



УНИВЕРЗИТЕТ У НОВОМ САДУ
ФАКУЛТЕТ ТЕХНИЧКИХ НАУКА У
НОВОМ САДУ



Развој композита на бази биомасе за унапређење термичких и звучних својстава грађевинских објеката

Докторска дисертација

Ментори:

Проф. Др Весна Булатовић

Проф. Др Бранко Радичевић

Кандидат:

Јована Бојковић

УНИВЕРЗИТЕТ У НОВОМ САДУ
ФАКУЛТЕТ ТЕХНИЧКИХ НАУКА

ОБРАЗАЦ – 5а

КЉУЧНА ДОКУМЕНТАЦИЈСКА ИНФОРМАЦИЈА¹

Врста рада:	Докторска дисертација
Име и презиме аутора:	Јована Бојковић
Ментор (титула, име, презиме, звање, институција)	др Весна Булатовић, ванредни професор, Факултет техничких наука, Нови Сад др Бранко Радичевић, ванредни професор, Факултет за машинство и грађевинарство у Краљеву
Наслов рада:	Развој композита на бази биомасе за унапређење термичких и звучних својстава грађевинских објеката
Језик публикације (писмо):	Српски (ћирилица)
Физички опи рада:	Унети број: Страница 210 Поглавља 8 Референци 149 Табела 61 Слика 170 Графикона 0 Прилога 7
Научна област:	Грађевинско инжењерство
Ужа научна област:	Грађевински материјали
Кључне речи / предметна одредница:	Биокомпозити, биомаса, топлотни изолатори, звучни изолатори
Резиме на језику рада:	У дисертацији су приказани резултати сопственог експерименталног истраживања три врсте биокомпозита који су засновани на млевеном окласку кукуруза, пиљевини и гранулама експандираног полистирена као агрегата док се као везиво користи мешавина креча и гипса. На предметним мешавинама испитани су одређени параметри као што су порозност, упијање воде, чврстоће при притиску и савијању, отпор протока ваздуха, коефицијент топлотне проводљивости, специфични топлотни капацитет и фактор отпора дифузији водене паре. ГРА вишекритеријумском анализом три врсте биокомпозита одређен је оптимално добар термички и звучни изолатор.
Датум прихватања теме од стране надлежног већа:	28.02.2024.

¹Аутор докторске дисертације потписао је и приложио следеће Обрасце:

5б – Изјава о ауторству;

5в – Изјава о истоветности штампане и електронске верзије и о личним подацима;

5г – Изјава о коришћењу.

Ове Изјаве се чувају на факултету у штампаном и електронском облику и не корице се са тезом.

Датум одбране: (Попуњава одговарајућа служба)	
Чланови комисије: (титула, име, презиме, звање, институција)	Председник: Др Анка Старчев-Ћурчин, ванредни професор, Факултет техничких наука, Универзитет у Новом Саду Члан: Др Ненад Ристић, ванредни професор, Грађевинско-архитектонски факултет, Универзитет у Нишу Члан: Др Тиана Миловић, научни сарадник, Факултет техничких наука, Универзитет у Новом Саду Члан: Др Весна Булатовић, ванредни професор, Факултет техничких наука, Универзитет у Новом Саду Члан: Др Бранко Радичевић, ванредни професор, Факултет за машинство и грађевинарство у Краљеву, Универзитет у Крагујевцу
Напомена:	

UNIVERSITY OF NOVI SAD
FACULTY OF TECHNICAL SCIENCES

KEY WORD DOCUMENTATION²

Document type:	Doctoral dissertation
Author:	Jovana Bojković
Supervisor (title, first name, last name, position, institution)	Vesna Bulatović PhD, Associate Professor, Faculty of Technical Sciences, Novi Sad Branko Radičević PhD, Associate Professor, The Faculty of Mechanical and Civil Engineering in Kraljevo
Thesis title:	Development of biomass-based composites for the improvement of thermal and sound properties of construction objects
Language of text (script):	Serbian language (cyrillic)
Physical description:	Number of: Pages 210 Chapters 8 References 149 Tables 61 Illustrations 170 Graphs 0 Appendices 7
Artistic field:	Civil Engineering
Artistic subfield:	Building materials
Subject, Key words:	Biocomposites, biomass, thermal insulation, sound insulation
Abstract in English language:	The dissertation presents the results of its own experimental research on three types of biocomposites, which are based on ground corn cobs, sawdust and Styrofoam granules as aggregates, while a mixture of lime and gypsum is used as a binder. Certain parameters such as porosity, water absorption, compressive and bending strength, air flow resistance, thermal conductivity coefficient, specific heat capacity and water vapor diffusion resistance factor were tested on the mixtures in question. GRA multi-criteria analysis of three types of biocomposites determined optimally good thermal and sound insulation material.
Accepted on Scientific Board on:	28.02.2024.
Defended: (Filled by the faculty service)	

² The author of doctoral art project has signed the following Statements:

56 – Statement on the authority,

5B – Statement that the printed and e-version of doctoral dissertation are identical and about personal data,

5r – Statement on copyright licenses.

The paper and e-versions of Statements are held at the faculty and are not included into the printed thesis.

Thesis Defend Board: (title, first name, last name, position, institution)	President: PhD Anka Starčev- Ćurčin, Associate Professor, Faculty of Technical Sciences, Novi Sad Member: PhD Nenad Ristić, Associate Professor, Faculty of Civil Engineering and Architecture in Nišu Member: PhD Tiana Milović, Science Associate, Faculty of Technical Sciences, Novi Sad Member: PhD Vesna Bulatović, Associate Professor, Faculty of Technical Sciences, Novi Sad Member: PhD Branko Radičević, Associate Professor, Faculty of Mechanical Engineering and Civil Engineering in Kraljevo, University in Kragujevac
Note:	

ЗАХВАЛНОСТ

Свако ауторско дело је барем мало и колективно дело. Томе сведочи ова дисертација које свакако не би било без подршке и помоћи дивних и стручних људи.

Највећу захвалност дугујем менторима, професорима и великим пријатељима Весни Булатовић и Бранку Радичевићу, првенствено на брижљивом праћењу мојих истраживања, разумевању, подршци, стручности и помоћи око свих проблема са којима сам се сусретала током рада, као и за непроцењиве савете који су утицали на мој професионални и лични развој. Посебно хвала професорима Властимиру Радоњанину и Мирјани Малешев, за пружену прилику и поверење које су ми указивали током студија, нарочито на самом почетку израде ове дисертације.

Захвалност дугујем и колеги Ненаду Стојићу за несебичну помоћ око извођења експеримента. Хвала лаборанту Стевану Томићу без кога реализација експеримента не би била могућа као и колегама са Машинског факултета у Новом Саду. Хвала свим колегама на катедри за грађевинарство Факултета за машинство и грађевинарство у Краљеву који су на било који начин допринели обликовању и завршетку ове тезе.

Бесконечно хвала мојој ужој породици – супругу Милошу, сину Вељку и ћерки Тари. Милошу, мом најстрожем критичару, хвала за сву његову посебност која ме инспирише, љубав, разумевање и подршку коју ми је пружао и даље пружа, а Вељку и Тари хвала што су ме на овом путу углавном успешно и истрајно ометали, који су учинили да писање овог рада буде теже али да живот буде лепши, смисленији и узбудљивији, истовремено ме хранивши љубављу и енергијом да не поклекнем и наставим даље. Велико хвала мојим родитељима за безусловну љубав и помоћ коју ми увек дају. Хвала мојој сестри Тијани на љубави и подршци коју ми је пружала од првих корака па све до данас „табајући“ пут којим сам самоуверено корачала.

Апсолутну одговорност за све грешке и недостатке у раду остављам себи, са настојањем да их у свим будућим радовима буде што мање.

РЕЗИМЕ

Све већи енергетски захтеви за одржавање микроклиме у стамбеним објектима и мере које се примењују ради очувања здравља људи и животне средине су допринели разматрању проблематике анализираних у раду. Циљеви истраживања су производња нових биокомпозитних изолационих материјала употребом биомасе из пољопривредне производње и дрвног отпада као агрегата са додатком гранула експандираног полистирена (ЕПС), ради побољшања термичких карактеристика материјала, креча и гипса као везивног средства, као и испитивање карактеристика и могућност примене ових изолационих материјала. Рад садржи три радне хипотезе од којих прва хипотеза представља могућност да отпадни биоматеријали добију нову употребну вредност. Друга хипотеза претпоставља да биокомпозитни материјали могу бити упоредиви са већ постојећим термичким и звучним изолационим материјалима док трећа хипотеза представља могућност дефинисања оптималног састава биокомпозитног материјала, који ће се у исто време сматрати добрим термичким и звучним изолатором. С обзиром да се испитивања врше на три различита биокомпозита и пет дебљина узорака, применом вишекритеријумске анализе одређен је оптимално добар термички и звучни изолатор.

Прегледом актуелних литературних навода утврђено је да постоји већи број истраживања усмерених на примену пољопривредне биомасе за производњу изолационих материјала уз употребу различитих синтетичких везива. Мањи број истраживања је фокусиран на примену природних везивних средстава. Прегледом литературе нису пронађена истраживања која се баве применом материјала сачињеног од млевеног окласка кукуруза у комбинацији са дрвним отпадом-пиљевином и додатком ЕПС.

На основу литературних извора дефинисан је програм експерименталног истраживања дисертације. Први део чини справљање узорака три различите биокомпозитне масе а затим испитивање параметара на свакој од њих. Број узорака за свако испитивање по мешавини (укупно три мешавине), по дебљини (укупно пет различитих дебљина) је три до пет. На основу добијених резултата извршена је вишекритеријумска оптимизација за одређивање оптимално доброг термичког и акустичког изолатора. Такође, урађен је прорачун енергетске ефикасности на примеру зида са различитим склопом. Експериментални и прорачунски добијени резултати одређују квалитет сваког биокомпозита дефинисањем његове практичне примене.

Ово истраживање је представило могућност производње биокомпозитних термоизолационих и акустичких материјала задовољавајућих изолационих карактеристика безбедних по људско здравље. Испитиване врсте биокомпозита могу да се примењује као грађевински изолациони материјали у стамбеним објектима уколико се обезбеде неопходни услови за монтажу и безбедносне мере. Постоји

значајан потенцијал у унапређењу ових биокompозита са циљем смањења трошкова производње и побољшања испитиваних карактеристика. Такође, утврђено је да биокompозит има значајан научно-истраживачки потенцијал са аспекта примене и других врста биомасе.

Кључне речи: Биокompозити, биомаса, топлотни изолатори, звучни изолатори

ABSTRACT

The increasing energy requirements for maintaining the microclimate in residential buildings and the measures applied to preserve the health of people and the environment have contributed to the consideration of the issues analyzed in the paper. The goals of the research are the production of new biocomposite insulation materials using biomass from agricultural production and sawdust as aggregate with the addition of expanded polystyrene (EPS) granules, in order to improve the thermal characteristics of the material, lime and gypsum as a binding agent, as well as the examination of the characteristics and the possibility of applying these insulation materials. The thesis contains three working hypotheses, of which the first hypothesis represents the possibility of waste biomaterials getting a new use value. The second hypothesis assumes that biocomposite materials can be comparable to existing thermal and sound insulation materials, while the third hypothesis represents the possibility of defining the optimal composition of a biocomposite material, which at the same time will be considered as a good thermal and sound insulator. Given that the tests are performed on three different biocomposites and five sample thicknesses, an optimally good thermal and sound insulator was determined using a multi-criteria analysis.

A review of the current literature found that there is a large number of researches focused on the application of agricultural biomass for the production of insulation materials with the use of various synthetic binders. A smaller amount of research is focused on the application of natural binders. A review of the literature did not find any research dealing with the application of material made of ground corn cobs in combination with wood waste-sawdust and the addition of EPS.

Based on literature sources, the program of experimental research of the dissertation was defined. The first part consists of making samples of three different biocomposite masses and then testing the parameters on each of them. The number of samples for each test per mix (total of three mixes), per thickness (total of five different thicknesses) is three to five. Based on the obtained results, a multi-criteria optimization was performed to determine the optimal thermal and acoustic insulator. Also, the calculation of energy efficiency was made on the example of a wall with a different assembly. Experimental and calculated results determine the quality of each biocomposite individually by defining its practical application.

This research presented the possibility of producing biocomposite thermal insulation and acoustic materials with satisfactory insulation characteristics safe for human health. The tested types of biocomposite can be used as building insulation materials in residential buildings if the necessary conditions for assembly and safety measures are provided. There is significant potential in improving these biocomposites with the aim of reducing production costs and improving the tested characteristics. Also, it was determined that the biocomposite has a significant scientific and research potential from the aspect of application other types of biomass also.

Key words: Biocomposites, biomass, thermal insulation, sound insulation

САДРЖАЈ

I УВОД

1.1	Увод	2
1.2	Потреба за истраживањем	3
1.3	Предмет, циљ и методологија истраживања	4
1.4	Применљивост резултата испитивања	7
1.5	Кратак приказ садржаја рада	8

II БИОМАСА- ОБНОВЉИВ ИЗВОР ЕНЕРГИЈЕ

2.1	Увод	10
2.2	Дефиниција и класификација биомасе	12
2.3	Пољопривредна биомаса	14
2.4	Дрвна биомаса	19
2.5	Материјали као агрегати	23
2.5.1	Дрвни и пољопривредни отпад	23
2.5.1.1	Пиљевина	23
2.5.1.2	Кукурузовина (млевени окласак кукуруза)	24
2.5.2	Грануле експандираног полистирена	25
2.6	Минерална везива	26
2.6.1	Грађевински гипс	26
2.6.2	Грађевински креч	27

III ТЕРМИЧКА И АКУСТИЧКА СВОЈСТВА БИОКОМПОЗИТНИХ МАТЕРИЈАЛА

3.1	Увод	30
3.2	Значај и потреба одређивања термофизичких својстава материјала	30
3.3	Преношење топлоте и топлотна проводљивости	32
3.4	Методе мерења топлотне проводљивости	33
3.4.1	Стационарне методе	35

3.4.1.1	Метода са флуксметром	35
3.4.1.2	Метода заштићене топле плоче	36
3.4.1.3	Метода са директним електричним грејањем	37
3.4.1.4	Метода са аксијалним током топлоте	38
3.4.1.5	Компаративна метода са аксијалним током топлоте	39
3.4.1.6	Метода радијалног топлотног тока	40
3.4.2	Нестационарне методе (транзијентне)	41
3.4.2.1	Метода са линијским извором топлоте (метода топле жице)	42
3.4.2.2	Транзијентна метода равног извора	43
3.4.2.3	Импулсна транзијентна метода	44
3.4.2.4	Ласерска импулсна метода	46
3.4.2.5	3ω метода	47
3.5	Материјали као звучни апсорбери	48
3.5.1	Увод	48
3.5.1.1	Порозни апсорбери	49
3.5.1.2	Механички (мембрански) апсорбери	55
3.5.1.3	Резонаторски апсорбери	57
3.5.2	Биоматеријали као звучни апсорбери	59
3.5.3	Коефицијент апсорпције	63
3.5.4	Параметри који утичу на апсорпцију звука материјала	65
3.5.5	Методе за одређивање отпора протока ваздуха	69
3.5.5.1	Метода са сталним протоком ваздуха	69
3.5.5.2	Метода са променљивим протоком ваздуха	70
3.5.5.3	Основне величине и услови испитивања	70
3.5.6	Модели за одређивање акустичких особина порозних материјала	73
3.5.6.1	Импеданса једног хомогеног слоја	76
3.5.6.2	Импеданса вишеструког слоја	77
3.5.6.3	Одређивање таласне импедансе и константе простирања	78

IV ТЕОРИЈЕ ОДЛУЧИВАЊА - вишекритеријумска анализа (ВКА)

4.1	Основни појмови одлучивања	83
4.2	Вишекритеријумска анализа	83
4.2.1	Методе вишекритеријумске анализе за избор изолационог материјала	83
4.2.1.1	Процес решавања проблема вишекритеријумске анализе	84
4.2.1.2	Преглед постојећих метода вишекритеријумске анализе	86
4.2.2	Сива релациона анализа (ГРА)	89

V ЕКСПЕРИМЕНТАЛНО ИСТРАЖИВАЊЕ

5.1	Увод	92
5.2	Програм експерименталног истраживања	92
5.3	Компонентни материјали	93
5.4	Израда биокompозита П, К и М	96
5.5	Методе и опрема	97
5.5.1	Испитивање морфолошких својстава	97
5.5.2	Одређивање порозности и упијања воде	98
5.5.3	Мерење отпора протока ваздуха	100
5.5.3.1	Поступак испитивања и одређивања вредности отпорности струјању ваздуха	104
5.5.4	Чврстоћа при притиску	105
5.5.5	Чврстоћа при савијању	107
5.5.6	Специфични топлотни капацитет	108
5.5.7	Топлотна проводљивост биокompозита	108
5.5.8	Фактор отпора дифузији водене паре	110
5.6	Енергетска ефикасност зидних склопова	113

VI РЕЗУЛТАТИ И ДИСКУСИЈА

6.1	Морфолошка својства	115
6.2	Порозност, упијање воде и запреминска маса биокompозита М, П и К	116
6.3	Отпор протока ваздуха	121
6.4	Чврстоћа при притиску	136

6.5 Чврстоћа при савијању	136
6.6 Специфични топлотни капацитет	138
6.7 Топлотна проводљивост биокомпозита М, П и К	138
6.8 Стандардна девијација	141
6.9 Дифузија водене паре и енергетска ефикасност	146
6.10 Сива релациона анализа ГРА	155
6.11 Практична примена биокомпозита	157
6.12 Правци даљег истраживања	158
6.13 Закључак	159

VII ЛИТЕРАТУРА	162
-----------------------	-----

VIII ПРИЛОЗИ

Прилог 1 - Порозност и упијање воде	175
Прилог 2 – Запреминска маса	176
Прилог 3 - Чврстоћа при притиску	177
Прилог 4 - Чврстоћа при савијању	178
Прилог 5 - Специфични топлотни капацитет	179
Прилог 6 - Отпор протока ваздуха	180
Прилог 7 – Коефицијент топлотне проводљивости	210

Списак слика:

Слика 1. Глобална расподела енергије и емисије CO ₂ у грађевинарству	2
Слика 2. Коришћење биоенергије по секторима и удео савремене биоенергије у укупној финалној потрошњи у нето нултом сценарију, 2010 – 2030	10
Слика 3. Процентуална заступљеност обновљивих извора енергије у Републици Србији	13
Слика 4. Густина производње пшенице и кукуруза у општинама Србије, подаци се односе на принос зрна равнотежног садржаја влаге	15
Слика 5. Расположиви потенцијал у биомаси по регионима у Србији	17
Слика 6. Кружење CO ₂	18
Слика 7. Површина под шумом у Србији	19
Слика 8. Цепана дрва	20
Слика 9. Дрвени угаљ- ђумур	20
Слика 10. Дрвени брикети	21
Слика 11. Различите форме дрвне сечке	21
Слика 12. Дрвени пелет	22
Слика 13. Попречни пресек окласка кукуруза	25
Слика 14. Кристали гипса широм света	26
Слика 15. Производња креча	27
Слика 16. Шематски приказ методе са флуksметром	35
Слика 17. Принцип методе заштићене топле плоче: а) једностране, б) двостране	37
Слика 18. Шематски приказ методе са директним електричним грејањем	38
Слика 19. Шематски приказ система заштићеног аксијалног топлотног тока компаративне методе	40
Слика 20. Принцип методе радијалног топлотног тока	41
Слика 21. Принцип методе са линијским извором топлоте	42
Слика 22. Принцип методе равног извора	44
Слика 23. Шематски блок дијаграм импулсне транзијентне методе	45
Слика 24. Шематски блок дијаграм ласерске импулсне методе	46
Слика 25. Принцип 3 ω методе	47
Слика 26. Расподела енергије звучног таласа који удари у грађевински елемент	48

