међутим познато је да додаток хранљивих материја може да има и негативну последицу. У средини богатој шећером формирају се хифе мање механичке чврстоће у односу на средину без суплемената. Разлог томе се налази у повећању удела липида и протеина у ћелијском зиду на рачун смањења удела хитина. Додатком суплемената појединачне хифе буковаче развијају већи пречник. У току живота структуру хифа одржава унутрашњи хидростатички притисак, тургор притисак, међутим након сушења материјала долази до његовог губитка и до урушавања цевасте структуре хифа. Последица урушавања структуре се огледа кроз опадање механичких својстава биокомпозита (Haneef et al., 2017). Сматра се да повећани број хифа услед додатка суплемената повећава механичка својства биокомпозита иако су оне механички слабије од хифа гајених без додатка суплемената. Експериментом је, кроз визуелно бољи развој мицеларне масе, потврђено да се додатком сахарозе у воду за пастеризацију утиче на развој веће масе вегетативне мицелије за исти период инкубације. Утврђена разлика је уочљива на упоредном приказу развоја мицелијума у току времена код узорака са додатком и без додатка сахарозе у процесу пастеризације (друга серија експеримента, укупни период инкубације 18 дана - Сл. 3.1).



Сл. 3.2: Сlike узорака 18. дана инкубације: узорак без додатка сахарозе (на левој) и узорак са додатком сахарозе (слика на десној страни). Сlike су обрађене, при чему им је уклоњена боја ради лакшег визуелног прегледа.

Мицелијум се на сликама види као бела, паучинаста маса која испуњава међупростор око пшеничне сламе. Јасно је уочљиво да су површине беле масе код узорака са додатком сахарозе испуниле већи простор око влакана. Уколико на сликама од последњег дана инкубације, у овом случају 18. дана од дана инокулације, уклонимо боју и претворимо их у црно белу копију излагањем истоветном филтеру за обраду слике (Сл. 3.2), та разлика постаје још уочљивија. Детаљно испитивање морфологије мицелијума је обиман процес који није предмет овог истраживања. У даљим истраживањима би од интереса било да се утврди утицај мицелијума гајеног са додатком и без додатка суплемената на финалну чврстоћу материјала, као и да се на основу тога изведе оптимизација додатка суплемената приликом производног процеса.

Трајање инкубације и производња са фазом или без фазе плодношења

Дужина инкубације има директан утицај на квалитет биокомпозитних ТИ плоча с обзиром да се продужењем инкубације гљиви даје више времена да формира обилнију вегетативну мицеларну масу. Продужењем фазе инкубације на период дужи

од 21 дан, буковача ће формирати плодносна тела уколико се за то стекну одговарајући услови. Након завршетка плодносне фазе, гљива обнавља развој вегетативне мицелије до следеће фазе плодношења. Буковача може да има до 7 фаза плодношења на једном супстрату. Свако плодношење траје 5 дана са паузом између сукцесивних фаза од 7 дана. За развој ваздушне мицелије неопходан је другачији сет амбијенталних параметара него код вегетативне мицелије. Одржавањем повољних услова за развој вегетативне мицелије ефикасно се спречава појава ваздушне мицелије.

Проверено је да продужена инкубација има позитиван утицај на механичка својства биокомпозита, при чему су узорци са 30 дана инкубације имали знатно боља механичка својства у односу на узорке инкубиране 18 дана. На основу ових резултата дефинисана је фаза инкубације од 30 дана као коначан период инкубације. Одабрано трајање инкубације дефинисано је као крајњи период значајног развоја вегетативне мицелије уколико се одржавају повољни услови средине.

У току прве фазе експерименталне целине утврђено је да постоји могућност спрегнуте производње ТИ биокомпозита и прехранбених производа уколико се у току фазе инкубације буковачи дозволи појава плодносних тела. Сматра се да би се комбинованом производњом остварила боља економска добит и постигао већи степен искоришћења сировина у складу са циљевима биекономије и одрживог развоја. Испитан је утицај фазе плодношења на квалитет биокомпозита. Једном делу узорака којима је период инкубације износио 30 дана, делимично је омогућена фаза плодношења и том приликом није утврђена значајнија разлика у квалитету биокомпозита у односу на узорке којима није дозвољена појава ваздушне мицелије. Иако није утврђена значајнија разлика у квалитету, одлучено је да се појава фазе плодношења спречава у свим будућим експериментима са циљем одржавања хигијенских и здравствених услова у просторији. С обзиром да није квантификована разлика у механичким карактеристикама између узорака са фазом и без фазе плодношења, даље истраживање у овом правцу охрабрује се за будуће експерименте.

Масени удео инокулума који се меша са супстратом

Мицелијум буковаче је једна од компоненти биокомпозита која има улогу матрикса, односно везивног средства. Због тога масени удео мицелијума има директан утицај на својства биокомпозита. Повећањем удела мицелијума повећава се и број ново насталих хифа, односно, маса насталог мицелијума. Повећање мицеларне масе одвија се на рачун међупростора у супстрату чиме се директно утиче на механичке и термичке карактеристике биокомпозита. Утицај масеног удела инокулума на квалитет биокомпозита испитан је при вредностима од 10, 15, 33 и 50 % које су испитане кроз четири серије експеримента. Резултати испитивања су указали да узорци са 33 % масеног удела инокулума и 18 дана периодом инкубације имају слична механичка својства као и узорци са 15 % масеног удела инокулума и 30 дана инкубације. У наредним експериментима је масени удео инокулума повећан на 50 %, са периодом инкубације 30 дана и са овим параметрима постигнути су најбољи резултати. Није испитиван утицај масеног удела инокулума већег од 50 %, али се даљим повећањем може очекивати додатно унапређење механичких својстава биокомпозита.

Иако се повећањем удела инокулума може очекивати бољи квалитет материјала са аспекта механичких својстава, поставља се питање да ли ће допринос бити сразмеран доприносу претходних вредности удела или је достигнута граница након које даље повећање концентрације инокулума не доноси оправдану добит. Такође,

неопходно је утврдити и да ли постоји смањење у термичким перформансама биокомпозита. Обзиром да је мицелијум мрежа цевастих структура које су у току живота гљиве испуњене цитоплазмом и да се након сушења тај простор ослобађа течне фазе, постоји могућност да умањење термичких карактеристика неће бити значајно. Због могућности значајног унапређења производног процеса, предлаже се да даља истраживања усмерена у овом правцу буду предмет будућих испитивања.

Супстрати различитих дужина влакана, њихово међусобно комбиновање и начин мешања инокулума и супстрата

Као део почетне поставке експеримента коришћена је пшенична слама која није уситњавана, а дужина влакана супстрата износила је 400 до 500 mm. Влакна супстрата овакве дужине нису погодна за мешање са инокулумом. Приликом мешања, инокулум се због ситне гранулације издвајао и нагомилавао на дну суда, што умањује ефикасност хомогенизације смеше. Коришћена је мање ефикасна и временски захтевнија техника засејавања. Инокулација овако крупног супстрата извођена је наизменичним nanoшењем слојева супстрата и инокулума у калупу до захтеване дебљине биокомпозита. Слојеви супстрата слагани су у малим дебљинама, а инокулум равномерно распоређен по површини. Инокулација поменутом методом има неколико недостатака који се манифестују у виду биокомпозитног материјала лошијег квалитета. Првенствено, степен трансфера мицелије са зрна инокулума на супстрат је нижи. Приликом мешања инокулума и супстрата долази до бољег контакта инокулума и супстрата услед којег се путем трења део мицелије пренесе на супстрат. Код методе инокулације наизменичним nanoшењем не долази до значајнијег мешања, а самим тим и до мањег броја тачака контакта између мицелијума и супстрата. Додатно, без обзира на дебљину слоја и равномерност nanoшења инокулума, степен хомогенизације смеше остаје на релативно ниском нивоу. Последњи недостатак је стварање ламела у биокомпозиту по којима након сушења може доћи до деламинације, односно, раздвајања материјала по нанетим слојевима. Такође, дугачке стабљике супстрата нису погодне ни са аспекта обликовања материјала у калупима нити за инкубацију гљиве услед стварања празнина непремостивих за мицелијум. На тај начин настају делови материјала са веома slabим прорастом који представљају слабе тачке биокомпозита са аспекта механичких карактеристика. Уколико се користи уситњен супстрат, тада је мешање могуће извести у посуди или механичкој мешалици пре него што се смеша сложи у калупе. Што је дужина влакана супстрата краћа, постиже се боље хомогенизована смеша.

У неколико експеримената коришћена је уситњена пшенична слама дужине до 8 mm. Ситно сецкана слама се показала као много бољи материјал са аспекта мешања и калупљења, међутим, супстрат са овако кратким влакнима није погодан за израду биокомпозита због лоших механичких карактеристика. Овако кратка влакна немају довољну дужину да се оствари чврст контакт са већом површином биокомпозита чиме би се материјал одупирао спољашњим силама. Узорци од сламе дужине до 8 mm били су превише крти и осетљиви на механичка оштећења, те је долазило до знатних оштећења узорака приликом руковања (Сл. 3.3).



Сл. 3.3: Пример оштећења насталог приликом руковања материјалом услед сувише велике кртости



Сл. 3.4: Пример неуспешног узорка биокompозита са супстратом дужине до 8 mm. Развој мицелијума инхибиран у централном делу узорка услед формирања анаеробних услова средине (означено црвеним кругом)

Додатно, превише уситњен материјал није погодан за гајење гљиве јер је супстрат сувише компактан што смањује количину заробљеног ваздуха у материјалу.

Сувише компактан материјал умањује и ефикасност дистрибуције свежег ваздуха услед чега долази до формирања анаеробних услова у деловима материјала удаљеним од вентилационих отвора, попут централног дела узорака. Као последица развоја анаеробних услова долази до одумирања мицелијума гљиве у тим деловима плоче и до развоја, неизбежне и доминантно спорогене бактеријске инфекције која започиње анаеробну декомпозицију органске материје. Узорци у којима је дошло до развоја анаеробних услова имају карактеристично непријатан и кисео мирис, видно се диференцирају делови са развијеним мицелијумом и делови без развијене мицеларне масе у којима апсолутно не постоји кохезија унутар супстрата. На слици Сл. 3.4 јасно се издваја граница између материјала прожетог мицелијумом гљиве и материјала у којем нема развоја мицеларне масе. Узорци биокмпозита оштећени на овај начин нису погодни за даљу употребу.

Затим, коришћена је уситњена слама дужине 30 до 70 mm, која је задржана све до краја испитивања. Овако уситњен материјал поседује сва добра својства која су недостајала код претходно употребљених дужина. Материјал поменуто дужине влакана се релативно добро и лако меша са зрнима инокулума уз добру манипулацију материјалом приликом попуњавања калупа. Осим тога, омогућена је добра дистрибуција кисеоника, а усвојена дужина сламки материјалу пружа добра механичка својства. На основу изнетог, узорци који су намењени за потребе испитивања механичких карактеристика произведени су од пшеничне сламе и конопље дужине од 30 до 70 mm.

Пробно је изведен и експеримент у којем је уз сламу и мицелијум успешно коришћен и перлит гранулације око 1 mm. Удео компоненти био је делимично измењен да би се користиле три компоненте у биокмпозиту. Вредности масених удела компоненти биле су око 25 % перлит, 38 % мицелијум и 37 % пшенична слама. Измењен је и процес мешања компоненти у односу на узорке у којима су компоненте само мицелијум и супстрат. Након хлађења и цеђења супстрата и перлита, мицелијум је прво измешан са перлитом како би се остварило што више тачака које носе мицелијум и које ће повећати број извора раста хифа након мешања. Затим је мешавина мицелијума и перлита измешана са уситњеном пшеничном сламом, односно конопљом. На овај начин произведен је боље хомогенизован супстрат, а честице мицелијума и перлита много боље приањају на сламу. Увођењем перлита у производни процес увелико се олакшава обрада смеше приликом инокулације, уз побољшано мешање са мицелијумом и сламом. Перлит је првобитно пастеризован влажном пастеризацијом заједно са сламом, међутим, утврђено је да цеђење ситнозрног материјала није погодно те се предлаже његова припрема сувим процесом пастеризације, односно, сушењем у сушари на 105 °C у трајању од једног сата. Овако пастеризован перлит је пре примене потребно помешати са одређеном количином воде из процеса пастеризације да би се постигла влажност материјала која одговара релативној влажности оцеђене сламе. Перлит има својство упијања великих количина влаге. Претходним влажењем перлита спречава се одузимање влаге из супстрата која је неопходна за развој мицелијума, што би био случај да се користи суво пастеризовани перлит.

Након сушења, узорци са перлитом су визуелно деловали много компактније од узорака без перлита. Међутим, даљом инспекцијом и ломљењем утврђено је да су узорци са перлитом знатно кротији и да се лакше кидају од узорака без перлита. Овакви резултати су неочекивани и могу се образложити смањеном површином контакта између мицелијума и сламе услед присуства зрна перлита као посредника што резултује слабијом адхезијом мицелијума за површину сламе. Међутим, комбиновањем минералних ТИ материјала попут перлита и вермикулита са

биокомпозитом могуће је произвести материјал са већом отпорности на услове пожара, а недостатке у погледу механичких својстава могуће је превазићи применом различитих система градње. Након овог експеримента одлучено је да се даља испитивања у овом смеру, услед недостатка времена и обима неопходних испитивања, за сада изоставе. Приликом испитивања утицаја дужине влакана изведена је само делимична оптимизација производног процеса и неопходна су детаљнија истраживања у овом смеру.

Начин сушења материјала

Након инкубације биокомпозит је неопходно ослободити сувишне влаге при чему се истовремено и мицелијум гљиве преводи у инертно стање. Ово се изводи на основу граничних температурних услова за гљиву буковачу. Да би се прекинуле животне активности довољно је гљиву изложити утицају температуре 60 °C у трајању 15 минута. Првобитни узорци излагани су овој температури у периоду од неколико дана како би се из материјала истовремено издвојила и сувишна влага. Међутим, иако су прекинуте животне активности буковаче, овај режим сушења се показао неефикасним услед стварања површинског слоја који спречава исушивање влаге из унутрашњости плоче. На основу првобитних резултата коригован је режим сушења да би се материјал исушио по целој запремини. Првобитни једностепени режим сушења замењен је вишестепеним режимом у којем се температура постепено повећава, чиме је избегнута појава не-пермеабилног површинског слоја. Узорцима је пре сушења мерена маса, након чега су постављени у конвективну сушару. Загревање је спроведено на 45 °C у току 24 часа. Температура је затим повећана на 50 °C у трајању 24 часа. Након тога, температура је подигнута на 60 °C и та температура је одржавана до краја процеса. Узорцима је периодично мерена маса како би се установио крај сушења. Експерименталним путем је утврђено да је то период од 96 часова, односно, да укупно време сушења износи 144 часа (6 дана). Губитак масе након 6 дана сушења износи око 1 g dan⁻¹ чиме се сматра да је материјал довољно осушен. На крају, узорци се последњи пут одмеравају да би се утврдила укупна маса издвојене влаге и израчунао удео суве материје. Након сушења узорци нису апсолутно суви, већ садрже одређену количину везане влаге која није довољна да се развију непожељни микроорганизми. Узорци осушени на описани начин ће, у зависности од услова у којима се складиште, из ваздуха упијати хигроскопну влагу и на тај начин одржавати равнотежу са околином, што је карактеристично за све лигноцелулозне материјале. Ово је последица присуства хигроскопних пора у материјалу и афинитета целулозе према води. Након сушења, материјал задржава првобитни облик калупа без значајнијих промена димензија и деформација, компактан је и чврст, уз помало непријатан мирис који подсећа на пољопривредну биомасу.

Утврђено је да је режим сушења са постепеним подизањем температуре погоднији од наглог сушења на 60 °C. При поступном повећању температуре није долазило до стварања површинског слоја који је успоравао даљи губитак влаге из узорака. Иако није дошло до појаве микроорганизама на осушеним узорцима, након неколико серија експеримента је одлучено да се почетна температура сушења са 40 °C подигне на 45 °C. Повећање почетне температуре није довољно велико да утиче на стварање непермеабилног површинског слоја, али се повећава број врста микроорганизама чије се животне активности прекидају, а чије споре се налазе у ваздуху који нас окружује. На овај начин се смањује могућност преживљавања штетних микроорганизама на површини биокомпозита.

У току сушења долази до ослобађања велике количине слободне воде из материјала, нарочито у првих 48 часова сушења. Издвојена влага је носилац

непријатних мириса због чега је важно да се она кондензује у контролисаним условима. Да би се издвојена влага из сушаре одвела на контролисани начин, неопходно је да унутар коморе за сушење постоји и размењивач топлоте који се хлади. Хлађењем размењивача се влага издваја из ваздуха, кондензује и одводи у засебну посуду. У противном, издвојена влага се шири и преноси непријатне мирисе у окружење сушаре. Процес сушења се изводи при одабраним температурама са циљем смањења неопходне енергије за производњу материјала. Постоје индикације, на основу познавања својстава биополимера који улазе у састав биомасе, првенствено лигнина, да повећањем температуре приликом сушења можемо да утичемо на побољшање механичких својстава биокомпозита. Повећањем температуре на 80 °C док је биокомпозит у влажном стању може да се изазове размекшавање лигнина који се налази у структури супстрата. На тај начин би се ојачале везе које лигнин остварује са осталим полимерима које би након хлађења остале трајне. Подаци о реполимеризацији лигнина преузети из (Akihiro et al., 2010; Calvo-Flores et al., 2015; Hu, 2002; Johnson et al., 2003; Omar and Mohini, 2016). Сушењем материјала у микроталасним пресамa би се значајно убрзало сушење и унапредила механичка својства биокомпозита услед реполимеризације појединих компоненти у саставу супстрата. С обзиром на то да сушење није једноставан процес и да оптимизација није део теме која се обрађује, предлаже се даље истраживање и у овом правцу.

Врста биомасе

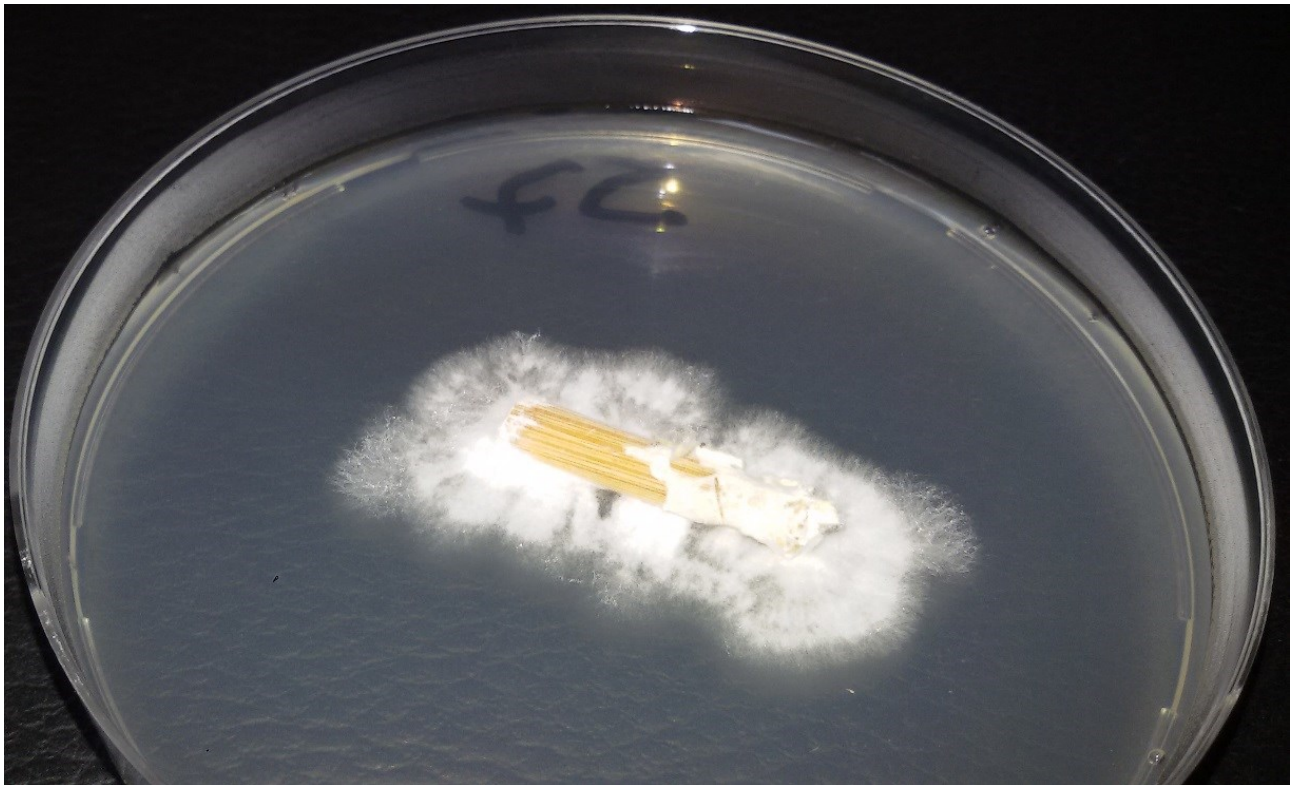
Свака сировина која се користи као супстрат за гајење буковаче, биокомпозиту преноси део сопствених карактеристика. Узорци од конопље по правилу имају боља механичка својства од узорака са пшеничном сламом с обзиром да конопља као сировина има већу чврстоћу од пшеничне сламе. Запреминска маса биокомпозита зависи од врсте супстрата, али и од производног процеса, пре свега, притиска којем је смеша изложена у фази инкубације. У току испитивања узорци су имали различите запреминске масе, због оптерећења које је било испитивани параметар. Због тога је усвојена вредност која је коришћена код производње узорака за потребе испитивања изведених у другој целини.

Узорци димензија 320 x 220 x 50 mm представљају основу за утврђивање запреминске масе и осталих параметара попут притиска који се намеће узорцима, неопходне масе смеше за производњу узорака одређене дебљине и сл. Установљено је да је за узорке ових димензија неопходно око 1,6 kg смеше пшеничне сламе и мицелијума, док је за узорке са конопљом неопходно око 2 kg. Према томе, запреминска маса биокомпозита са сламом, у влажном стању, износи око 455 kg m⁻³, а са конопљом око 570 kg m⁻³. Вредности осушеног биокомпозита износе приближно 128 и 157 kg m⁻³ респективно. С обзиром да је однос удела мицелијума и сламе у смеши 1:1, из тога произилази да је крајња запреминска маса оцеђене сламе, односно конопље, око 227 и 285 kg m⁻³ респективно. При томе релативна влажност оцеђене пшеничне сламе износи око 73 %, а конопље око 66 %.

Оба супстрата се пастеризују са подједнаком лакоћом. Конопља је грубља и много чвршћа од пшеничне сламе, а такође се лакше и цеди на оптималну вредност садржаја воде. Код конопље је постигнута вредност 65 – 68 %, док пшеничну сламу није било могуће оцедити на садржај воде мањи од 72 % уз употребу расположиве опреме. Узорци са конопљом имају већу запреминску масу од узорака са пшеничном сламом.

Могућност производње материјала веће дебљине

С обзиром да живи организам представља део развојног процеса биокомпозита, испитана је максимална могућа дебљина плоча која може да се произведе у наведеним условима. Доказано је да је могуће произвести узорке дебљине до 50 mm. Међутим, неопходно је било да се утврди могућност производње материјала већих дебљина. Код већих дебљина проблем је обезбедити размену гасова без значајније измене структуре плоче. У централном делу узорака се, у току прва три дана инкубације, развијала температура око 60 °С, те је долазило до раста спорогене, вероватно термофилне до термотолерантне анаеробне бактеријске контаминације. Услед активности мицелијума буковаче, слабе измене ваздуха и слабе размене топлоте са околином дошло је до стварања анаеробних услова који су погодвали активирању преживелих бактеријских спора. Њиховим активирањем, дошло је до даљег повећања температуре у централном делу узорка. Направљени су пробни узорци дебљине 200, 100 и 80 mm од којих је развој мицелије био успешан једино код узорака дебљине 80 mm. Да би елиминисали контаминацију смеше у току инокулације као потенцијални узрок, за сваки узорак повећане дебљине произведени су контролни узорци дебљине 50 mm. У њима није уочена појава контаминације што је показатељ да се узрок налази у фази инкубације. Код узорака дебљине 80 mm, у централном делу узорака дошло је до појаве температуре блиске горњим граничним вредностима, али се мицелијум развио без развића контаминације другим микроорганизмима. Да би потврдили вијабилност (животност) мицелије, један од узорака дебљине 80 mm је расечен и узорци мицелије са сламом су узети из средине и испод површине плоче. Узорци материјала постављени су у Петријеве посуде са Сладним агаром и инкубирани на 25 °С ради праћења развоја мицелије и евентуалних бактеријских контаминација.