Слика 27. Типови звучних апсорбера у зависности од фреквенцијског спектра буке и коефицијента звуцне апсорпције	49
Слика 28. Порозни апсорбер	49
Слика 29. Графички приказ утицаја дебљине минералне вуне на коефицијент апсорпције материјала	50
Слика 30. Графички приказ утицаја отпора струјања на коефицијент апсорпције материјала	51
Слика 31. Графички приказ утицаја порозности на коефицијент апсорпције материјала	51
Слика 32. Графички приказ утицаја положаја материјала у односу на зид на коефицијент апсорпције материјала	52
Слика 33. Апсорпција звука у дебелом и танком слоју порозног апсорбера	53
Слика 34. Акустик плоче	54
Слика 35. Примери порозних апсорбера: а) минерална вуна, б) акустичка пена, в) азмафон	54
Слика 36. Мембрански апсорбер	55
Слика 37. Начини савијања мембране на различитим фреквенцијама звучних таласа	55
Слика 38 а и б. Промена фреквенције резонансе мембране са дебљином ваздушне коморе	56
Слика 39. Начини промене фреквенције резонансе мембране	57
Слика 40. Helmholtsov резонатор са пригушним материјалом	57
Слика 41. Ефекат уношења апсорпционог материјала у комору	58
Слика 42. Акустички резонатор са и без апсорпционог материјала	58
Слика 43. Процеси који настају при наиласку звучних таласа на препреку	63
Слика 44. Простирање звучног таласа кроз порозни материјал	64
Слика 45. Графички приказ пресека порозног чврстог материјала	65
Слика 46. Три основна типа порозних апсорбујућих материјала	66
Слика 47. Простирање звучних таласа кроз ваздух и кроз систем пора и шупљина порозног материјала	68
Слика 48. Метода са сталним протоком ваздуха	69
Слика 49. Метода са променљивим протоком ваздуха	70

Слика 50. Шематски приказ мерења отпорности струјању ваздуха	71
Слика 51. Нормализована реална и имагинарна компонента карактеристичне импедансе у функцији од односа фреквенције и подужне отпорности струјању ваздуха	75
Слика 52. Нормализована реална и имагинарна компонента карактеристичне импедансе у функцији од односа фреквенције и подужне отпорности струјању ваздуха	75
Слика 53. Ознаке коришћене за израчунавање импедансе једнослојног	77
Слика 54. Вишеслојни систем са ваздушним међупростором	78
Слика 55. Нормализована реална компонента импедансе у функцији од бездимензионе променљиве $E = \epsilon_0 / \sigma$	80
Слика 56. Нормализована имагинарна компонента импедансе у функцији од бездимензионе променљиве $E = \epsilon_0 / \sigma$	80
Слика 57. Нормализована константа слабљења у функцији од бездимензионе променљиве $E = \epsilon_0 / \sigma$	80
Слика 58. Нормализована фазна константа у функцији од бездимензионе променљиве $E = \epsilon_0 / \sigma$	80
Слика 59. Кораци у процесу решавања проблема избора материјала применом ВКА	85
Слика 60. Хронолошки преглед метода вишекритеријумске анализе	89
Слика 61. Букова пиљевина коришћена за прављење узорака	94
Слика 62. Млевени окласак кукуруза	94
Слика 63. Грануле експандираног полистирена	95
Слика 64. Калупи за узорке	96
Слика 65. Узорци	97
Слика 66. Стереоскопски микроскоп Carl Zeiss SteREO Discovery	97
Слика 67. Сушница	98
Слика 68. Вага CONTROLS 11-D0629/A	98
Слика 69. Вага KERN FKB 16K0.1	98
Слика 70. Поступак вакумирања узорака	99
Слика 71. Блок дијаграм система са сталним протоком ваздуха	100
Слика 72. Диференцијални мерач TESTO 511	102
Слика 73. Попречни пресек мерне ћелије	103

Слика 74. Обујмица (спојка) за цеви	103
Слика 75. Мерни систем за мерење отпора струјања ваздуха	104
Слика 76. Подужни пресек мерне цеви са узорком	105
Слика 77. Узорци за испитивање чврстоће при притиску	106
Слика 78. Испитивање чврстоће на притисак	106
Слика 79. Механизам за оптерећивање узорака при савијању према EN 12089 стандарду	107
Слика 80. Стационарно провођење и пролаз топлоте кроз раван зид	109
Слика 81. Флуксметар Kyoto electronics HFM 201, сензор TR2-B	110
Слика 82. Металне плоче као део опреме за формирање мерног ланца	110
Слика 83. Посуда са узорком за испитивање отпора дифузији водене паре	111
Слика 84. Климакомора	112
Слика 85. Микроскопски приказ биокомпозита М	115
Слика 86. Микроскопски приказ биокомпозита К	115
Слика 87. Микроскопски приказ биокомпозита П	116
Слика 88. Средње вредности порозности за предметне биокомпозите	117
Слика 89. Средње вредности упијања воде за предметне биокомпозите	118
Слика 90. Средње вредности запреминске масе за предметне биокомпозите	118
Слика 91. Графички приказ линеарне корелације ϕ - γ по дебљинама	120
Слика 92. Корелација између специфичне отпорности струјању и брзине струјања ваздуха за први узорак биокомпозита К дебљине 50mm	123
Слика 93. Корелација између специфичне отпорности струјању и брзине струјања ваздуха за други узорак биокомпозита К дебљине 50mm	123
Слика 94. Корелација између специфичне отпорности струјању и брзине струјања ваздуха за трећи узорак биокомпозита К дебљине 50mm	123
Слика 95. Графички приказ линеарне корелације ϕ - τ по дебљинама	127
Слика 96. Графички приказ линеарне корелације γ - τ по дебљинама	129
Слика 97. Упоредни приказ коефицијената апсорпције за биокомпозит П дебљине узорака 10 mm	131
Слика 98. Упоредни приказ коефицијената апсорпције за биокомпозит К дебљине узорака 10 mm	131

Слика 99. Упоредни приказ коефицијената апсорпције за биокмползит М дебљине узоракa 10 mm	132
Слика 100. Упоредни приказ коефицијената апсорпције за биокмползит П дебљине узоракa 20 mm	132
Слика 101. Упоредни приказ коефицијената апсорпције за биокмползит К дебљине узоракa 20 mm	132
Слика 102. Упоредни приказ коефицијената апсорпције за биокмползит М дебљине узоракa 20 mm	133
Слика 103. Упоредни приказ коефицијената апсорпције за биокмползит П дебљине узоракa 30 mm	133
Слика 104. Упоредни приказ коефицијената апсорпције за биокмползит К дебљине узоракa 30 mm	133
Слика 105. Упоредни приказ коефицијената апсорпције за биокмползит М дебљине узоракa 30 mm	134
Слика 106. Упоредни приказ коефицијената апсорпције за биокмползит П дебљине узоракa 40 mm	134
Слика 107. Упоредни приказ коефицијената апсорпције за биокмползит К дебљине узоракa 40 mm	134
Слика 108. Упоредни приказ коефицијената апсорпције за биокмползит М дебљине узоракa 40 mm	135
Слика 109. Упоредни приказ коефицијената апсорпције за биокмползит П дебљине узоракa 50 mm	135
Слика 110. Упоредни приказ коефицијената апсорпције за биокмползит К дебљине узоракa 50 mm	135
Слика 111. Упоредни приказ коефицијената апсорпције за биокмползит М дебљине узоракa 50 mm	136
Слика 112. Вредности чврстоће при притиску	137
Слика 113. Лом узорка при испитивању чврстоће при савијању	138
Слика 114. Вредности чврстоће при савијању	138
Слика 115. Линеарна корелација ϕ - λ за дебљину узоракa 10mm	141
Слика 116. Линеарна корелација ϕ - λ за дебљину узоракa 20mm	141
Слика 117. Линеарна корелација ϕ - λ за дебљину узоракa 30mm	141
Слика 118. Линеарна корелација ϕ - λ за дебљину узоракa 40mm	141
Слика 119. Линеарна корелација ϕ - λ за дебљину узоракa 50mm	142

Слика 120. Вредности порозности за биокompозите М, П и К по дебљинама	144
Слика 121. Вредности коефицијента топлотне проводљивости за биокompозите М, П и К по дебљинама	145
Слика 122. Вредности топлотног флуksа за биокompозите М, П и К по дебљинама	145
Слика 123. Вредности подужног отпора струјања ваздуха за биокompозите М, П и К по дебљинама	146
Слика 124. Биокompозити П, К и М као изолационог материјала на фасадном зиду од грађевинског блока, плоча димензија 500*500 mm	157
Слика 125. Биокompозити П, К и М као изолационог материјала на фасадном зиду од бетона, плоча димензија 500*500 mm	158
Слика 126. Корелација између специфичне отпорности струјању и брзине струјања ваздуха за први узорак биокompозита К дебљине 10mm	181
Слика 127. Корелација између специфичне отпорности струјању и брзине струјања ваздуха за други узорак биокompозита К дебљине 10mm	181
Слика 128. Корелација између специфичне отпорности струјању и брзине струјања ваздуха за трећи узорак биокompозита К дебљине 10mm	181
Слика 129. Корелација између специфичне отпорности струјању и брзине струјања ваздуха за први узорак биокompозита К дебљине 10mm	183
Слика 130. Корелација између специфичне отпорности струјању и брзине струјања ваздуха за други узорак биокompозита К дебљине 20mm	183
Слика 131. Корелација између специфичне отпорности струјању и брзине струјања ваздуха за трећи узорак биокompозита К дебљине 20mm	183
Слика 132. Корелација између специфичне отпорности струјању и брзине струјања ваздуха за први узорак биокompозита К дебљине 30mm	185
Слика 133. Корелација између специфичне отпорности струјању и брзине струјања ваздуха за други узорак биокompозита К дебљине 30mm	185
Слика 134. Корелација између специфичне отпорности струјању и брзине струјања ваздуха за трећи узорак биокompозита К дебљине 30mm	185
Слика 135. Корелација између специфичне отпорности струјању и брзине струјања ваздуха за први узорак биокompозита К дебљине 40mm	187
Слика 136. Корелација између специфичне отпорности струјању и брзине струјања ваздуха за други узорак биокompозита К дебљине 40mm	187
Слика 137. Корелација између специфичне отпорности струјању и брзине струјања ваздуха за трећи узорак биокompозита К дебљине 40mm	187

[illegible]

Списак табела

Табела 1. Потенцијалне количине биомасе из остатака пољопривредне производње у Србији	16
Табела 2. Физичке особине биомасе	18
Табела 3. Енергетске вредности жетвених остатака	19
Табела 4. Упоредни преглед калоријске снаге одређених горива	22
Табела 5. Преглед развијених метода вишекритеријумске анализе	87
Табела 6. Усвојене ознаке композира за различите дебљине узорака	93
Табела 7. Просечна расподела честица у агрегату	95
Табела 8. Карактеристике вакуум пумпе	101
Табела 9. Карактеристике флуксметра Kyoto electronics HFM 201	110
Табела 10. Услови средине за испитивање фактора отпора дифузији водене паре за хигроскопне материјале према стандарду EN 12086	111
Табела 11. Склопови зидних конструкција	113
Табела 12. Резултати одређивања порозности, запреминске масе и упијања воде	117
Табела 13. Резултати мерења отпорности струјању ваздуха за биокompозит К дебљине узорка 50 mm	122
Табела 14. Вредности отпорности струјању ваздуха и подужне отпорности струјању ваздуха за биокompозит М	124
Табела 15. Вредности отпорности струјању ваздуха и подужне отпорности струјању ваздуха за биокompозит П	124
Табела 16. Вредности отпорности струјању ваздуха и подужне отпорности струјању ваздуха за биокompозит К	124
Табела 17. Зависност отпора протока ваздуха од порозности материјала по дебљинама узорака	125
Табела 18. Вредности коефицијената топлотне проводљивости биокompозита П, М и К	138
Табела 19. Упоредна анализа порозности и коефицијента топлотне проводљивости биокompозита М, П и К по дебљинама	149
Табела 20. Резултати испитивања	142
Табела 21. Стандардна девијација вредности порозности за три биокompозита	142
Табела 22. Стандардна девијација вредности коефицијента топлотне проводљивости за три биокompозита	143

Табела 23. Стандардна девијација вредности топлотног флука за три биокмпозита	144
Табела 24. Стандардна девијација вредности подужне отпорности струјању ваздуха за три биокмпозита	144
Табела 25. Вредности отпора дифузији водене паре	146
Табела 26. Зидни склоп са ТИ ознаке П и керамичким блоком као основним материјалом	147
Табели 27. Прорачун дифузије водене паре за склоп 1 са керамичким блоком	147
Табела 28. Зидни склоп са ТИ ознаке П и бетонским платном као основним материјалом	148
Табела 29. Прорачун дифузије водене паре за склоп 1 са бетонским платном	149
Табела 30. Зидни склоп са ТИ ознаке М и керамичким блоком као основним материјалом	150
Табела 31. Прорачун дифузије водене паре за склоп 2 са керамичким блоком	151
Табела 32. Зидни склоп са ТИ ознаке М и бетонским платном као основним материјалом	151
Табела 33. Прорачун дифузије водене паре за склоп 2 са бетонским платном	152
Табела 34. Зидни склоп са ТИ ознаке К и керамичким блоком као основним материјалом	152
Табела 35. Прорачун дифузије водене паре за склоп 2 са керамичким блоком	153
Табела 36. Зидни склоп са ТИ ознаке К и бетонским платном као основним материјалом	154
Табела 37. Прорачун дифузије водене паре за склоп 3 са бетонским платном	154
Табела 38. Рангирање зидних склопова на основу параметра U	155
Табела 39 . Нормализација вредности алтернатива за оба критеријума	156
Табела 40. Резултати GRA	156
Табела 41. Резултати испитивања порозности и упијања воде биокмпозита	175
Табела 42. Вредности запреминске масе биокмпозита	176
Табела 43. Вредности чврстоће при притиску биокмпозита	177
Табела 44. Вредности чврстоће при савијању биокмпозита	178
Табела 45. Вредности масеног удела материјала који улазе у састав биокмпозита	179

Табела 46. Вредности отпора протока ваздуха биокompозита К дебљине узорака 10 mm 180

Табела 47. Вредности отпора протока ваздуха биокompозита К дебљине узорака 20 mm 182

Табела 48. Вредности отпора протока ваздуха биокompозита К дебљине узорака 30 mm 184

Табела 49. Вредности отпора протока ваздуха биокompозита К дебљине узорака 40 mm 186

Табела 50. Вредности отпора протока ваздуха биокompозита К дебљине узорака 50 mm 188

Табела 51. Вредности отпора протока ваздуха биокompозита М дебљине узорака 10 mm 190

Табела 52. Вредности отпора протока ваздуха биокompозита М дебљине узорака 20 mm 192

Табела 53. Вредности отпора протока ваздуха биокompозита М дебљине узорака 30 mm 194

Табела 54. Вредности отпора протока ваздуха биокompозита М дебљине узорака 40 mm 196

Табела 55. Вредности отпора протока ваздуха биокompозита М дебљине узорака 50 mm 198

Табела 56. Вредности отпора протока ваздуха биокompозита П дебљине узорака 10 mm 200

Табела 57. Вредности отпора протока ваздуха биокompозита П дебљине узорака 20 mm 202

Табела 58. Вредности отпора протока ваздуха биокompозита П дебљине узорака 30 mm 204

Табела 59. Вредности отпора протока ваздуха биокompозита П дебљине узорака 40 mm 206

Табела 60. Вредности отпора протока ваздуха биокompозита П дебљине узорака 50 mm 208

Табела 61. Вредности коефицијената топлотне проводљивости биокompозита 210

Списак прилога:

Прилог 1- Порозност и упијање воде	175
Прилог 2 – Запреминска маса	176
Прилог 3 - Чврстоћа при притиску	177
Прилог 4 - Чврстоћа при савијању	178
Прилог 5 - Специфични топлотни капацитет	179
Прилог 6 - Отпор протока ваздуха	180
Прилог 7 – Коефицијент топлотне проводљивости	210

Скраћенице и хемијске ознаке:

CO₂ – угљендиоксид

ОИЕ – обновљиви извори енергије

Mt - мегатона

П – пиљевина

К - окласак кукуруза

М - мешавина пиљевине и окласка кукуруза

ГРА метода - оптимизациона метода (сива релациона анализа)

ВКА – вишекритеријумска анализа

SRIO - Single Region Input-Output модел

ТТМ – традиционалне технике и материјали

СМ – конвенционални системи и материјали

АП – аутономна покрајина

LCA - методологија за процену одрживости материјала и производа

CaCl₂ - калцијум-хлорид

Na₂Cr₂O₇·2H₂O - натријумдихромат

GRC – сиви релациони коефицијент

ЕПС – експандирани полистирен

ТИ – термоизолација

Симболи:

λ - топлотна проводљивост

Q - топлотни флуks кроз узорак

A - површина кроз коју флуks пролази

d - дебљина узорка

ΔT - разлика температура на површинама узорка

ρ - специфична електрична отпорност

L – дужина узорка

A - попречни пресек узорка

i_h – струја за време грејања узорка

ΔU_h - пад напона за време грејања узорка

T - температура на растојању x од унутрашње тачке која се разматра

T_0 - температура зида коморе (температура краја цилиндра)

p - обим попречног пресека цилиндра

ε - тотална емисивност површине

σ - Штефанова константа зрачења

ω - површина попречног пресека цилиндра

ρ - специфична отпорност

I - електрична струја загревања

T_L - температура на средини штапа

T_∞ - температура бесконачно дугачког штапа

L - дужина

λ_r – топлотна проводљивост референтног материјала

λ_s – топлотна проводљивост стационарног стања материјала

H – дужина грејача

Q/H - специфични топлотни флуks по јединици дужине цилиндра

ΔT - разлика температуре у две тачке одређене радијусима r_1 и r_2 дуж температурног градијента

α - топлотне дифузивности

ρ - густина материјала

c_p - специфична топлота при константном притиску

$T_2 - T_1$ - разлике температуре током познатог интервала времена (t_1, t_2)

q - топлотног флуksа грејача

$\overline{\Delta T}(\tau)$ - средња температура променљиве τ

r - полупречник сензора

α - топлотна дифузивност узорка

t - време

P_0 - укупна излазна снага

$D(\tau)$ - карактеристична временски зависна функцију

m - број концентричних кругова сензора

$T(h, t)$ - транзијентна температура термопарског споја

R - отпорност планарног грејача

α - топлотна дифузивност узорка

h - растојање између грејача и термопара

t_m - време за које се постиже максимални температурни одзив T_m

$t_{1/2}$ - време за које температура задње стране узорка достигне половину своје максималне вредности

ω - угаона фреквенца

f_1 и f_2 - две различите фреквенције

V - напон на траци фреквенције ω

$V_{3,1}$ - напон трећег хармоника за фреквенцију f_1

$V_{3,2}$ - напон на трећем хармонику за фреквенцију f_2

R - средња вредност отпорности металне траке

dR/dT - нагиб калибрационе криве отпорности у зависности од температуре

P_α - апсорбована енергија у јединици времена

P_u - укупна енергије у јединици времена

P_r - рефлектована енергија

r - коефицијент рефлексије

Δp - разлика ваздушног притиска испред и иза узорка

q_v - (запремински) ваздушни проток кроз узорак

Rs - специфична отпорност струјању ваздуха

R - отпорност струјању ваздуха

A - површина попречног пресека узорка управна на правац протока

d - дебљина узорка за испитивање у правцу протока ваздуха

Zc - специфична акустичка импеданса

kc - таласни број

R - реална компонента

X - имагинарни део

α - коефицијент апсорпције

P_α - апсорбована енергија у јединици времена

P_u - укупна енергија у јединици времена

P_r - рефлектована енергија

d – дебљина узорка

f - фреквенција

h – ход клипа

Ap - површина попречног пресека клипа

r - подужна (специфична) отпорност струјања ваздуха

Zc - специфична акустична импеданса

β - фазна константа

ω - кружна фреквенција

c - брзина звука

j - константа пригушења (dB/m)

Z_0 - карактеристична импеданса

γ - коефицијент простирања

Z_i - акустичка импеданса

W - таласна импеданса (карактеристична импеданса)

Z_0 - импеданса ослоња слоја материјала

L - дебљина слоја хомогеног материјала

$|W|$ - апсолутна вредност функције коју чине А и В функције

β - функција која дефинише однос угаоне брзине и акустичке брзине таласа при фреквенцији f

Z_i - импеданса на предњем делу

Γ - коефицијент простирања

Z_0 - карактеристична импеданса

ρ_0 - густина ваздуха

r - подужна отпорност струјању ваздуха

λ - таласна дужина

Z_R и Z_I - реални и имагинарни делови карактеристичне акустичке импедансе Z_c

α и β - реални и имагинарни делови коефицијента простирања

c_0 - брзина звука

f - фреквенција

φ - порозност

U_v - упијање воде

V - запремина тела неправилног облика

γ - запреминска маса

m_{hydr} - маса узорака мерених на хидростатичкој ваги

m_{sat} - маса засићених узорака

m_{dry} - маса осушених узорака

C_{ps} - средњи топлотни капацитет биокompatозита

g_i - масени удео материјала

C_{pi} - специфични топлотни капацитет појединачног материјала

q - топлотни флукс

t_{n+1} - температура последње, спољашње, хладније површине зида

δ_i - дебљина i - тог слоја зида

U - коефицијент пролаза топлоте

R_{si}, R_{se} - отпори прелаза топлоте са ваздуха на унутрашњу површину зида

δ_i - дебљина i -тог слоја конструкције

λ – коефицијент топлотне проводљивости

i – редни број алтернативе ($i=1,2,\dots,15$)

k – редни број критеријума ($k=1,2$)

η - сиве релационе оцене

n – укупни број критеријума

ω_k – тежински коефицијент критеријума k при чему $\sum_{k=1}^n \omega_k = 1$

$\mu(\cdot)$ - дифузији водене паре

U - коефицијента топлотне проводљивости

t - температура

R - отпор пролаза топлоте

I УВОД

1.1 УВОД

Чињеница да је грађевинарство делатност која у 21. веку троши највећу количину природних ресурса, доводи до потребе за проналажењем алтернативних извора сировина. Изградња и експлоатација зграда заслужне су за 35% укупно потрошене енергије, на глобалном нивоу. За разлику од потражње енергије која је стабилна, емисија угљендиоксида (CO_2) расте и заједно са употребом грађевинског материјала, транспортом и изградњом, грађевинарство је одговорно за 38% укупне емисије CO_2 (Слика 1.) [1].



Слика 1. Глобална расподела енергије и емисије CO_2 у грађевинарству (GASC, 2020)

Ово је разлог све веће тежње грађевинске индустрије ка приступу градње, који је познат под називом „зелена градња“, чији је резултат смањење емисије CO_2 [2]. Са друге стране, загађење животне средине расте због све веће количине отпада на депонијама који настаје услед развоја индустрије. Због тога се данас тежи ка поновној употреби отпадних материјала, индустријских нуспроизвода и пољопривредног отпада.

Индустрија прераде дрвета као и остале гране индустрије се све више осврћу на очување и заштиту животне средине. Приликом прераде дрвета, међу отпадом који настане, пиљевина има веома важну улогу. Пољопривредни отпад налази све већу примену у свакодневном животу. Неки од њих већ има утврђену употребу, као што је лан и конопља, док се други и даље испитују у циљу њиховог максималног искоришћења. Стога је јако битна свест људи о искоришћењу отпада, тачније, тежња ка добијању нове употребне вредности отпадног материјала његовим враћањем у процес производње. Поновном употребом отпада значајно би се утицало на очување и заштиту животне средине. Оваква свест довела је и до развоја нових природних материјала, који замењују класичне материјале. Све већа тежња ка производњи материјала на био бази има позитиван утицај на одрживу производњу и смањење

негативног еколошког утицаја. Искоришћењем отпадних материјала, као вредних сировина, из других индустрија производе се нови материјали који се могу користити као замена за већ постојеће. Као грађевински материјали, ови нуспроизводи могу добити нову употребну вредност, а помажу и очувању како националних тако и глобалних природних ресурса.

Коришћење све веће количине агрегата отвара питање исцрпљивања природних ресурса и потребе за проналажењем нових материјала за добијање истог. Стално трагање за начинима да се што више очувају природни ресурси треба да резултира заменом коришћења природне сировине алтернативним материјалима, као што су индустријски секундарни производи, пољопривредни биљни отпад и грађевински отпад, чије депоновање представља велики еколошки проблем. Такви материјали се могу користити као агрегати-пунила или минерални додаци. Тачније, они могу бити потпуна или делимична замена већ одавно коришћених агрегата или везива. Технологије које се све више примењују за производњу нових материјала подразумевају коришћење отпадних материјала попут:

- различитих врста биомаса,
- остатака при сагоревању,
- нуспроизводе индустрије,
- рециклажне материјале као што су стакло, гума, пластика
- остатке изградње и рушења објеката итд.

1.2 ПОТРЕБА ЗА ИСТРАЖИВАЊЕМ

Неисцрпни извори енергије из природе који се обнављају у одређеном временском интервалу представљају обновљив извор енергије (ОИЕ). Ови извори се користе у циљу производње електричне, топлотне и механичке енергије, при чему се издваја њихова најбитнија карактеристика а то је да немају негативних утицаја на околину, због смањене емисије CO₂ у процесу производње.

Наша држава располаже са бројним обновљивим изворима енергије: геотермална енергија, биомаса, Сунце, вода и ветар. Значајно смањење коришћења фосилних горива лежи у потенцијалу Србије, и то у обновљивим изворима енергија, који износе 6Mt годишње. Од укупне количине 64% представља биомаса што износи око 3,4 Mt годишње [3].

Србија спада у врх европских земаља по количини расположиве биомасе, као највећи обновљиви извор енергије. Ово је разлог све веће производње опреме за коришћење

биомасе. Домаћа индустрија указује да постоји добра перспектива за поновну употребу биомасе а самим тим и тржиште се развија за примену исте.

У нашој земљи је истраживана могућност примене одређених врста биомаса као обновљивог извора енергије. Међутим, употреба окласка кукуруза заостаје у односу на остали пољопривредни отпад. Ова врста биомасе у комбинацији са отпадом који настаје услед прераде дрвета, може представити занимљиву алтернативу многим, одавно коришћеним материјалима у грађевинарству. Комбинацијом споменутих материјала створила би се додатна употребна вредност овом отпадном материјалу и омогућило би се стварање услова за одрживи развој у овом сегменту привреде. Индустрија производње биоматеријала има велике потенцијале за позитиван помак према одрживој производњи и смањењу негативног еколошког утицаја.

Употреба пољопривредног отпада или отпада из индустрије прераде дрвета као компонената за прављење новог материјала подразумева темељно познавање карактеристика тог агрегата. Ту се пре свега мисли на запреминску и специфичну масу, упијање воде, чврстоћу итд. Велики проценат пољопривредног отпада, зависно од састава и порекла уз одређене технологије обраде, се може поновно искористити као економски вредна сировина. Могућности кориштења зависе од стања отпада, тј. од испуњавања основних захтева тог материјала као агрегата, али и од захтева коначног производа, његове намене. Имајући у виду велике количине пољопривредног отпада и његов проблем депоновања, може се рећи да се коришћењем истог у новом процесу производње, као и његова поновна употреба могу сматрати једним од решења која теже принципима одрживог развоја у грађевинарству.

1.3 ПРЕДМЕТ, ЦИЉ И МЕТОДОЛОГИЈА ИСТРАЖИВАЊА

Предмет истраживања су нови биокompatитни материјали, са аспекта:

- састава мешавина и њиховог еколошког значаја,
- основних физичких и механичких својстава,
- утицај порозности и дебљине узорака мешавина на њихове карактеристике,
- задовољења принципа одрживог развоја по принципу оптимално доброг акустичког и термичког изолатора (што ће се оценити помоћу вишекритеријумске анализе).

У оквиру дисертације, предмет истраживања ће бити композитни материјали на биљној бази при чему ће се испитивати три врсте мешавина у пет различитих

дебљина узорака. Приликом планирања експерименталног истраживања дефинисани су и састави нових материјала, при чему ће се варирати:

- Удео окласка кукуруза као агрегата
- Удео пиљевине као агрегата

За израду узорака биокompозита дефинисан је следећи запремински удео компонентних материјала:

1. **Биокompозит П:** Пиљевина 53,5%, грануле ЕПС 13,5%, кречно – гипсана паста 33% (креч: гипс=4: 1),

2. **Биокompозит К:** Млевени окласак кукуруза 53,5%, грануле ЕПС 13,5%, кречно – гипсана паста 33% (креч: гипс=4: 1),

3. **Биокompозит М:** Пиљевина 26,75%, млевени окласак кукуруза 26,75%, грануле ЕПС 13,5%, кречно – гипсана паста 33% (креч: гипс=4: 1).

На предметним материјалима одређена су следећа својства:

- морфолошка својстава узорака,
- порозност материјала,
- упијање воде,
- запреминска маса,
- чврстоћа при притиску,
- чврстоћа при савијању,
- отпор струјања ваздуха,
- специфични топлотни капацитет,
- фактор отпора дифузији водене паре,
- топлотни флуks,
- коефицијент топлотне проводљивости.

На основу измерених вредности топлотног флуksа израчунат је коефицијент топлотне проводљивости на основу кога су дефинисани и описани биокompозити као топлотни изолатори док се на основу измерених вредности отпора струјања ваздуха одређује по питању звучне изолације.

Промена дебљине узорака, врсте агрегата (пиљевине и млевоног окласка кукуруза) као и његовог удела у биокompозитима омогућава дефинисање оптималног састава и дебљине ново испитиваних биокompозита са аспекта физичких и механичких својстава.

Резултати експерименталног истраживања предметне докторске дисертације помажу развоју и примени новог биокompозитног материјала, насталог максималним

искоришћењем биомасе, чиме се одређује одрживо управљање овом врстом отпада, заштита животне средине и даје нова употребна вредност овом производу у складу са принципима одрживог развоја у грађевинарству.

Циљ истраживања ове дисертације је да се кроз теоријску и експерименталну анализу резултата који су добијени на одабраним врстама биокомпозита оправда примена истраживаних врста материјала у грађевинарству и да се овом отпадном материјалу дефинише нова употребна вредност. Кроз испитивања се намеће још један циљ- одређивање оптималног изолаторског материјала по питању термичке и акустичке изолације истовремено.

Ради остварења постављеног циља истраживања одређено је следеће:

1. Утицај врсте материјала и његовог удела у биокомпозиту на основна физичко-механичка својства материјала,
2. Утицај порозности и дебљине узорака испитиваних биокомпозита на одабрана физичка и механичка својства,
3. Вишекритеријумска анализа испитиваних врста биокомпозита као доброг термичког и акустичког изолатора.

Резултати истраживања и изведени закључци представљају подлогу за дефинисање препорука за одрживо коришћење отпадних биоматеријала у композитима. Такође, резултати истраживања омогућавају дефинисање ограничења за примену новог материјала.

На основу постављеног циља, као основа за дефинисање плана и програма истраживања, постављене су полазне хипотезе:

Хипотеза 1: Отпадним биоматеријалима могуће је дати нову употребну вредност,

Хипотеза 2: Биокомпозитни материјали могу бити упоредиви са већ постојећим термичким и звучним изолационим материјалима,

Хипотеза 3: Могуће је дефинисати оптималан састав биокомпозитног материјала, који ће се у исто време сматрати добрим термичким и звучним изолатором.

Како би се провериле дефинисане хипотезе, спроведене су следеће активности:

- 1) Анализа расположивости биомасе у свету и код нас, врсте које се доминантно користе у свету, варијациони параметри, ограничења за примену, припрема материјала пре испитивања, и слично.
- 2) Опис карактеристика одређених врста биомасе.

3) Експериментално испитивање одабраних физичко-механичких својстава биокompозита у функцији:

- врсте примењеног агрегата,
- различите дебљине.

4) Доношење општих закључака о могућности и начину примене одабраних компонентних материјала за добијање новог биокompозита, као и оправданости примене биомасе као отпадног материјала.

Имајући у виду предмет и циљ истраживања предложене докторске дисертације, од изузетног је значаја правилан избор метода научно-истраживачког рада. На основу синтезе и критичке анализе резултата постојећих истраживања у овој области дефинисани су план и циљеви истраживања, а затим и експериментално истраживање. Анализа резултата испитивања базирана је на компаративној методи, где се параметри сва три биокompозита упоређују, а затим је примењена и оптимизациона анализа применом ГРА методе.

1.4 ПРИМЕНЉИВОСТ РЕЗУЛТАТА ИСПИТИВАЊА

Резултати експерименталног истраживања предметне докторске дисертације дефинишу могућност примене биомасе, добијене као пољопривредни отпад и отпад из индустријске производње дрвета, у биокompозитима, чиме се обезбеђује заштита животне средине, одрживо управљање овом врстом отпада и даје нова употребна вредност овом производу у складу са принципима одрживог развоја у грађевинарству.

Супституцијом већ коришћених материјала новим биокompозитним материјалима смањује се негативан еколошки утицај на животну средину. С друге стране, коришћењем агрегата од отпадног материјала решава се проблем прекомерне потрошње необновљивих природних ресурса, депоније отпада, чиме се омогућава стварање услова за одрживи развој у овом сегменту привреде а истовремено се добија нов материјал на био бази као звучни и топлотни изолатор објеката. Један од кључних разлога примене ове врсте материјала је потреба за енергетском ефикасношћу објеката и неопходној употреби термоизолационог и акустичког материјала, како због законске обавезе, тако и због све веће протражње за удобним и квалитетним становањем.

1.5 КРАТАК ПРИКАЗ САДРЖАЈА РАДА

У првом поглављу дефинисани су предмет и циљеви истраживања, постављене су основне хипотезе и описана је методологија истраживања, као и оправданост и применљивост предметног истраживања.

У другом поглављу представљен је потенцијал биомасе као обновљивог извора енергије у Србији. Дата је дефиниција и класификација биомасе, при чему је стављен акценат на пољопривредну и дрвну биомасу, као две врсте биомасе са највећим потенцијалом за употребу у енергетске сврхе.

У трећем поглављу дат је преглед стања у области истраживања биокомпозитних материјала. Анализирана су постојећа истраживања релевантних физичких и механичких својстава биокомпозита израђених од различитих врста материјала, првенствено од материјала који се користе у експерименталном истраживању предметне докторске дисертације (пиљевина и млевени окласак кукуруза са или без додатака гранула ЕПС). Акценат је стављен на термичке и акустичке особине биокомпозитних материјала.

Четврто поглавље се односи на теорије одлучивања, тачније на примену методе вишекритеријумске оптимизације (ВКА) ради дефинисања оптимално доброг изолационог материјала.

У петом поглављу је приказан план и програм експерименталног истраживања. У овом поглављу су описане мешавине материјала, величина и број узорака за испитивање, карактеристике опреме као и поступци испитивања материјала, анализираних физичких и механичких својстава биокомпозита. Поред тога, дефинисан је план и распоред испитивања материјала. На крају овог поглавља дефинисан је принцип оптималног избора биокомпозита са аспекта оптимално доброг термичког и звучног изолатора.

У шестом поглављу приказани су резултати и закључци везани за испитивана својства све три врсте биокомпозита. Истакнуте су предности и недостаци примене ових врста материјала са аспекта физичких и механичких својстава биокомпозита. На основу свих изведених закључака формиран је коначни закључак о могућности примене биокомпозита као термичког и акустичког изолатора зграда. Применом ГРА методе дефинисан је оптимално добар термички и акустички изолатор.

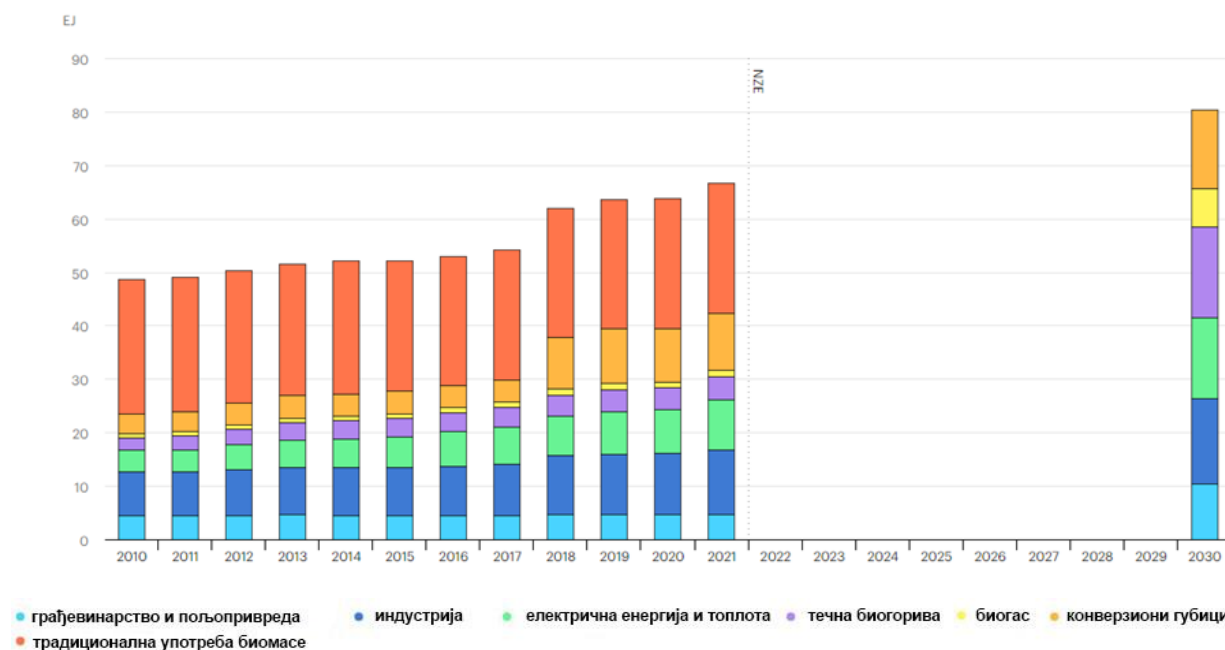
У седмом поглављу, дат је шири списак коришћене литературе и референци, као и називи стандарда који су коришћени у оквиру експерименталног дела дисертације.

У осмом поглављу, табеларно или у виду дијаграма су приказани резултати експерименталних испитивања у ширем обиму (у виду прилога)- измерене величине и израчунате вредности својстава одабраних за анализу.

II БИОМАСА - ОБНОВЉИВ ИЗВОР ЕНЕРГИЈЕ

2.1 УВОД

Главни проблеми савременог друштва су несигурно снабдевање и ограничена количина енергената, загађење животне средине и климатске промене које су директна последица потрошње залиха енергије. Економски раст и напредак земаља широм света су у директној вези са све већом потребом за различитим облицима енергије. Стога, снабдевање енергијом представља кључни фактор за економску стабилност, социјални мир, конкурентност на тржишту. Како би се обезбедио континуитет раста економије неопходно је обезбедити довољну количину енергије. Паралелно са порастом популације, расте и потреба за енергијом што представља један од будућих светских проблема због евентуалних недостатака енергената у будућности. Са друге стране, дугогодишњом анализом се предвиђа пораст потрошње енергије на светском нивоу од 33% до 2030. године. Ради уштеде енергије пројектован је Net Zero Сценарио до 2030. године са све већом применом биомасе и биоенергије и подразумева постепено избацавање фосилних горива. У периоду између 2010. и 2021. године употреба биомасе и биоенергије је порасла за око 7% при чему тренд ове примене наставља да расте (Слика 2.) [4].