Сл. 3.5: Пример прораста мицелијума буковаче соја Б96 старог 30 дана, на Сладном агару након 7 дана инкубације на 25 °С

Утврђено је да је мицелија жива иако је њена активност била смањена услед старости. Такође је утврђено да није дошло до пораста контаминације плоче другим микроорганизмима (Сл. 3.5). Смањена активност мицелије се огледа у малој површини коју мицелијум заузима унутар Петријеве посуде. Млада и витална мицелија би требало да скоро у потпуности освоји површину посуде за 7 дана при оптималној температури средине. Када је узорак контаминиран другом врстом буђи долази до појаве мицелије друге боје и другачијег изгледа хифа. Уколико се ради о бактеријској контаминацији јављају се кружна, углавном сјајна компактна тела која немају филаментозну структуру. Обзиром да се на агару није развила ниједна друга култура осим мицелије буковаче, можемо констатовати да не постоји контаминација плоче биокомпозита аеробним и факултативно анаеробним бактеријама. Овим је потврђено да максимална дебљина плоче биокомпозита без модификације производног процеса износи 80 mm. Уколико би било потребно произвести материјал веће дебљине, неопходно је модификовати производни процес да би се централном делу плоче обезбедио доток свежег, деконтаминираниог ваздуха који би био и расхладни медијум. Постоје и технике ламеларне инокулације и инкубације (Baeyer and McIntyre, 2016, 2015a, 2015b) којима би било могуће произвести веће дебљине плоча без додатног хлађења, али оне због свог обима нису предмет овог рада.

3.2 Својства биокомпозитних плоча термоизолационог материјала

Испитивање морфолошких својстава

Прегледом попречног пресека сирових и осушених узорака може да се разликује супстрат од мицелијума. Хифе испуњавају простор између појединачних влакана супстрата, а на појединим местима може да се уочи и зрно пшенице/јечма које је носач мицелијума. Узорци су компактни, без већих празнина које се диференцирају у структури плоче. Равномерно распоређена слама и уједначен прораст мицелијума указују на добро мешање компоненти. Влакна супстрата насумично су оријентисана у простору, али су већином оријентисане у равни. Ово је очекивана појава, обзиром да је материјал у току инкубације изложен притиску по вертикалној оси. Због тога су дугачка влакна већином заузела трансверзалан положај у односу на смер деловања притиска. Због овакве оријентације влакана биокомпозит исказује анизотропна својства, што је најизраженије код механичких својстава.

На попречном пресеку може да се уочи да већина влакана има елипсасти или плочасти облик услед излагања биокомпозита притиску у дужем периоду. У зависности од дела стабљике из којег потичу и због чврстоће дрвенастог поздера, супстрат конопље је у већем степену задржао свој првобитни облик. На Сл. 3.6 приказана је структура биокомпозитне плоче од пшеничне сламе. На горњој слици је попречни пресек сировог, а на доњој осушеног узорка. Код сирових узорака лакше се диференцирају влакна супстрата од мицелијума због јасне разлике у боји. Сушењем узорака, мицелијум губи белу боју и поприма жућкасто смеђу што отежава њихово разлучивање.



Сл. 3.6: Макроскопски приказ структуре узорка биокомпозитног материјала од пшеничне сламе: пре сушења (А) и након сушења (Б)



Сл. 3.7: Попречни пресек узорка биокомпозита са конопљом, мицелијумом и перлитом након сушења

На Сл. 3.7 приказан је узорак од конопље, мицелијума и перлита. Могу се уочити регије на којима има више перлита (заокружено црвеном бојом) што је последица слабије хомогенизације смеше услед велике разлике у димензијама супстрата и перлита. Перлит се у овом случају понаша као пунилац, па не утиче битно на промену запремине у односу на узорке без перлита. Због тога, узорци при визуелном прегледу делују компактније и чвршће.

На попречном пресеку супстрата који је задржао интегритет влакана уочена је густо развијена мрежа хифа у унутрашњости. Посматрањем под микроскопом могу јасно да се виде индивидуалне хифе мицелијума (Сл. 3.8).

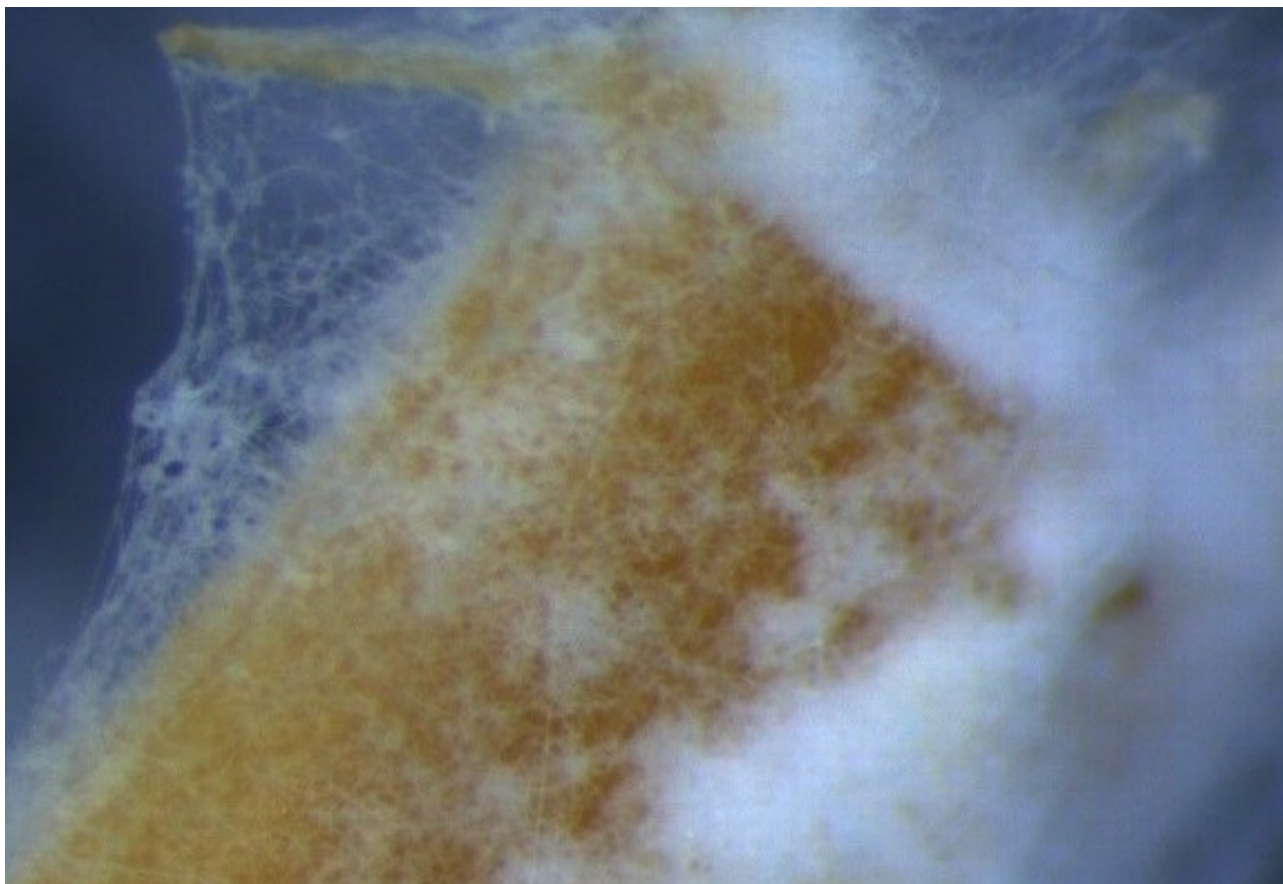


Сл. 3.8: Раст мицелије са унутрашње стране влакна супстрата (увећање 32 x)

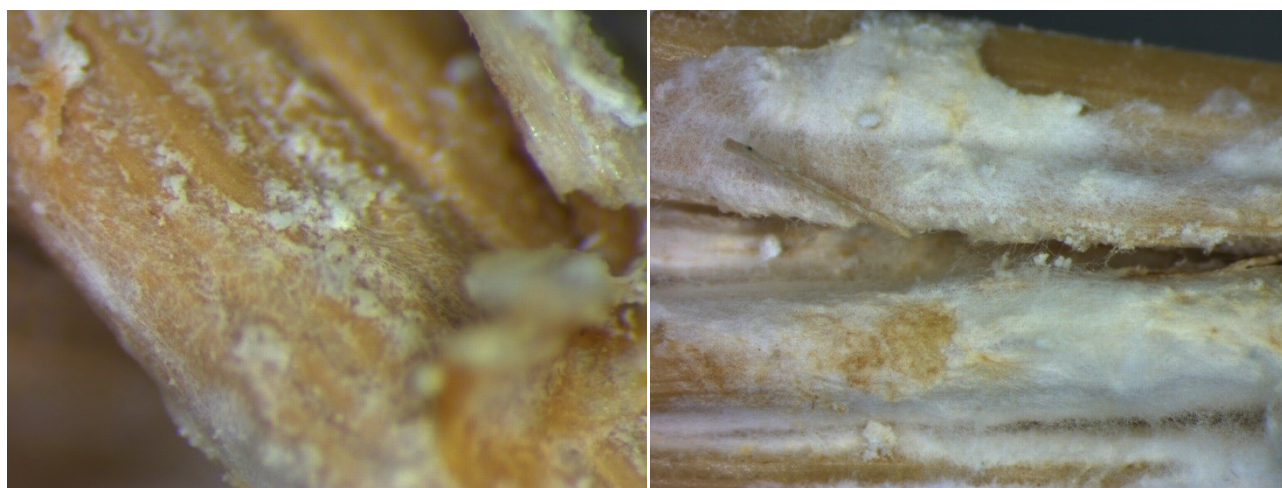
У току инкубације мицелијум обраста око супстрата и на slabим местима продире у унутрашњост влакана. На тај начин мицелијум прожима и повезује све компоненте биокомпозита у једну целину. Уколико су услови у току инкубације бољи, утолико ће се формирати дебљи слој мицелије на супстрату што резултује бољим механичким својствима биокомпозита.

Појединачна влакна супстрата су извлачењем са пинцетом издвојена из централног дела сировог узорка ради испитивања вијабилности мицелије и посматрања под микроскопом. Један део влакана је осушен док је други део остављен у инкубатору ради провере вијабилности мицелије. Приликом извлачења влакана из биокомпозита неминовно је дошло до пуцања и одвајања једног дела мицелије са површине влакна што је узрок визуелном недостатку хифа на влакнима супстрата. Након 7 дана инкубације на температури од 25 °С, мицелија је започела поновни раст на огољеним површинама, а на деловима на којима је остала, повећана је дебљина слоја мреже хифа (Сл. 3.9).

На влакнима која су осушена након издвајања могу да се уоче различити степени развоја мицелије што је последица неуједначеног прораста. Ова неуједначеност је спорадична и није уочљива голим оком. Неуједначен прораст је последица недовољно хомогенизоване смеше и раста мицелијума. Овим се указује да је за добру хомогенизацију неопходно оптимизовати дужину влакана супстрата и унапредити процес мешања употребом механичких мешалица уз продужен период мешања. Повећао би се број ћелија гљиве пренетих са инокулума на супстрат, што за последицу има већи број тачака (извора) прораста мицелије. На слици Сл. 3.10 приказани су примери влакана са слабијим и са добрим прорастом мицелије.



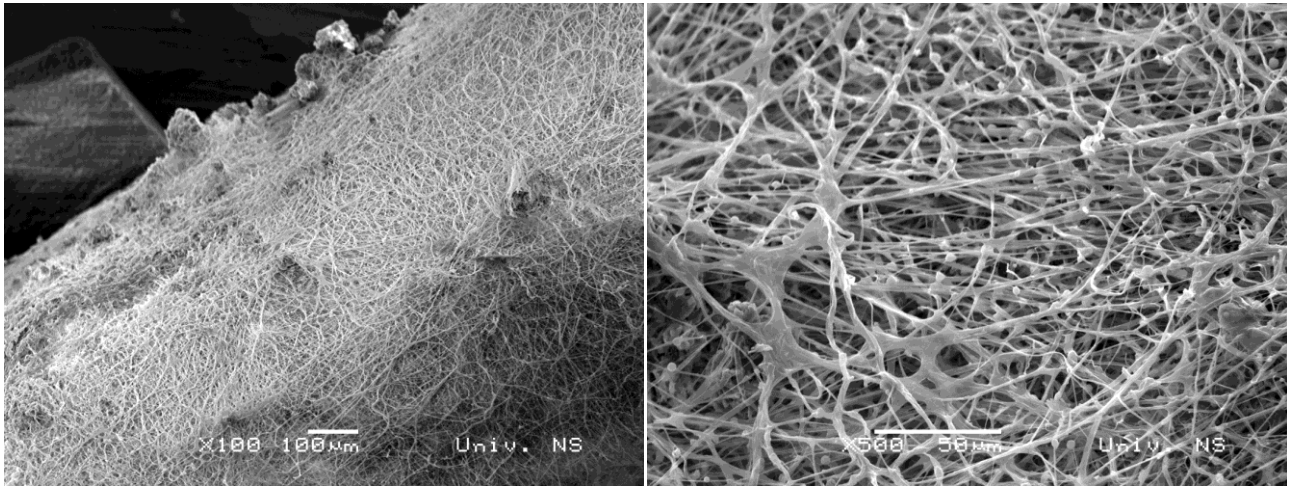
Сл. 3.9: Приказ живе мицелије буковаче под микроскопом (увећање 32 x)



Сл. 3.10: Изглед влакана са тањим слојем мицелије на површини (слика лево) и влакана покривених са више слојева мицелије (слика десно)

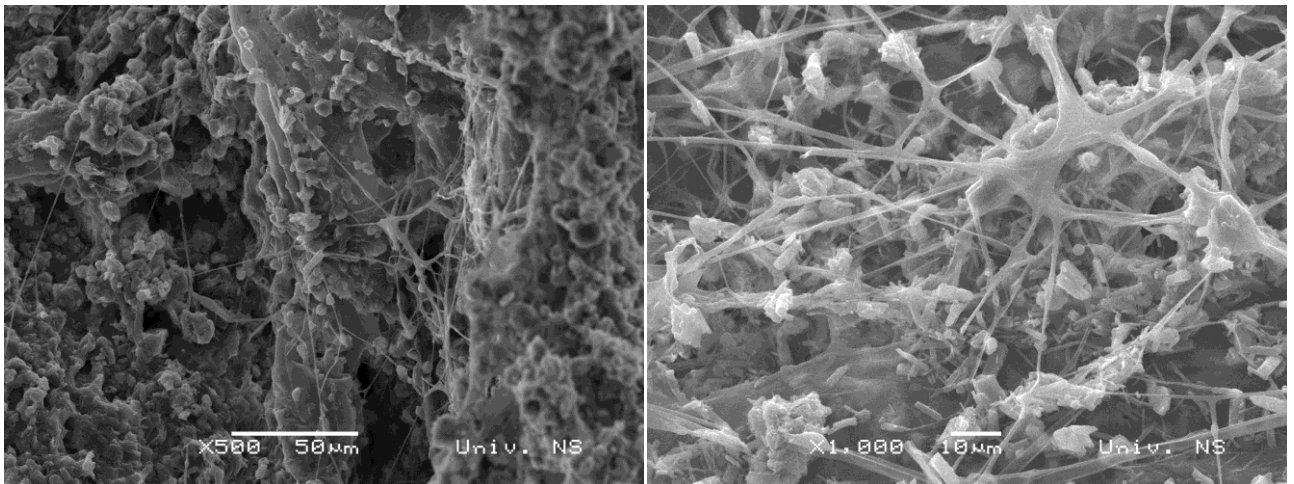
Узорци осушених влакана су посматрани под електронским микроскопом са циљем утврђивања морфолошких својстава и квалитета прораста мицелије на микроскопском нивоу. На сликама се мицелија препознаје као кончаста материја која се повезује међусобно и са супстратом. Посматрани су делови са слабијим и са бољим прорастом мицелије. На местима са добрим прорастом јасно је уочљив вишеслојни раст мицелије какав би у идеалном случају био у свим деловима

биокомпозита и на којима није могуће видети површину супстрата кроз слојеве хифа (Сл. 3.11).

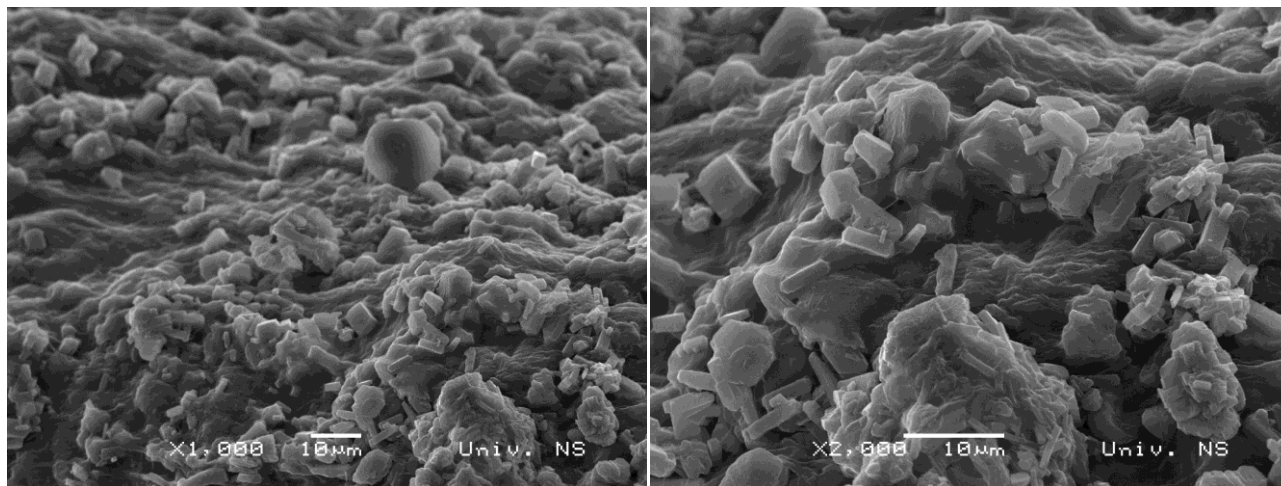


Сл. 3.11: SEM снимак вишеслојног прораста мицелије на супстрату: увећање 100 x (слика лево) и 500 x (слика десно)

Посматрањем делова са слабијим прорастом јасно се разликују површина супстрата са исталоженим полиедарским структурама правилног облика (кристали какве граде оксалати и који су највероватније продукт метаболизма гљиве) и кончаста материја која се везује за површину супстрата (Сл. 3.12). Хифе на сликама имају тракаст изглед што је последица примењеног поступка припреме узорка, односно, губитка тургоровог притиска, услед чега су оне изгубиле карактеристично цилиндричан облик. Осим регија са слабијим прорастом, местимично могу да се уоче и регије са потпуним одсуством хифа што је приказано на Сл. 3.13.



Сл. 3.12: Приказ слабог прораста мицелијума на супстрату при увећању од 500 x (слика лево) и 1000 x (слика десно)



Сл. 3.13: Приказ једне од регија без присуства мицелије при увећању од 1000 x (слика лево) и 2000 x (слика десно)

Испитивање физичко-хемијских својстава

Активност воде (a_w) – након 10 дана у ексикаторима при релативној влажности ваздуха од 55, 65, 70, 75, 85 и 95 %, узорци су достигли равнотежно стање са средином. Ово је утврђено са два узастопна мерења масе узорака у временском размаку од 48 часова. Узорци који су одлежали у клима комори при вредности релативне влажности 55 % равнотежно стање су достигли за нешто краћи период.

Између седмог и десетог дана аклиматизације, утврђено је да су сви узорци изложени вредностима релативне влажности 85 и 95 % развили голим оком видљиве колоније плесни на површини. Појава колонијских облика плесни на површини, који су често различито обојени, доказ је да су вредности активности воде сигурно веће од 0,61 и да су узорци подложни нападу микроорганизама, а последично и процесима биодеградације. Да би се утврдила вредност активности воде при најмање повољним условима за развој контаминације, постављени су нови узорци на релативној влажности од 95 %, који су испитани након 6 дана. Иако узорци нису достигли константну масу у току тог периода, прираст масе узорака износио је свега $0,1 \text{ g dan}^{-1}$, што можемо сматрати занемарљивим вредностима. Узорци који су били изложени у условима са вредностима релативне влажности средине 55 до 75 % нису показали видљиве знакове биолошке контаминације плеснима, те су након достизања равнотеже са средином подвргнути тесту. Резултати теста активности воде приказани су у Таб. 3.1.

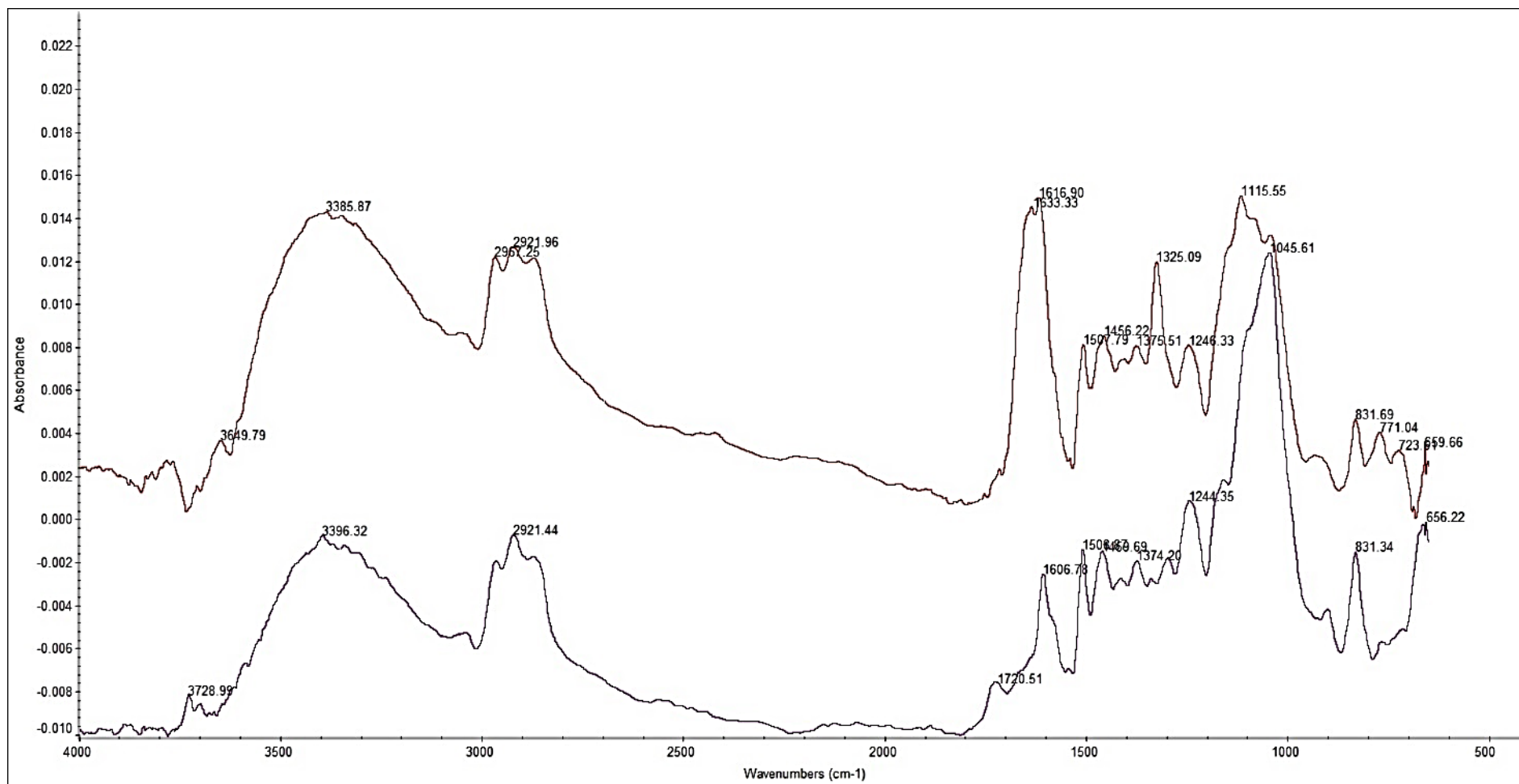
Таб. 3.1: Активност воде биокомпозита у односу на равнотежну релативну влажност ваздуха

a_w вредност при релативној влажности ваздуха	Врста материјала	
	Биокомпозит са пшеничном сламом	Биокомпозит са конопљом
55 %	$0,528 \pm 0,004$	$0,524 \pm 0,005$
65 %	$0,612 \pm 0,004$	$0,629 \pm 0,006$
70 %	$0,652 \pm 0,004$	$0,647 \pm 0,005$
75 %	$0,757 \pm 0,003$	$0,747 \pm 0,011$
85 %	> 0,61	> 0,61
95 %	0,913	0,914