Слика 2. Коришћење биоенергије по секторима и удео савремене биоенергије у укупној финалној потрошњи у нето нултом сценарију, 2010 – 2030 [4]

Како потреба за енергијом у свету расте, самим тим расте и емисија CO₂, стога то постаје један од главних праваца истраживања многих истраживача широм света. Taffese и остали [5] су идентификовали пет најкоришћенијих грађевинских материјала и елемената (цемент, песак, крупни агрегати, шупљи бетонски блокови и

арматурне шипке), који представљају изворе стварања отпада током изградње објеката. Затим је уследила процена искоришћених енергија и емисија CO₂ ових материјала испитивањем пет комерцијалних и јавних зграда од почетка градње до експлоатације. Резултати испитивања су показали да су цемент, шупљи бетонски блокови и арматурне шипке главни потрошачи енергије и главни емитери CO₂. Кумулативно, они су били одговорни за 94% потрошене енергије и 98% емисије CO₂. Отпадни део грађевинских материјала је значајно повећао искоришћење енергије као и накнадне емисије CO₂. Студија је такође препоручила неколико стратегија за смањење искоришћења енергије и повезане емисије CO₂. Овакав тип истраживања утиче на свест људи о важности потрошње енергије и емисији CO₂ и на тај начин се потпомаже очување животне средине. Lin и остали [6] сматрају да убрзани процес урбанизације, доводи и до брзог развоја грађевинске индустрије. Ова чињеница подразумева и велику потрошњу енергије, што резултира огромним притиском на животну средину. На основу улазно-излазних табела и користећи модел SRIO (Single Region Input-Output) анализирали су утрошену енергију у грађевинској индустрији од 1995. до 2009. године и направили пројекције за 2020. Резултати истраживања показују да око 4,84 милијарде тона енергије угља троши кинеска грађевинска индустрија. Овај податак имплицира да урбанизација не само да изискује више утрошка енергије, већ пружа могућности за развој зелене грађевинске индустрије која штеди енергију. Curto и остали [7] су истраживали нове материјале везане за грађевински сектор, утрошену енергију и емисију CO₂. Основна идеја је смањење потрошње енергије, посебно у стамбеном сектору, а самим тим и ограничавање директног и индиректног коришћења фосилних горива за услуге унутрашњег грејања, хлађења и вентилације. Обзиром да је у стамбеном сектору висока потрошња енергије, избор материјала је од суштинског значаја за побољшање одрживости. Све фазе изградња, животни век зграде и демонтажа утичу на потрошњу ресурса и енергије и уско су повезане са емисијама загађујућих материја у атмосферу. Pakdel и остали [8] су у испитивању настојали да открију еколошке предности коришћења традиционалних техника и земљаних материјала. Како би то потврдили истраживали су утрошену енергију и емисију CO₂. Користећи LCA методологију, утрошену енергију и емисију угљеника пилот пасивне зграде која је изграђена традиционалним техникама и материјалима (TTM) упоређивали су са зградом изграђеном од конвенционалних система и материјала (CSM). На основу испитивања, остварена потрошња енергије и емисије угљеника TTM-а је 2,86 GJ/m² и 220 kg CO₂ ек/m² што показује смањење од 43% и 48% у поређењу са CSM, респективно. На основу ове студије се може закључити да традиционалне технике и земљани материјали могу имати велики утицај на укупну енергију животног циклуса и емисију CO₂. Karla Vázquez-Calle и остали [9] су истраживали количину утрошене енергије и емисију CO₂ при производњи бетона. Студија је заснована на методологији процене животног циклуса установљеној стандардима. Производња бетона разматрана је годину дана, са приступом „од улаза

до излаза“, укључујући „транспорт сировине“ до фабрике бетона и накнадни „транспорт финалног производа“ до градилишта. Резултати су показали да је за производњу 1m^3 бетона било потребно 568,69 MJ енергије, уз 42,83 kg CO_2 . Индиректни транспорт ствара највећи утицај на животну средину, посебно „транспорт сировина“, који представља приближно 80% уграђене енергије и 79% емисије CO_2 . Yoon Young-Cheol и остали [10] су се бавили методом одрживог пројектовања који оптимизује утрошену енергију и емисију CO_2 стуба од армираног бетона. Конвенционално пројектовање овакве конструкције је фокусирано на минимизирање трошкова изградње уз задовољавање прописа за пројектовање конструкција. У процесу одрживог пројектовања, постављене су циљне функције за цену, уграђену енергију и емисију CO_2 и спроведене су бројне анализе оптимизације за различите услове оптерећења. Анализом резултата је закључено да са повећањем трошкова израде конструкције од 10%, утрошена енергија и емисија CO_2 могу бити подвргнуте укупном смањењу до 22%. Као резултат тога, предложени метод пројектовања омогућава да се утрошена енергија и емисије CO_2 ефикасно оптимизују у конвенционалном процесу пројектовања.

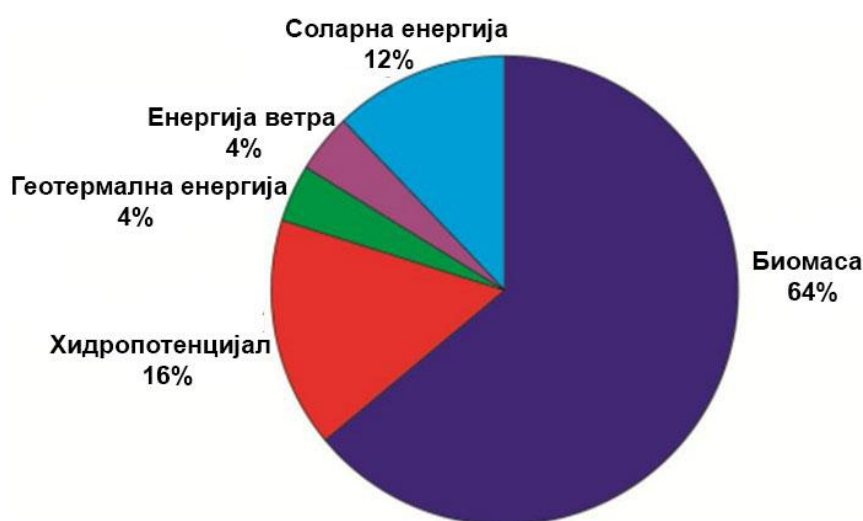
Једна од могућих стратегија смањења потрошње енергије и емисије CO_2 јесте коришћење биомасе, тј. отпадних материјала и нуспроизвода из других индустрија. Овакво затварање круга могуће је само ако се у обзир узму својства појединог отпадног материјала и искористе се приликом пројектовања где су та својства задовољавајућа.

2.2 ДЕФИНИЦИЈА И КЛАСИФИКАЦИЈА БИОМАСЕ

У земљама широм света, биомаса, као најчешћи облик обновљиве енергије (ОИЕ), је у све широј употреби и чини 55% обновљиве енергије и преко 6% глобалног снабдевања енергијом. Под термином биомаса се подразумевају отпадне материје, производи и остаци органског порекла (животињског и биљног), који су биоразградиви и представљају споредни производ из процеса прераде дрвета, пољопривредне производње, отпадни материјал из индустрије или чак представљају градски отпад. Биомаса као обновљив извор енергије представља највећи потенцијал за употребу у енергетске сврхе. У последње време се тежи проналаску погодних врста биомасе, које могу да замене конвенционалне изворе енергије. Једна од главних карактеристика материјала на бази биомасе је ниска емисија гасова стаклене баште, која је нижа од оних из необновљивих извора.

Република Србија као члан Енергетске заједнице следи енергетску политику Европске уније што подразумева коришћење обновљивих извора енергије (ОИЕ). Према

Националном плану везаном за обновљиве изворе енергије Републике Србије, биомаса представља најзначајнији потенцијал ОИЕ (Слика 3.) [11].



Слика 3. Проценуална засиуљеност обновљивих извора енерије у Рејублици Србији [11]

Биомаса се може добити из различитих извора и дели се на:

- пољопривредну биомасу (кукуруз, слама, лишће, шећерна трска, различите врсте шећерне репе, итд.),
- биомасу из шумарства (пиљевина, неискоришћено дрво, остаци пањева, полудивље дрвеће, итд.),
- биомасу са фарми животиња,
- биомасу из енергетских засада (репа, кромпир и специјалне врсте дрвећа, итд),
- биомасу из индустријског отпада (индустрије које прозводе органски отпад, као што је прехранбена индустрија и сл.)
- биомасу из градског отпада (на пример папир).

Анализом светског кретања у области искоришћења ОИЕ, закључује се да се развијене земље убрзано окрећу интензивној употреби ових извора енергије. Европска заједница се стратегијом Европа 2020 обавезала стварању „20/20/20” климатско-енергетског циља где ће се за 20% смањити емисију гасова у односу на 1990. годину, 20 % повећати удео обновљивих извора енергије у потрошњи енергената и за 20 % ће се повећати енергетска ефикасност објеката [12]. Сповођењем овог програма, неке земље Европе као што су Финска, Шведска, Аустрија итд. данас имају више од 20% комерцијалне енергије произведене из биомасе, док остале још увек теже ка томе.

Само искоришћење биомасе као и њена енергетска вредност имају велики енергетски потенцијал у обновљивим изворима енергије при чему он није у довољној мери искоришћен. Још једна од позитивних страна обновљивих извора енергије је знатно нижа цена у поређењу са конвенционалним изворима енергије. Анализом технолошког циклуса, посебно посматрано са еколошког аспекта, цена енергије добијене из пољопривредне биомасе је јако повољна [3].

Огромне потенцијале биомасе као извора енергије не умањује мала искоришћеност исте, проузрокована ниском топлотном вредношћу биомасе по јединици транспортне запремине и израженом просторном дисперзијом. Због наведених карактеристика, највећи део биомасе не може да буде економично експлоатисан. Насупрот томе, давањем нове употребне вредности овом отпаду, биомаса добија на значају. Стога се може закључити да примарна предност биомасе не лежи у њеном огромном потенцијалу већ у обновљивости што представља примат над класичним, фосилним горивима која су необновљива и не могу представљати основ за планирање одрживог развоја који подразумева рационално искоришћење [3].

Отпаци шећерне трске, кукуруза, љуске сунцокрета, влакна јуте, стабљике памука, пшеничне или сојине сламе, љуске пиринча итд. представљају најважније остатке пољопривредне биомасе у свету. Поновна употреба овог отпада у грађевинске сврхе представља решење не само са аспекта решења загађења већ и са аспекта депоновања, високе цене грађевинског материјала, као и очувања природних ресурса за будуће генерације.

У нашој земљи се биомаса најчешће употребљава у виду енергије за грејање и загревање топле воде. Поред наведеног, биомаса се може користити за производњу топлотне и електричне енергије, као сировина за производњу биогорива, у индустрији за производњу различитих врста хемикалија и влакана као и агрегат у спаривању нових материјала.

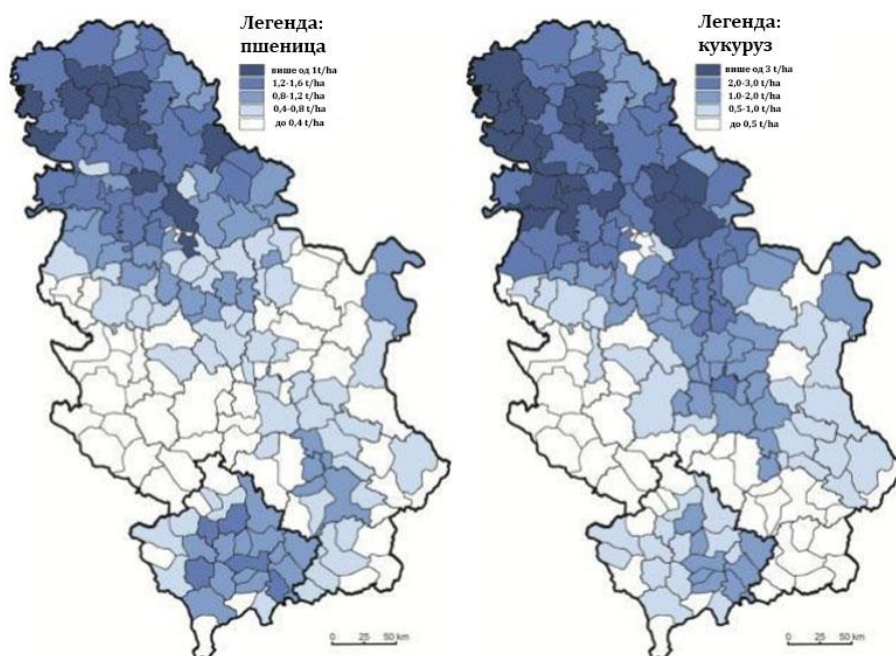
2.3 ПОЉОПРИВРЕДНА БИОМАСА

Пољопривредна биомаса представља значајан обновљиви енергетски извор у Србији, а најзначајнији у АП Војводини, јер је њена заступљеност на овом подручју највећа, на територији наше земље. Примена пољопривредне биомасе је обновљена осамдесетих година прошлог века, при чему се данас све више тежи проширењу области њене примене као што су технологије које резултирају генерисањем биогорива и електричне енергије.

На глобалном нивоу, из пољопривреде се годишње генерише у просеку 140 милијарди тона биомасе. У Европској Унији биомаса учествује са 4% у укупној потрошњи

енергије. Међутим, упркос великој потрошњи биомасе као извора енергије, највеће количине остају неискоришћене [13].

У Акционом плану за обновљиве изворе енергије Републике Србије процењује се да је потенцијал пољопривредне биомасе око 1,7 Мт. АП Војводина има највећи број пољопривредних површина на нивоу наше земље, док је и удео потенцијала тог подручја много већи од удела на површинама истих димензија у осталим крајевима. О овоме говори густина засаде пшенице и кукуруза (Слика 4.) [11].



Слика 4. Густина производње пшенице и кукуруза у општинама Србије, подаци се односе на принос зрна равнотежне садржаја влаге [11]

Често се при оцени потенцијала рачуна на целокупни принос жетвених остатака изнад површине земљишта. Међутим, дефинисање реалног потенцијала није баш тако једноставно. При овој оцени предлаже се примена више категорија и то:

- 1) Теоретски потенцијал,
- 2) Технички потенцијал,
- 3) Одрживи потенцијал,
- 4) Потенцијал за енергетске сврхе.

Теоретски потенцијал подразумева укупне жетвене остатке изнад земљишта и нема посебан значај за примену. Једина корист је да се оцени колика количина остаје на земљишту што се може урадити на основу осталих потенцијала. Ово може утицати на плодност земљишта.

Технички потенцијал представља количине жетвених остатака које се могу одређеном техником и поступком убрати. Ова врста потенцијала најчешће представља од 22 - 65 % теоретског потенцијала, што зависи од стања усева, биљне врсте и примењеног поступка убирања.

Одрживи потенцијал се односи на количину жетвених остатака који могу да се убера а да нема последица по плодности земљишта. Овај потенцијал зависи од бројних утицаја као што су стање земљишта, климатски услови, биљне врсте и др.

Енергетски потенцијал се добија тако што се од одрживог потенцијала одузму количине које се користе у друге намене. На пример, слама која се користи као подлога за производњу печурки или као простирка за животиње.

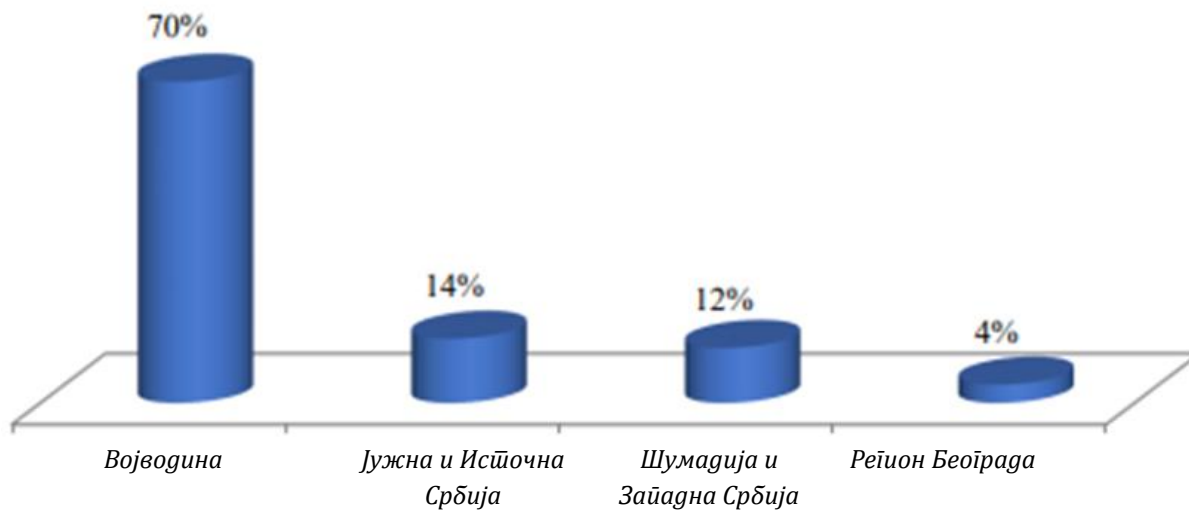
У табели 1. дат је преглед потенцијала биомасе из пољопривреде у Србији [14].

Табела 1. Потенцијалне количине биомасе из остатака пољопривредне производње у Србији

Биомаса	Биомаса за сагоревање (25% од укупне) (10³t)	Доња топлотна моћ (MJ/kg)	Еквивалентна вредност лаког угља за ложење (10³t)
Пшенична слама	743,75	14	247,92
Јечмена слама	103,13	14,2	34,87
Овсена слама	6,4	14,5	2,21
Ражена слама	3	14	1
Кукурузовина	1809,06	27,35	581,66
Окласак	357	14,7	124,95
Стабљика	200	14,5	69,05
Љуске	30	17,55	12,54
Сојина слама	80	15,7	29,9
Слама уљане	75	17,4	31,07
Стабљика хмеља	1,98	14	0,66
Стабљика	0,26	13,85	0,09
Остаци резидбе у воћњацима	289,44	14,15	97,5
Остаци резидбе у виноградима	71,55	14	23,85
Стајњак	110	23	60,24
Укупно:	3880,57	242,9	1317,51

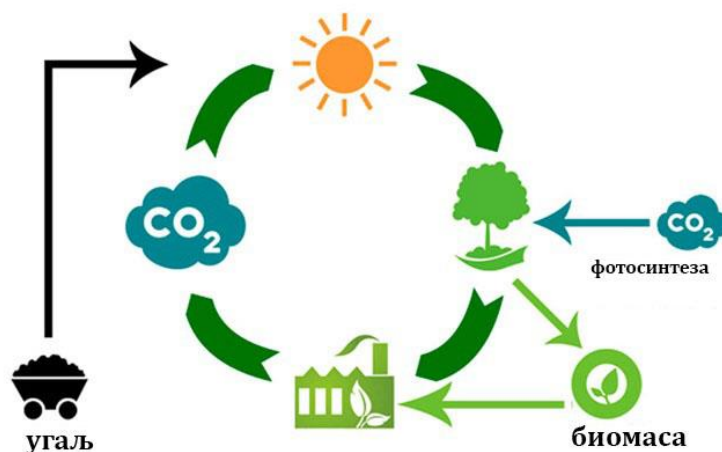
Анализа структуре биомасе из остатака пољопривредне производње показује да је око 15 % у жетвеним остацима сунцокрета, соје, уљане репице или резидбеним остацима дрвенастих биљака, више од четвртине у слами стрних жита, пре свега пшенице и више од половине ресурса лежи у кукурузној биомаси.

Биомаса као остатак пољопривредне производње се може користити као енергент за добијање топлотне и електричне енергије, али и као материјал за изолацију објеката. У овом погледу, у значајне пољопривредне изворе спадају остаци годишњих култура као што су: кукурузовина, окласак, слама, стабљике, љуске... Највећи проценат ових култура на највећој обрадивој површини у Србији, АП Војводини, чине житарице, чак 70%, 20% отпада на индустријско биље, а 10% на остале културе [3]. Када је реч о биомаси на територији Републике Србије, расположиви потенцијал у биомаси по регионима дат је на слици 5 [15].



Слика 5. Расположиви потенцијал у биомаси по регионима у Србији

Предност коришћења пољопривредне биомасе као енергента или материјала који се користи и у друге сврхе, представља оправданост и са еколошког аспекта. Еколошки аспекти коришћења биомасе су: биоразградивост јер се 95% материје биомасе разгради за 28 дана, мала количина сумпора - приликом сагоревања биомасе нема емисије угљоводоника и ова врста биомасе представља CO_2 неутралан извор енергије [16]. У процесу фотосинтезе, количина CO_2 коју биљка усвоји из атмосфере пропорционално је једнака количини CO_2 која се ослободи приликом сагоревања биљне биомасе (Слика 6.).

Слика 6. Кружење CO_2

Са друге стране, досадашње анализе указују да су главни проблем за економично коришћење жетвених остатака високи трошкови прикупљања, транспорта од места производње до места складиштења или потрошње. Због тога се све више конструишу ефикасне машине које ће овај посао обавити са што мање утрошене енергије и људског рада. Коришћење пољопривредне биомасе у енергетске сврхе не достиже укупни потенцијал овог ресурса. Разлог тога је обновљивост биомасе која тражи решење у даљој примени и економски исплативој експлоатацији ресурса. Због велике количине пољопривредног отпада жетвени остаци се у великој количини сагоревају у пољу. На овај начин се загађује животна средина и уништавају природни ресурси, као што је хумус. Због тога се све више тежи максималном искоришћењу пољопривредног отпада што представља и један од праваца истраживања ове дисертације. У циљу производње нових биокompatитних материјала, као термичког и акустичког изолатора зграда, испитују се карактеристике материјала направљених од пољопривредне биомасе. Неке од физичких особина су већ познате и приказане у табели 2, док су енергетске вредности жетвених остатака приказане у табели 3 [3].

Табела 2. Физичке особине биомасе

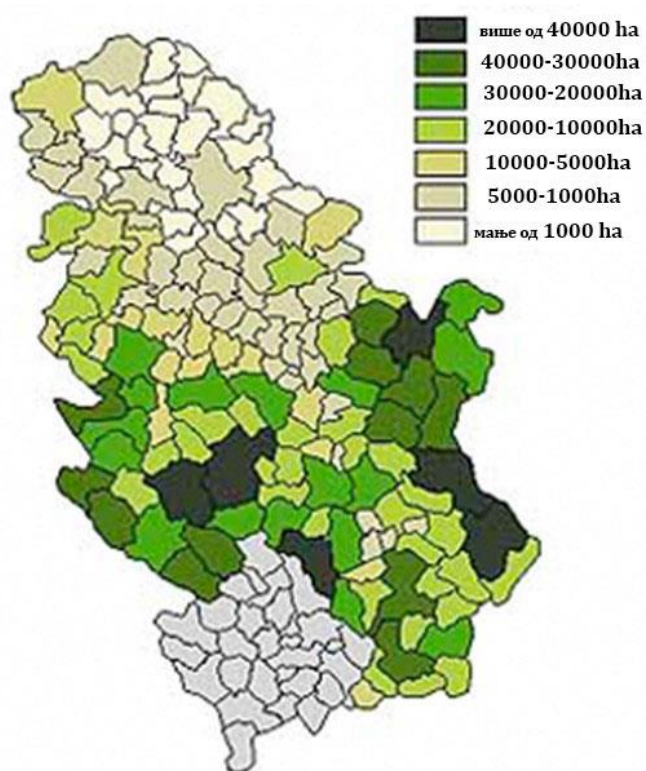
Физичке особине	Вредност
Густина	400 – 900 kg/m ³
Насипна густина	40 – 600 kg/m ³
Топлотна моћ	5 – 10 MJ/kg (зависно од влажности)
Топлотна моћ по m ³	0,7 – 12 MJ/m ³
Садржај воде	8 -50 %
Садржај пепела	1 – 10 %
Садржај испарљивих горивих материја	50 – 70 %

Табела 3. Енергетске вредности жетвених остатака

Врста жетвених остатака	Енергетска вредност (MJ/kg)
Кукурузовина	17,1
Слама стрних жита	16,2
Сојина слама	18,2
Сунцокретова љуска	17,6
Стабљика сунцокрета	15,7

2.4 ДРВНА БИОМАСА

Повећање цена фосилних горива и смањење њихових постојећих резерви у свету утиче на све актуелније и свеобухватније истраживање о могућностима искоришћења обновљивих извора енергије (ОИЕ). Северни део наше земље представља географско подручје које пружа највеће могућности истраживања потенцијала и употребе пољопривредне биомасе. За разлику од овог, потенцијали осталих региона могу бити двојаки и то: директан извоз енергије добијене сечом шуме или остатак из дрвно - прерађивачке индустрије. На слици 7. приказана је површина под шумом на територији наше земље.



Слика 7. Површина под шумом у Србији [17]

Потенцијал дрвне масе у Србији чини око 1.0 Mt и представља сву шумску дрвну масу (стабло и крошње дрвета) и дрвне остатке настале из прераде дрвета. У шумарској пракси Републике Србије дрвна биомаса подразумева више форми дрвних горива и то: просторно, цепано дрво, дрвени угаљ (ћумур), дрвни брикети, дрвна сечка и дрвни пелети [18].

Цепано дрво (Слика 8.) је настало пре свега као захтев потрошача ради коришћења истог за огрев, у количинама и димензијама које им одговарају. Најчешће дужине цепаних дрва које се користе за огрев су 25, 33, 50 и 100 cm док се садржај влаге креће од 20 до 50%. Када је реч о количини, она се изражава у кубним метрима (m^3) [18].



Слика 8. Цепана дрва

Ћумур - дрвени угаљ (Слика 9.) се добија након производног процеса који се одвија у такозваним ћумуранама, приликом сагоревања дрвета на одређеним температурама. За производњу ове биомасе користи се отпадно дрво или дрво лошијег квалитета, при чему се готов производ пакује у џакове од 3 - 20 kg [18].



Слика 9. Дрвени угаљ- ћумур

Дрвни брикети (Слика 10.) се добијају физичким сабијањем уситњеног дрвног материјала у одговарајућим пресамa при чему се добијају компактне форме. Како би се произвео квалитетан дрвни брикет потребно је обезбедити одговарајућу опрему за производњу, довољну количину и одговарајућу гранулацију дрвног остатка као и захтеван ниво влажности дрвне масе. Дозвољени садржај влаге је максимално 10% а величина паковања, која се изражава у килограмима (kg)[18].



Слика 10. Дрвни брикеџи

Дрвна сечка (ивер) представља уситњену комадну масу, са дефинисаном величином делова који се добијају механичким третманом дрвета, помоћу секире и ножева. То је производ чије се карактеристике мењају у зависности од многих фактора, првенствено од сировине од које се добија затим и од технологије производње. Према Европском стандарду постоје две врсте дрвне сечке, ивера, које су приказане на слици 11. и то: “Wood chips” и “Hog fuels” [18].



“Wood chips” “Hog fuels”

Слика 11. Различите форме дрвне сечке

Ивер као дрвни материјал мора да испуњава одређене услове у погледу величине комада, густине, степена влажности и слично. Сировина за производњу дрвне сечке потиче из стабала, грања, остатака приликом сече шума, пањева, корења. Јединица мере је насипни метар кубни и ова врста биомасе постаје једна од најчешће коришћених у индустрији производње плочастих материјала.

Дрвни пелети (Слика 12.) су хомогенизоване форме произведене од дрвног остатка насталог у процесима прераде дрвета и њиховим ситњењем до нивоа брашна а затим и сабијањем у посебним пресама. Због њених постојаних карактеристика ова врста биомасе представља идеално гориво за аутоматизоване системе за грејање [18].



Слика 12. Дрвни пелет

Када је реч о набројаним формама дрвних горива, у шумарству Републике Србије се већ одавно производи просторно дрво и дрво за производњу ћумура (дрвеног угља), док се за све остале форме, дрво пласира само као сировина. Дрвени пелет и брикети представљају производе настале у индустријама које се ослањају на шумарску производњу, односно користе полупроизоде или производе шумарства као сировину.

Поред тога што се коришћењем дрвне биомасе смањује емисија CO₂, карактеристичне су и калоријске вредности производа од дрвне биомасе које се могу упоредити са вредностима угља и природног гаса. На основу табеле 4 може се закључити да се из 1 kg пелета и брикета од биомасе добија нешто мање енергије него спаљивањем угља. У поређењу са природним гасом и нафтом, та енергија је 2,5-3 пута мања.

Табела 4. Упоредни преглед калоријске снаге одређених горива [19]

Тип горива	Садржај влаге [%]	Калоријске вредности [MJ/kg]
Брикет	10	16,74 – 17,10
Пелет	9	17,10 – 17,46
Пиљевина	8	17,28 – 17,64
Дрвни ивер	50	8,10 – 8,46
Сирова нафта	0	43,05 – 45,30
Угаљ	5	22,732 – 23,968
Природни гас	0	45,86 – 50,84

Како се индустрија прераде дрвета све више развија тако се све већи акценат ставља на очување и заштиту животне средине. Ова чињеница указује на то да се отпад који настаје приликом ове врсте производње, треба поново употребити. Међу отпадом који настане услед прераде дрвног материјала, пиљевина има веома важну улогу. Поред употребе у производњи брикета и пелета, савремена свест људи је довела и до развоја одрживих материјала на бази пиљевине, који могу да замене класичне материјале. Стога, ова врста материјала се може користити и као агрегат за прављење биокомпозита, чије се карактеристике и употребна вредност испитују у овој дисертацији.

2.5 МАТЕРИЈАЛИ КАО АГРЕГАТИ

2.5.1 Дрвни и пољопривредни отпад

2.5.1.1 Пиљевина

Пиљевина је нуспроизвод или отпадни производ обраде дрвета као што су тестерисање, брушење, глодање и рендисање. Састоји се од ситних комадића дрвета и настаје као последица прекида дрвних влакана и „разбијања“ дрвних ћелија. У зависности која метода обраде дрвета се примењује добија се различити облик дрвног отпада. На пример, тестерисањем и глодањем добија се крупнији дрвни отпад - стругорина, док се брушењем добија отпад у виду пиљевине.

Битна карактеристика дрвета као грађевинског материјала је његова еколошка прихватљивост. Пиљевина је безбедна за животну средину и здравље људи, и стога је њена употреба дозвољена у различитим областима (на пример, користи се за пуњење дечијих играчака). И поред широке употребе велика количина завршава на депонијама, што представља један од разлога искоришћења ове биомасе за прављење новог изолационог материјала.

Данас на грађевинском тржишту се може пронаћи велики број различитих врста струготине и пиљевине у зависности од порекла тј. врсте дрвета од које је настала. Главна подела се базира на ону добијену од четинара или листопадног дрвећа. У зависности којој групи припада дефинише се њена примена. Тако на пример, четинарска пиљевина се најчешће користи у хортикултури јер има тенденцију повећања киселости тла. Са друге стране, листопадни тип је распрострањенији од четинарског. Струготина од брезе се користи за узгој печурака, храстова за прављење иверице, брикета, пиљевина од кестена је добар апсорбер па се користи за израду изолације.

Упркос постојању обиља индустријске изолације, пиљевина са тог аспекта постаје све популарнија.

С обзиром на чињеницу да је топлотна проводљивост овог материјала инфериорна у односу на друге изолационе материјале као што су минерална вуна и сл., пиљевина има и неколико предности, које укључују:

- одржавање оптималног нивоа влажности током целе године у просторији због чињенице да такав материјал избацује вишак влаге акумулиране у просторији,
- одлична паропропусност, која се не налази у другим индустријским топлотноизолационим материјалима,
- отпорност на високу влажност и кондензацију, која се појављује на различитим површинама током температурних промена.

Предност пиљевине је и њена ниска цена у поређењу са индустријском изолацијом као и лака монтажа панела направљених од ове врсте материјала.

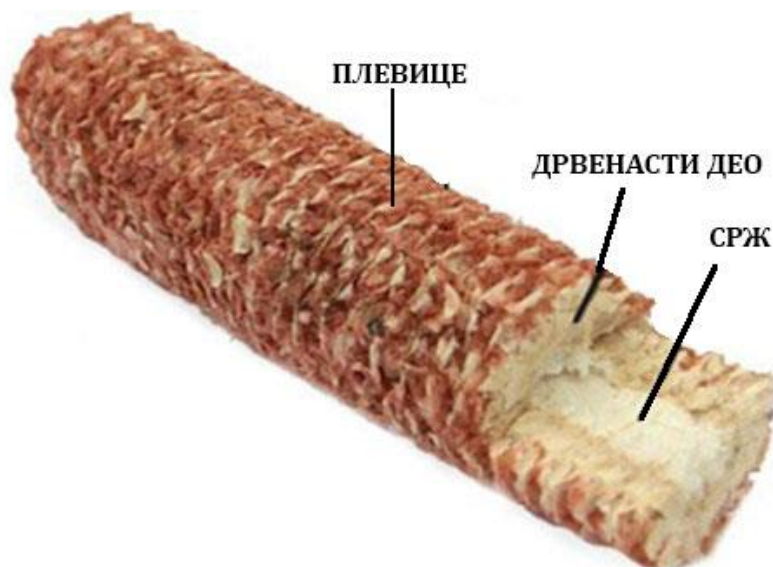
Уз велики број предности, пиљевина има и низ недостатака:

- висок степен запаљивости,
- способност привлачења глодара који живе у слободним сувим материјалима,
- склоност згрушавању, због чега се могу формирати празнине на местима топлотне изолације.

Ове негативне чињенице се лако могу избећи третирањем пиљевине пре пуштања у процес производње.

2.5.1.2 Кукурузовина (млевени окласак кукуруза)

Кукуруз је једногодишња биљка пореклом из Средње и Јужне Америке. На лиснатој стабљивици биљке расту семени замеци или клас, из кога се развијају кукурузна језгра, односно семе. Кукуруз је производ који је познат широм света, са својом разновсном наменом и то као храна, трговачка роба, огрев, индустријска сировина, лековита и декоративна биљка. Са индустријском револуцијом кукуруз је постао тражена сировина, не само за припремање хране, већ и за добијање нових индустријских производа. Данас се кукуруз у индустрији користи као сировина за производњу папира, амбалаже, картона и низа других производа. Поред стабла, листова и цвета, окласак или кочанка представља део кукуруза чија је употреба најзаступљенија. На попречном пресеку окласка разликују се три зоне: централна, срж кукуруза, зона дрвенастог цилиндра и периферни слој који се састоји од слоја грубих и слоја финих плевица (Слика 13.).



Слика 13. Појречни ѓресек окласка кукуруза

Традиционална употреба окласка је најчешће за грејање просторија и загревање ваздуха за сушење зрна. Међутим, данас је значајно проширена његова употреба на индустријску прераду. Како би се ова биомаса, која настаје као пољопривредни отпад, максимално искористила, потребно је физичко прилагођавање, односно механичко уситњавање, гранулирање и отпрашивање као и познавање што већег броја физичко-механичких карактеристика наведеног материјала. С тога овај материјал, постаје и део истраживања ове дисертације. У циљу проналажења адекватног природног материјала за израду звучне и топлотне изолације, приступило се испитивању ове врсте биомасе. Са друге стране давање нове употребне вредности отпадном материјалу утиче на очување и заштиту животне средине.

2.5.2 Грануле експандираног полистирена

Различите врсте пластике које се свакодневно употребљавају су утицале на свакодневни живот. Тачније, данас живот више није могуће замислити без употребе одређених пластичних материјала. Међутим, с обзиром да постоје различите врсте пластике, свака од њих има своје специфичне карактеристике које дефинишу њену употребу.

Полистирен, као најпопуларнија пластика данас, је полимеризовани стирен, односно то је производ хемијске индустрије који се прави од течног стирена, а добија из нафте и угља. Не може се рећи да је савремени полистирен у потпуности исти као онај који је коришћен у прошлом веку јер су све ово време научници користили за побољшавање његових својстава. Физичке карактеристике савременог полистирена у великој мери зависе од тога како је произведен што диктира и његову употребу.

2.6 МИНЕРАЛНА ВЕЗИВА

Минерална везива су прашкасти материјали који у комбинацији са водом дају пластична теста која се након одређених физичко-хемијских процеса стврдну и поприме својства камена. Деле се на [20]:

- нехидраулична везива (гипс, креч, водено стакло) – очвршћавају на ваздуху,
- хидраулична везива (хидраулични креч и разне врсте цемената) – очвршћавају и на ваздуху и у води,
- аутоклавна везива (креч – SiO_2 , креч – згура, креч – пуцолан) – очвршћавају у аутоклавима, у условима повишених температура и притисака.

2.6.1 Грађевински гипс

Таложењем наслага у плитким морским заливима, дебљине и до 70m, настао је гипс. То је минерал сиве, беле и ружичасте боје, издужених равних кристала, тврдоће по Мосу 1,5 – 2, специфичне масе 2700 – 3000 kg/m³, који не реагује са киселинама, не гори, добар је топлотни и звучни изолатор, без мириса [20].

У Европи, највећа налазишта гипса су лоцирана у Немачкој, Француској, Италији, Русији, Пољској, Великој Британији, Шпанији и Украјини. У Србији су најзначајнија налазишта у долини реке Груже.

Гипс (Слика 14.) се добија печењем садре - гипсаног камена који је по хемијском саставу калцијум-сулфат дихидрат ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) уз евентуално присуство кречњака, песка и оксида гвожђа. За добијање гипса прво се врши уситњавање садре, затим се она меље у прах који се суши у пећници. Постепеним повећавањем температуре прах се пече на температури од 110 - 180°C. Након печења, добијени производ се након хлађења поново меље ради постизања жељене финоће млива и на крају пакује.

Гипс се у грађевинарству најчешће употребљава за израду спуштених плафона или преградних зидова а врло често и као везивно средство за израду композитних материјала.



кристал гипса- Аустралија

кристал гипса- Француска

пустињска ружа – Тунис

Слика 14. Кристали гипса широм светла

Грађевински гипс се дели на [20]:

Штук гипс има средњу финоћу млива, садржај примеса је ограничен на 10%, не сме да садржи више од 9% везане воде а време везивања је најдуже 30 минута. Користи се за израду префабрикованих елемената, украсне радове у ентеријеру као и за малтерисање. Често се додаје кречном малтеру како би се убрзало време везивања.

Гипс за малтере има 30% зрна крупнијих од 0,2 mm, везане воде до 9% а примеса до 15%. Време везивања је најдуже 2 часа.

Гипс за кошуљице и подлоге се другачије назива естрих гипс. Добија се на температурама од 800 - 1400°C. Чврстоћа ове врсте гипса, при притиску, након 7 дана је најмање 11МПа, док се чврстоћа осталих врста гипса креће од 2,2 – 2,5 МПа. Везане воде може да има до 9%, примеса до 3% док време везивања траје и до 36 часова.

Моделарски гипс је по свом саставу сличан штук гипсу, али доста финијег млива. Везане воде, као и остале врсте гипса, садржи највише 9%, примеса 5%, док му је најдуже време везивања 15 минута.

Алабастер гипс је чист гипс, беле боје. Најчешће се користи за вајарске радове и фина малтерисања. Има највише 5% зрна крупнијих од 0,2 mm, док је најдуже време везивања 30 минута.

2.6.2 Грађевински креч

Овај везивни материјал се добија печењем кречњака (CaCO_3) на температури од 900 - 1000°C. Како би се добио, креч пролази кроз процес производње (Слика 15. а, б и в) који обухвата вађење креча из каменолома, његово дробљење и сепарисање, а затим печење у ротационим или шахтним пећима. Иако се печењем ослобађа угљендиоксид који чини 44% кречњака, запремина добијеног, живог креча је мања само 14% у односу на полазну сировину. Ова чињеница указује на велику порозност. Мешањем живог креча са водом долази до његовог гашења при чему се ослобађа велика количина топлоте. Величина честица гашеног креча је јако мала, свега 0,001 mm, што даје велику пластичност кречном тесту и условљава задржавање воде [20].



а) Кречњак (CaCO_3) - њече се у њећима на 1000°C



б) Живи креч (CaO) – њаси се водом



в) Гашени креч (Ca(OH)_2) - хидрајисани креч

Слика 15. Производња креча

Грађевински креч се дели на [20]:

Негашени (живи) креч у комадима се добија директно из пећи за печење. Састоји се из комада различите величине, веома је хигроскопан (осетљив на дејство влаге) и потребно га је што пре гасити. Не сме да садржи већу количину непечених делова, максимално 7%, што се утврђује према садржају CO_2 .

Негашени (живи) млевени креч се добија млевењем комадног креча, при чему је прописано да садржај честице крупнијих од 0,09 mm не прелази 10%. Испоручује се у папирним врећама.

Хидратисани креч се добија гашењем живог креча одређеном количином воде и има веома широку употребу.

Хидраулични креч се добија печењем лапоровитих кречњака са 6 – 20% глиновитих примеса. Процес печења се одвија на температурама од 900 - 1000°C. Хидраулични креч садржи и значајну количину слободног креча. Ово је разлог зашто се и хидраулични креч гаси водом и његова хидраулична својства су обрнуто пропорционална количини слободног креча. Најчешће се користи у виду праха за малтере или за бетоне нижег квалитета.

III ТЕРМИЧКА И АКУСТИЧКА СВОЈСТВА БИОКОМПОЗИТНИХ МАТЕРИЈАЛА

3.1 УВОД

Све чешћа употреба биокompозита како у науци тако и у пракси захтева испитивање њихових физичких, механичких, хемијских, морфолошких и површинских својстава као што су: порозност, густина, топлотна проводљивост, чврстоћа, савијање, пропустљивост ваздуха, акустичка својства, горивост, отпорност на хабање, итд. Неке од карактеристика биокompозита су међусобно условљене, попут утицаја порозности на остале особине материјала. Постоји и међусобна зависност између топлотне проводљивости и апсорпције звука у материјалу. Када звучни талас падне на порозну површину биокompозита он ствара осцилације влакана у материјалу. Осцилације затим узрокују тренутно загревање у влакнима услед трења. Зато се може рећи да добар апсорбер апсорбује топлотну енергију коју ствара звучни талас па самим тим ослобађа мање топлоте. У зависности од осталих карактеристика попут густине, дебљине материјала, распореда влакана унутар структуре материјала зависе и термо-акустичке особине биокompозита. Проучавање процеса простирања звука и топлоте кроз биокompозит, од великог је значаја за одређивање акустичких и термичких особина ове врсте материјала, чије је познавање веома важно због њихове примене у сврху изолационог материјала [21–26].