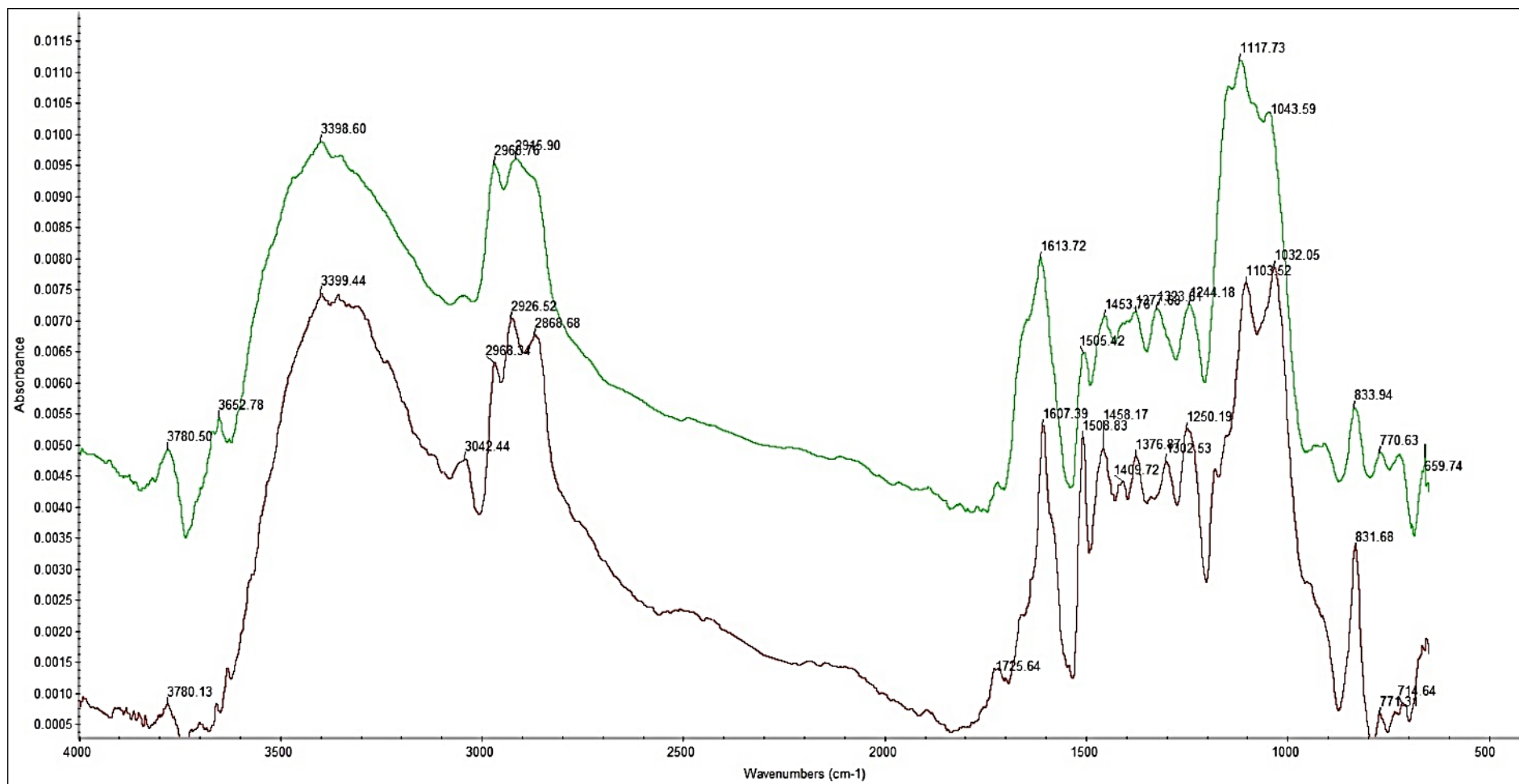
Утврђене вредности за биокомпозит изложен релативној влажности ваздуха 55 % су испод граничне вредности од 0,61 и указују да при овим условима средине не постоји довољна количина слободне воде у материјалу за развој микроорганизама. Вредности утврђене тестом указују да је материјал са аспекта количине слободне воде при релативној влажности 75 % погодна подлога за плесни (плесни рода *Aspergillus* $a_w > 0,65 - 0,75$) и осмофилних квасаца ($a_w > 0,60$). Аутор (Krnjetin, 2015) наводи да гранична вредност релативне влажности ваздуха за примену балиране сламе износи 70 %. Узорци изложени условима релативне влажности средине од 75 % ни након више од 150 дана нису развили голим оком видљиве знакове присуства штетних микроорганизама. На основу a_w вредности при овој равнотежној релативној влажности требало би да су се развиле голим оком видљиве колоније плесни. До ове појаве, вероватно није дошло услед недостатка контаминације материјала плеснима присутним у спољној средини. Релативна влажност средине ≥ 85 % није подобна за радне услове и за складиштење биокомпозита. При поменутих вредностима релативне влажности, теоретска вредност активности воде износи изнад 0,80 што представља подручје највеће метаболичке активности већине штетних микроорганизама. Ово је нарочито важно са аспекта заштите материјала, при чему је поред директног влажења, материјал неопходно заштити и од појаве кондензације у унутрашњим слојевима елемента. Да би се то спречило, неопходно је посебну пажњу посветити пројектовању елемента и димензионисању дебљине ТИ слоја у конструкцији. Постоји одређена зависност између релативне влажности средине са којом је биокомпозит успоставио равнотежу и активности воде. На основу ове зависности можемо да тврдимо да је биокомпозит безбедно складиштити и користити при релативним влажностима средине до 75 %, без бојазни од оштећења услед микробиолошке активности на површини материјала.

Обзиром да је биокомпозит органског порекла, услов присуства хранљиве подлоге за микроорганизме је испуњен. Други сет услова односи се на параметар релативне влажности средине чијим повећањем се повећава и количина доступне воде за микроорганизме. На овај начин атмосферска влага постаје доминантан извор слободне воде за биолошку активност микроорганизама. Осим доступне слободне воде, за развој штетних микроорганизама потребне су одговарајуће рН вредности средине, температура и доступност специфичних хранљивих материја.

Структурна карактеризација – резултати структурне карактеризације биокомпозита и чистог супстрата приказани су на Сл. 3.15, Сл. 3.17 и у Таб. 3.2. Уопштени инфрацрвени апсорпциони спектар мицелијума зависи од молекула који чине његову структуру. С обзиром на то да се полисахариди у основи хемијске структуре гљиве буковаче, пшеничне сламе и конопље, односно, целулоза, хемицелулозе и хитин, састоје од низа јединица простог шећера D-глукозе, утврђени инфрацрвени спектри су међусобно слични. Разлике у структури ових полисахарида се јављају услед различитих функционалних група и дужине ланца полисахарида. Осим целулозе, хемицелулозе и хитина у саставу биокомпозита налазе се други шећери, липиди, протеини, беланчевине, минерали и соли који су такође присутни у супстрату и мицелијуму и чије се апсорпционе траке појављују у резултујућем инфрацрвеном спектру. Главне апсорпционе траке налазе се у оквиру таласних бројева $3.000 - 2.800 \text{ cm}^{-1}$ (често и на вредностима приближно 1740 и 1450 cm^{-1}) за липиде. Апсорпционе траке протеина се уочавају на вредностима $1.700 - 1.300 \text{ cm}^{-1}$ и то од 1.700 до 1.600 cm^{-1} амидна I вибрација и од $1.575 - 1.300 \text{ cm}^{-1}$ амидна II и III вибрација, које се најчешће везују за хитин. Вибрације нуклеинских киселина се уочавају на опсезима $1.255 - 1.245 \text{ cm}^{-1}$, а полисахариди на $1.200 - 900 \text{ cm}^{-1}$ (Haneef et al., 2017).



Сл. 3.14 ATR-FTIR спектри испитаних узока чистог супстрата и биокомпозита – чиста пшенична слама (доња крива) и биокомпозит са пшеничном сламом (горња крива)



Сл. 3.15: ATR-FTIR спектри испитаних узорака чистог супстрата и биокompозита – чиста конопља (доња крива) и биокompозит са конопљом (горња крива)

У Таб. 3.2 приказане су асигнације за траке уочене у FTIR спектрима биокомпозита и њихових чистих супстрата. Материјали органског порекла попут пшеничне сламе и конопље релативно су комплексне хемијске структуре и као такви у FTIR спектрима читава се много преклапајућих вибрација различитих функционалних група карактеристичних за ове материјале. Са циљем лакше упоредне анализе трака у спектру, у табели је приказано 6 карактеристичних спектралних региона.

Таб. 3.2: Резултати спектралне анализе за биокомпозите и њихове чисте супстрате

Спектрални опсег и асигнација трака	Пшенична слама		Конопља	
	Чист супстрат	Биокомпозит	Чист супстрат	Биокомпозит
3.500 – 3.000 cm ⁻¹ Валенционе истежуће вибрације –ОН група	3396	3385	3399	3398
3.000 – 2.800 cm ⁻¹ Валенционе истежуће вибрације –CH _n група	2959, 2921, 2869	2967, 2921, 2871	2968, 2926, 2868	2968, 2915, 2866
1.800 – 1.600 cm ⁻¹ Валенционе истежуће вибрације –C=O група	1717, 1606	1635 , 1616	1725, 1607	1648 , 1613,
1.600 – 1.200 cm ⁻¹ Валенционе истежуће C–C и деформационе –CH _n група	1508, 1459, 1374, 1296, 1244	1507, 1456, 1375, 1325 , 1246	1508, 1458, 1376, 1302, 1250	1505, 1453, 1377, 1323 , 1244
1.200 – 1.000 cm ⁻¹ Валенционе истежуће C–C и C–O вибрације	1045	1043, 1115	1032, 1103	1051, 1117 , 1143
1.000 – 600 cm ⁻¹ Деформационе –CH _n вибрације	831	831, 771 , 723	831	831, 764 , 720

На вишим вредностима таласних бројева (3.600 – 1.600) могу се уочити валенционе вибрације поларнијих група, док се на нижим вредностима (1.600 – 600) јављају деформационе траке. Како се са слика апсорпционих спектра и података у табели може уочити, у спектрима који припадају биокомпозитима појављују се нове траке које су означене масним и подвученим словима у табели. Обзиром да се ове траке спектра не појављују код чистих супстрата, њихово порекло се повезује са хитином као карактеристичном компонентом ћелијског зида мицелијума која се не налази у лигноцелулозном супстрату.

У опсегу валенционих вибрација карбонилне групе у спектрима биокомпозита заснованог на пшеничној слами и конопљи могу да се уоче траке на 1635, односно 1648 cm⁻¹, респективно, које могу да се припишу присуству амидне C=O групе пореклом из хитина или протеина који улазе у састав ћелијског зида гљива. У опсегу таласних бројева 1.600 – 1.200 cm⁻¹ могу да се уоче карактеристичне траке на око 1325 cm⁻¹ која припада амидној III вибрацији, такође пореклом из протеина аминокиселина или хитина или деформацији ОН групе пореклом из полисахарида.

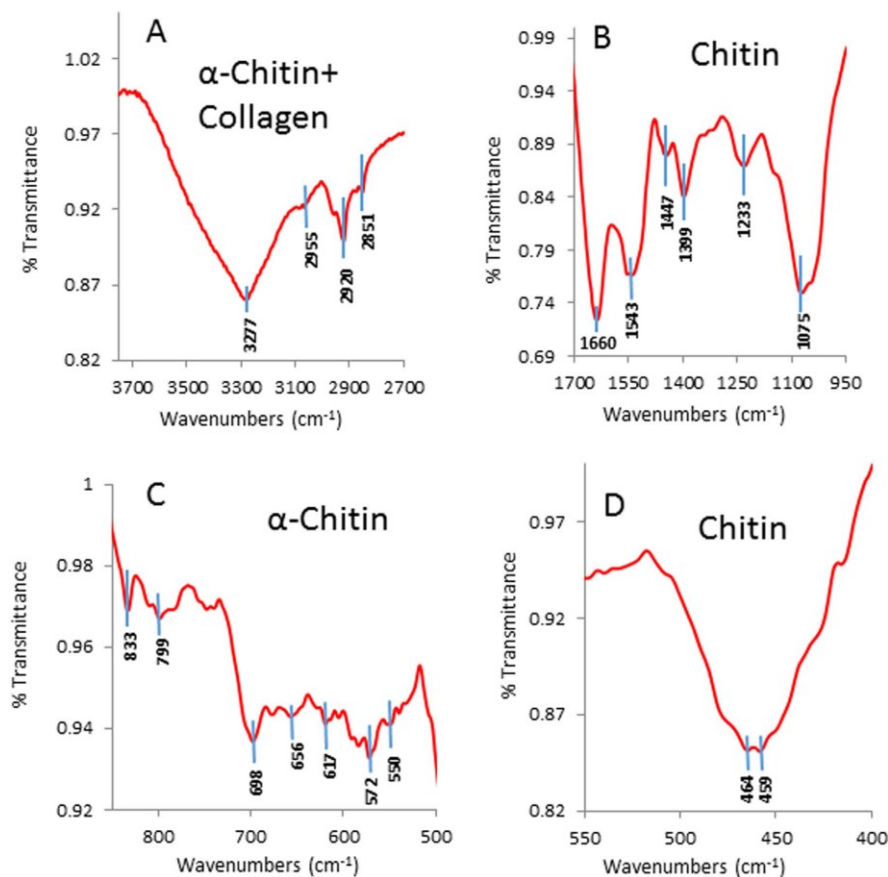
Траке разлике у спектрима биокомпозита на таласним бројевима око 1115, 1117 и 1143 могу да припадају α и β глукану пореклом из полисахарида ћелијског зида гљива или PO_2^- групи фосфолипида који представљају основу у цитоплазминој мембрани. Деформационе вибрације на око 770 и 720 cm^{-1} највероватније воде порекло од деформација ван равни NH и CH_n група хитина. Детаљније информације о карактеристичним тракама у описаних 6 опсега могуће је пронаћи у спектроскопској литератури (Cui et al., 2012; Guan et al., 2018; Haneef et al., 2017; Rahman and Halfar, 2015).

Уколико се на Сл. 3.15 посматрају апсорпциони спектри обе врсте чистог супстрата и биокомпозита, поред појављивања нових трака које су карактеристичне за мицелијум, може да се уочи смањење интензитета апсорбанце у одређеним деловима спектра. Очигледно смањење апсорбанце код спектра оба биокомпозита се уочава на таласним бројевима 831 и 833 cm^{-1} за пшеничну сламу и конопљу, респективно. Ови таласни бројеви су карактеристични за целулозу, а узроковани су симетричним β глукозидним везама у њеном молекулу. На таласним бројевима 1045 cm^{-1} за супстрат од пшеничне сламе и 1032 cm^{-1} за супстрат од конопље се уочава значајно смањење интензитета апсорбанце. Поменуте фреквенције су, такође, карактеристичне за целулозу, али и за угљене хидрате краћих ланаца попут глукозе и фруктозе који су главни чиниоци сахарозе коришћене приликом пастеризације супстрата. Смањење апсорбанце на овим таласним дужинама код биокомпозита се може објаснити утрешком полисахарида као енергената за потребе развоја мицелијума.

Карактеристичне траке апсорпционог спектра за протеине и лигнин се налазе на таласним бројевима 1.600 – 1.300 cm^{-1} , с тим да се лигнин налази ближе доњој вредности (1453 – 1508 cm^{-1}), а протеини ближе горњој вредности овог опсега. Опадање апсорбанце за биокомпозите на приближно 1.500 cm^{-1} објашњава се смањењем концентрације лигнина, а њен пораст на вредностима око 1.600 cm^{-1} може да се објасни порастом садржаја протеина које је мицелијум синтетисао у току разградње супстрата. Код чистих супстрата пшеничне сламе и конопље, на таласним бројевима 1720 и 1725 cm^{-1} , респективно, уочавају се апсорпционе траке које одговарају хемицелулозама, а које се не појављују у спектрима биокомпозита што може да се објасни разградњом хемицелулоза у процесу развоја мицелијума. Такође је дошло до очигледног смањења апсорбанце на тракама карактеристичним за хемицелулозе и које се налазе на око 1244/1246 cm^{-1} за чист супстрат пшеничне сламе и биокомпозит заснован на њој, као и на 1250/1244 cm^{-1} за конопљу и одговарајући биокомпозит.

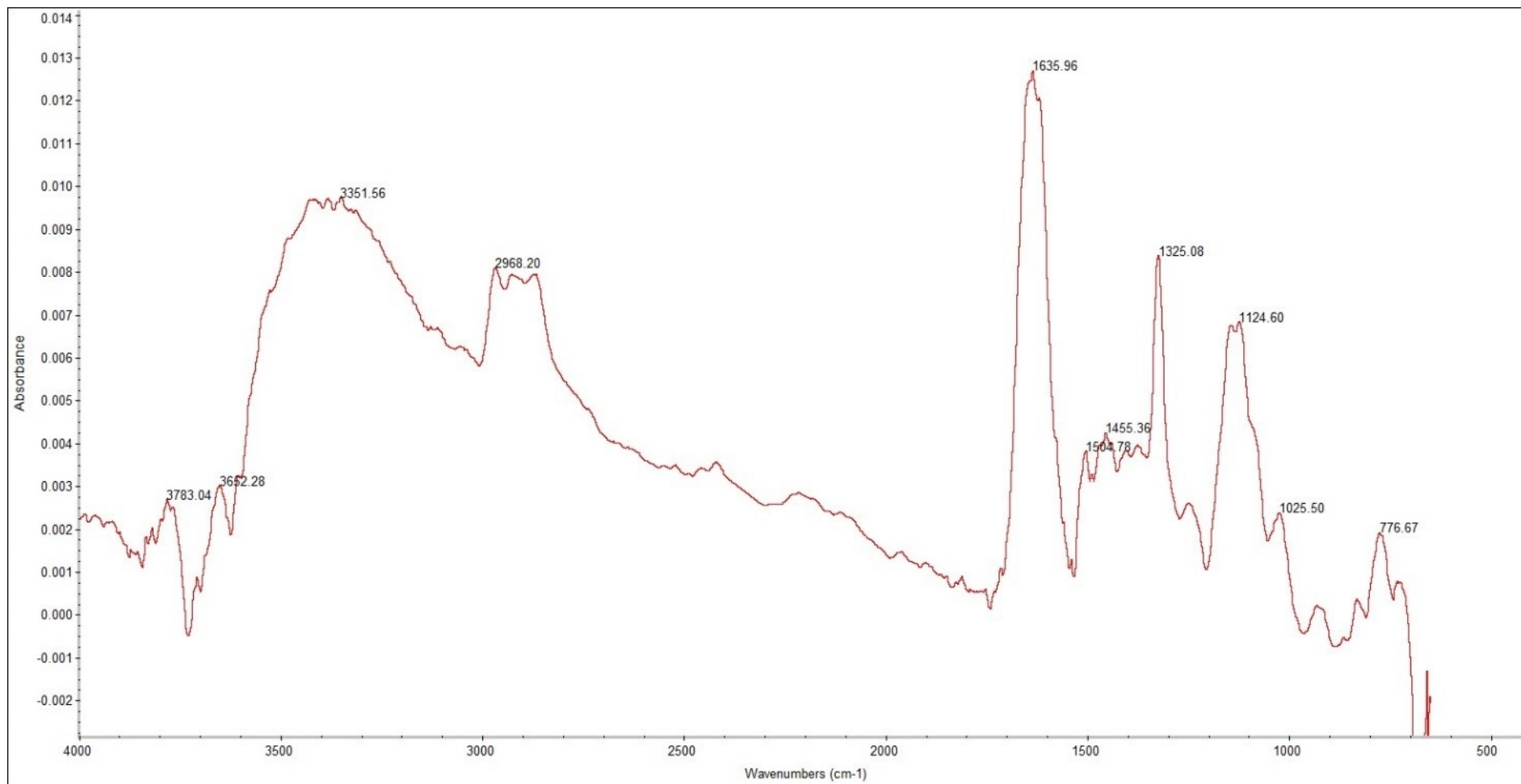
Најмање смањење апсорбанце уочава се на тракама у опсегу између 3.400 и 2.800 cm^{-1} што је карактеристичан опсег спектра за полисахариде и липиде, респективно. Код пшеничне сламе и конопље ови липиди представљају заштитни восак. Минорно смањење апсорбанце на фреквенцијама липида се тумачи великом концентрацијом полисахарида и протеина као примарног извора хране за мицелијум. Такође, у саставу ћелијског зида мицелијума, поред протеина налазе се и липиди (Haneef et al., 2017), те без детаљније карактеризације материјала није могуће утврдити да ли су липиди који доприносе измереним вредностима апсорбанце пореклом из супстрата или мицелијума. Сматра се да карактеристична трака на таласним бројевима око 3.400 cm^{-1} представља истежуће вибрације $-OH$ групе у молекулима полисахарида који улазе у састав ћелијског зида биљака. Пшенична слама и конопља богати су полисахаридима као основним градивним јединицама ћелијског зида. Разграђујући их, мицелијум ствара полисахариде који чине његове ћелијске зидове и који такође имају значајан број слободних $-OH$ група у ланцу

молекула. Иако је у току развоја мицелијума у биокомпозиту дошло до делимичне разградње полисахарида ћелијског зида супстрата, синтетисани су нови ланци у ћелијској структури мицелијума. Због тога се верује да се у току анализе супстрата и биокомпозита не може уочити разлика у овом делу спектра. Такође, уколико материјал који се испитује садржи воду и у зависности од врсте везе коју она остварује, вода може да се очитава при овим таласним бројевима. Обзиром да су и супстрат и мицелијум осушени приликом припреме на приближно исту вредност релативне влажности материјала, делимични допринос овом делу спектра може да се додели и уделу воде у материјалу. За део спектра између 3.400 и 2.800 cm^{-1} карактеристично је да и супстрати и мицелијум у ћелијској грађи имају сличне компоненте које доприносе апсорбанци на овим таласним бројевима и да је мала разлика између супстрата и биокомпозита. Овако мала разлика може да се објасни делимичном деградацијом компоненти у супстрату, а такође истовременом синтезом сличних компоненти од стране мицелијума.



Сл. 3.16 Карактеристичне траке трансмитансе за хитин (Rahman and Halfar, 2015)

Уколико се од спектра биокомпозита одузме спектар чистог супстрата, као резултат ће остати спектар који садржи горе поменуте карактеристичне траке за хитин Сл. 3.17. Хемијском карактеризацијом биокомпозита помоћу ATR-FTIR спектроскопије утврђено је да су траке апсорбанце инфрацрвеног спектра код биокомпозита карактеристичне за лигноцелулозне материјале, што је индикатор да не постоји значајна разлика између биокомпозита и примењених супстрата. Модификације којима је мицелијум допринео односе се на поједине траке при нижим вредностима таласних бројева инфрацрвеног спектра и карактеристичне су за уопштenu грађу ћелијског зида гљива. Такође, утврђено смањење апсорбанце у спектрима је у складу са смањењем концентрације појединих компоненти из супстрата и последичним развојем мицелијума.

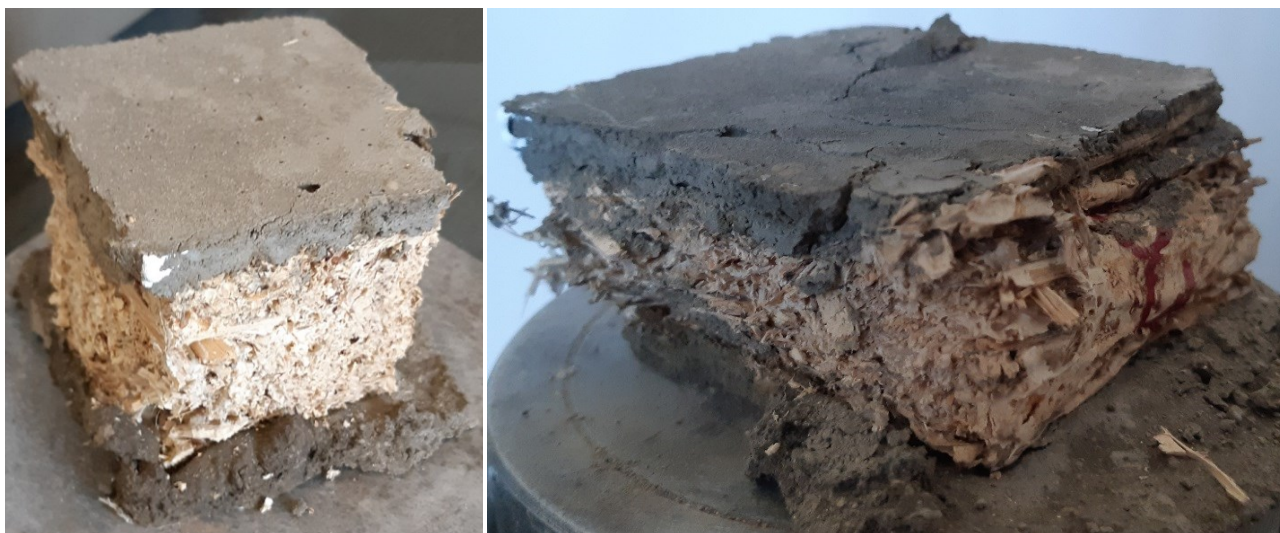


Сл. 3.17: Резултујући спектар након што се од спектра биокомпозита одузме спектар чистог супстрата (биокомпозит са пшеничном сламом)

Испитивање механичких својстава

Одређеном броју узорака су контактне површине прекривене слојем цементног малтера, односно гипсом. Резултати испитивања чврстоће при притиску показали су да је биокомпозит мек и еластичан, те да нема опасности од ове појаве. Нису уочене значајније разлике у чврстоћи при притиску код узорака којима је контактна површина припремљена цементним малтером и узорака на чијим површинама није изведена оваква припрема.

Напон при притиску при деформацији од 10 % ($\sigma_{p,10\%}$) – материјал изложен притиску у правцу управном на влакна биокомпозита трпи велике деформације без знакова лома, чак и у зони пластичних деформација. Ово је разлог због чега није било могуће утврдити граничну вредност чврстоће при притиску (Сл. 3.18). Материјал није показивао знакове лома, те је тест притисне чврстоће прекинут након што је узорак претрпео деформације од 55 % у односу на почетну вредност висине. Вредност силе забележене у моменту прекида теста износила је 3,6 kN, односно, измерена вредност напона при притиску износила је око 1 МПа (узорак са конопљом). С обзиром на понашање материјала са конопљом и сличности обе врсте биокомпозита, ни узорци са пшеничном сламом нису испитани на граничне вредности чврстоће при притиску. Узорци оптерећени управно на правац распрострањања влакана тестирани су до 10 % деформације од почетне висине узорка.