3.2 ЗНАЧАЈ И ПОТРЕБА ОДРЕЂИВАЊА ТЕРМОФИЗИЧКИХ СВОЈСТАВА МАТЕРИЈАЛА

Одређивање физичких особина материјала има велики значај како у свим областима науке тако и по питању економског ефекта који се испољава преко смањења потрошње енергије, директно кроз цену материјала као и повећања ефикасности производних и технолошких процеса. Термофизичке карактеристике су јако битне, првенствено због квалитетније термичке анализе за контролу процеса провођења топлоте. Овај тип провођења се јавља у свим индустријским гранама и веома је тешко пронаћи процес у инжењерској пракси који има опширнију примену од преноса топлоте кроз материјал или композит. Тако на пример, машинским инжењерима је потребно познавање топлотног провођења због система за грејање и хлађење, електроинжењерима због спречавања оштећења услед појаве врућих тачака у електричним моторима, трансформаторима, генераторима... Исто важи и у пољу пољопривреде и металургије, као и у осталим привредним гранама, где познавање ове особине омогућава добијање квалитетнијег финалног производа. Што се тиче области грађевинарства, познавање ових карактеристика материјала утиче на квалитет изграђеног објекта по питању топлотне изолације.

Иако постоје многи успешни пројекти везани за топлотну проводљивост материјала, даљи развој ове области је још увек неопходан па се многи истраживачи баве њеним истраживањем. Rochwała [27] и остали су испитивали топлотну проводљивост

биоматеријала, која представља битну карактеристику изолације објеката. Curto и сарадници [7] су проучавали термичке и акустичке карактеристике материјала добијених мешањем природног креча, воде и конопље. Њихова истраживања су спроведена на тачно дефинисаним величинама и облицима узорака материјала. Добијени резултати су упоређени са резултатима других аутора, при чему је закључено да нови материјал од креча и конопље може заменити већ одавно коришћене конвенционалне материјале. Исту врсту материјала проучавао је Brzyski са својим сарадницима [28]. Они су тестирали узорке димензија 250x250x50mm, одређујући њихову топлотну проводљивост, у складу са стандардом ISO 8302. Коефицијент топлотне проводљивости композита се кретао у распону од 0,088 до 0,122 W/(mK), што је представљало резултат испитивања три узорка. Установљено је да са повећањем количине везива расте коефицијент топлотне проводљивости као и велики утицај густине материјала на топлотну проводљивост. Ninikas и остали [29] су проучавали врсту изолације направљене од конопље и коре дрвета бора. Направљене су четири врсте мешавина помоћу влакана материјала која су спајана лепком од метил целулозе. Разлика се огледала у процентуалном односу влакана коре дрвета и конопље која су мешана у следећој размери: 90:10, 80:20, 70:30 и 60:40. Резултати су показали да се са повећањем садржаја конопље побољшавају механичка својства. Међутим, истовремено расте и коефицијент топлотне проводљивости што представља негативну страну овакве мешавине. Kosinski [30] је истраживао термичка изолациона својства индустријске конопље. Мерења величине пора, термичке проводљивости и ваздушне пропустљивости материјала су примарна испитивања урађена у овој студији. Khoukhi [31] и сарадници су развили еколошки прихватљив термоизолациони материјал на бази кратког и дугозрнастог пиринча. Испитивањима је утврђена оптимална топлотна проводљивост овог биоизолационог материјала. Тачно одређивање карактеристика, попут топлотног флуksа и коефицијента пролаза топлоте је од кључног значаја за сваки материјал (композит) који је изложен различитим температурним променама. Познавање ових вредности, омогућава тачно одређивање количине топлоте која прође кроз материјал а затим и правилно димензионисање, односно одређивања одговарајуће дебљине изолационог материјала. Термофизичке особине материјала се могу поделити на: топлотне транспортне, термодинамичке и топлотне радијационе особине. У групу топлотних транспортних особина убрајају се топлотна проводљивост и топлотна дифузивност, у термодинамичке особина спадају специфична топлота, енталпија и температурни коефицијент линеарног ширења материјала, док се у групу топлотних радијационих особина убрајају коефицијенти апсорпције, рефлексије и транспаренције и емисивност.

Када је реч о термофизичким особинама материјала, или у овом случају биокомпозита, одређивање топлотне проводљивости је од посебног значаја. Мера способности

материјала да проведе топлотну енергију окарактерисана је овом особином, која се може дефинисати као количина топлоте која пролази кроз медијум ограничен двема бесконачним равнима изложеним градијенту температуре од 1 K/m по јединици времена и јединици површине [32].

Топлотна проводљивост материјала се мења у зависности од састава материјала, тачније узорка материјала. Она зависи од порозности, садржаја воде као и од других фактора и мења се током времена. Обзиром да вредности топлотне проводљивости зависе од температуре материјала, њено одређивање у дефинисаном температурном опсегу је јако битно. Врло често је коефицијент топлотне проводљивост за материјал познат и вредности истог се могу узети из постојећих каталога. Међутим, некада је потребно извршити мерења на узорцима нових материјала и све то у циљу побољшања енергетске ефикасности зграда. На жалост, наша земља све до 2008 године је имала најнижи степен енергетске ефикасности у Европи [33], а грађевински сектор је кључни потрошач енергије па се акценат све више ставља на материјале који ће допринети овим променама у позитивном смеру. Податак који говори да зграде у Србији троше 60% укупне потрошене енергије прави огромну разлику између нас и осталих земаља Европе, где се овај проценат креће између 20 и 40% [33]. Ово стање би се променило правилним избором материјала код новопроектованих објеката, што даје значај одређивању топлотне проводљивости нових грађевинских материјала, најчешће изолационих. На овај начин би се решили потенцијални проблеми зграда и повећао би се комфор њених корисника.

3.3 ПРЕНОШЕЊЕ ТОПЛОТЕ И ТОПЛОТНА ПРОВОДЉИВОСТ

Када говоримо о топлоти, познато је да се она простира од тела више ка телу ниже температуре. Преношење топлоте се врши на три начина и то путем:

1. кондукције (провођења),
2. конвекције (прелаза топлоте),
3. радијације (зрачења).

Неуређено кретање микроскопских елемената (молекула, слободних електрона) при промени температуре средине, дефинише се као провођење топлоте.

Простирање топлоте путем конвекције настаје услед кретања макрочестица из области више у област ниже температуре. При овом кретању честице носе одређену количину топлоте а овакав начин размене топлоте је карактеристичан за гасове, течности и дисперзне флуиде. За кретање флуида неопходно је дејство силе која може бити површинска (сила трења) или запреминска (гравитациона сила).

Радијацијом се енергија преноси тако што се унутрашња енергија материје претвара у енергију електромагнетних таласа, која се у облику таласа простира кроз простор, при чему, када наиђе на чврсту материју предаје јој део своје топлотне енергије.

Кондукција (провођење топлоте) је механизам размене топлоте кроз чврсте материје, приликом чега је топлотни флуks усмерен од топлије ка хладнијој површини.

Количина топлоте која се кондукцијом може пренети зависи од коефицијента топлотне проводљивости материјала. За познату (измерену) вредност топлотног фукса q , познату дебљину материјала δ и измерене температуре са обе стране површине може се израчунати вредност коефицијента топлотне проводљивости λ .

3.4 МЕТОДЕ МЕРЕЊА ТОПЛОТНЕ ПРОВОДЉИВОСТИ

У пракси постоје бројне методе за експериментално одређивање топлоте проводљивости [32] које обухватају примену различитих математичких и физичких принципа. Ови принципи зависе од врсте материјала, температурног опсега, геометрије узорка који се тестира и брзине добијања резултата. Методе за експериментално мерење топлотне проводљивости се деле на: стационарне и нестационарне или транзијентне методе. У методама стабилног стања (стационарне), топлотна проводљивост се добија директним мерењем топлотног флуksа и температура на обе површине узорка када се постигне стабилно стање. Код транзијентних метода дистрибуција температуре на узорку се мења током времена, а мери се и брзина промене температуре, што резултира одређивањем топлотне дифузивности материјала. Када су густина испитиваног материјала, специфични топлотни капацитет и топлотна дифузивност познати, могуће је израчунати топлотну проводљивост.

Код стационарних метода временски интервал за мерење топлотне проводљивости може да траје од неколико сати до неколико дана. Мерна опрема је сложена и подразумева контролу топлотног флуksа, а у случају појаве контактне топлотне отпорности јављају се и потешкоће у мерењима [34]. За разлику од предходно наведених метода, карактеристике нестационарних метода су краћи временски интервал мерења, мањи узорци, и једноставнија апаратура [35]. Због горе наведених фактора и разлика међу методама, често се поставља питање коју методу треба применити за одређивање топлотне проводљивости, за одређене материјале. У зависности од врсте материјала, геометрије тестираног узорка и потребне тачности врши се одабир одговарајуће методе испитивања. Много истраживања се базира на основу међулабораторијских поређења резултата мерења као и примењених метода.

Прво експериментално проучавање топлотне проводљивости изведено је 1753. год. када је В. Frenklin показао да различити материјали имају различите способности да

приме топлоту и „пренесу је даље“. Он је сопственим додиром, према степену хладноће, одређивао да ли су материјали добри или лоши топлотни проводници. Године 1851. Forbes је описао прве стационарне методе, док је Ångström 1861. године говорио о нестационарним методама [36]. Од тада, па све до данас, развијено је пуно различитих експерименталних техника и њихових варијанти [37].

Salmon [38] и остали су након разматрања кључних питања, укључујући опсег топлотне проводљивости, једноставност, малу величину узорака и кратко време рада, предложили две методе за испитивање топлотне проводљивости преграда од исечених блокова дебљине од 6 – 8 mm. Прва је била заштићени мерач протока топлоте у стабилном стању, а друга пролазна врућа трака у линеарној и диск конфигурацији. Да би се проверила њихова применљивост, обе методе су коришћене међусобним поређењем које је укључивало укупно девет мерења. Мерења су вршена на собној температури на танким узорцима за испитивање направљеним од серије једног типичног зиданог материјала. Cha [39] и остали су сматрали да смањење топлотне проводљивости зависи од изолације објекта, што представља најосновнији фактор за смањење потрошње енергије, а самим тим и емисије CO₂, што представља један од кључних проблема данашњег друштва. Због тога су тачна и континуирана мерења топлотне проводљивости важна за решавање наведених проблема. Ова студија представља методе за мерење топлотне проводљивости и упоређује три методе: мерач топлотног протока, ласерску анализу и анализатор топлотне проводљивости. Rudtsch [40] и остали су представили резултате међусобног поређења мерења топлотне проводљивости, топлотне дифузивности, специфичног топлотног капацитета и густине полиметил метакрилата у температурном опсегу између –70°C и + 80°C. Сврха овог поређења је истраживање променљивост резултата као и њихово упоређивање са вредностима референтних материјала. Wulf [41] и остали су представили мерења топлотне проводљивости различитим методама, за различите материјале. Један од проучаваних материјала, калцијум силикат, је изотропан; друга два, простирке од алумино-силиката и алуминијских влакана, нису биле изотропне. Мерења су обављена са два различита апарата за испитивање у стабилном стању. Ова група истраживача је представила како резултате мерења тако и разлике метода које су примењивали у овом раду.

Било да се сврставају у групу стационарних или транзијентних, методе за одређивање топлотне проводљивости материјала могу имати бројне предности и мане [42]. Нестационарне методе карактерише једноставност, краће трају и лакше су за обављање мерења у односу на другу групу метода.

У групу стационарних метода за мерење топлотне проводљивости спадају [43]:

- Метода са флуксметром,
- Метода заштићене топле плоче,
- Метода са директним електричним грејачем,

- Метода са аксијалним током топлоте,
- Компаративна метода са аксијалним током топлоте,
- Метода радијалног топлотног тока,

док у групу нестационарних (транзијентних) метода спадају:

- Импулсна транзијентна метода,
- Ласерска импулсна метода,
- 3ω метода,
- Транзијентна метода равног извора,
- Метода са линијским извором топлоте (метода топле жице).

3.4.1 Стационарне методе

Стационарне методе подразумевају мерење топлотног флукса неопходног за одржавање временски константне температурне разлике између две површине узорка испитиваног материјала. Коефицијент топлотне проводљивости може се прорачунати на основу измерене вредности топлотног флукса у зависности од температурне разлике и дебљине испитиваног материјала.

3.4.1.1 Метода са флуксметром

Употреба ове методе је најчешћа и најраспрострањенија због једноставности, брзине рада као и широког опсега материјала, на којима се мерења могу вршити, односно чије се карактеристике могу тестирати. Метода је стандардизована са европским стандардом EN 12667 [44] и два америчка стандарда ASTM C518 [45] и ASTM E 1530 [46]. Апаратура која се користи при овој методи је јако слична апаратури по методи једностране заштићене топле плоче. Код обе методе се узорак поставља између две плоче рзличитих температура, при чему се једна греје а друга хлади (Слика 16.) [43]. Топлотни флукс се мери сензором флуксметра, док се вредности читавају на дисплеју уређаја.



Слика 16. Шематски приказ методе са флуксметром

Најчешће испитивани материјали овом методом су изолаторски, међутим врло често се тестирају и полимери ($\lambda < 0,3 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$), а под одређеним условима стакло и керамика чија је топлотна проводљивост мања од $5 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$. За изолаторске материјале на собној температури, мерна несигурност је око 3%, док је на високим температурама између 10% и 20% [36].

Метода са флуксметром подразумева да се топлота кроз материјал преноси само кондукцијом, тј. да конвекција и радијација нису присутне. Код материјала са малим вредностима топлотне проводљивости, пренос топлоте конвекцијом и радијацијом се може занемарити у односу на пренос топлоте кондукцијом. У случају да су вредности топлотне проводљивости велике, потребан је дебљи узорак за испитивање, због мерења разлике температура, па самим тим занемаривање радијације и конвекције није могуће. На овај начин се тачност мерења доводи у питање. У случају вакуума, губици топлоте конвекцијом се могу минимизирати.

Salmon и Tye [38] су се бавили овом тематиком и извршили су поређење седамнаест апаратура за мерење топлотне проводљивости. Мерења су вршена на 10°C и 23°C , на узорцима две дебљине експандираног полистирена, екструдираниог полистирена и камених влакана високе густине. Од укупно 154 резултата 69% је било у $\pm 3\%$ границама док је 50% било у $\pm 2\%$, што показује подударање вредности мерења.

3.4.1.2 Метода заштићене топле плоче

Метода заштићене топле плоче се примењује за одређивање топлотне проводљивости чврстих материјала који су најчешће изолаторски, као што су ЕПС, стаклена вуна, полиуретани или слабопроводни материјали као на пример стакло, керамка, гума, пластика и слично. Ова метода се заснива на стационарном једнодимензионалном преносу топлоте кондукцијом кроз узорак материјала који се испитује а постављен је између две плоче које су различитих температура. Овај процес се може описати помоћу Фуријеовог закона, на основу кога је:

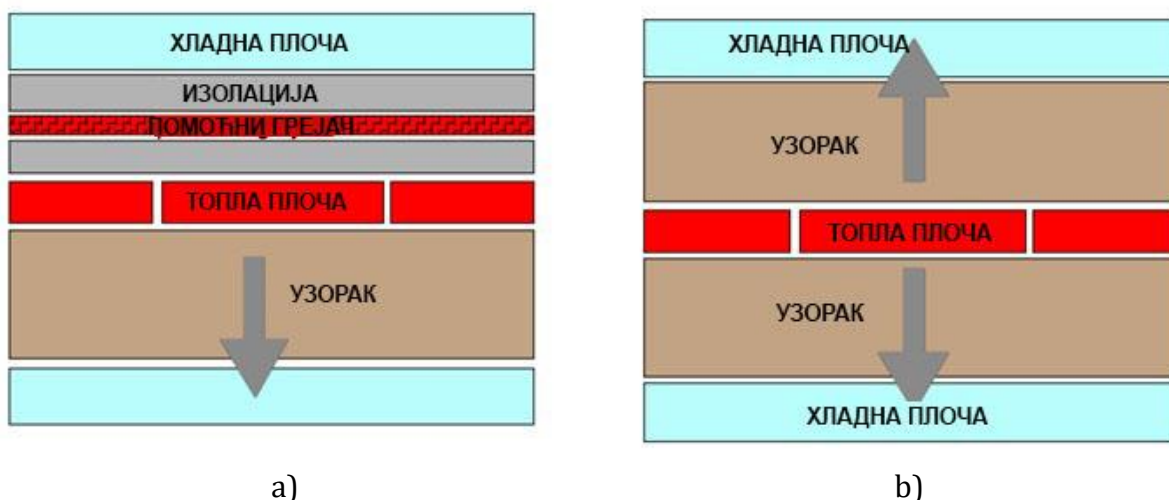
$$\lambda = \frac{d}{A} \frac{Q}{\Delta T} \quad (1)$$

где λ представља топлотну проводљивост узорка, Q топлотни флуks кроз узорак, A је површина кроз коју флуks пролази, d дебљина узорка и ΔT разлика температура на површинама узорка.

Дакле, топлотна проводљивост се може израчунати ако су измерене предходно наведене величине из једначине (1).

Постоје два типа ове методе и то: једнострани и двострани (Слика 17.). Код једностране методе испитује се један по један узорак материјала, док се код двостране испитују истовремено два идентична узорка. Применом предходно наведене једначине у

случају двостране методе, именилац се множи са 2, док се за A и d узимају средње вредности оба узорка.



Слика 17. Принцип методе заштићене топле плоче: а) једностране, б) двостране

Апаратура која се користи при овој методи се састоји од једне или две хладне плоче, топле плоче, узорка који се испитује и заштитне изолације. Топла плоча се састоји од заштитног грејача који окружује главни грејач. Нека одступања у мерењима се могу јавити због температурне разлике између ових грејача као и због нехомогености узорка.

Многи истраживачи попут Salmon-а [47] су се бавили мерењем топлотне проводљивости изолаторских материјала применом ове методе. Прво мерење је вршено на изолацији дебљине 250 mm на собној температури, а друго је мерење изолације и ватросталних материјала на температурама до 850°C. У другом истраживању [47] су постигли резултате са мерном толеранцијом од $\pm 3\%$ код мерења топлотне проводљивости изолаторских материјала, методом заштићене плоче, у температурном опсегу од -20°C до 80°C. Zarr [48] је одређивао топлотну проводљивост стаклене вуне мале густине и добио је резултате зависне од дебљине узорка који су се кретали од $\pm 0,9\%$ за дебљину узорка од 25,4 mm до $\pm 2,8\%$ за узорак дебљине 228,6 mm.

3.4.1.3 Метода са директним електричним грејањем

Решавање проблема дужине трајања мерења и сложености одређивања топлотних губитака, код стационарних метода, најчешће се решава применом методе са директним електричним грејањем. Метали и легуре су најчешће испитивани материјали применом ове методе [49] јер су узорци који се постављају у вакуумску комору облика жице или цилиндра. Кроз узорак се пропушта једносмерна струја а мерење температуре и пада напона се врши на позицијама које су означене на слици

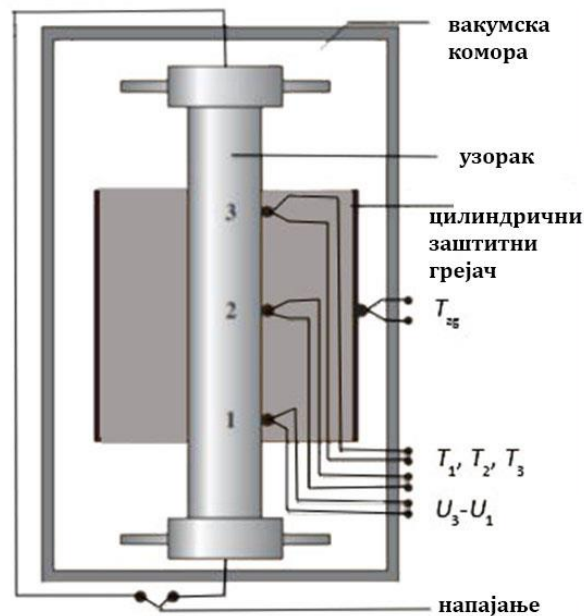
18., при чему се добија топлотна проводљивост λ и специфична електрична отпорност ρ [50]:

$$\lambda\rho = \frac{(U_3 - U_1)^2}{4[2T_2 - (T_1 + T_3)]} \quad (2)$$

$$\rho = \frac{\Delta U_h A}{i_h L} \quad (3)$$

где су L дужина и A попречни пресек узорка, а i_h и ΔU_h струја и пад напона за време грејања узорка

Топлотна проводљивост узорака мерених овом методом се креће у опсегу 10 W/(m·K) до 200 W/(m·K), док је мерна толеранција од 2 % до 10 % [32].