Сл. 3.18: Узорак биокомпозита са конопљом оптерећеног при притиску у правцу управном на простирање влакана пре (слика лево) и након теста (слика десно)

Вредности напона при притиску до 10 % деформације материјала управно на правац пружања влакана износе од 0,02 до 0,03 МПа за биокомпозит са пшеничном сламом и око 0,05 МПа за биокомпозит са конопљом. За исту деформацију биокомпозита са конопљом потребан је 1,7 до 2,5 пута већи напон у односу на биокомпозит са пшеничном сламом. Овакве вредности су очекиване с обзиром на то да конопља као сировина има већу чврстоћу од пшеничне сламе захваљујући дрвенастом поздеру.

Узорци оптерећени у правцу простирања влакана тестирани су до граничних вредности притисне чврстоће. За разлику од узорака оптерећених управно на правац простирања влакана, исказали су знакове лома након којих је тест прекинут (Сл. 3.19). Обе врсте биокомпозита понашале су се слично при оптерећењу у правцу простирања влакана са разликом у граничним вредностима чврстоће материјала. Граничне

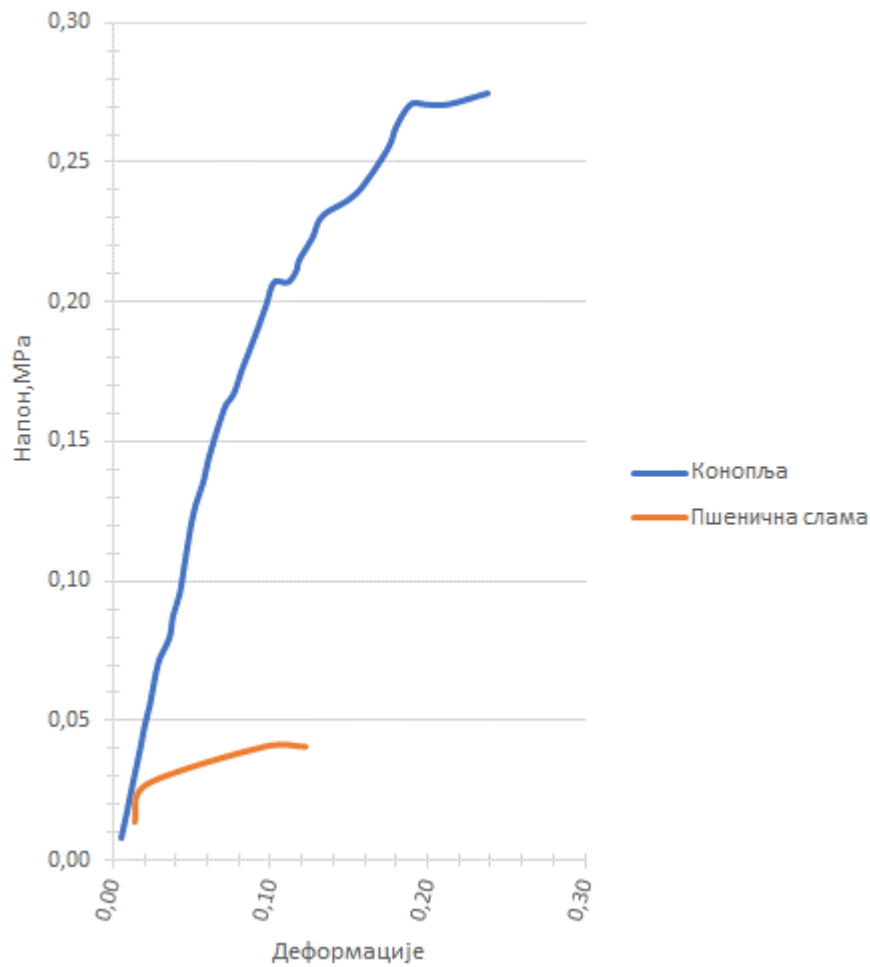
вредности чврстоћа при притиску у овом правцу износе око 0,04 МПа за биокомпозит са пшеничном сламом и од 0,16 до 0,28 МПа за биокомпозит са конопљом.



Сл. 3.19: Приказ узорка биокомпозита са конопљом оптерећеног при притиску у правцу простирања влакана пре (слика лево) и након теста (слика десно)

Резултати теста показали су да биокомпозит са конопљом има 7 пута већу вредност граничне чврстоће при притиску од биокомпозита са пшеничном сламом, оптерећеног у истом правцу. За разлику од чврстоће у правцу управном на влакна, код овог оптерећења постоји значајна разлика у граничним вредностима чврстоће у корист биокомпозита са конопљом. Овакве разлике могу се објаснити грубљом површином конопље због чега је и површина контакта између мицелијума и конопље повећана. Осим тога, конопља је у фази припреме материјала оцеђена до повољнијег садржаја влаге неопходне за гајење мицелијума буковаче. Обзиром да са овог аспекта конопља обезбеђује боље услове за гајење мицелијума, сматра се да је сходно томе створен већи број хифа који повезује индивидуална влакна материјала. Другим речима, са овог аспекта конопља представља бољи супстрат за узгој мицелијума, што резултује већим чврстоћама у односу на пшеничну сламу.

Испитивање чврстоће у правцу простирања влакана испитивано је до слома узорака. Том приликом постигнуте су веће вредности силе којом се делује на материјал и тест је временски трајао дуже због чега је било могуће израдити радне дијаграме материјала. Упоредни приказ радних дијаграма материјала приказан је на Сл. 3.20.



Сл. 3.20: Радни дијаграм напон/деформација биокompatита при оптерећењу узорка при притиску у правцу простирања влакана

Чврстоћа при савијању (f_m) – извођена је на узорцима који су исецани на потребну димензију из произведених плоча. Након аклиматизације на услове средине узорци су подвргнути тесту. Тест је извођен до граничних вредности чврстоће при савијању, односно до лома узорка. Због оптерећења којем се узорци излажу у фази инкубације, већина влакана је оријентисана у хоризонталној равни, те је сила којом се узорци испитују деловала управно на правац пружања влакана. Сви узорци су показали слично понашање приликом оптерећења и лома без обзира на врсту биомасе од које су израђени. Пре лома се може чути звук пуцања индивидуалних влакана пшеничне сламе и конопље, након чега долази до изненадног лома. Лом материјала је крт, уз карактеристичну појаву пукотине са доње стране, по целој ширини узорка (Сл. 3.21). Приликом сламања не долази до потпуног одвајања половина узорка због присуства великог броја влакана у унутрашњим слојевима (нарочито при горњој површини узорка) која и даље обављају своју функцију и што је карактеристично за влакнасте материјале. Граничне вредности чврстоће материјала утврђене приликом испитивања износе од 0,05 до 0,13 МПа за биокompatит са пшеничном сламом и од 0,096 до 0,22 МПа за биокompatит са конопљом. Биокompatит са конопљом има од 1,6 до 1,9 пута већу чврстоћу при савијању од биокompatита са пшеничном сламом. Очекивано је да биокompatит са конопљом исказује веће вредности чврстоће при савијању због бољих карактеристика конопље као сировине, а измерене вредности су у складу са разликом у вредностима код чврстоће при притиску при 10 % деформације.



Сл. 3.21: Приказ лома приликом испитивања чврстоће при савијању биокompозита са конопљом

С обзиром да су узорци за испитивање чврстоће исецани из већих плоча на потребне димензије, постоји могућност да је приликом сечења дошло до слабљења појединих веза у материјалу. Додатно, присуство спољашњег омотача мицелијума по површини узорка повољно утиче на његова механичка својства. Исецањем узорака се губи предност присуства оваквог омотача због чега се сматра да су вредности утврђене у току испитивања за 10 до 20 % мање у односу на вредности узорака који би били произведени у димензијама захтеваним стандардима. Резултати испитивања чврстоће при притиску и при савијању материјала су конзистентни што указује да описана методологија производње биокompозитних плоча резултује материјалом са сличним механичким својствима, односно, узорци су са аспекта механичких својстава релативно хомогени.

У односу на биокompозит који су испитивали Holt et al. (2012) узорци материјала испитани у оквиру овог рада показују значајно боља механичка својства. Чврстоћа при савијању је 5 до 8,5 пута већа, а чврстоћа при притиску у оквиру њихових резултата није јасно дефинисана и није могуће извести директно поређење ова два материјала. Врло је важно напоменути да су Holt et al. утврђивали поменуте вредности према ASTM C165 стандарду. У њиховом истраживању није наведено према којим условима су извођена испитивања биокompозита (до 10 %, до 25 % деформације, или до жељене деформације која практично није ограничена). Вредности чврстоће при савијању код биокompозита испитаног у оквиру овог рада више су од вредности које су Holt et al. утврдили за свој материјал због дужег периода инкубације и већег броја хифа формираних у супстрату. Додатно, Holt et al. су користили мицелијум друге врсте гљиве, друге супstrate, а такође је примењен и другачији третман материјала након фазе инкубације. Услед ових разлика и великог броја непознатих параметара није могуће утврдити тачне разлоге за уочене разлике у материјалу.

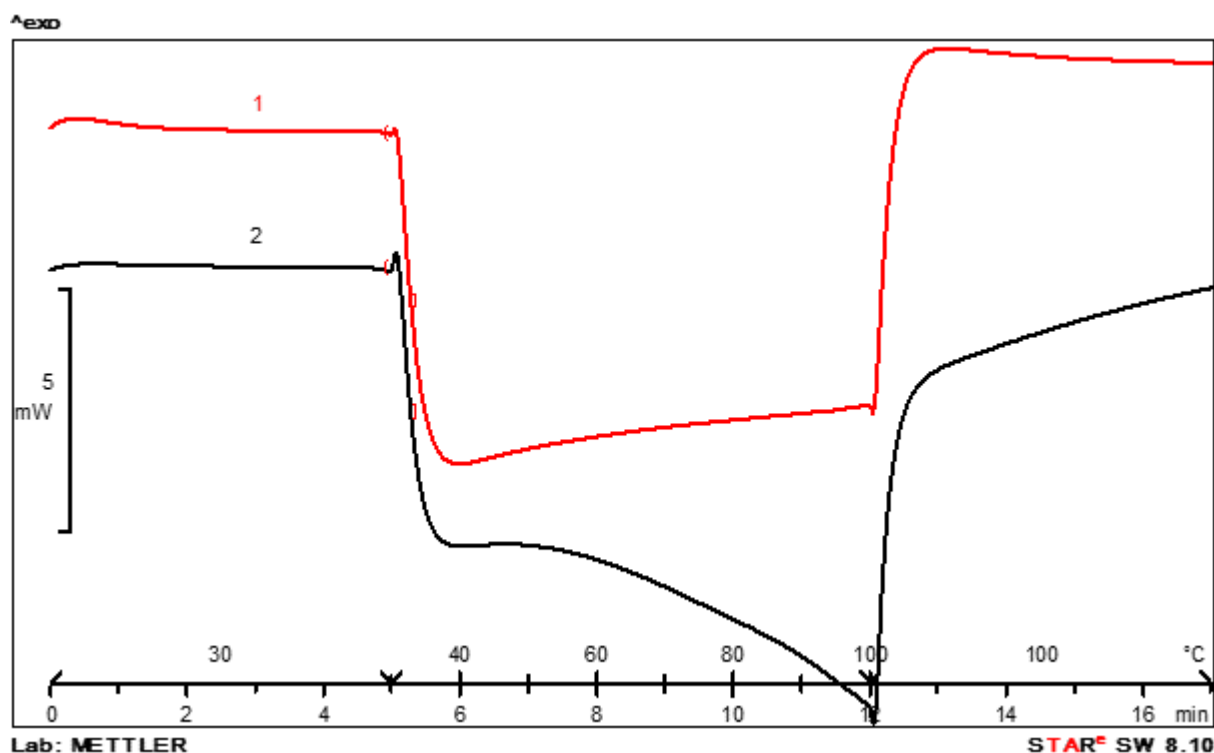
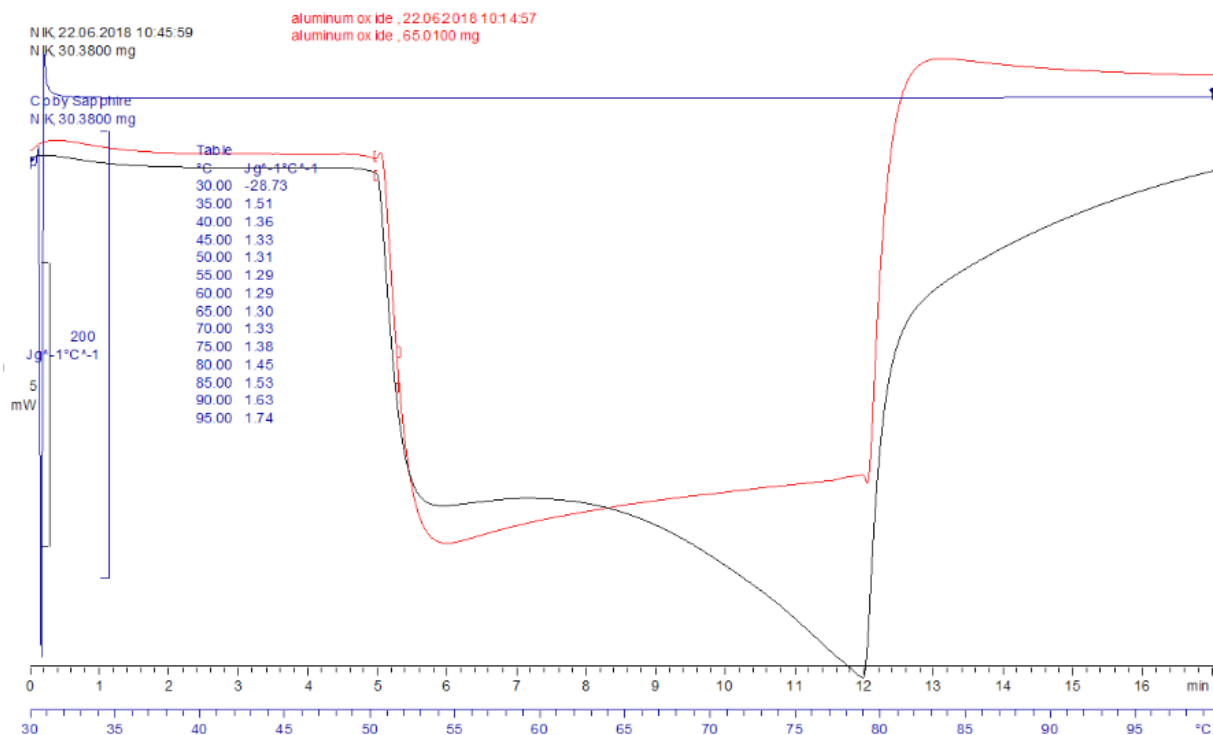
Интересантно је да биокompозит испитан у оквиру овог рада у поређењу са резултатима испитивања које су објавили Yang et al. (2017) има за 1,1 до 2 пута мању запреминску масу, за 11 до 30 пута мању чврстоћу при притиску и драстично ниже вредности модула еластичности (видети Таб. 1.6, или Таб. 3.6). Већина узорака из њиховог истраживања има врло сличне вредности као и испитивани биокompозитни ТИ материјал, међутим једна серија узорака коју су произвели имала је значајно боља механичка својства. У тој серији, аутори су користили другачији метод инкубације који је резултовао значајно већим бројем остварених веза између мицелијума и супстрата. Осим тога, период инкубације је продужен на 6 недеља и испитивања су изведена на

узорцима који су произведени у облику и димензијама потребним за испитивање (без сечења).

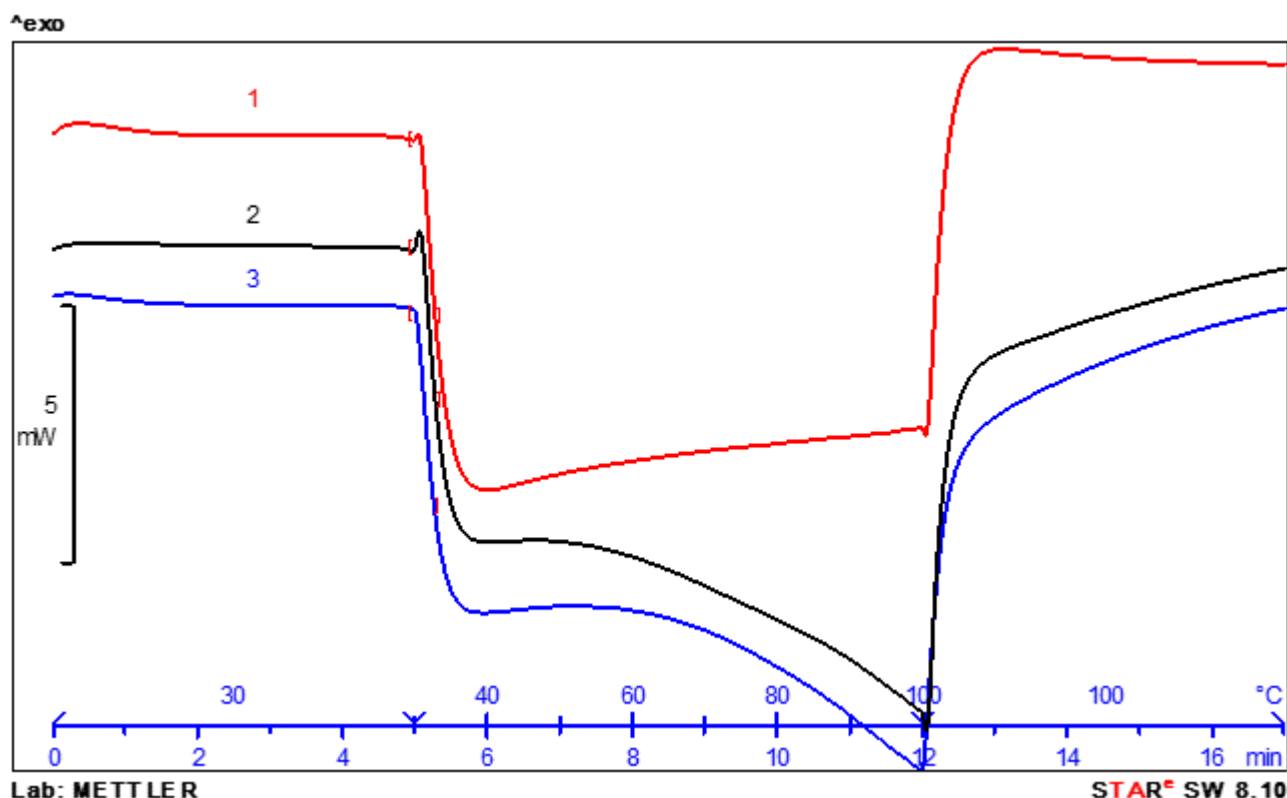
С обзиром да се испитане врсте биокомпозита разликују по механичким својствима, њихова примена у објекту има различит потенцијал, међутим друге карактеристике материјала ограничавају начин његове примене. Биокомпозит са конопљом има својства врло слична EPS-у, што имплицира да се може примењивати на сличан начин у објекту. Материјал је довољно чврст да се може постављати као спољна композитна ТИ (DEMIT фасада). Међутим, приликом испитивања чврстоће при притиску, приликом малтерисања контактних површина, утврђено је да површина биокомпозита није компатибилна са цементним малтером. Узорци су сувише брзо упијали воду из малтера који се веома лако крунио и одвајао од њихове површине. Биокомпозит са конопљом је на основу механичких својстава подједнако погодан и за уградњу као испуна у лакој конструкцији и кровној конструкцији, али због ниске вредности притисне чврстоће није погодан за уградњу као подна ТИ. Биокомпозит са пшеничном сламом са има слабија механичка својства због чега његова примена у оквиру спољне композитне и подне ТИ није могућа. На основу изнесеног, најпогоднија примена биокомпозита била би у виду испуне у зидовима лаке, дрвене конструкције где материјал није изложен већим механичким оптерећењима. Влакна супстрата у биокомпозиту већински су оријентисана у равни због чега он исказује анизотропно понашање које је нарочито изражено код механичких својстава. Услед наметнутог притиска у току фазе инкубације влакна супстрата изгубила су кружни попречни пресек. Ова појава је у много мањем степену изражена код конопље него што је то случај са код пшеничне сламе чија влакна су већином попримила плочасти попречни пресек. Губитак попречног пресека одражава се на могућност влакана да се одупиру дејству механичких сила, због чега је биокомпозит са конопљом показао боља механичка својства од биокомпозита са пшеничном сламом.

Испитивање хигротермичких својстава

Специфични топлотни капацитет (c_p) – испитан је при температурном опсегу од 35 до 95 °С. Вредности испитаних параметара су измерени у $J(g\ ^\circ C)^{-1}$ (како је и приказано на Сл. 3.22) и накнадно прерачунати у $J(kg\ K)^{-1}$. Овом приликом измерене су вредности специфичног топлотног капацитета у опсегу од 1.300 до 1.740 $J(kg\ K)^{-1}$ за биокомпозит са пшеничном сламом и 1.300 $J(kg\ K)^{-1}$ до 1.710 $J(kg\ K)^{-1}$ за биокомпозит са конопљом. Просечна вредност измереног специфичног топлотног капацитета за биокомпозите износи 1.420 $J(kg\ K)^{-1}$ и 1.410 $J(kg\ K)^{-1}$, респективно. Приликом испитивања специфичног топлотног капацитета нису утврђене значајније разлике између биокомпозита. Оба материјала имају веома блиске вредности у наведеном температурном опсегу и понашају се на скоро идентичан начин приликом загревања, због чега су криве приказане на Сл. 3.23 вертикално смакнуте како би се лакше разликовале.



Сл. 3.22: Резултати испитивања специфичног топлотног капацитета биокомпозита са пшеничном сламом (график означен црном бојом горе) и биокомпозита са конопљом (график означен црном бојом доле). Црвеном бојом је на графицима означен референтни материјал, алуминијум-оксид.



Сл. 3.23: Упоредни приказ специфичног топлотног капацитета референтног материјала – алуминијум-оксида (1), биокомпозита са конопљом (2) и биокомпозита са пшеничном сламом (3)

Таб. 3.3: Табеларне вредности специфичног топлотног капацитета биокомпозита у одабраном температурном опсегу

Специфични топлотни капацитет $J(kg K)^{-1}$	Температура $^{\circ}C$												
	35	40	45	50	55	60	65	70	75	80	85	90	95
Биокомпозит са ПС	1.510	1.360	1.330	1.310	1.290	1.290	1.300	1.330	1.380	1.450	1.530	1.630	1.740
Биокомпозит са К	1.360	1.310	1.280	1.270	1.270	1.300	1.330	1.380	1.430	1.490	1.540	1.610	1.710

ПС – пшенична слама
 К – конопља

Измерене вредности се крећу у опсегу за лигноцелулозне материјале и могу се упоредити са целулозом ($1.300 J(kg K)^{-1}$), памуком ($1.300 J(kg K)^{-1}$), хитином ($1.700 J(kg K)^{-1}$), експандираном плутом ($1.560 J(kg K)^{-1}$), плочама од дрвене вуне ($1.470 J(kg K)^{-1}$), овчијом вуном ($1.680 J(kg K)^{-1}$), полистиреном ($1.340 J(kg K)^{-1}$) и полиуретаном ($1.400 J(kg K)^{-1}$) (Kozic et al., 1979; Radeka, 2009; Wertz et al., 2010; Zhang et al., 2011). Сви поменути материјали су органског порекла због чега имају веће вредности специфичног топлотног капацитета. Овакви резултати нису неочекивани с обзиром на то да у саставу биокомпозита највише учествују целулоза и у мањој мери хитин.

Коефицијент топлотне проводљивости (λ) – резултати испитивања приказани су у Таб. 3.4. Ове вредности представљају средње вредности испитаног параметра утврђених на основу 10 узастопних понављања теста за сваки узорак биокомпозита.

Резултати теста указују да материјал има врло повољне вредности коефицијента топлотне проводљивости и да се на основу њих може сврстати у праве ТИ материјале.

Таб. 3.4: Просечне вредности коефицијента топлотне проводљивости и запреминске масе узорка

Ознака Узорка	Пшенична слама		Пшенична слама након 15 дана		Конопља		Конопља након 15 дана	
	П1	П2	П1	П2	К1	К2	К1	К2
Димензије узорка, mm	500 x 500							
Дебљина узорка, mm	46,4	46,6	46,3	46,3	45,1	41,4	44,3	41,7
Маса узорка, g	1.615	1.600	1.600	1.600	1.550	1.475	1.550	1.450
Запреминска маса узорка, kg m ⁻³	139,13	139,37	138,35	138,35	137,58	142,53	140,04	143,84
Коефицијент топлотне проводљивости, W(m K) ⁻¹	0,046	0,047	0,047	0,047	0,049	0,048	0,049	0,049

Иако постоје значајне морфолошке и физичко-хемијске разлике између пшеничне сламе и конопље, када је у питању коефицијент топлотне проводљивости и запреминска маса биокомпозита, нису уочене значајније међусобне разлике између узорка. Коефицијент топлотне проводљивости се између ове две врсте материјала разликује за 0,002 до 0,003 W(m K)⁻¹, односно, за 4 до 6 %. Запреминска маса узорка је приближно једнака без обзира на врсту биокомпозита. Разлика у запреминској маси износи до 4 %. Вредности које су израчунате на основу узорка 330 x 220 mm имале су разлику од 7 до 11 %. Из табеле изнад се може уочити да су поједини узорци након одређеног периода прилагођавања успоставили равнотежу са средином што се незнатно одразило на вредности запреминске масе узорка (до 1,5 %) и на коефицијент топлотне проводљивости биокомпозита. С обзиром да се биокомпозит заснива на лигноцелулозним материјалима чије се вредности коефицијента топлотне проводљивости у литератури крећу и до 0,060 W(m K)⁻¹, измерене вредности су ниже од очекиваних. Вредности коефицијента топлотне проводљивости код биокомпозита су више у односу на класичне ТИ материјале попут минералних вуна, XPS, PU, али су упоредиве са горњим вредностима EPS-а. Даље, биокомпозит је показао значајно боље резултате од појединих термоизолационих материјала заснованих на природним сировинама (Таролит плоче, тршчане плоче) и појединих материјала минералног порекла (перлитни малтер, гас бетонски елементи и сл). Према измереним параметрима, биокомпозит је најсличнији плочама од експандиране плуте. Разлике између најчешће употребљаваних ТИ материјала и биокомпозита су приказане у Таб. 3.6. Запреминска маса биокомпозита има важну улогу, нарочито код топлотне стабилности конструкције при чему материјали веће запреминске масе имају већу топлотну инерцију, а самим тим и бољу топлотну стабилност. Запреминска маса биокомпозита већа је у односу на већину других ТИ материјала (и до 5 пута већа у односу на EPS).

У поређењу са сличним биокомпозитима страних аутора, утврђено је да су измерене вредности коефицијента топлотне проводљивости ниже од вредности које су утврдили Yang et al. (2017). Обзиром да биокомпозит има нешто мању вредност запреминске масе од биокомпозита поменутих аутора утврђени резултати су у складу са њиховим истраживањима. Holt et al. (2012) су за свој биокомпозитни материјал утврдили чак двоструко више вредности коефицијента топлотне проводљивости у односу на биокомпозит и вредности које су утврдили Yang et al. за свој биокомпозит. Имајући у виду да Holt et al. нису наводили услове испитивања овог параметра, услед

великог броја непознатих параметара није могуће извести равноправно поређење материјала.

Фактор отпора дифузији водене паре (μ) – резултати испитивања за испитане биокомпозите приказани су у Таб. 3.5.

Таб. 3.5: Резултати испитивања фактора отпора дифузији водене паре за биокомпозит према EN 12086 стандарду

	Просечна вредност фактора отпора дифузији водене паре (μ)
Биокомпозит са пшеничном сламом	3,80 ± 0,06
Биокомпозит са конопљом	3,31 ± 0,02

Биокомпозити су испитани само при тесту суве шоље због високих вредности релативне влажности услова средине које остварује натријум-дихромат. Висока вредност релативне влажности код биокомпозита изазива појаву плесни на површини узорака, што их дисквалификује за примену при наведеним условима и због чега је избегнуто испитивање при сету услова Б. Биокомпозити имају 3,8 и 3,31 пута већи отпор дифузији водене паре него што је то случај код слоја ваздуха дебљине 1 m. Резултати теста указују да биокомпозити добро пропуштају водену пару што је индикатор велике отворене порозности материјала која је условљена морфолошким својствима лигноцелулозних сировина. Постоји међусобна разлика од око 13 % у утврђеним вредностима које су такође последица морфолошких својстава биомасе, али и структуре биокомпозита. Услед губитка цилиндричног попречног пресека код влакана пшеничне сламе, долази до смањења великих пора кроз које водена пара може лако да прође. Самим тим се повећава и фактор отпора дифузији водене паре. Код биокомпозита са конопљом случај губитка цилиндричног попречног пресека влакана конопље није толико изражен због дрвенасте структуре поздера који је очувао структурни интегритет под притиском. Овим је олакшан пролаз водене паре кроз велике поре у централном делу поздера што се одражава и на фактор отпора дифузији водене паре материјала. Утврђене вредности су повољније него код појединих лигноцелулозних ТИ материјала које се уопштено крећу од 2 (плоче од прошивене трске) па до 10 (експандирана плута). Приликом извођења теста, утврђено је одређено кашњење у одзиву материјала на пролаз водене паре до успостављања стационарних услова пролаза водене паре. Ова појава може да се објасни великом хигроскопношћу материјала и афинитетом целулозе према води.

Конвенционални ТИ материјали засновани на фосилним сировинама имају знатно веће вредности отпора дифузији водене паре. Ово је последица велике порозности материјала затвореног типа и знатно дуже путање или потпуне спречености кретања водене паре кроз материјал. Због отежаног проласка и задржавања водене паре у унутрашњости објекта, значајно се повећава вероватноћа њене кондензације и појаве раста микроорганизама на унутрашњим површинама зидова у току зимског периода. Због ниских вредности фактора отпора дифузији водене паре, биокомпозит неће задржавати водену пару у просторијама и тиме ће спречити орошавање потхлађених унутрашњих површина омотача и појаву раста нежељених микроорганизама.

Термичка стабилност (DSC–TGA) – испитивање је изведено са циљем да се утврди температура на којој, током загревања у пиролитичким условима, почиње разградња ТИ материјала са структуром комплексног композитног материјала. Термички ефекти који настају одражавају састав и интеракцију биополимера који улазе у састав гљиве и супстрата као и услова у којим је формиран ТИ материјал.

Узорци анализирани у истраживању настали су у процесу раста гљиве на супстратима заснованим на пшеничној слами и конопљи. Гљива у току свог развоја лучи ензиме у циљу разградње наведених супстрата како би могла да их користи за исхрану. Неки од тих ензима садрже пероксидазе које имају способност да разраде чак и лигнин. Гљива за свој раст и развој користила је горе наведене биополимере, тако да се њихова количина са временом смањивала. По завршетку развоја гљиве и њеним угинућем, поред наведених биополимера у структури ТИ материјала остали су и протеини и липиди.

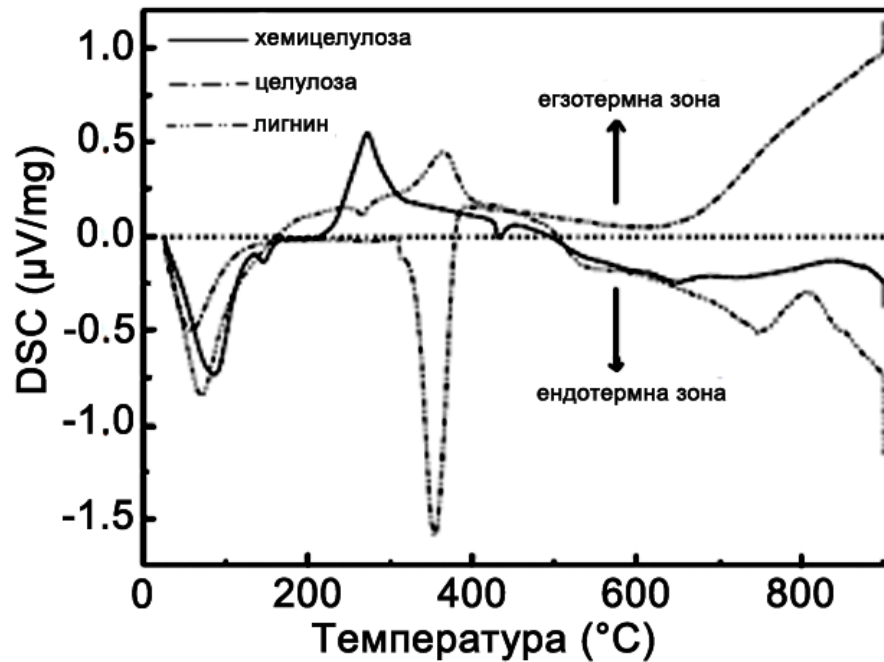
Као и све биљне масе, пшенична слама и конопља примарно су састављене од целулозе, хемицелулозе и лигнина уз додатак мале количине пектина, протеина и неорганских материја које након термичког третмана дају пепео. Током термичке анализе у атмосфери инертног гаса – пиролиза, ове три врсте биополимера пролазе кроз фазе дехидратације, деполимеризације, фрагментације, реаранжирања структурних јединица, кондензације и карбонизације. При загревању наведени биополимери се понашају веома различито. Уобичајено је да се у температурном опсегу од 150 до 200 °C из материјала издваја везана влага, након чега започиње термичка декомпозиција главних градивних компоненти и која се завршава између 500 и 700 °C. Процеси деградације материјала који се одвијају приликом пиролизе захтевају унос топлотне енергије због ендотермне природе хемијских реакција. На температурама до приближно 350 °C главне реакције представљају дехидрација, декарбонилација и декарбоксилација које ослобађају воду, угљен-моноксид и угљен-диоксид из материјала, респективно.

Хемицелулоза се приликом пиролизе по карактеру разграђује егзотермном реакцијом праћеном губитком масе. За прекидање веза структурних јединица у бочним низовима је потребна мања енергија активације, због чега је и почетна температура њихове деградације релативно ниска. У раду (Quan et al., 2016) наводи се да хемицелулоза има два егзотермна пика. Пик на 270 °C означава кидање гликозидних веза између структурних јединица ксилана као и разградњу веза у бочним ланцима; на температури од 320 °C разграђују се ксилани. Према истраживањима објављеним у раду (Yang et al., 2007), хемицелулоза има аморфну структуру састављену од различитих мономера. Структура је веома разграната, а структурне елементе који се налазе у том делу веома је лако одвојити од главног ланца и термички деградирати у испарљиве материје попут CO, CO₂, неких угљоводоника и др. чак и при ниским температурама. Хемицелулоза се лако разлаже у температурном интервалу 220 – 320 °C, што се огледа појавом егзотермног пика на графику (Сл. 3.24).

Целулоза кроз термичку декомпозицију пролази у температурном интервалу 260 – 410 °C, што се огледа кроз ендотермни пик на графику (Сл. 3.24). Максималан губитак масе забележен је при температури 375 °C. За разлику од хемицелулозе, целулоза је линијски полимер без бочних структурних јединица. Овакав тип структуре има већу правилност кристалне решетке и јаке интра и интермолекуларне водоничне везе, те је термичка стабилност целулозе већа него код хемицелулозе (Wang et al., 2016).

Лигнин садржи мноштво ароматичних прстенова са великим бројем споредних ланаца што чини интрамолекуларне везе јачим и отпорнијим у широком опсегу температура. Отуда се деградација лигнина одвија на температурама од 150 до 600 °C и што је представљено егзотермним пиком на Сл. 3.24. Од три главна биополимера у биљкама, лигнин је термички најстабилнији и најтеже га је разградити. Термичка декомпозиција лигнина одвија се до 600 °C са веома малим губитком масе,

што је последица његове комплексне структуре. Остатак при термичкој декомпозицији лигнина је значајан због јаких попречних веза ароматичних структурних јединица.



Сл. 3.24 Уопштени DSC дијаграм хемицелулозе, целулозе и лигнина (Yang et al., 2007, делимично прилагођено)

Ball и др. (Ball et al., 2004) истакли су да су процеси пиролизе који се завршавају са стварањем чађи егзотермни, док су процеси ко којих се издвајају испарљиве компоненте ендотермни. Зато се код хемицелулозе и лигнина јавља егзотермни пик уз стварање много већег остатка чврсте материје, док се код целулозе јавља ендотермни пик који води ка стварању мале количине чврсте материје.

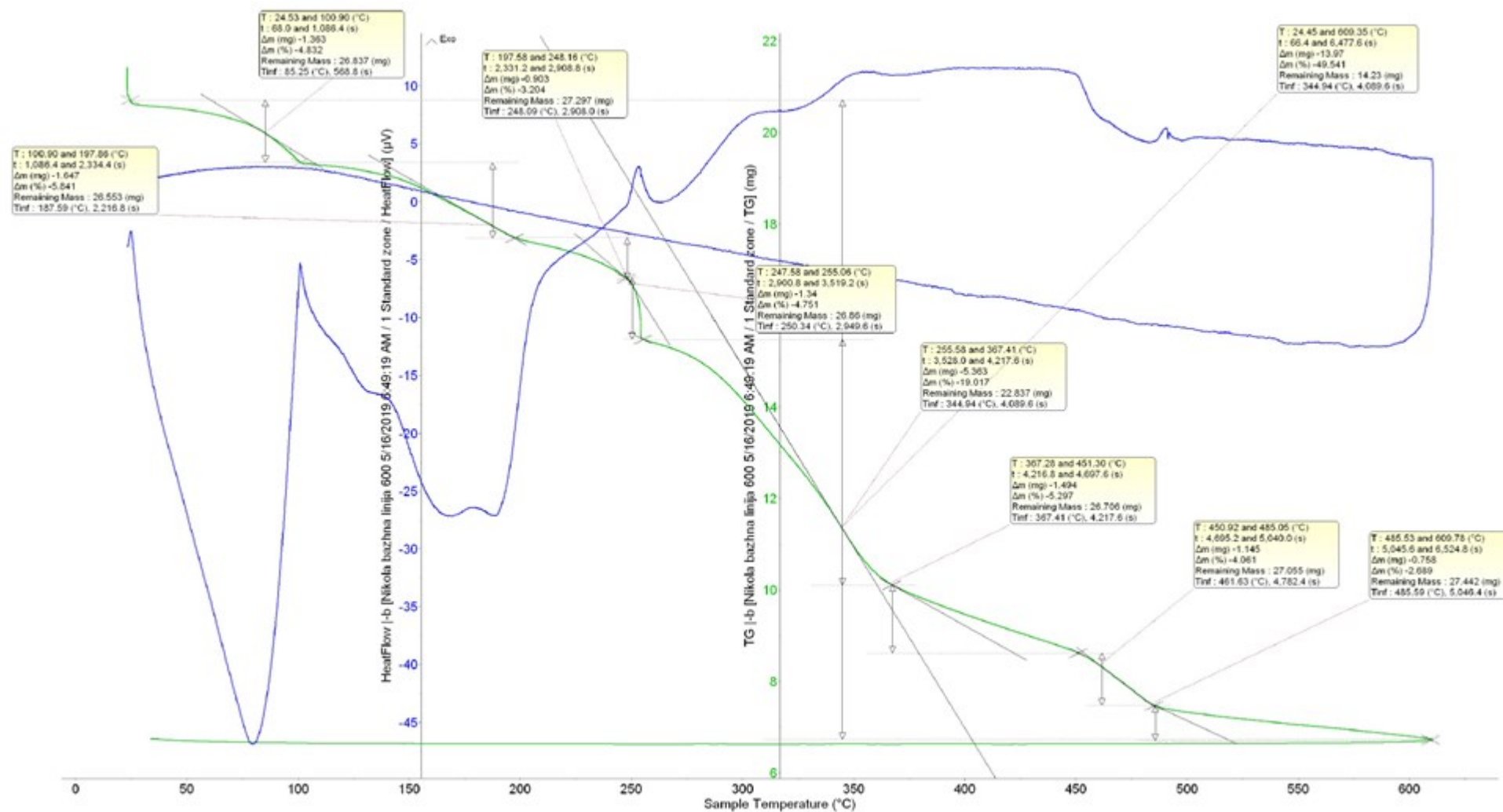
Екстраховани протеини (Wang et al., 2017) пиролитички се разлажу у температурном интервалу 300 – 500 °C. Према овом раду липиди се разграђују на око 353 °C, протеини на око 310 °C, а угљени хидрати на око 275 °C. Наведене температуре термичке декомпозиције утврђене су кроз TG–DTA анализе, док релевантни подаци за DSC анализу протеина гљиве нису утврђени.

Хитин има два ендотермна пика, при температурама 100 °C и у температурном опсегу 280 – 430 °C. Хитозан такође, има ендотермни пик на 100 °C, али и егзотермни пик у опсегу температура 270 – 360 °C. Деградација хитина почиње са цепањем ланаца и одвајањем фрагмената од главног или споредних ланаца и ослобађањем испарљивих материја (Wanjun et al., 2005). Хитин и хитозан током пиролизе показују ендотермни пик при температури 100 °C који је праћен губитком масе и који се доводи у везу са испаравањем воде присутне у узорку (Wanjun et al., 2005). Полисахариди обично имају велики афинитет према води а у чврстом стању ови макромолекули могу да имају дефектну структуру која може брзо да хидратише. Као што је познато хидратациона својства ових полисахарида зависе од примарне и супрамолекуларне структуре. Код хитина, молекули воде су везани за хидроксилне групе. Након деацетилације код хитозана се стварају нови хидрофилни центри, тј. амини, који могу да вежу много више молекула воде. На основу тога може да се закључи да пораст количине поларних група заједно са порастом количине аморфне зоне доводи до пораста капацитета везивања воде (Kittur et al., 2002). Понекад температура ендотермног пика на 100 °C при хлађењу може бити померена на већу вредност.

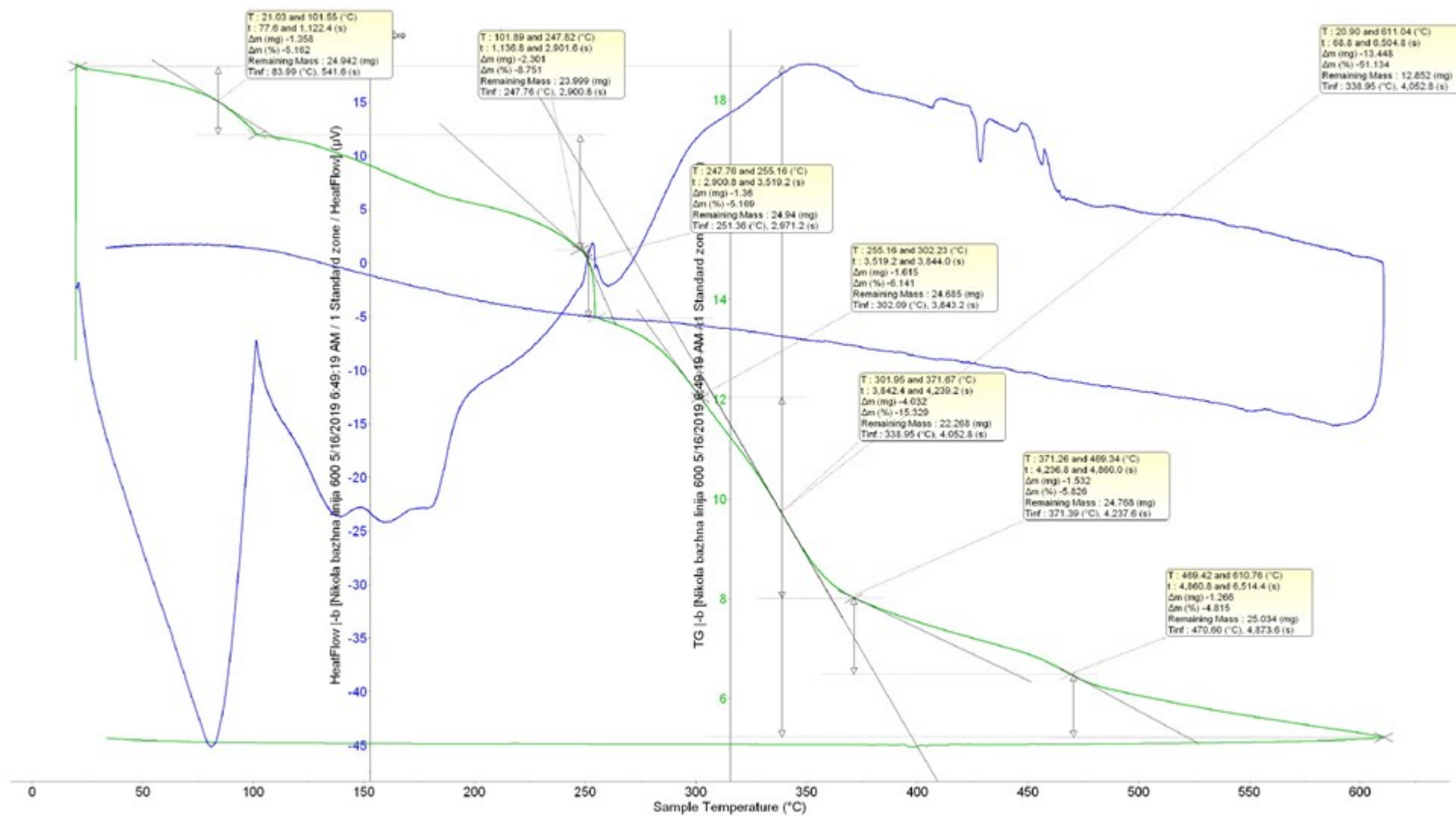
Широк ендотермни пик на 175 °C може да укаже на поновно испаравање воде. Ово се јавља услед поновног везивања воде која испари приликом хлађења за хидрофилне центре у молекулу. Други ендотермни феномен за хитин, у температурном опсегу 287 – 427 °C, доводи се у везу са деполимеризацијом хитина уз формирање испарљивих компоненти. Егзотермни пик код хитозана у интервалу 277 – 352 °C је највероватније повезан са умрежавањем продуката термичке декомпозиције хитозана. Температура која одговара максимуму егзотермног пика повезаног са губитком масе је умерена ка нижим вредностима у односу на вредност тог пика код хитина. Разлог за ову појаву је деацетилација при чему се степен кристаличности смањује, па је температура разградње нижа за хитозан у односу на хитин. Отуда је термичка стабилност хитозана мања него код хитина. Пошто је енергија везе C-O-C мања у односу на енергију C-C везе, највероватније да прекид креће од C-O-C веза као слабих места у структури хитина. Деполимеризација хитина у мономере креће од краја на којем се налазе радикали. Код хитина нема модификације бочних веза и ацетиленске везе у бочним нивовима стабилизоваће везе у његовим главним нивовима. Већа енергија активације и виша температура разлагања хитина указују да ацетиленска група у бочном низу утиче на стабилност главног ланца за који је повезана. Константна енергија активације указује да на сваком месту главни ланац има исту структуру и окружење. Хитин се може трансформисати у хитозан са хомогеном или хетерогеном алкалном N-деацетилацијом. Насупрот хитину, хитозан има модификоване везе у главном ланцу, стога постоји широк опсег енергија потребних за његову разградњу. Зато термичка разградња хитина представља једностепени процес, вероватно контролисан деполимеризацијом, док су термички феномени хитозана контролисани реакцијама попречног умрежавања које се дешавају током загревања.

Познато је да у току термичког третмана долази до интеракције гасова који се развијају и биополимера (Kittur et al., 2002; Wanjun et al., 2005). Стога је анализа дијаграма DSC–TGA комплексна и има за циљ да одреди температуру почетка термичке деградације биокompatитног материјала који је предмет овог истраживања, Сл. 3.25 и Сл. 3.26.

Анализом дијаграма представљених на Сл. 3.25 и Сл. 3.26 уочавају се веома сличне термичке промене ТИ материјала произведених коришћењем различитих супстрата за узгој гљиве. DSC анализа показује два ендотермна пика: на око 85 °C и широки ендотермни пик у интервалу 100 – 200 °C. Први ендотермни пик приписује се испаравању воде. Такође, поред испаравања воде, у овом интервалу температура се може јавити денатурација протеина, али се њен термички ефекат овде искључује. Разлог је што се процес денатурације већ десио у завршној фази припреме узорка ТИ материјала. Ендотермни феномен у области 100 – 200 °C могао се формирати као последица великог афинитета полисахарида који су саставни део целулозе, хитина и хитозана према води, дакле услед испаравања воде, али и због дехидратације унутрашњег ћелијског зида као и због делимичног разлагања биополимера. (Kittur et al., 2002; Wang et al., 2015)



Сл. 3.25: DSC–TGA анализа ТИ материјала заснованог на пшеничној слами као супстрату



Сл. 3.26: DSC–TGA анализа ТИ материјала заснованог на конопљи као супстрату

Велика структурна комплексност довела је до тога да не постоје јасно изражене егзотермни и ендотермни пикови у температурном интервалу 200 °C – 450 °C код биокомпозита заснованог на пшеничној слами, Сл. 3.25 и у опсегу температура 200 °C – 380 °C, код биокомпозита заснованог на конопљи, Сл. 3.26. Код оба биокомпозита примећен је карактеристичан егзотермни пик на приближно 255 °C и који је праћен губитком масе. Иако је начињен велики напредак у тумачењу молекуларних механизма који доводе до термичке деградације материјала, због међусобних интеракција компоненти тумачење резултата постаје много комплексније када се анализира производ у целини. Код биокомпозита са пшеничном сламом, у опсегу температура 200 °C – 450 °C укупан губитак масе износи 32,35 %, а највећи удео те масе, чак 19,1 %, губи се у температурном интервалу 255 – 368 °C. Код биокомпозита са конопљом, у опсегу температура 200 °C – 380 °C укупан губитак масе износи 26,63 %, а највећи губитак од чак 21,4 % одвија се у опсегу 255 – 372 °C. Наведени температурни интервал је карактеристичан пре свега за хемицелулозу, целулозу, али и за протеине. Хитин се такође разлаже у овом температурном интервалу, али је његов пик ендотерман. На узорку биокомпозита са конопљом за температуру око 400 °C се заиста може запазити мали ендотермни пик. Много изражајнији ендотермни пик се запажа на температури око 428 °C, чије се присуство, према теоријским наводима, може приписати са деполимеризацији праћеној издвајањем испарљивих материјала. Након тога долази до разлагања материје све до температуре између 500 и 700 °C. На температурама вишим од 350 °C преовлађујући пиролитички производи су ароматична једињења (Pollex et al., 2012).