Слика 18. Шемајски приказ методе са директним електричним грејањем

3.4.1.4 Метода са аксијалним током топлоте

Метода са аксијалним током топлоте је у употреби још од половине прошлог века и подразумева одређивање топлотне проводљивости метала. Каснијих година замениле су је знатно брже методе, нестационарне. Код ове методе користе се узорци у облику дугачке призме или цилиндра, на чијој је једној основи извор топлоте а на супротној топлотни понор. Једначина која се користи код ове врсте стационарне методе је [51]:

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} - \frac{p\varepsilon\sigma}{\lambda\omega} (T^4 - T_0^4) + \frac{I^2\rho}{\lambda\omega^2} = 0 \quad (4)$$

где је T температура на растојању x од унутрашње тачке која се разматра, T_0 је температура зида коморе (температура краја цилиндра), p је обим попречног пресека цилиндра, ε тотална емисивност површине, σ Штефанова константа зрачења, λ топлотна проводљивост узорка, ω површина попречног пресека цилиндра, ρ његова специфична отпорност, I је електрична струја загревања.

Из предходне једначине (4) се може доћи до израза за добијање топлотне проводљивости [36]:

$$\lambda = \frac{p\varepsilon\sigma}{2\omega} (L - x)^2 \frac{(T_\infty^4 - T_0^4)}{T_L - T} \quad (5)$$

где је T_L температура на средини штапа чија је дужина $2L$, док је T_∞ температура бесконачно дугачког штапа.

Једна од мана ове методе је појава радијалних губитака топлоте на њеном аксијалном путу кроз узорак. Наведени губици су доста мањи на ниским температурама, међутим, како температура “расте” изнад собне температуре контрола топлотних губитака је све тежа. Ова метода се примењује за температурни опсег топлотне проводљивости од $5 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$ до $500 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$, на температурама од 4K до 1000K . Мерна несигурност за узорке од метала износи до 2% [36].

Методу са аксијалним током топлоте су примењивали многи истраживачи широм света попут Вермана [52] који је описивао апарат у коме је топлотна проводљивост чврстих материјала одређена на температурама између 2K и 90K . Мерења су вршена на неколико врста стакла и диелектричних кристала. Раније је утврђено да је на високим температурама проводљивост стакла пропорционална специфичној топлоти, док на ниским температурама опада спорије од специфичне топлоте. Садашњи експерименти показују да постоји температурна област у којој је проводљивост скоро независна од температуре.

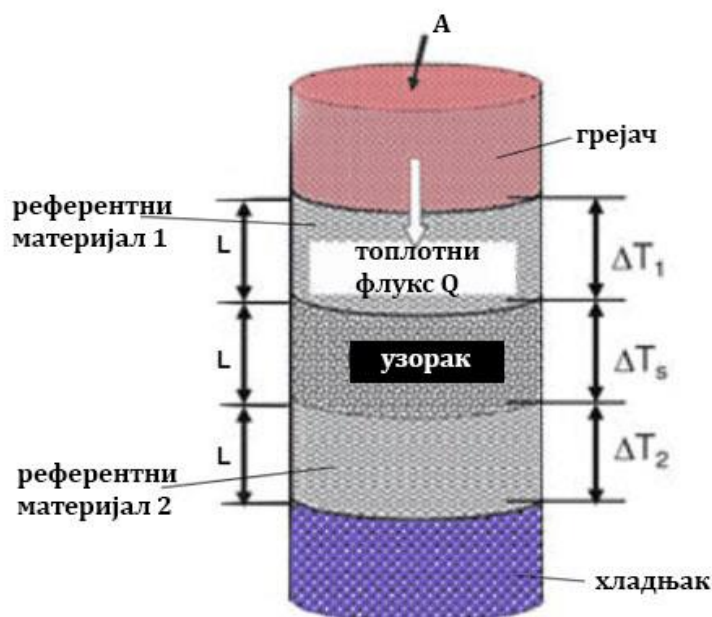
3.4.1.5 Компаративна метода са аксијалним током топлоте

Компаративна метода са аксијалним током топлоте се користи још од 50-тих година прошлог века. Данас је ова метода замењена бржим, транзијентним методама које карактеришу одређени недостаци, као на пример немогућност примене у неким специфичним случајевима геометрије или структуре узорака [53]. Принцип рада ове методе се заснива на постављању минимум два узорка на пут непознатог топлотног флуksа Q , при чему је топлотна проводљивост једног узорка позната а друга непозната (λ_r и λ_s) [54].

При реализацији компаративне методе, узорак, који се испитује, се најчешће поставља између два узорка истог попречног пресека A , исте дужине L и познате топлотне

проводљивости λ_r (узорци референтног материјала) (Слика 19.). Успостављање температурне разлике се постиже постављањем хладњака на дно целе апаратуре, док се на врху налази грејач. У циљу смањења ивичних губитака топлоте, заштитни грејачи се постављају са бочних страна, док се једнодимензионални флуks постиже постављањем два слоја изолације уз узорке. Након постизања стационарног стања, може се добити и топлотна проводљивост λ_s :

$$\frac{Q}{A} = \lambda_s \frac{\Delta T_s}{L} = \lambda_r \frac{\Delta T_1 + \Delta T_2}{2L} \rightarrow \lambda_s = \lambda_r \frac{\Delta T_1 + \Delta T_2}{2\Delta T_s} \quad (6)$$



Слика 19. Шематски приказ система заштитеној аксијалној шилојној шока компаративне методе

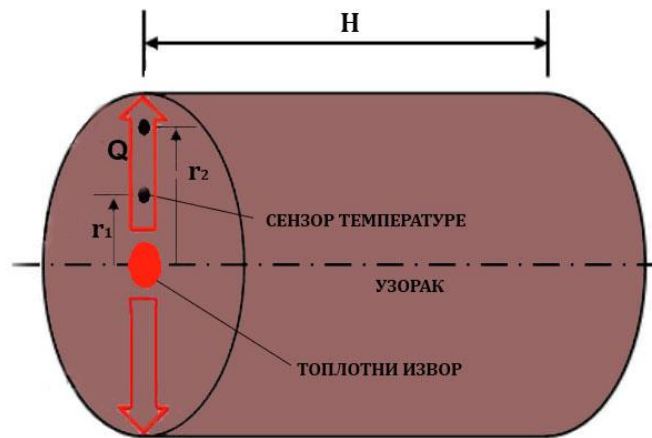
Примена ове методе је широка – од лоших проводника топлоте до метала, топлотне проводљивости у распону од 0,2 W/(m·K) до 200 W/(m·K) и широком опсегу температуре [36].

Предност методе лежи у њеној једноставности и разноврсности геометрије узорака, као и разноврсности материјала који се испитује. Мерна несигурност компаративне методе је већа него код осталих стационарних метода. Међутим, Xing и остали [53] су успели да смање укупну мерну несигурност ове методе као и проблем неслагања вредности λ_r и λ_s . Добијени резултати се не разликују више од 3 % од референтних вредности.

3.4.1.6 Метода радијалног топлотног тока

Метода радијалног топлотног тока се користи за мерење узорака у чврстом стању, компактне или зрнасте структуре, мале до средње топлотне проводљивости. Температурни опсег је широког опсега од -200°C до 2000°C . Међутим, метода је најчешће коришћена између 100°C и 1300°C , одређујући карактеризацију нуклеарног горива CO_2 [36]. Истраживачи су установили да је мерна несигурност ове методе око 2 % и то вршећи мерења синтерованих керамичких материјала до метала и њихових легура [55].

Код ове методе узорак је у облику дугачког шупљег цилиндра у чијој се оси налази грејач у облику танке жице или шипке, чија је дужина H (Слика 20.).



Слика 20. Принципиј методѣ радијалног топлотног тока

Топлотна проводљивост се добија из следећег израза, по решењу Фурјеове једначине за провођење топлоте кроз бесконачан шупљи цилиндар у радијалном смеру:

$$\lambda = \frac{Q}{2\pi H \Delta T} \ln \frac{r_1}{r_2} \quad (7)$$

где је Q/H специфични топлотни флуks по јединици дужине цилиндра, а ΔT разлика температуре у две тачке одређене радијусима r_1 и r_2 дуж температурног градијента.

3.4.2 Нестационарне методе (транзијентне)

Нестационарне методе су засноване на вези температурне промене, кроз одређени временски интервал и топлотне дифузивности α , променљивог извора топлоте. Веза топлотне проводљивости и дифузивности је представљена изразом:

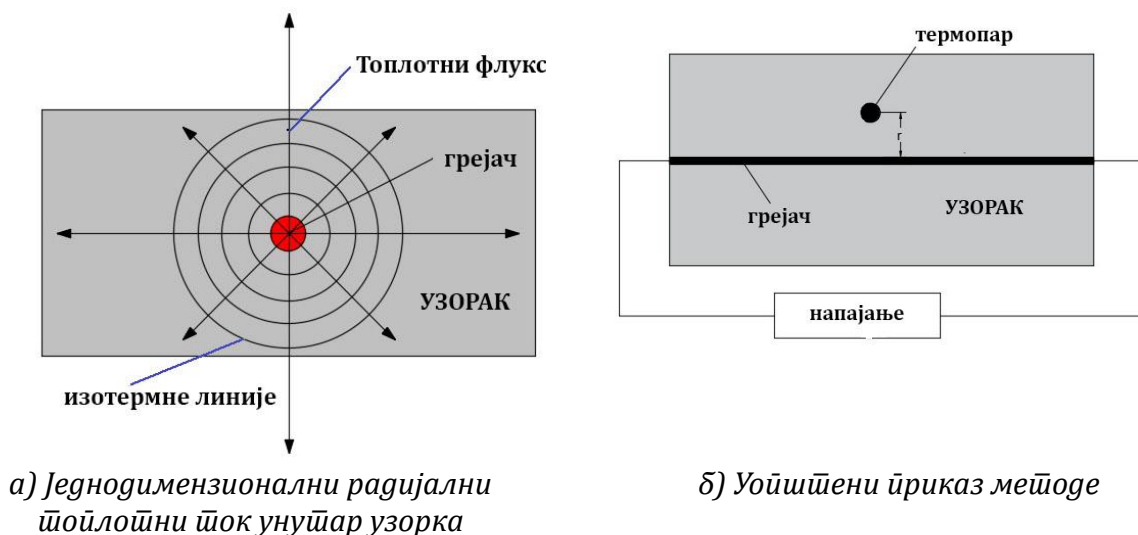
$$\alpha = \lambda / (\rho c_p) \quad (8)$$

где ρ представља густину материјала, а c_p његову специфичну топлоту при константном притиску.

Прве методе ове групе су се појавиле половином деветнаестог века и њихов развој је повезан са развојем електронске мерне опреме. Ова опрема је омогућавала опис енергије у одређеном облику, а затим и записивање температурног одзива у дефинисаној тачки.

3.4.2.1 Метода са линијским извором топлоте

Други назив за методу са линијским извором топлоте је метода топле жице и спада у групу транзијнтних метода за одређивање топлотне проводљивости. Због претпоставке да је линијски извор бесконачне дужине, код ове методе је заступљен једнодимензионални радијални ток топлоте унутар узорка материјала који се испитује (Слика 21.). Линијски грејач је уграђен у тестирани материјал, док се мерење температуре врши на тачно дефинисаном растојању од њега, у одређеном временском интервалу. Препоручује се да линијски грејач буде направљен од жице чисте платине.



Слика 21. Принципиј методe са линијским извором топлоте

Ако се дефинише да је топлота добијена од стране грејача константна и уједначена дуж тестираног узорка, топлотна проводљивост се може извести из разлике температуре ($T_2 - T_1$), током познатог интервала времена (t_1, t_2) и топлотног флуksа грејача (q):

$$\lambda = \frac{q}{4\pi(T_2 - T_1)} \ln \frac{t_2}{t_1} \quad (9)$$

Примена ове методе је први пут започета 1931. године од стране Stalhane и Рука-а [36] при карактеризацији чврстих и прашкастих материјала. Међутим, ова метода се јак

брзо развијала, тако да се данас користи и за мерење топлотне проводљивости течности [56, 57]. Метода топле жице се примењује код материјала који су слабији топлотни проводници ($\lambda < 15 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$) на температурама до 1500°C [36].

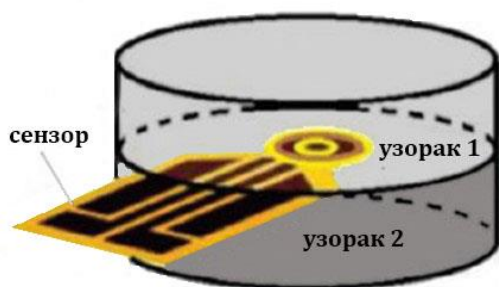
Hammerschmidt [58] је у својим истраживањима, применом ове методе добио мерну несигурност за израчунавање топлотне проводности од 5,8 %.

Метода која се у пракси често среће а функционише по потпуно истом принципу, с тим да се мерење температуре базира на систему нултог пречника ($r = 0$) је метода топлотне сонде [59]. Линијски извор топлоте је са термопаром смештен унутар сонде и на тај начин електрично изолован од узорка материјала који се испитује. Код одређивања топлотне проводљивости чврстих материјала, применом методе са линијским извором топлоте, често се јавља проблем контактнотог отпора, због чега се користи њена модификована метода - методе топле траке [60]. Разлика ове две методе је у извору топлоте, јер се код методе топле траке користи танка метална трака што представља и предност, јер се остварује бољи термички контакт са узорком. Са друге стране, недостатак ове методе се огледа у томе што трака има мању електричну отпорност од жице, па су и промене температуре много мање [61].

3.4.2.2 Транзијентна метода равног извора

Ова метода је позната под називом Gustafsson-ова сонда према научнику који ју је открио 1991. године или, чак, као метода топлог диска. Транзијентна метода равног таласа се најчешће користи за одређивање топлотне проводљивости течности и чврстих тела [62, 63], док су мерна апаратура и поступак мерења ове методе дефинисан стандардом ASTM D7984-16 [36].

Принцип функционисања методе је веома сличан принципу методе са линијским извором топлоте, односно методи топлотне сонде. Код све три методе, отпорни елемент се користи и као температурни сензор и као грејач и као такав, веома је танак, како би имао што већу електричну отпорност, односно што већу осетљивост на промену температуре. Сензор се поставља између два узорка истог материјала који се испитује или се урања у узорак у случају испитивања течности или прахова (Слика 22.).



Слика 22. Принцип методе равног извора

Принцип рада ове методе се заснива на константној струји која се пропушта кроз грејач у кратком временском интервалу, при чему се бележи промена његове отпорности у функцији времена. На основу овога се може доћи и до промене температуре узорка материјала који се испитује, при чему њен пораст зависи од излазне снаге сензора, топлотне дифузности и топлотне проводљивости. Како би поједноставили процес, средња температура $\overline{\Delta T}(\tau)$ се може представити као функција само једне променљиве τ [64].

$$\tau = \sqrt{\frac{t\alpha}{r^2}} \quad (10)$$

где је r полупречник сензора, α топлотна дифузивност узорка испитиваног материјала и t време. Температурни одзив сензора као функција параметра τ је дата следећом једначином [64]:

$$T(\tau) = \frac{P_0}{\sqrt{\pi^3 r \lambda}} D(\tau) \quad (11)$$

где је P_0 укупна излазна снага, док $D(\tau)$ представља карактеристичну временски зависну функцију дефинисану као [64]

$$D(\tau) = \frac{1}{[m(m+1)]^2} \int_0^\tau \frac{1}{s^2} ds \left[\sum_{n=1}^m n \sum_{k=1}^m k \left\{ -\frac{n^2+k^2}{4m^2s^2} \right\} I_0 \left(\frac{nk}{2m^2s^2} \right) \right] \quad (12)$$

где m представља број концентричних кругова сензора.

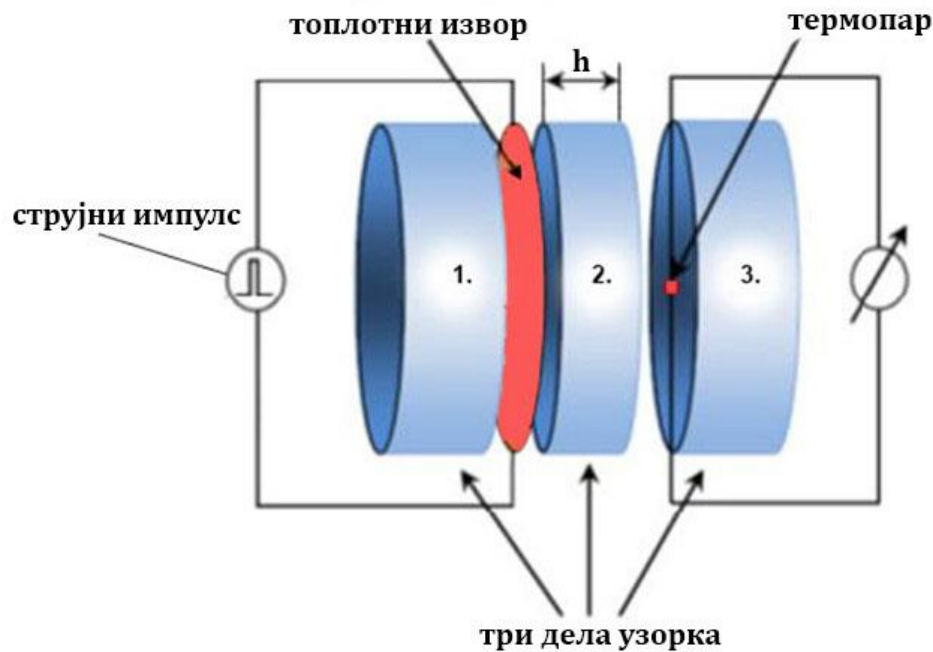
Због постојања концентричних кругова на сензору јавља се разлика у теоријским и експерименталним резултатима. Ова разлика се може отклонити ако је број концентричних кругова m већи од 10, ако се изврши мала корекција у времену или ако је вредност бездимензионог параметра τ већа од 0,1.

Топлотна проводљивост која се може одредити овом методом је у широком распону и то од 0,005 W/(m·K) до 500 W/(m·K), у распону температуре од 30 K до 1200 K [50] и временском интервалу добијања резултата од 10 s до 10 min [36]. Ова врста транзијентне методе је применљива на течности, аерогелове и чврста тела [65], [66] док мерна несигурност исте износи 3 %, што је доказао Gustafsson [62] мерећи топлотну проводљивост чврстих тела.

3.4.2.3 Импулсна транзијентна метода

Ова врста транзијентне методе представља једноставну методу за одређивање температурног поља узорка материјала који се испитује [67], одређивањем максималног раста температуре узорка на тачно дефинисаном растојању од извора топлоте. При испитивању овом методом, узорак се састоји од три дела (Слика 23.), при

чему се између првог и другог дела узорка поставља топлотни извор, који се загрева помоћу струјног импулса, док се температурни одзив бележи термопаром који се поставља између другог и трећег дела.



Слика 23. Шематски блок дијаграм импулсне транзијентне методе

Модел импулсне методе се карактерише функцијом температуре која представља решење парцијалне диференцијалне једначине. Идеалан модел је [67]:

$$T(h, t) = \frac{Q}{c_p \rho \sqrt{\pi \alpha t}} e^{-\frac{h^2}{4\alpha t}} \quad (13)$$

где $T(h, t)$ представља транзијентну температуру термопарског споја, $Q = RI^2$, R отпорност планарног грејача, c_p , ρ и α су специфична топлота, густина и топлотна дифузивност узорка, и h представља растојање између грејача и термопара.

На основу идеалног модела, топлотна проводљивост узорка се рачуна на основу следећег израза:

$$\lambda = \frac{Qh}{2(2\pi e)^{1/2} t_m T_m} \quad (14)$$

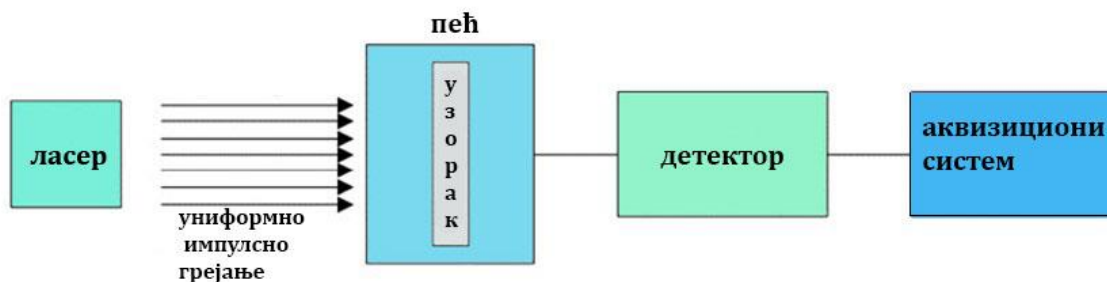
где t_m представља време за које се постиже максимални температурни одзив T_m .