Таб. 3.6: Упоредне карактеристике појединих ТИ материјала (Klarić, 2017; Olive, 2016; Radonjanin and Malešev, 2012; Todorović et al., 2012, делимично прерађено)

Материјал	Запреминска маса (ρ), kg m^{-3}	Коефицијент топлотне проводљивости (λ), W(m K)^{-1}	Напон при притиску при 10% деформације ($\sigma_{p,10\%}$), N mm^{-2} , или МПа	Чврстоћа при савијању (f_m), N mm^{-2} , или МПа	Чврстоћа при затезању (f_t), N mm^{-2} , или МПа	Модул еластичности (E), N mm^{-2} , или МПа	Упијање воде (U), %	Фактор дифузионе отпорности водене паре (μ)
EPS	10 – 30	0,028 – 0,048	0,060 – 0,250	0,160 – 0,460	0,150 – 0,420	2 – 11	2 – 8	25 – 60
XPS	25 – 45	0,025 – 0,037	0,250 – 0,700	–	–	–	0,2 – 0,3	80 – 200
PU	30 – 50	0,020 – 0,037	0,200 – 0,400	–	0,300 – 0,700	–	–	40 – 50
Камена вуна	40 – 200 ^{1.} 45 – 160 ^{2.}	0,033 – 0,041 ^{1.} 0,035 – 0,041 ^{2.}	0,003 – 0,050	–	0,010 – 0,030	–	> 100	$\geq 1,1$
Стаклена вуна	10 – 130	0,032 – 0,041 ^{2.}	–	–	–	–	> 100	≥ 1
Перлитни малтери	260 – 800	0,055 – 0,023	–	–	–	–	–	–
Перлитни бетони	180 – 460	0,043 – 0,100	–	–	–	–	–	–
Експандирана глина ⁶	–	0,073	–	–	–	–	–	–
Пенобетони	400 – 550	0,08 – 0,130	–	–	–	–	–	3
Плоче од плуте	110 – 120	0,040 – 0,060	–	–	–	–	–	5 – 10 ^{2.}
Плоче од трске	175 – 250	0,045 – 0,073	0,015 ^{3.}	~3	–	–	–	2
Таролит плоче	300 – 350 200 – 800 ^{2.}	0,052 – 0,060 ^{1.} 0,074 – 0,140 ^{2.}	0,400 – 1200	–	–	–	60 – 70	–
Конвенционални ТИ на бази ПС	60 – 360	0,038 – 0,150	–	–	–	–	–	–
Конвенционални ТИ на бази К	30 – 316	0,051 – 0,063	–	–	–	–	–	–
ТИ на бази целулозе	20 – 100	0,037 – 0,045 ^{1.} < 0,040 ^{2.}	–	–	–	–	–	1 – 2
ТИ на бази овчије вуне	15 – 20	0,036 – 0,042	–	–	–	–	–	–

Материјал	Запреминска маса (ρ), kg m^{-3}	Коефицијент топлотне проводљивости (λ), W(m K)^{-1}	Напон при притиску при 10% деформације ($\sigma_{p,10\%}$), N mm^{-2} , или МПа	Чврстоћа при савијању (f_m), N mm^{-2} , или МПа	Чврстоћа при затезању (f_t), N mm^{-2} , или МПа	Модул еластичности (E), N mm^{-2} , или МПа	Упијање воде (U), %	Фактор дифузионе отпорности водене паре (μ)
Биокомпозит (Holt et al., 2012)	66,5 – 224	0,100 – 0,180	0,001 – 0,072 ⁵	0,007 – 0,026	–	0,122 – 0,675	93,5 – 198,1	–
Биокомпозит (Jiang et al., 2017)	–	–	–	0,762 – 1,5	–	4,650 – 6,567	–	–
Биокомпозит (Yang et al., 2017)	160 – 280	0,050 – 0,070	0,350 – 0,570 ⁴	–	–	15 – 60	–	–
Биокомпозит (Islam et al., 2017)	30 – 50	–	–	–	0,100 – 0,300	0,600 – 2	–	–
Биокомпозит на бази ПС	128 – 139	0,046 – 0,047	0,020 – 0,030	0,050 – 0,130	–	–	–	3,8
Биокомпозит на бази К	137 – 157	0,048 – 0,049	0,050	0,096 – 0,220	–	–	–	3,3

¹ – подаци према (Todorović et al., 2012)

ПС – пшенична слама

² – подаци према (Radonjanin and Malešev, 2012)

К – конопља

³ – при деформацији од 2 %

⁴ – при деформацији од 15 %

⁵ – према ASTM C165 стандарду, тест се изводи до граничних вредности напона

⁶ – подаци према (Olive, 2016)

3.3 Моделовање енергетске ефикасности и анализа животног циклуса

Прорачун енергетске ефикасности

На основу дефинисаних параметара утврђене су топлотне карактеристике одабраних модела и израђени су њихови енергетски пасоши. Сви модели припадају истом разреду објекта са појединим изузецима у оквиру лаког типа градње. Специфични енергетски захтеви се код лаког типа конструкције крећу између 64 и 66 kW h (m²a)⁻¹ што их сврстава у енергетски разред „C“ и „D“. Израчуната вредност специфичних годишњих енергетских захтева је за већину модела мања од максимално дозвољене годишње потребне финалне енергије за грејање објекта, осим у случају модела са прошивеном трском и биокомпозитима и то код лаког типа конструкције зида. Остали одабрани модели испуњавају минималне захтеве Правилника о условима, садржини и начину издавања сертификата о енергетским својствима зграда Републике Србије. С обзиром да се модели у оквиру истог типа конструкције разликују само према примењеном ТИ материјалу у спољном омотачу, разлика између енергетских захтева модела је искључиво последица његовог утицаја. Резултати енергетског аудита модела сумирани су у Таб. 3.7, Таб. 3.8 и Таб. 3.9 за моделе лаког, средње тешког и тешког типа конструкције, респективно.

Таб. 3.7: Резултати енергетског аудита одабраних модела за лаки тип конструкције

ТИ материјал модела	Коеф. Пролаза топлоте (U) (W (m ² K) ⁻¹) / Енергетски разред	Коеф. топлотне проводљивости (λ) W(m K) ⁻¹	Годишња емисија CO ₂		Укупна емисија CO ₂ у току животног века*		
			Q _{H,nd,rel} , %	Q _{H,nd} , kW h(m ² a) ⁻¹	kg a ⁻¹	kg (m ² a) ⁻¹	kg
EPS/минерална вуна***	U = 0,236 / C	0,041	98	64	3.705	57	296.400
Експандирана плута	U = 0,247 / C	0,041	99	65	3.719	57	297.520
Прошивена трска	U = 0,274 / D	0,046	102	66	3.753	58	300.240
Целулозна влакна	U = 0,241 / C	0,040	99	64	3.712	57	296.960
Овчија вуна***	U = 0,241 / C	0,040	99	64	3.712	57	296.960
Биокомпозит на бази ПС**	U = 0,264 / D	0,050	101	66	3.741	58	299.280
Биокомпозит на бази К**	U = 0,264 / D	0,050	101	66	3.741	58	299.280

* – Емисија CO₂ пореклом од енергената утрошених за одржавање микроклиме унутар објекта

** – 20 mm дебљи слој ТИ материјала у моделу да би се задовољио критеријум максимално дозвољеног коефицијента пролаза топлоте (U_{max} = 0,3 W (m²K)⁻¹)

*** – модел не задовољава захтеве са аспекта топлотне стабилности елемента спољног омотача

ПС – пшенична слама

К – конопља

Код лаког типа конструкције највећа разлика између модела је у енергетском разреду којем модели припадају и у топлотној стабилности спољног зида модела. Обзиром да се код овог типа конструкције вредности специфичних годишњих енергетских захтева модела налазе близу граничне вредности између разреда „C“ и

„D“, припадност појединих модела енергетском разреду „D“ је последица нешто веће вредности коефицијента топлотне проводљивости материјала. Овој разлици у резултатима, делимично, али не и пресудно, доприноси и ограничење програмског пакета за енергетски аудит који не дозвољава да се уносе нови материјали чији коефицијент топлотне проводљивости износи мање од $0,050 \text{ W(m K)}^{-1}$. Из тог разлога, приликом прорачуна, нису примењене измерене вредности коефицијента топлотне проводљивости за биокомпозите. Модели са прошивеном трском и биокомпозитима припадају енергетском разреду „D“ који, према Правилнику о условима, садржини и начину издавања сертификата о енергетским својствима зграда Републике Србије, није прихватљив за новоизграђене објекте, без обзира на чињеницу да је коефицијент пролаза топлоте за спољне зидове ових модела прихватљив. Неопходно је напоменути да је дебљина ТИ слоја код модела са биокомпозитима већа за 20 mm у односу на остале моделе код овог типа градње због највећег коефицијента топлотне проводљивости ТИ материјала. Дебљина ТИ материјала код модела са биокомпозитима не би испуњавала критеријум максималне вредности коефицијента пролаза топлоте за спољни зид, те је из тог разлога повећана до вредности која је испуњавала овај захтев. Због тога модел са прошивеном трском има веће вредности коефицијента пролаза топлоте спољног зида иако је вредност коефицијента топлотне проводљивости за трску нижа него код биокомпозита.

За моделе са EPS/минералном вуном и овчијом вуном је утврђено да не испуњавају захтеве са аспекта топлотне стабилности елемента што је последица мале запреминске масе ТИ материјала. Лигноцелулозни материјали одабрани за моделе имају знатно већу запреминску масу којом се повећава кашњење пролаза топлотног флуksа кроз спољне зидове објекта, те су они прихватљивији са овог аспекта од EPS-а и овчије вуне.

На основу резултата моделовања, може да се уочи разлика од 1,5 до 3 % у специфичним годишњим енергетским захтевима између наведених модела. Модели са биокомпозитима имају највеће енергетске потребе што је директна последица највише вредности коефицијента топлотне проводљивости од свих одабраних материјала. Сходно највећим енергетским потребама, модели са трском и биокомпозитима имају и највеће GHG емисије пореклом од енергената утрошених за одржавање микроклиме у објекту.

Код средње тешког типа конструкције модели имају значајно боље резултате са аспекта енергетских захтева у односу на моделе са лаким типом конструкције спољашњег зида. Вредност коефицијента пролаза топлоте код овог типа зида је за 4,2 – 12 % већа у односу на моделе лаког типа. Разлика у специфичним енергетским потребама на годишњем нивоу износи за приближно $10 \text{ kW h(m}^2 \text{ a)}^{-1}$ мање у корист средње тешког типа зида, што је последица бољих ТИ карактеристика и повећане топлотне стабилности. За разлику од лаког типа конструкције, код овог типа не постоје варијације у енергетским разредима и сви модели имају значајно бољу топлотну стабилност елемента спољног зида. Разлике у специфичним годишњим енергетским захтевима између модела у оквиру овог типа конструкције износе 1,5 до 3 %, што је идентично као и код модела са лаким типом конструкције.

Може се уочити да смањење у специфичним енергетским захтевима није истоветно за све моделе. Модели са експандираном плутом и прошивеном трском исказали су смањење у енергетским потребама за $11 \text{ kW h(m}^2 \text{ a)}^{-1}$ захваљујући већем фактору пригушења осцилације температуре, односно, боље топлотне стабилности зида.

Таб. 3.8: Резултати енергетског аудита одабраних модела за средње тешки тип конструкције

ТИ материјал модела	Коеф. Пролаза топлоте (U) ($W (m^2K)^{-1}$) / Енергетски разред	Коеф. топлотне проводљивости (λ) $W(m K)^{-1}$	$Q_{H,nd,rel}$, %	$Q_{H,nd}$, $kW h(m^2 a)^{-1}$	Годишња емисија CO_2		Укупна емисија CO_2 у току животног века* kg
					$kg a^{-1}$	$kg (m^2 a)^{-1}$	
EPS	U = 0,226 / C	0,041	83	54	3.424	55	273.920
Експандирана плута	U = 0,226 / C	0,041	83	54	3.424	55	273.920
Прошивена трска	U = 0,241 / C	0,046	85	55	3.442	56	275.360
Целулозна влакна	U = 0,223 / C	0,040	83	54	3.421	55	273.680
Овчија вуна	U = 0,223 / C	0,040	83	54	3.421	55	273.680
Биокомпозит на бази ПС	U = 0,251 / C	0,050	85	56	3.454	56	276.320
Биокомпозит на бази К	U = 0,251 / C	0,050	85	56	3.454	56	276.320

* – Емисија CO_2 пореклом од енергената утрошених за одржавање микроклиме унутар објекта

ПС – пшенична слама

К – конопља

Таб. 3.9: Резултати енергетског аудита одабраних модела за тешки тип конструкције

ТИ материјал модела	Коеф. Пролаза топлоте (U) ($W (m^2K)^{-1}$) / Енергетски разред	Коеф. топлотне проводљивости (λ) $W(m K)^{-1}$	$Q_{H,nd,rel}$, %	$Q_{H,nd}$, $kW h(m^2 a)^{-1}$	Годишња емисија CO_2		Укупна емисија CO_2 у току животног века* kg
					$kg a^{-1}$	$kg (m^2 a)^{-1}$	
EPS	U = 0,290 / C	0,041	82	53	3.398	55	271.840
Експандирана плута	U = 0,290 / C	0,041	82	53	3.398	55	271.840
Прошивена трска**	U = 0,264 / C	0,046	79	52	3.368	55	269.440
Целулозна влакна	U = 0,284 / C	0,040	81	53	3.391	55	271.280
Овчија вуна	U = 0,284 / C	0,040	81	53	3.391	55	271.280
Биокомпозит на бази ПС**	U = 0,284 / C	0,050	81	53	3.391	55	271.280
Биокомпозит на бази К**	U = 0,284 / C	0,050	81	53	3.391	55	271.280

* – Емисија CO_2 пореклом од енергената утрошених за одржавање микроклиме унутар објекта

** – 30 mm дебљи слој ТИ материјала да би се задовољио критеријум максимално дозвољеног коефицијента пролаза топлоте ($U_{max} = 0,3 W (m^2K)^{-1}$)

ПС – пшенична слама

К – конопља

Код тешког типа градње уочава се додатно смањење у енергетским потребама модела за које је највише заслужна термална маса спољног зида. Иако је коефицијент пролаза топлоте код овог типа зида за 8,7 – 22 % већи него у случају средње тешког типа, модели имају за 1 до 3 $kW h(m^2 a)^{-1}$, односно, за 1,8 до 5 % мање енергетске захтеве. Модели са прошивеном трском и биокомпозитима у прорачуну имају за 30 mm већу дебљину ТИ слоја него остали модели да би се задовољили захтеви

Правилника за максималном дозвољеном вредношћу коефицијента пролаза топлоте спољног зида. Сви модели овог типа, такође, задовољавају захтеве са аспекта топлотне стабилности.

Резултати моделовања указују да је лаки тип конструкције топлотно најмање стабилан од свих испитаних типова и да половина одабраних ТИ материјала са наведеном дебљином не задовољава захтеве законске регулативе за изградњу нових објеката у погледу енергетског разреда.

Иако је разлика у енергетским захтевима између модела са лаким и тешким типом зида очигледна, она није довољна да се моделима са бољим перформансама додели виши енергетски разред од разреда „С“. Резултати енергетског аудита указују да, у оквиру истог типа конструкције, не постоје значајне разлике између одабраних материјала. Такође, утврђено је да тип конструкције има значајну улогу са аспекта енергетске ефикасности, при чему очигледну предност имају модели са већом термалном масом спољног омотача. Иако скоро сви модели припадају истом енергетском разреду и модели лаког типа имају очигледну предност над моделима тешког типа са аспекта коефицијента пролаза топлоте, до изражаја долази топлотна инерција и значај термалне масе спољних елемената омотача објекта.

Иако се на основу коефицијента топлотне проводљивости биокompозити могу сврстати у групу правих ТИ материјала, утврђено је да они имају најслабија ТИ својства од свих одабраних материјала. Због тога, код појединих типова конструкције, било је неопходно повећати слој ТИ материјала за око 20 % како би елемент задовољио захтеве законске регулативе. Модели са биокompозитима код лаког типа конструкције имају за 22 – 36 kg већу годишњу емисију угљен-диоксида од већине осталих модела сем у случају модела са прошивеном трском који има већу емисију због 20 mm тањег ТИ слоја. На нивоу животног века модела ова разлика износи 1.760 – 2.880 kg угљен-диоксида што чини 0,6 – 1 % од укупних емисија модела. Код средње тешког типа градње разлика у годишњој емисији угљен-диоксида износи од 12 до 33 kg. На нивоу животног века разлика је 960 – 2.640 kg, односно, 0,3 – 1 % у односу на укупне емисије за овај тип градње. Код средње тешког типа конструкције разлике могу да се сматрају потпуно репрезентативним јер код ових модела не постоји разлика у дебљини ТИ слоја. Код тешког типа градње повећана је дебљина ТИ слоја за моделе са биокompозитима и трском, што је смањило њихову емисију угљен-диоксида. Емисија угљен-диоксида у случају тешког типа градње слична је код свих поређених модела и износи до 30 kg на годишњем нивоу, односно, 2.400 kg на нивоу животног века модела. Модели са биокompозитима имају мању емисију од модела са експандираном плутом и EPS-ом и у рангу су модела са целулозом и овчијом вуном. Код овог типа градње, топлотна стабилност конструкције је допринела изједначавању ефекта који ТИ материјали имају на зид.

Иако је утврђено да биокompозити, са аспекта ТИ карактеристика, нису бољи од класичних ТИ материјала, такође је утврђено да материјал има боље карактеристике пригушења температурних осцилација, где су показали предност у односу на EPS и овчију вуну за око 3,6 и 2,6 %, респективно. Приликом избора ТИ материјала није довољно само посматрати параметре попут коефицијента топлотне проводљивости и коефицијента пролаза топлоте. Кашњење топлотног флуksа се такође мора узети у обзир. Зато су у погледу енергетске ефикасности најбољи објекти који комбинују зидове високе топлотне инерције и адекватно пројектованог ТИ слоја израђеног од лигноцелулозних материјала.

Анализа животног циклуса

На основу органског порекла и нискоенергетског производног процеса очекивано је да биокомпозит неће имати значајан утицај на животну средину. Такође, очекивано је да ће биокомпозит имати мањи утицај на животну средину од конвенционалних синтетичких ТИ материјала. Резултати анализе животног циклуса за биокомпозит показали су да је претпоставка делимично тачна. Иако је материјал са аспекта кружења материје у природи потпуно рециклабилан и што се као сировина за производњу користе нуспроизводи из пољопривредне производње, GHG емисије пореклом од уложене енергије у фази инкубације и сушења поништавају бенефите органског порекла материјала. Скоро 1,5 kgCO_{2eq} гасова емитује се за производњу једног килограма биокомпозита, док се за производњу једног килограма ТИ на бази целулозе емитује свега 0,359 kg CO_{2eq} гасова. За производњу исте масе EPS-а емитује 3,7 kgCO_{2eq}, док се за производњу XPS емитује се 5,2 kgCO_{2eq}. За термоизолацију на бази целулозе емитује се свега 24 % од укупних GHG емисија из производње биокомпозита. Са друге стране, за производњу биокомпозита емитује се свега 29 % од укупних GHG емисија у односу на производни процес XPS-а. Са аспекта категорије климатских промена, биокомпозит има највећу разлику у односу на XPS, а најмању у односу на стаклену вуну. GHG емисије из производног процеса биокомпозита чине око 41 % емисија из производног процеса EPS-а. Резултати LCA поређења приказани су на Сл. 3.27.



Сл. 3.27: Резултати LCA производног процеса биокомпозита и конвенционалних ТИ материјала у категорији климатских промена према *IMPACT 2002+* методологији

Уколико се GHG емисије разложе на поједине производне процесе, могу да се идентификују највећи енергетски губици и да се производни процес биокомпозита оптимизује сходно томе. Као највећи енергетски губитак утврђено је сушење материјала са 0,72 kWh(kg)⁻¹, што чини око 54 % укупних енергетских потреба у производном процесу. Као други највећи енергетски губитак идентификоване су енергетске потребе за одржавање микроклиме у просторији са око 0,36 kWh(kg)⁻¹, односно 30 % од укупних енергетских потреба у процесу производње. Заједнички удео сушења и одржавања микроклиме чини скоро 85 % енергетских потреба у процесу производње биокомпозита. Обзиром да производни процес није оптимизован, јасно је

да оптимизација процеса сушења има највећи потенцијал за смањење утицаја на животну средину. Осим унапређења са аспекта оптимизације процеса, да би се сагледао утицај на животну средину у потпуности, неопходно је извести LCA студију у којој ће се сагледати утицај у све четири категорије штетности према *IMPACT 2002+* методологији. Такође, имајући у виду да у саставу појединих конвенционалних ТИ материјала учествују компоненте које имају значајан утицај на животну средину са аспекта екотоксичности и утицаја на људско здравље, сматра се да би органско порекло и мали број компоненти у биокомпозиту значајно унапредили положај биокомпозита на лествици штетности по животну средину.

3.4 Препоруке за практичну примену биокомпозита

На основу резултата другог експерименталног дела изведено је поређење биокомпозита са конвенционалним ТИ материјалима, као и процена за његову примену у пракси. Као најважнији фактори за примену биокомпозита, од испитаних параметара издвајају се активност воде, механичка својства и термичка стабилност материјала. Остали испитани параметри подробније описују биокомпозит, али у оквиру њих се не изражавају ограничења за његову примену у пракси.

Резултати активности воде указују да биокомпозит није подобан за примену на релативним влажностима ваздуха изнад 75% услед развоја плесни на површини материјала. Због тога, неопходно је да се пажљиво пројектује спољни омотач објекта како не би долазило до појаве кондензације на површини материјала. Осим појаве кондензације на површини, материјал је неопходно заштити и од директног контакта са водом.

На основу испитаних механичких својстава биокомпозита утврђено је да постоје разлике у чврстоћи биокомпозита од пшеничне сламе и конопље. Биокомпозит заснован на конопљи има боља механичка својства у односу на биокомпозит заснован на пшеничној слами. Од механичких својстава зависи место и начин примене ТИ материјала у оквиру спољног омотача објекта, али не постоје ограничавајући фактори који би у потпуности спречили његову употребу са овог аспекта. Постоје класични ТИ материјали са врло ниским вредностима механичке чврстоће, али су ови недостаци превазиђени различитим системима градње и применом на одговарајућим позицијама у спољном омотачу објекта и који могу да се искористе и за примену биокомпозита. Биокомпозит са пшеничном сламом нема довољну чврстоћу да се користи као део спољне топлотне изолације. Са друге стране, биокомпозит са конопљом има механичка својства слична EPS-у, те је са овог аспекта подобан да се користи као материјал за топлотну изолацију зидова са спољне стране. Међутим, приликом испитивања механичких својстава, утврђено је да биокомпозити не остварују добру везу са малтером, што ограничава начин његове примене. Ово је последица присуства папирне подлоге која се користи приликом производње материјала и која се, местимично, релативно лако може одвојити од плоче. Осим тога, овај папир се слабо везује за малтер, а као физичка препрека спречава везивање малтера за супстрат и мицелијум који чине тело биокомпозита.

Резултати испитивања термичке стабилности материјала на DSC–TGA указују да су оба биокомпозита, у пиролизичким условима, термички стабилна до 250 °C након чега наступа термичка декомпозиција хемицелулозе и целулозе, као и делимичне декомпозиције хитина и лигнина као основних градивних компоненти. Такође, имајући у виду да се приликом загревања на температуру вишу од 100 °C из материјала

издваја влага везана у његовој структури и да се тиме слабе интрамолекулске везе, препоручује се да, као ограничавајући фактор, буде узета у обзир ова температура и да се материјал уграђује на местима где се очекују температуре до наведене вредности.

За практичну примену материјала препоручује се његова уградња у оквиру скелетног система градње префабрикованих монтажних објеката или уградњом са спољне стране зида заштићеног облогама постављеним на одговарајуће носаче. Код уградње са спољне стране зида од тврдог материјала, причвршћивање биокомпозита би се изводило употребом PVC сидра са широком главом које се користи приликом постављања контактне фасаде. Оваквим системима градње, материјал би био заштићен од механичких напрезања, директног утицаја влаге и евентуалне појаве пламена. Такође, имајући у виду резултате моделовања енергетске ефикасности и уштеде у утрошку енергената у току животног века објекта, предност се даје тешком типу градње зидова са вентилисаном фасадом.

3.5 Правци даљих истраживања

Нарочиту пажњу заслужују употреба различитих врста биомасе и режим сушења материјала као параметри са највећим истраживачким потенцијалом за оптимизацију и унапређења. На основу претходних истраживања расположиве биомасе на територији Републике Србије, може се закључити да би и друге врсте биомасе пореклом из пољопривредне производње, попут сојине сламе, окласака кукуруза и сл. могле да се искористе за производњу биокомпозита.

Предлог 1. Имајући у виду да се конопља најчешће гаји за потребе производње влакана високе тржишне цене, поставља се питање економске оправданости употребе стабљике конопље за производњу биокомпозита. У оквиру истраживања показано је да конопља пореклом из производње семена представља једно од решења овог проблема. Таква конопља није погодна за производњу влакана, сировина се може прибавити по знатно нижој цени, без значајнијег утицаја на карактеристике биокомпозита уз повећање искоришћења конопље као ресурса. Друго решење може да представља искоришћење поздера који остаје након издвајања влакана и који се за сада не користи у значајнијој мери.

Предлог 2. Код параметра сушења биокомпозита првенствено је неопходно извести оптимизацију предложеног процеса, а затим би од интереса било испитивање могућности употребе преса са микроталасним загревањем. Тиме се омогућава производња биокомпозита различитих облика, већих запреминских маса и чврстоћа, као и ламелираних производа који би имали и друге употребне вредности.

Предлог 3. С обзиром да је материјал лигноцелулозног порекла и да је подложен појави микроорганизама уколико се изложи повишеним вредностима релативне влажности ваздуха и директном контакту са водом, од интереса би било да се истраже могућности његове заштите од влаге применом хемијских средстава која су мање штетна по животну средину.

Предлог 4. Природни материјали подложни су утицају влаге, те је неопходно проценити брзину деградације уграђених материјала као и утврдити њихове реалне (in situ) хигротермичке карактеристике. Са тим циљем, предлаже се изградња тест објекта у којем би се у вишегодишњем периоду пратили услови микроклиме у односу на сезонске промене и дугорочно понашање биокомпозита.

Истраживање пружа значајну почетну основу за сва будућа истраживања усмерена ка употреби биокompatитних ТИ материјала у грађевинарству.

4 ЗАКЉУЧЦИ

Предмет, проблем и циљеви истраживања

Уочено је да синтетички конвенционални термоизолациони материјали имају значајан негативан утицај на животну средину због потрошње ограничених природних ресурса и значајних енергетских захтева приликом производње, а поједини материјали могу имати и значајан негативан утицај на људско здравље. Такође, ови материјали на крају свог животног века представљају проблем за који савремени системи управљања отпадом немају адекватно решење. Циљ истраживања био је да се произведе потпуно биоразградив термоизолациони материјал, нешкодљив по људско здравље, са мањим утицајем на животну средину, који би могао да замени конвенционалне термоизолационе материјале у стамбеним објектима. Други циљ истраживања био је да се такав материјал карактеризује са циљем оцењивања могућности његове примене у реалним условима.

Резултати истраживања

Производња биокompatитног, плочастог ТИ материјала заснованог на биомаси и мицелијуму гљиве буковаче

Иако се истраживање заснива на примени пшеничне сламе и конопље, принцип производње биокompatитног термоизолационог материјала може да се примени на било који лигноцелулозни материјал, с тим да ће примена других сировина резултовати измењеним својствима биокompatита. У току истраживања утврђено је да су најбоља механичка својства биокompatита постигнута применом уситњене сламе и конопље дужине 30 до 70 mm и да је ова дужина влакана супстрата најповољнија са аспекта мешања са инокулумом и минералним примесамa у биокompatиту. Такође, гранична вредност притиска којем је материјал изложен у првих 18 дана није утврђена и може да износи значајно више од 995 kg m^{-2} , односно, од 9.750 Pa колико је примењено у току истраживања. Додатком сахарозе у воду за пастеризацију убрзава се развој мицелијума и побољшава се квалитет биокompatита. Дужина инкубационог периода од 30 дана, са делимичним плодоношењем 1. кола, повољно утиче на квалитет биокompatита, а такође, омогућује спрегнуту производњу термоизолационих материјала и прехранбених производа чиме се остварује додатна материјална добит. Са масеним уделом инокулума у биокompatиту од 50 % произведен је материјал са најбољим механичким својствима, а даљим повећањем његовог удела може се очекивати даље побољшање квалитета биокompatита. За сушење материјала режим са постепеним подизањем температуре од 45 до 60 °C погоднији је од режима у којем се температура сушења одмах подешава на 60°C. Конопљу је лакше оцедити до оптималног садржаја влаге за развој мицелијума него пшеничну сламу. Такође, конопља биокompatиту пружа боља механичка својства од пшеничне сламе. Приказаним методом производње могуће је произвести материјал дебљине до 80 mm, а за производњу биокompatита веће дебљине утршак кисеоника и одвођење вишка топлотне енергије представљају највећи изазов, те је неопходно прилагодити производни процес сходно томе. Због начина на који се биокompatит преводи у инертно стање, примена вегетативног ткива гљива као везивног средства не омогућује ширење спора као потенцијалног алергена.

Хипотеза 1: Могуће је произвести плочасте, биокompatитне термоизолационе материјале засноване на биомаси као основном супстрату и мицелијуму гљиве буковаче као везивном средству.

Ова хипотеза је потврђена. Иако производни процес биокompозита није оптимизован, производна метода је успешно потврђена кроз све серије изведених експеримената.

Испитивање својстава биокompозитних плоча као ТИ материјала у грађевинарству

Биокompозитни термоизолациони материјал је за потребе овог истраживања произведен у облику плоча димензија 330x220 mm, 500x500 mm и 750x750 mm, дебљине од сса 50 mm до 80 mm.

- *Морфолошка својства* – биокompозит је хетероген, компактан материјал са добро развијеним мицелијумом око влакана пшенице и конопље без већих празнина у структури. Влакна пшеничне сламе и конопље су већински оријентисана у равни, иако постоји мањи удео влакана која су насумично оријентисана у простору. Због тога биокompозит исказује анизотропна својства која су највише изражена код механичких својстава биокompозита.
- *Физичко-хемијска својства* – запреминска маса плоча биокompозита износи од 128 до 139 kg m⁻³ за биокompозит на бази пшеничне сламе и од 137 до 157 kg m⁻³ за биокompозит са конопљом. Резултати испитивања активности воде указују да не постоји могућност развоја штетних микроорганизама на површини биокompозита на релативним влажностима ваздуха до 75 %. На основу ATR–FTIR анализе утврђено је да се у структури биокompозита уочава шест спектралних региона карактеристичних за лигноцелулозне материјале и мицелијум. Уочене спектралне траке везују се за протеине, липиде и полисахариде који улазе у састав целулозе, хемицелулозе и хитина, а такође могу да се уоче и траке које су карактеристичне за лигнин.
- *Механичка својства* – напон при притиску при 10 % деформације, у правцу управном на правац простирања влакана, за биокompозит са пшеничном сламом износи 0,02 – 0,03 МПа и 0,05 МПа за биокompозит са конопљом. Гранична вредност чврстоће при притиску у правцу простирања влакана износи 0,04 МПа за биокompозит са пшеничном сламом и од 0,16 до 0,28 МПа за биокompозит са конопљом. Граничне вредности чврстоће при савијању износе од 0,05 до 0,13 МПа за биокompозит заснован на пшеничној слами и од 0,096 до 0,22 МПа за биокompозит заснован на конопљи.
- *Хигротермичка својства* – просечна вредност специфичног топлотног капацитета произведеног материјала у температурном опсегу од 35 до 95 °C износи 1.420 J(kg K)⁻¹ за биокompозит са пшеничном сламом и 1.410 J(kg K)⁻¹ за биокompозит са конопљом. Коефицијент топлотне проводљивости износи 0,046 – 0,047 W(m K)⁻¹ за биокompозит са пшеничном сламом и 0,048 – 0,049 W(m K)⁻¹ за биокompозит са конопљом. Фактор отпора дифузији водене паре испитан при тесту суве шоље износи 3,80 код биокompозита са пшеничном сламом и 3,31 код биокompозита са конопљом. Термичка стабилност произведених материјала утврђена помоћу DSC–TGA уређаја показала је да су биокompозити термички стабилни до 250 °C.

Поређењем горе наведених својстава произведених биокompозитних материјала са конвенционалним термоизолационим материјалима који се користе у грађевинарству може да се закључи да су механичка својства биокompозита

упоредива са својствима експандираног полистирена. Обе врсте биокомпозита (на бази пшеничне сламе и конопље) погодне су за примену код система градње где неће бити изложени већим механичким напрезањима. Биокомпозит није подобан за радне услове средине са вредностима релативне влажности изнад 75 %, те је она дефинисана као гранична вредност за његово складиштење и примену. Вредности коефицијента топлотне проводљивости сврставају га у праве термоизолационе материјале, а најсличније су плочама заснованим на експандираној плути. Има знатно бољу пермеабилност према воденој пари у односу на полиуретан, експандирани и екструдирани полистирен, а незнатно слабију пермеабилност у поређењу са влакнастим материјалима попут минералних вуна. Иако не постоје поуздани подаци за већину природних термоизолационих материјала, биокомпозит има незнатно слабију пермеабилност према воденој пари у односу на термоизолацију од целулозних влакана.

Хипотеза 2: Биокомпозитне плоче су погодне, са аспекта хигротермичких својстава, да се користе као термоизолациони материјал у грађевинарству.

Ова хипотеза је делимично потврђена. Испитивања су показала да је материјал погодан за примену као термоизолациони материјал у грађевинарству са свих аспеката осим у погледу отпорности на развој микроорганизама у условима повишене релативне влажности, што је највећа препрека за његову практичну примену.

Моделовање енергетске ефикасности и анализа животног циклуса биокомпозитних плоча ТИ материјала

Моделовање енергетске ефикасности изведено је применом програма *URSA Грађевинска Физика 2*, на примеру породичног стамбеног објекта бруто површине 68 m² у оквиру којег су дефинисана три типа конструкције спољашњег зида, лаки, средње тешки и тешки тип. За сва три типа конструкције поређене су перформансе експандираног полистирена, експандиране плуте, прошивене трске, термоизолације од целулозних влакана, овчије вуне и произведених биокомпозита. Код модела са лаким типом конструкције спољног зида специфични енергетски захтеви на годишњем нивоу износе од 64 до 66 kWh(m² a)⁻¹, с тим да модели са прошивеном трском и биокомпозитном термоизолацијом са пшеничном сламом и конопљом припадају горњем опсегу ових вредности. Код модела са средње тешким типом конструкције специфичне енергетске потребе на годишњем нивоу износе од 54 до 56 kWh(m² a)⁻¹. При томе се модели са биокомпозитима произведеним у оквиру овог истраживања налазе на горњој граници опсега. За моделе са тешким типом градње специфичне годишње енергетске потребе за одржавање микроклиме унутар објекта износе од 52 до 53 kWh(m² a)⁻¹. Из анализе енергетске ефикасности могу да се издвоје два глава закључка. Прво, утврђено је да не постоје значајне разлике у губитку енергије између модела са биокомпозитима и модела са класичним ТИ материјалима. Модели са биокомпозитима имају занемарљиво веће енергетске губитке и сходно томе више GHG емисије. Међутим, у односу на EPS и овчију вуну биокомпозити пружају бољу топлотну стабилност елемента спољног зида. Друго, утврђено је да тип конструкције елемената има значајан утицај на енергетску ефикасност објекта. Модели са лаком конструкцијом спољног зида имају најмању топлотну стабилност и највеће енергетске губитке, а модели тешког типа градње имају највећу топлотну стабилност и најмање енергетске губитке. Такође, уочено је да се повећањем специфичне масе спољног зида смањује значај утицаја ТИ материјала.

Анализа животног циклуса модела, изведена уз помоћ програмског пакета *SimaPro 8* и који се ослања на *Ecoinvent 3* базу података, указала је да, у оквиру одабраних граница система и са аспекта емисија гасова са ефектом стаклене баште

из производње материјала, биокомпозити испитани у оквиру овог истраживања имају емисије око 1,495 kgCO₂ по килограму биокомпозита. На основу тога уочава се да биокомпозити имају мање штетан утицај на животну средину од експандираног и екструдираниог полистирена чије емисије износе 3,687 и 5,199 kgCO₂ по килограму материјала респективно, али не и од минералних вуна како је очекивано. Вредности емисија гасова приликом производње минералних вуна су блиске вредностима емисија код биокомпозита и износе 1,433 за стаклену и 1,419 kgCO₂ по килограму материјала за камену вуну. Да би се извело равноправно поређење са конвенционалним термоизолационим материјалима, превасходно је потребно оптимизовати производни процес, што би се постигло производњом биокомпозита на индустријском нивоу. Неопходно је извести и детаљнију процену утицаја на животну средину како би се приближније утврдио утицај, а такође идентификовале и све слабости у производном процесу.

Хипотеза 3: Са становишта утицаја на животну средину, биокомпозитни термоизолациони материјали повољнији су, са аспекта GHG емисија, од конвенционалних.

Ова хипотеза је делимично потврђена. Анализом енергетске ефикасности утврђено је да под одређеним условима произведени биокомпозити имају повољније карактеристике од појединих, али не и од свих конвенционалних термоизолационих материјала. Иако воде порекло од потпуно обновљивих извора и биоразградиви су под одређеним условима, производни процес није оптимизован услед чега постоје значајни енергетски губици у току фазе сушења материјала, а сходно томе и повећане емисије гасова са ефектом стаклене баште.

5 ЛИТЕРАТУРА

- Abhijith, R., Ashok, A., Rejeesh, C.R., 2018. Sustainable packaging applications from mycelium to substitute polystyrene: a review. *Mater. Today Proc.* 5, 2139–2145. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.matpr.2017.09.211>
- Akihiro, A., Dušek, K., Kobayashi, S., Blazewicz, S., Hatakeyama, H., Hatakeyama, T., Pielichowska, K., Ikai, A., 2010. *Biopolymers, Advances in Polymer Science*. Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg. <https://doi.org/10.1007/978-3-642-13630-6>
- Aksogan, O., Resatoglu, R., Binici, H., 2018. An environment friendly new insulation material involving waste newsprint papers reinforced by cane stalks. *J. Build. Eng.* 15, 33–40. <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2017.10.011>
- Ali, M.E., Alabdulkarem, A., 2017. On thermal characteristics and microstructure of a new insulation material extracted from date palm trees surface fibers. *Constr. Build. Mater.* 138, 276–284. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.02.012>
- Antić, M., 2016. Kompozitni materijali. *Zavar. i zavarene Konstr.* 19–28.
- Arifin, Y.H., Yusuf, Y., 2013. Mycelium Fibers as New Resource for Environmental Sustainability. *Procedia Eng.* 53, 504–508. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2013.02.065>
- Ashour, T., Wieland, H., Georg, H., Bockisch, F.J., Wu, W., 2010. The influence of natural reinforcement fibres on insulation values of earth plaster for straw bale buildings. *Mater. Des.* 31, 4676–4685. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2010.05.026>
- Azhary, K. El, Chihab, Y., Mansour, M., Laaroussi, N., Garoum, M., 2017. Energy Efficiency and Thermal Properties of the Composite Material Clay-straw. *Energy Procedia* 141, 160–164. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.11.030>
- Bajwa, D.S., Holt, G.A., Bajwa, S.G., Duke, S.E., McIntyre, G., 2017. Enhancement of termite (*Reticulitermes flavipes* L.) resistance in mycelium reinforced biofiber-composites. *Ind. Crops Prod.* 107, 420–426. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2017.06.032>
- Ball, R., McIntosh, A.C., Brindley, J., 2004. Feedback processes in cellulose thermal decomposition: implications for fire-retarding strategies and treatments. *Combust. Theory Model.* 8, 281–291. <https://doi.org/10.1088/1364-7830/8/2/005>
- Barreca, F., Fichera, C.R., 2013. Use of olive stone as an additive in cement lime mortar to improve thermal insulation. *Energy Build.* 62, 507–513. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2013.03.040>
- Bayer, E., McIntyre, G., 2016. Method for producing grown materials and products made thereby. Patent number: US 9485917 B2.
- Bayer, E., McIntyre, G., 2015a. Method for making dehydrated mycelium elements and products made thereby. Pub. No.: US 2015/0342138 A1.
- Bayer, E., McIntyre, G., 2015b. Method For Making Dehydrated Mycelium Elements And Product Made Thereby. Publication number: US20150342138 A1.
- Bayer, E., McIntyre, G., 2009. Method for producing rapidly renewable chitinous material using fungal fruiting bodies and product made thereby. US Pat. 8,001,719. Pub. No.: US 2009/0307969 A1.

- Baysal, E., Peker, H., Al., E., 2003. Cultivation of oyster mushroom on waste paper with some added supplementary materials. *Bioresour. Technol.* 89, 95–97. [https://doi.org/10.1016/S0960-8524\(03\)00028-2](https://doi.org/10.1016/S0960-8524(03)00028-2)
- Belhadj, B., Bederina, M., Montrelay, N., Houessou, J., Quéneudec, M., 2014. Effect of substitution of wood shavings by barley straws on the physico-mechanical properties of lightweight sand concrete. *Constr. Build. Mater.* 66, 247–258. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.05.090>
- Berenji, J., Sikora, V., 1996. Oplemenjivanje i semenarstvo konoplje, in: Kastori, R. (Ed.), *Zbornik Radova Naučnog Instituta Za Ratarstvo I Povrtarstvo Novi Sad*. Naučni institut za ratarstvo i povrtarstvo, Maksima Gorkog 30, 21000, Novi Sad, Novi Sad, Serbia, pp. 19–38.
- Binici, H., Aksogan, O., Demirhan, C., 2016. Mechanical, thermal and acoustical characterizations of an insulation composite made of bio-based materials. *Sustain. Cities Soc.* 20, 17–26. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2015.09.004>
- Boulloc, P., Allegret, S., Arnaud, L., 2013. *Hemp: industrial production and uses*. CABI, Wallingford. <https://doi.org/10.1079/9781845937935.0000>
- Bourdot, A., Moussa, T., Gacoin, A., Maalouf, C., Vazquez, P., Thomachot-Schneider, C., Bliard, C., Merabtine, A., Lachi, M., Douzane, O., Karaky, H., Polidori, G., 2017. Characterization of a hemp-based agro-material: Influence of starch ratio and hemp shive size on physical, mechanical, and hygrothermal properties. *Energy Build.* 153, 501–512. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2017.08.022>
- Brundtland, G.H., 1991. Our common future, in: *Earth and Us*. Elsevier, pp. 29–31. <https://doi.org/10.1016/B978-0-7506-1049-0.50009-5>
- Bugarski, D., 2016. *Doktorska disertacija: Uticaj različitih supstrata na morfološka, fiziološka i hemijska svojstva odabranih sojeva gljive Bukovače Pleurotus ostreatus (Jacq.) P. Kumm. 1871*. Univerzitet u Novom Sadu, Prirodno matematički fakultet.
- Bugarski, D., 2001. *Magistarska teza: Osnovni faktori razvoja micelijuma gljive Bukovače Pleurotus sp.* Univerzitet u Novom Sadu, Poljoprivredni fakultet.
- Bugarski, D., Gvozdenović, Đ., Vasić, M., Jovičević, D., 1997. Međuzavisnost činioca koji utiču na razvoj micelije gljive bukovače (*Pleurotus Ostreatus*). *Sel. i Semen.* IV, 147–151.
- Callister, W.D.J., 2007. *Materials science and engineering an introduction*, 7th editio. ed. John Wiley & Sons, Inc.
- Calvo-Flores, F.G., Dobado, J.A., Isac-García, J., Martín-Martínez, F.J., 2015. *Lignin and Lignans as Renewable Raw Materials: Chemistry, Technology and Applications*, Lignin and Lignans as Renewable Raw Materials: Chemistry, Technology and Applications. Wiley. <https://doi.org/10.1002/9781118682784>
- Cárdenas-R, J.P., Cea, M., Santín, K., Valdés, G., Hunter, R., Navia, R., 2018. Characterization and application of a natural polymer obtained from *Hydrangea macrophylla* as a thermal insulation biomaterial. *Compos. Part B Eng.* 132, 10–16. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2017.07.086>
- Chang, S.-T., Miles, P.G., 2004. *Mushrooms - cultivation, nutritional value, medicinal effect and environmental impact*, Second edi. ed. CRC Press LLC, Boca Raton, Florida.
- Chau, C.K., Leung, T.M., Ng, W.Y., 2015. A review on Life Cycle Assessment, Life Cycle Energy Assessment and Life Cycle Carbon Emissions Assessment on buildings. *Appl.*

- Energy 143, 395–413. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2015.01.023>
- Chikhi, M., Agoudjil, B., Boudenne, A., Gherabli, A., 2013. Experimental investigation of new biocomposite with low cost for thermal insulation. *Energy Build.* 66, 267–273. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2013.07.019>
- Clarke, R.C., 1996. The future of cannabis as a source of nutraceuticals and pharmaceuticals, in: Kastori, R. (Ed.), *Zbornik Radova Naučnog Instituta Za Ratarstvo I Povrtarstvo Novi Sad. Naučni institut za ratarstvo i povrtarstvo, Maksima Gorkog 30, 21000, Novi Sad, Novi Sad, Serbia*, pp. 121–130.
- Collet, F., Prétot, S., Lanos, C., 2017. Hemp-Straw Composites: Thermal And Hygric Performances. *Energy Procedia* 139, 294–300. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.11.211>
- Crawford, R.H., 2011. *Life cycle assessment in the built environment*. Spon Press, Abingdon on Thames.
- Cui, L., Liu, Z., Si, C., Lanfeng, H., Kang, N., Zhao, T., 2012. Influence of steam explosion pretreatment on the composition and structure of wheat straw. *BioResources* 7, 4202–4213.
- Đikanović Golubović, D., 2013. *Doktorska disertacija: Strukturna ispitivanja ćelijskog zida i lignina različitog porekla*. Univerzitet u Beogradu.
- Djoudi, A., Khenfer, M.M., Bali, A., Bouziani, T., 2014. Effect of the addition of date palm fibers on thermal properties of plaster concrete: experimental study and modeling. *J. Adhes. Sci. Technol.* 28, 2100–2111. <https://doi.org/10.1080/01694243.2014.948363>
- Dodoo, A., Gustavsson, L., Sathre, R., 2011. Building energy-efficiency standards in a life cycle primary energy perspective. *Energy Build.* 43, 1589–1597. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2011.03.002>
- Dragičević, I., 2016. *Ćelijski zid - materijal sa predavanja za Biološki fakultet Univerziteta u Beogradu*.
- Đurovka, M., Mišković, A., Cvetić, Z., 2001. Uticaj različitih supstrata na brzinu rasta i prinos gljive bukovače. *Letop. naučnih Rad.* 25, 25–31.
- Ebnesajjad, S., 2013. *Handbook of biopolymers and biodegradable plastics*. William Andrew, Elsevier, Oxford.
- European Commission, 2018. *Roadmap to update of the 2012 Bioeconomy Strategy*.
- European Commission, 2012. *Strategy for “Innovating for Sustainable Growth: A Bioeconomy for Europe.”* Brussels.
- European Parliament and the Council of the European Union, 2018. *Energy Performance of Buildings Directive 2018/844*.
- Evon, P., Vandenbossche, V., Pontalier, P.-Y., Rigal, L., 2014. New thermal insulation fiberboards from cake generated during biorefinery of sunflower whole plant in a twin-screw extruder. *Ind. Crops Prod.* 52, 354–362. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2013.10.049>
- Ezechiáš, M., Covino, S., Cajthaml, T., 2014. Ecotoxicity and biodegradability of new brominated flame retardants: A review. *Ecotoxicol. Environ. Saf.* 110, 153–167. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2014.08.030>
- Fakirov, S., Bhattacharyya, D., 2007. *Handbook of Engineering Biopolymers Homopolymers, Blends and Composites*. Hanser.

- Fernea, R., Tămaş-Gavrea, D.R., Manea, D.L., Roşca, I.C., Aciu, C., Munteanu, C., 2017. Multicriterial Analysis of Several Acoustic Absorption Building Materials Based on Hemp. *Procedia Eng.* 181, 1005–1012. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.02.500>
- Filosofov, P.S., 1950. *Građevinski materijali. Građevinska knjiga*, Belgrade, Serbia.
- Fromme, H., Becher, G., Hilger, B., Völkel, W., 2016. Brominated flame retardants – Exposure and risk assessment for the general population. *Int. J. Hyg. Environ. Health* 219, 1–23. <https://doi.org/10.1016/j.ijheh.2015.08.004>
- Gidley, M.J., Chanliaud, E., Whitney, S., 2002. *Plant Biopolymer Science, Special Publication. Royal Society of Chemistry, Cambridge.* <https://doi.org/10.1039/9781847551672>
- Gojković, M., 1983. *Drvene konstrukcije. Naučna Knjiga*, Belgrade, Serbia.
- Golub, M., Đatkov, Đ., Bojić, S., Martinov, M., 2011. Total and available yield of wheat plant residues. *Savrem. Poljopr. Teh.* 37, 185–192.
- Goodhew, S., Griffiths, R., 2005. Sustainable earth walls to meet the building regulations. *Energy Build.* 37, 451–459. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2004.08.005>
- Graham, D., 2010. *Construction materials - their nature and behaviour*, 4th editio. ed. Spon Press, Abingdon on Thames.
- Greetham, L., McIntyre, G., Bayer, E., Winiski, J., Araldi, S., 2015. Mycological biopolymers grown in void space tooling. Pub. No.: US 2015/0033620 A1.
- Gross, R.A., Scholz, C., 2001. *Biopolymers from Polysaccharides and Agropoteins*, Copyright, Foreword. American Chemical Society, Washington, DC, p. 427. <https://doi.org/10.1021/bk-2001-0786.fw001>
- Guan, Y., Su, H., Yang, C., Wu, L., Chen, S., Gu, J., Zhang, W., Zhang, D., 2018. Ordering of Hollow Ag-Au Nanospheres with Butterfly Wings as a Bio-template. *Sci. Rep.* 8, 9261. <https://doi.org/10.1038/s41598-018-27679-5>
- Gvozdenac, D., Petrović, J., Brkić, M., Marić, M., Kljajić, M., Gvozdenac Urošević, B., Đaković, D., 2010. *Elaborat: Razvoj tržišta biomase u Vojvodini*. Novi Sad, Serbia.
- Haneef, M., Ceseracciu, L., Canale, C., Bayer, I.S., Heredia-Guerrero, J.A., Athanassiou, A., 2017. Advanced Materials From Fungal Mycelium: Fabrication and Tuning of Physical Properties. *Sci. Rep.* 7, 41292. <https://doi.org/10.1038/srep41292>
- Helmih, E., Novaković, B., 1972. *Zvučna i toplotna izolacija i ventilacija - dimnjaci u savremenom zgradarstvu u vezi sa novim propisima*. Biro za Građevinarstvo, Belgrade, Serbia.
- Hendriks, H.S., Westerink, R.H.S., 2015. Neurotoxicity and risk assessment of brominated and alternative flame retardants. *Neurotoxicol. Teratol.* 52, 248–269. <https://doi.org/10.1016/j.ntt.2015.09.002>
- Holt, G.A., McIntyre, G., Flagg, D., Bayer, E., Wanjura, J.D., Pelletier, M.G., 2012. Fungal Mycelium and Cotton Plant Materials in the Manufacture of Biodegradable Molded Packaging Material: Evaluation Study of Select Blends of Cotton Byproducts. *J. Biobased Mater. Bioenergy* 6, 431–439. <https://doi.org/10.1166/jbmb.2012.1241>
- Hu, T.Q., 2002. *Chemical Modification, Properties, and Usage of Lignin*, Journal of Chemical Information and Modeling. Springer US, Boston, MA. <https://doi.org/10.1007/978-1-4615-0643-0>
- Idler, C., Pecenka, R., Fürll, C., Gusovius, H.-J., 2011. *Wet Processing of Hemp: An*

- Overview. *J. Nat. Fibers* 8, 59–80. <https://doi.org/10.1080/15440478.2011.576089>
- International Energy Agency, 2015. Tracking clean energy progress 2015, energy technology perspectives 2015 excerpt, IEA input to the clean energy ministerial [WWW Document]. URL <http://www.iea.org/etp/tracking2015/> (accessed 1.1.16).
- Irvine, G.M., 1985. The significance of the glass transition of lignin in thermomechanical pulping. *Wood Sci. Technol.* 19, 139–149.
- Islam, M.R., Tudryn, G., Bucinell, R., Schadler, L., Picu, R.C., 2017. Morphology and mechanics of fungal mycelium. *Sci. Rep.* 7, 13070. <https://doi.org/10.1038/s41598-017-13295-2>
- Jiang, L., Walczyk, D., McIntyre, G., Bucinell, R., Tudryn, G., 2017. Manufacturing of biocomposite sandwich structures using mycelium-bound cores and preforms. *J. Manuf. Process.* 28, 50–59. <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2017.04.029>
- Johnson, R.M., Mwaikambo, L.Y., Tucker, N., 2003. *Biopolymers*.
- Jones, M., Bhat, T., Huynh, T., Kandare, E., Yuen, R., Wang, C.H., John, S., 2018. Waste-derived low-cost mycelium composite construction materials with improved fire safety. *Fire Mater.* 42, 816–825. <https://doi.org/10.1002/fam.2637>
- Kaplan, D.L., 1998. *Biopolymers from Renewable Resources*. Springer - Verlag Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg. <https://doi.org/10.1007/978-3-662-03680-8>
- Karimi, K., 2015. *Lignocellulose-Based Bioproducts, Biofuel and Biorefinery Technologies*. Springer International Publishing, Cham. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-14033-9>
- Karlović, Đ., Berenji, J., 1996. Ulje zrna konoplje: pro et contra, in: Kastori, R. (Ed.), *Zbornik Radova Naučnog Instituta Za Ratarstvo I Povrtarstvo Novi Sad*. Naučni institut za ratarstvo i povrtarstvo, Maksima Gorkog 30, 21000, Novi Sad, Novi Sad, Serbia, pp. 131–136.
- Karlović, Đ., Turkulov, J., Berenji, J., Verešbaranji, I., 1996. Esencijalne masne kiseline i ulje zrna konoplje, in: Kastori, R. (Ed.), *Zbornik Radova Naučnog Instituta Za Ratarstvo I Povrtarstvo Novi Sad*. Naučni institut za ratarstvo i povrtarstvo, Maksima Gorkog 30, 21000, Novi Sad, Novi Sad, Serbia, pp. 137–148.
- Khedari, J., Suttisonk, B., Pratinthong, N., Hirunlabh, J., 2001. New lightweight composite construction materials with low thermal conductivity. *Cem. Concr. Compos.* 23, 65–70. [https://doi.org/10.1016/S0958-9465\(00\)00072-X](https://doi.org/10.1016/S0958-9465(00)00072-X)
- Kim, Y.R., Harden, F.A., Toms, L.-M.L., Norman, R.E., 2014. Health consequences of exposure to brominated flame retardants: A systematic review. *Chemosphere* 106, 1–19. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2013.12.064>
- Kirilovs, E., Kukle, S., Beļakova, D., Borodinecs, A., Ruciņš, Ā., Stramkale, V., 2015. Thermal Conductivity of Hemp Based Boards. *Environ. Technol. Resour. Proc. Int. Sci. Pract. Conf.* 1, 61. <https://doi.org/10.17770/etr2015vol1.206>
- Kirilovs, E., Kukle, S., Gusovius, H.-J., 2015. Wet-preserved hemp fibreboard properties improvement with veneering. p. 20059. <https://doi.org/10.1063/1.4914250>
- Kittur, F.S., Harish Prashanth, K.V., Udaya Sankar, K., Tharanathan, R.N., 2002. Characterization of chitin, chitosan and their carboxymethyl derivatives by differential scanning calorimetry. *Carbohydr. Polym.* 49, 185–193. [https://doi.org/10.1016/S0144-8617\(01\)00320-4](https://doi.org/10.1016/S0144-8617(01)00320-4)
- Klarić, S., 2017. Lokalni, tradicionalni, prirodni materijali za održivu budućnost, in:

- Radonjanin, V., Folić, R. (Eds.), *Savremena Građevinska Praksa 2017*. Fakultet tehničkih nauka, Grafički centar "GRID," Novi Sad, Serbia, pp. 51–76.
- Korjenic, A., Petráněk, V., Zach, J., Hroudová, J., 2011. Development and performance evaluation of natural thermal-insulation materials composed of renewable resources. *Energy Build.* 43, 2518–2523. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2011.06.012>
- Kovačević, R., Grubor-Lajšić, G., Petrović, O., Andrić, N., 2004. *Interna skripta - Biohemijski i mikrobiološki principi*. Novi Sad, Serbia.
- Kozić, Đ., Bekavac, B., Vasiljević, B., 1979. *Priručnik za termodinamiku*. Mašinski fakultet, Belgrade, Serbia.
- Kremensas, A., Stapulionienė, R., Vaitkus, S., Kairytė, A., 2017. Investigations on Physical-mechanical Properties of Effective Thermal Insulation Materials from Fibrous Hemp. *Procedia Eng.* 172, 586–594. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.02.069>
- Krnjetin, S., 2015. *Prirodni materijali u građevinarstvu*, Tehničke n. ed. Fakultet tehničkih nauka, Grafički centar "GRID," Novi Sad, Serbia.
- Krnjetin, S., 2004. *Graditeljstvo i zaštita životne sredine*, Second edi. ed. Prometej, Novi Sad, Serbia.
- Kubba, S., 2012. *Handbook of Green Building Design and Construction*. Butterworth-Heinemann, Waltham, USA.
- Lamrani, M., Laaroussi, N., Khabbazi, A., Khalfaoui, M., Garoum, M., Feiz, A., 2017. Experimental study of thermal properties of a new ecological building material based on peanut shells and plaster. *Case Stud. Constr. Mater.* 7, 294–304. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2017.09.006>
- Leiva, F.J., Saenz-Díez, J.C., Martínez, E., Jiménez, E., Blanco, J., 2015. Environmental impact of *Agaricus bisporus* mycelium production. *Agric. Syst.* 138, 38–45. <https://doi.org/10.1016/j.agsy.2015.05.003>
- Lenz, R.W., 1993. *Biopolymers I*. Springer-Verlag.
- Lertsutthiwong, P., Khunthon, S., Siralermukul, K., Noomun, K., Chandkrachang, S., 2008. New insulating particleboards prepared from mixture of solid wastes from tissue paper manufacturing and corn peel. *Bioresour. Technol.* 99, 4841–4845. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2007.09.051>
- Liuzzi, S., Sanarica, S., Stefanizzi, P., 2017. Use of agro-wastes in building materials in the Mediterranean area: a review. *Energy Procedia* 126, 242–249. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.08.147>
- Lühr, C., Pecenka, R., Budde, J., Hoffmann, T., Gusovius, H.-J., 2018. Comparative investigations of fibreboards resulting from selected hemp varieties. *Ind. Crops Prod.* 118, 81–94. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2018.03.031>
- Lühr, C., Pecenka, R., Gusovius, H., Wallot, G., Rinberg, R., Tech, S., 2013. Development of an Axial Fractionator for Hemp Shive Cleaning and Industrial Applications of Shives. *J. Agric. Sci.* 5, 9–16. <https://doi.org/10.5539/jas.v5n1p9>
- Lühr, C., Pecenka, R., Gusovius, H.J., 2015. Production of high quality hemp shives with a new cleaning system. *Agron. Res.* 13, 130–140.
- Lyche, J.L., Rosseland, C., Berge, G., Polder, A., 2015. Human health risk associated with brominated flame-retardants (BFRs). *Environ. Int.* 74, 170–180. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2014.09.006>

- Markov, S.L., 2012. Mikrobiologija - Osnovi mikrobiologije za studente tehnoloških struka. Tehnički fakultet, Univerzitet u Novom Sadu, Novi Sad, Serbia.
- Martinez, R.G., 2017. Hygrothermal Assessment of a Prefabricated Timber-frame Construction Based in Hemp. *Procedia Environ. Sci.* 38, 729–736. <https://doi.org/10.1016/j.proenv.2017.03.155>
- Martinov, M., Đatkov, Đ., Bojić, S., Golub, M., Višković, M., 2014. Crop residues potentials and drought impact. *J. Agric. Mach. Sci.* 10, 59–64.
- Martinov, M., Marković, D., Tešić, M., Krgović, M., Grozdanić, N., 1996. Mehanizovanje žetve konoplje, in: Kastori, R. (Ed.), *Zbornik Radova Naučnog Instituta Za Ratarstvo I Povrtarstvo Novi Sad*. Naučni institut za ratarstvo i povrtarstvo, Maksima Gorkog 30, 21000, Novi Sad, Novi Sad, Serbia, pp. 69–86.
- Mati-Baouche, N., De Baynast, H., Lebert, A., Sun, S., Lopez-Mingo, C.J.S., Leclaire, P., Michaud, P., 2014. Mechanical, thermal and acoustical characterizations of an insulating bio-based composite made from sunflower stalks particles and chitosan. *Ind. Crops Prod.* 58, 244–250. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2014.04.022>
- McIntyre, G., Tudryn, G., Betts, J., Winiski, J., 2015. Stiff mycelium bound part and method of producing stiff mycelium bound parts. Pub. No.: US 2015/0038619 A1.
- Miron, I.O., Manea, D.L., Cantor, D.M., Aciu, C., 2017. Organic Thermal Insulation Based on Wheat Straw. *Procedia Eng.* 181, 674–681. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.02.449>
- Mohanty, A.K., Misra, M., Drzal, L.T., 2005. *Natural Fibers, Biopolymers, and Biocomposites*. CRC Press, Taylor & Francis Group.
- Monahan, J., Powell, J.C., 2011. An embodied carbon and energy analysis of modern methods of construction in housing: A case study using a lifecycle assessment framework. *Energy Build.* 43, 179–188. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2010.09.005>
- Motuziene, V., Rogoža, A., Lapinskiene, V., Vilutiene, T., 2016. Construction solutions for energy efficient single-family house based on its life cycle multi-criteria analysis: A case study. *J. Clean. Prod.* 112, 532–541. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.08.103>
- Muravljev, M., 2005. *Građevinski Materijali*, 5. izdanje. ed. Građevinska knjiga, Belgrade, Serbia.
- Müssig, J. (Ed.), 2010. *Industrial Applications of Natural Fibres, Industrial Applications of natural Fibres*. John Wiley & Sons, Ltd, Chichester, UK. <https://doi.org/10.1002/9780470660324>
- Nguyen, T.-T., Picandet, V., Amziane, S., Baley, C., 2009. Influence of compactness and hemp hurd characteristics on the mechanical properties of lime and hemp concrete. *Eur. J. Environ. Civ. Eng.* 13, 1039–1050. <https://doi.org/10.1080/19648189.2009.9693171>
- Nunes, L., 2017. *Nonwood bio-based materials, Performance of Bio-based Building Materials*. Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-100982-6.00003-3>
- Olive, J., 2016. *Thermal Insulation Materials - Comfort*.
- Omar, F., Mohini, S., 2016. *Lignin in polymer composites*. Elsevier.
- Pacheco-Torgal, F., Ivanov, V., Karak, N., Jonkers, H., 2016. *Biopolymers and Biotech Admixtures for Eco-Efficient Construction Materials* Edited by. Woodhead publishing.
- Paiva, A., Pereira, S., Sá, A., Cruz, D., Varum, H., Pinto, J., 2012. A contribution to the

- thermal insulation performance characterization of corn cob particleboards. *Energy Build.* 45, 274–279. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2011.11.019>
- Panyakaew, S., Fotios, S., 2011. New thermal insulation boards made from coconut husk and bagasse. *Energy Build.* 43, 1732–1739. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2011.03.015>
- Pecenka, R., Fűrll, C., Radosavljevic, L., 2008. Processing of Wet Preserved Hemp to Fibre Boards in a Pilot Plant, in: *International Conference on Flax and Other Bast Plants*. pp. 75–80.
- Pecenka, R., Gusovius, H.-J., 2011. Production of fibre boards from agricultural raw materials and residues. *Landtechnik* 66, 53–55.
- Pecenka, R., Idler, C., Grundmann, P., Fűrll, C., Gusovius, H.J., 2007. Tube ensiling of hemp - Initial practical experience. *Agrartech. Forschung-Agricultural Eng. Res.* 13, 15–26.
- Pecenka, R., Lühr, C., Gusovius, H.-J., 2012. Design of Competitive Processing Plants for Hemp Fibre Production. *ISRN Agron.* 2012, 1–5. <https://doi.org/10.5402/2012/647867>
- Pelletier, M.G., Holt, G.A., Wanjura, J.D., Bayer, E., McIntyre, G., 2013. An evaluation study of mycelium based acoustic absorbers grown on agricultural by-product substrates. *Ind. Crops Prod.* 51, 480–485. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2013.09.008>
- Pelletier, M.G., Holt, G.A., Wanjura, J.D., Lara, A.J., Tapia-Carillo, A., McIntyre, G., Bayer, E., 2017. An evaluation study of pressure-compressed acoustic absorbers grown on agricultural by-products. *Ind. Crops Prod.* 95, 342–347. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2016.10.042>
- Pollex, A., Ortwein, A., Kaltschmitt, M., 2012. Thermo-chemical conversion of solid biofuels. *Biomass Convers. Biorefinery* 2, 21–39. <https://doi.org/10.1007/s13399-011-0025-z>
- Praskalo, J., 2010. *Doktorska disertacija: Dobijanje celuloznih vlakana specijalnih svojstava metodama hemijskog modifikovanja*. Tehnološko-metalurški fakultet, Univerzitet u Beogradu.
- Pravilnik o uslovima, sadržini i načinu izdavanja sertifikata o energetskim svojstvima zgrada ("Sl. glasnik RS", br. 61/2011), 2011. . Vlada Republike Srbije, Belgrade, Serbia.
- Qi, H., 2017. *Novel Functional Materials Based on Cellulose*, SpringerBriefs in Applied Sciences and Technology. Springer International Publishing, Cham. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-49592-7>
- Quan, C., Gao, N., Song, Q., 2016. Pyrolysis of biomass components in a TGA and a fixed-bed reactor: Thermochemical behaviors, kinetics, and product characterization. *J. Anal. Appl. Pyrolysis* 121, 84–92. <https://doi.org/10.1016/j.jaap.2016.07.005>
- Quintana, G., Velásquez, J., Betancourt, S., Gañán, P., 2009. Binderless fiberboard from steam exploded banana bunch. *Ind. Crops Prod.* 29, 60–66. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2008.04.007>
- Radeka, M., 2012. *Materijal za predavanja iz predmeta Materijali u građevinarstvu* (predavanje br. 2).
- Radeka, M., 2009. *Materijal sa predavanja iz predmeta "Nauka o materijalima."*
- Radonjanin, V., Malešev, M., 2012. *Građevinski materijali i sklopovi [WWW Document]*. Inženjerska komora Srb. URL http://www.ingkomora.org.rs/strucniispiti/download/ee/TP6-1_Gradjevinski_materijali_i_sklopovi.pdf (accessed 12.29.16).

- Radosavljevic, L., Pecenka, R., Fűrll, C., 2008. Natural Binders for Fibreboard Made of Hemp, in: International Conference on Flax and Other Bast Plants. pp. 70–74.
- Rahman, M.A., Halfar, J., 2015. First evidence of chitin in calcified coralline algae: new insights into the calcification process of *Clathromorphum compactum*. *Sci. Rep.* 4, 6162. <https://doi.org/10.1038/srep06162>
- Ross, P., 2012. Method for producing fungus structures. Pub. No.: US 2012/0135504 A1.
- Run-Chang Sun, 2010. Cereal straw as a resource for sustainable biomaterials and biofuels: Chemistry, Extractives, Lignins, Hemicelluloses and Cellulose. Elsevier.
- Sassoni, E., Manzi, S., Motori, A., Montecchi, M., Canti, M., 2014. Novel sustainable hemp-based composites for application in the building industry: Physical, thermal and mechanical characterization. *Energy Build.* 77, 219–226. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2014.03.033>
- Satarić, M., Mihailović, A., Tošić, T., 2003. Praktikum laboratorijskih vežbi iz fizike.
- Schirp, A., Loge, F., Aust, S., Swaner, P., Turner, G., Wolcott, M., 2006. Production and characterization of natural fiber-reinforced thermoplastic composites using wheat straw modified with the fungus *Pleurotus ostreatus*. *J. Appl. Polym. Sci.* 102, 5191–5201. <https://doi.org/10.1002/app.24724>
- Sedláková, A., Vilčeková, S., Krídlová Burdová, E., 2015. Analysis of material solutions for design of construction details of foundation, wall and floor for energy and environmental impacts. *Clean Technol. Environ. Policy* 17, 1323–1332. <https://doi.org/10.1007/s10098-015-0956-3>
- Stieger, G., Scheringer, M., Ng, C.A., Hungerbühler, K., 2014. Assessing the persistence, bioaccumulation potential and toxicity of brominated flame retardants: Data availability and quality for 36 alternative brominated flame retardants. *Chemosphere* 116, 118–123. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2014.01.083>
- Šunjka, S., Vučenović, Ž., Banjac, M., Nemeš, A., 1996. Primena konoplje u tekstilnoj industriji, in: Kastori, R. (Ed.), *Zbornik Radova Naučnog Instituta Za Ratarstvo I Povrtarstvo Novi Sad*. Naučni institut za ratarstvo i povrtarstvo, Maksima Gorkog 30, 21000, Novi Sad, Novi Sad, Serbia, pp. 87–101.
- TA Instruments, 2018. TA Instruments - Heat flow meters [WWW Document]. URL <http://www.tainstruments.com/wp-content/uploads/BROCH-LC-2015-EN.pdf> (accessed 10.2.18).
- Thiebleson, L.M., Collet, F., Prétot, S., Lanos, C., Kouakou, H., Boffoue, O., 2017. Elaboration and Characterization Of Eco-Materials Made From Recycled Or Bio-Based Raw Materials. *Energy Procedia* 139, 468–474. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.11.239>
- Todorović, M., Bogner, M., Denić, N., 2012. O izolaciji. Eta, Belgrade, Belgrade.
- Tufegdžić, V.D., 1971. Građevinski materijali poznavanje i ispitivanje. Naučna Knjiga, Belgrade, Serbia.
- UN (FAO), 2018. GIEWS Crop prospects and food situation quarterly global report.
- Van den Heede, P., De Belie, N., 2012. Environmental impact and life cycle assessment (LCA) of traditional and “green” concretes: Literature review and theoretical calculations. *Cem. Concr. Compos.* 34, 431–442. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2012.01.004>

- Venkatarama Reddy, B. V., Jagadish, K.S., 2003. Embodied energy of common and alternative building materials and technologies. *Energy Build.* 35, 129–137. [https://doi.org/10.1016/S0378-7788\(01\)00141-4](https://doi.org/10.1016/S0378-7788(01)00141-4)
- Vilems, V.M., Šild, K., Dinter, S., 2008. *Građevinska fizika 1 - priručnik*. Građevinska knjiga, Belgrade, Serbia.
- Wang, D., Sun, X.S., 2002. Low density particleboard from wheat straw and corn pith. *Ind. Crops Prod.* 15, 43–50. [https://doi.org/10.1016/S0926-6690\(01\)00094-2](https://doi.org/10.1016/S0926-6690(01)00094-2)
- Wang, F., Hu, L.J., Zheng, Y.W., Huang, Y.B., Yang, X.Q., Liu, C., Kang, J., Zheng, Z.F., 2016. Regulation for Optimal Liquid Products during Biomass Pyrolysis: A Review. *IOP Conf. Ser. Earth Environ. Sci.* 40, 12047. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/40/1/012047>
- Wang, S., Wang, Q., Hu, Y.M., Xu, S.N., He, Z.X., Ji, H.S., 2015. Study on the synergistic co-pyrolysis behaviors of mixed rice husk and two types of seaweed by a combined TG-FTIR technique. *J. Anal. Appl. Pyrolysis* 114, 109–118. <https://doi.org/10.1016/j.jaap.2015.05.008>
- Wang, X., Sheng, L., Yang, X., 2017. Pyrolysis characteristics and pathways of protein, lipid and carbohydrate isolated from microalgae *Nannochloropsis* sp. *Bioresour. Technol.* 229, 119–125. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2017.01.018>
- WanJun, T., Cunxin, W., Donghua, C., 2005. Kinetic studies on the pyrolysis of chitin and chitosan. *Polym. Degrad. Stab.* 87, 389–394. <https://doi.org/10.1016/j.polymdegradstab.2004.08.006>
- Wei, K., Lv, C., Chen, M., Zhou, X., Dai, Z., Shen, D., 2015. Development and performance evaluation of a new thermal insulation material from rice straw using high frequency hot-pressing. *Energy Build.* 87, 116–122. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2014.11.026>
- Wertz, J.-L., Bedue, O., Mercier, J.P., 2010. *Cellulose science and technology*. APFL Press.
- Winiski, J., 2016. Method for stimulating the expression of specific tissue morphologies in filamentous fungi. Pub. No.: US 2016/0002589 A1.
- Winiski, J.M., Van Hook, S.S., 2015. Tissue morphology produced with the fungus *pycnoporus cinnabarinus*. Patent number: 9085763.
- Wool, R.P., Sun, X.S., 2005. *Bio-Based Polymers and Composites*. Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-763952-9.X5000-X>
- Xu, J., Sugawara, R., Widyorini, R., Han, G., Kawai, S., 2004. Manufacture and properties of low-density binderless particleboard from kenaf core. *J. Wood Sci.* 50, 62–67. <https://doi.org/10.1007/s10086-003-0522-1>
- Yamanaka, S., Kikuchi, R., 1991. Complex of fibers and fungi and a process for preparation thereof. Patent number: 5074959.
- Yang, H.-S., Kim, D.-J., Kim, H.-J., 2003. Rice straw–wood particle composite for sound absorbing wooden construction materials. *Bioresour. Technol.* 86, 117–121. [https://doi.org/10.1016/S0960-8524\(02\)00163-3](https://doi.org/10.1016/S0960-8524(02)00163-3)
- Yang, H., Yan, R., Chen, H., Lee, D.H., Zheng, C., 2007. Characteristics of hemicellulose, cellulose and lignin pyrolysis. *Fuel* 86, 1781–1788. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2006.12.013>
- Yang, Z. (Joey), Zhang, F., Still, B., White, M., Amstislavski, P., 2017. Physical and Mechanical Properties of Fungal Mycelium-Based Biofoam. *J. Mater. Civ. Eng.* 29,

4017030. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)MT.1943-5533.0001866](https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0001866)
- Youssefian, S., Rahbar, N., 2015. Molecular Origin of Strength and Stiffness in Bamboo Fibrils. *Sci. Rep.* 5, 11116. <https://doi.org/10.1038/srep11116>
- Yüksek, İ., 2015. The Evaluation of Building Materials in Terms of Energy Efficiency. *Period. Polytech. Civ. Eng.* 59, 45–58. <https://doi.org/10.3311/PPci.7050>
- Zabalza Bribián, I., Valero Capilla, A., Aranda Usón, A., 2011. Life cycle assessment of building materials: Comparative analysis of energy and environmental impacts and evaluation of the eco-efficiency improvement potential. *Build. Environ.* 46, 1133–1140. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2010.12.002>
- Zhang, N., Cheng, J.C., Warren, C.G., Pisano, A.P., 2011. Bioinspired, uncooled chitin photomechanical sensor for thermal infrared sensing, in: 2011 IEEE SENSORS Proceedings. IEEE, pp. 833–836. <https://doi.org/10.1109/ICSENS.2011.6127320>
- Zhou, X.Y., Zheng, F., Li, H.G., Lu, C.L., 2010. An environment-friendly thermal insulation material from cotton stalk fibers. *Energy Build.* 42, 1070–1074. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2010.01.020>