У зависности од времена мерења током којег се шири и температурно поље у узорку, геометрије узорка као и карактеристика грејача, одређена је и мерна несигурност ове методе. Kubica и остали [68] су мерили топлотну проводљивост хомогених и хетерогених чврстих материјала и одредили да мерна несигурност имулсне транзијентне методе износи око 4%.

3.4.2.4 Ласерска импулсна метода

Ласерска импулсна метода је једна од најзаступљенијих како у лабораторијским, тако и у индустријским условима, због своје тачности и једноставности. Још једна њена предност огледа се у томе, што се топлотна проводљивост може мерити код вишеслојних материјала и композита. Ову врсту методе изучавали су научници широм света [69] и препоручује се у многим стандардима, као на пример у стандарду ISO 18755 [36].

Основни принцип ласерске импулсне методе је да узорак који се налази на одређеној температури и облика је танког диска, на једној својој површини апсорбује одређену количину енергије која се добија од кратког имулса ласерског зрачења. Дифузијом апсорбована топлота прелази на другу страну узорка, при чему се промена температуре мери оптичким пирометром, инфрацрвеним детектором или термопаром. Блок дијаграм ове методе приказан је на слици 24.



Слика 24. Шемајски блок дијаграм ласерске импулсне методе

Топлотна дифузивност, α , узорка дебљине L се може израчунати помоћу следеће једначине

$$\alpha = 1,38 \cdot \frac{L^2}{\pi^2 t_{1/2}} \quad (15)$$

где $t_{1/2}$ представља време за које температура задње стране узорка достигне половину своје максималне вредности. На основу топлотне дифузивности се може добити топлотна проводљивост, познавајући густину и специфичну топлоту узорка материјала који се испитује. Једноставна геометрија и мале димензије узорака, брзина мерења као и широк температурни опсег представљају главне предности ове методе. Са друге стране, за добијање тачне топлотне проводљивости потребно је познавање и осталих особина испитиваног материјала и њена најчешћа примена је код чврстих тела. Мерна толеранција ове методе износи 5 % што је дефинисано према стандарду ASTM E1461[36]. Међутим, неки истраживачи су проценили да мерна несигурност исте методе износи око 3 % [70].

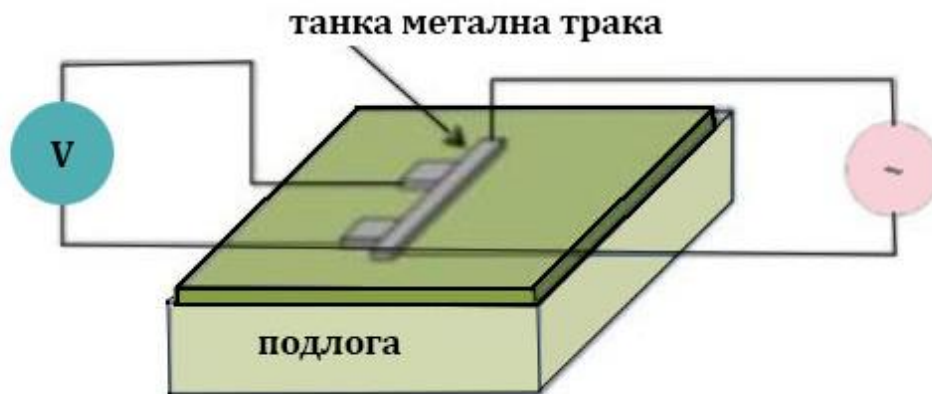
3.4.2.5 3ω метода

3ω метода је први пут предложена 1987. године од Cahill-а са сарадницима [71] и њен принцип се заснива на примени наизменичне струје угаоне фреквенције ω кроз танки метални грејач који истовремено представља и грејач и температурни сензор који се директно ослања на електрично изоловани узорак материјала који се испитује (Слика 25.). Због промена температуре настају осцилације отпорности угаоне фреквенције 2ω , које са струјом угаоне фреквенције ω стварају осцилације напонског сигнала кроз грејач од метала, фреквенције 3ω [72].

Мерењем трећег напонског сигнала на две различите фреквенције f_1 и f_2 , одређује се топлотна проводљивост према следећој једначини [73]:

$$\lambda = \frac{V^3}{4\pi l R^2 (V_{3,1} - V_{3,2})} \frac{dR}{dT} \ln \frac{f_2}{f_1} \quad (16)$$

где је V напон на траци фреквенције ω , $V_{3,1}$ напон трећег хармоника за фреквенцију f_1 , $V_{3,2}$ напон на трећем хармонику за фреквенцију f_2 , R је средња вредност отпорности металне траке и dR/dT нагиб калибрационе криве отпорности у зависности од температуре.



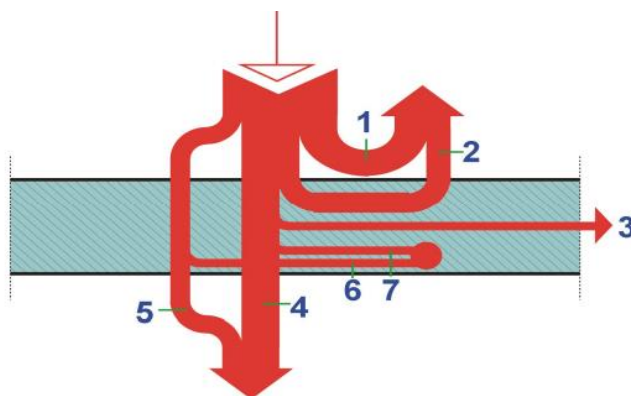
Слика 25. Принцип 3ω методе

Ова метода омогућава испитивање јако танких материјала, филмова, дебљина између $10 \mu\text{m}$ и $1000 \mu\text{m}$ што је издваја од осталих метода за одређивање топлотне проводљивости материјала. Група аутора је испитивањем танких чврстих узорака слабо проводних полимера дефинисала мерну несигурност ове методе која износи 3% [73].

3.5 МАТЕРИЈАЛИ КАО ЗВУЧНИ АПСОРБЕРИ

3.5.1 Увод

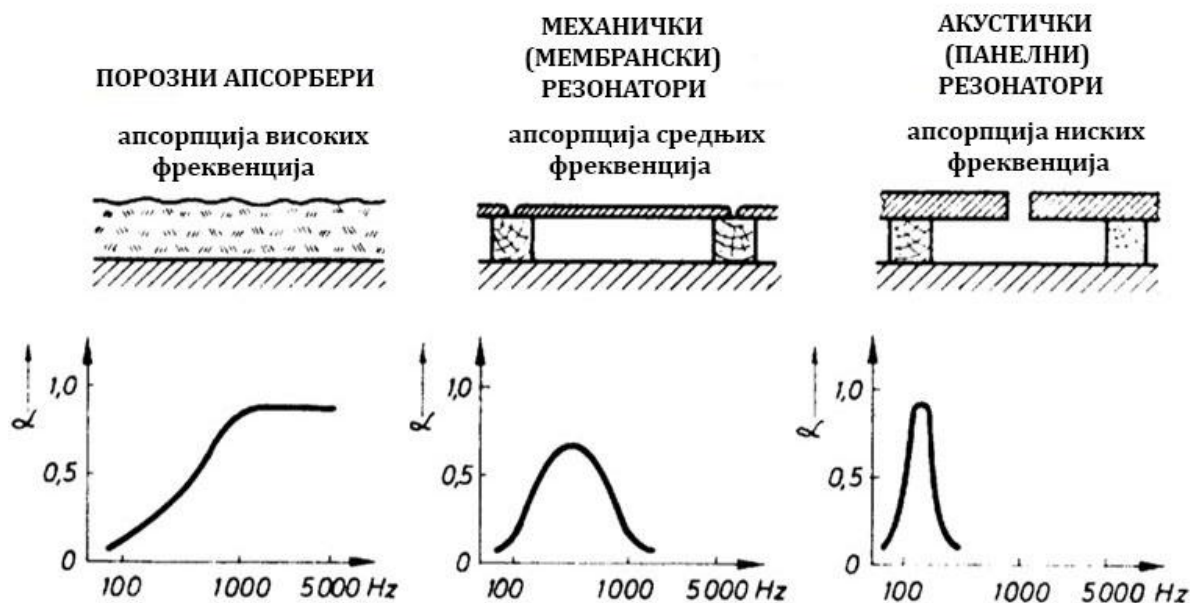
Када је реч о апсорпционим материјалима који се користе у грађевинарству, првенствено се мисли на оне који својим акустичким својствима контролишу апсорпцију и рефлексију звука. Ова врста материјала је јако битна јер пригушује буку, скраћују време одјека или отклањају појаву одјека. Приликом наилазак звучних таласа на површину неког материјала део бива одбијен, део прође кроз материјал, део се апсорбује, док се један део претвори у други облик енергије - топлотну енергију (Слика 26.).



Слика 26. Расподела енергије звучног таласа који удари у грађевински елемент (1 - део енергије звучног таласа који се рефлектује назад у просторију, 2 - део енергије вибрирања преграде враћа се назад у просторију, 3 - мањи део који се шири уздуж преграде, 4 - преостали део енергије који пролази у другу просторију зрачним путем кроз поре, 6 и 7 - део енергије звука који се претвора у топлоту) [74]

Апсорпционе и рефлексионе карактеристике материјала су нарочито битне када је потребна заштита од звучних таласа, буке. Приликом одбијања звучних таласа, може доћи до промене њихове амплитуде [74], што зависи од дебљине и врсте материјала, а истовремено зависи и од фреквенције упадног таласа. Како рефлексија таласа зависи од његове фреквенције тако ће и коефицијент апсорпције бити функција фреквенције звучних таласа.

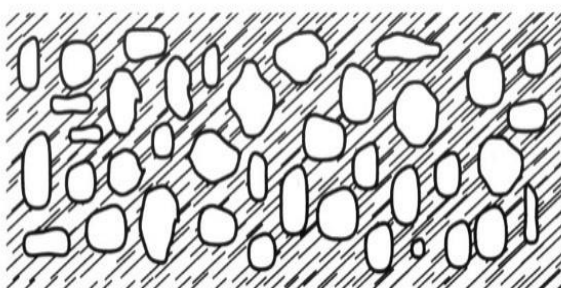
У пракси су познате три основне врсте апсорбера и то: порозни апсорбери (а), механички (мембрански) апсорбери (б) и резонаторски апсорбери (ц) (Слика 27.) [74].



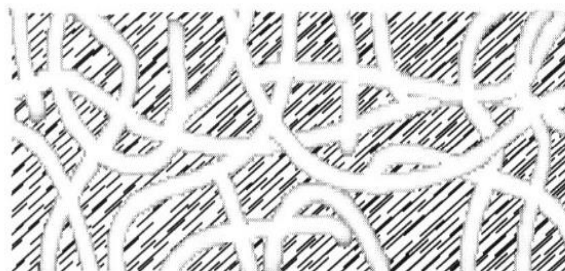
Слика 27. Типови звучних апсорбера у зависности од фреквенцијског спектра буке и коефицијента звуке апсорпције

3.5.1.1 Порозни апсорбери

Ова група апсорпционих материјала, како им и сам назив каже, су по својој структури јако порозни и деле се на оне са отвореним и оне са затвореним порима (Слика 28.) [75].



Материјал са затвореним порима

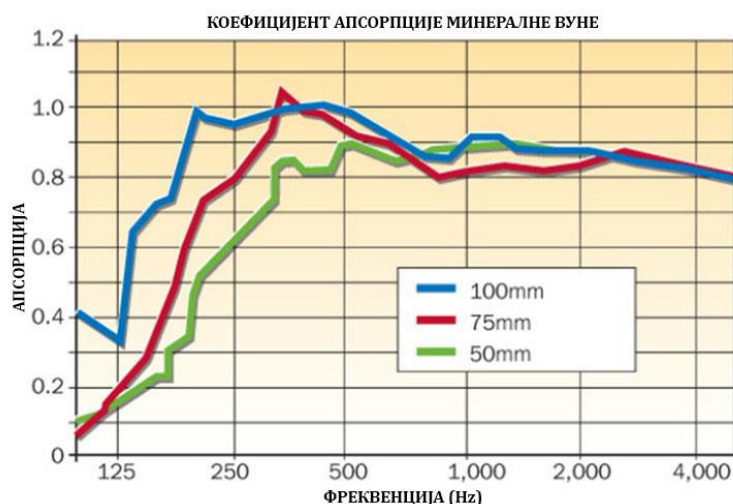


Материјал са отвореним порима

Слика 28. Порозни апсорбер

Најзначајнија карактеристика порозних апсорбера је та што звучна енергија може продри унутар материјала након што удари о његову површину. Међутим, та енергија не нестаје, она се претвара у други облик енергије. Коефицијент апсорпције ове врсте апсорбера зависи од дебљине слоја материјала (Слика 29.), фреквенције

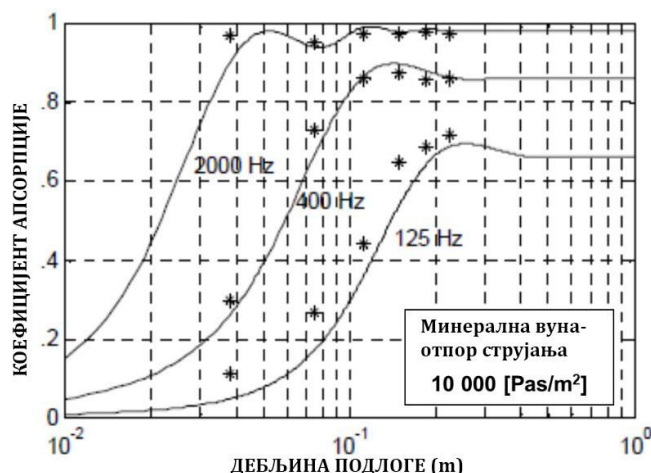
емитованих звучних таласа, отпора струјања (Слика 30.) и порозности (Слика 31.). Ако је у питању вишеслојна преграда, тада на апсорпцију звука ове преграде утиче и редослед слојева као и њихова удаљеност од подлоге (Слика 32.).



Слика 29. Графички приказ утицаја дебљине минералне вуне на коефицијент апсорпције материјала [75]

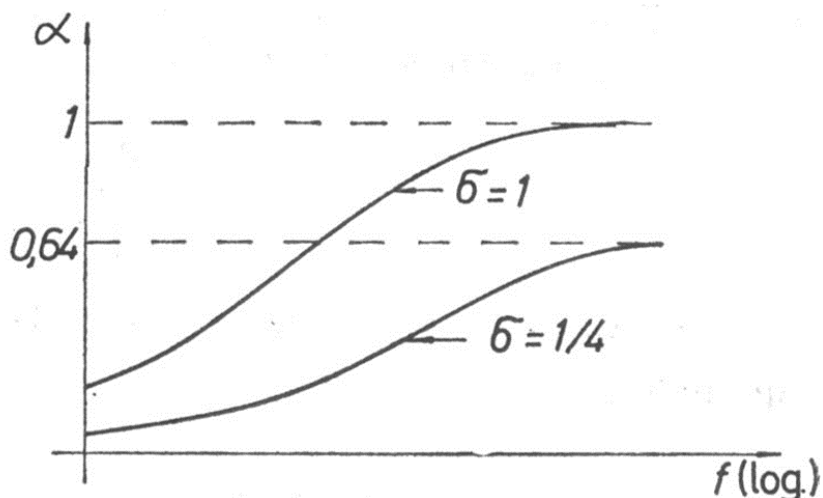
Порозне материјале карактерише чињеница да са повећањем дебљине материјала расте и коефицијент звучне апсорпције што је највише изражено у подручју ниске (50 Hz - 125 Hz) и средње (160 Hz - 400 Hz) фреквенције звука. На ниским фреквенцијама коефицијент апсорпције порозних материјала је мали због односа таласних дужина према димензијама пора. У подручју изнад 500 Hz, тачније, при високим фреквенцијама, повећање коефицијента звучне апсорпције са повећањем дебљине је знатно мање изражено.

На слици 29. можемо уочити да је коефицијент апсорпције минералне вуне мали на ниским фреквенцијама (до 125 Hz). Такође, минерална вуна мањих дебљина, на ниским фреквенцијама не испуњава гранични услов апсорпционих материјала а то је да коефицијент звучне апсорпције треба да буде мањи од 0,3. Са повећањем дебљине слоја материјала коефицијент звучне апсорпције се повећава до фреквенције од око 300 Hz а затим, на вишим фреквенцијама се слично понаша као и тањи слој материјала. Са графикона се може уочити да коефицијенти апсорпције све три представљене дебљине минералне вуне у фреквенцијском подручју од око 300- 3000 Hz одговарају подручју грађевинске акустике док се изнад 630 Hz може се сматрати да коефицијент звучне апсорпције има приближно исту вредност за све три дебљине слоја минералне вуне.



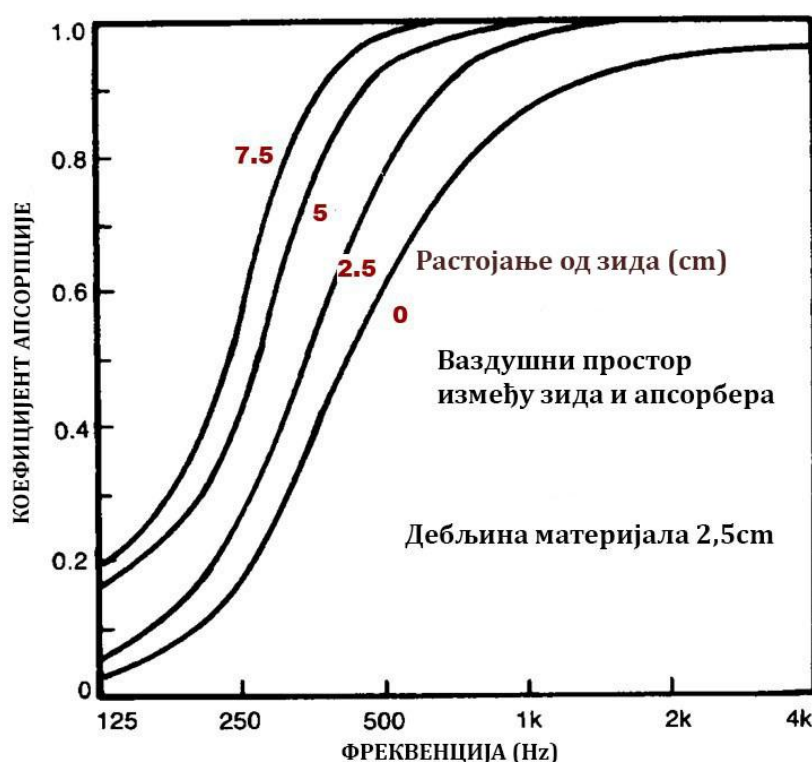
Слика 30. Графички приказ утицаја отпора струјања на коефицијент апсорпције материјала [75]

На слици 30. приказана је зависност коефицијента звучне апсорпције од дебљине подлоге за три карактеристичне фреквенције од 125 Hz, 400 Hz и 2000 Hz, при константној вредности отпорности струјању ваздуха. Испитиване фреквенције одговарају подручјима ниских, средњих и високих фреквенција. Нижој фреквенцији звучних таласа одговара мањи коефицијент звучне апсорпције. Са повећањем дебљине подлоге повећава се вредност коефицијента звучне апсорпције до максималне вредности која се остварује на граничној дебљини слоја материјала. Изнад граничне дебљине материјала вредност коефицијента звучне апсорпције за појединачне фреквенције је константна и не мења се без обзира на дебљину подлоге. Вишој фреквенцији звука одговара нижа вредност дебљине граничног слоја.



Слика 31. Графички приказ утицаја порозности на коефицијент апсорпције материјала [75]

На слици 31. приказана је фреквенцијска карактеристика коефицијента апсорпције која се односи се на отворену структуру порозног материјала. Криве зависности коефицијента звучне апсорпције у зависности од фреквенције звука за одређену вредност порозности су одређене уз извесна поједностављења и представљају типичне зависности коефицијента звучне апсорпције код порозних материјала. На почетном делу криве постоји пораст коефицијента звучне апсорпције, а потом се тежи ка сталној вредности која зависи од порозности. Основни закључак је да коефицијент апсорпције има највеће вредности на високом фреквенцијама и применљив је на све порозне материјале. Експериментални резултати потврђују да вредност коефицијента апсорпције може бити врло блиска јединици када је порозност материјала блиска јединици.



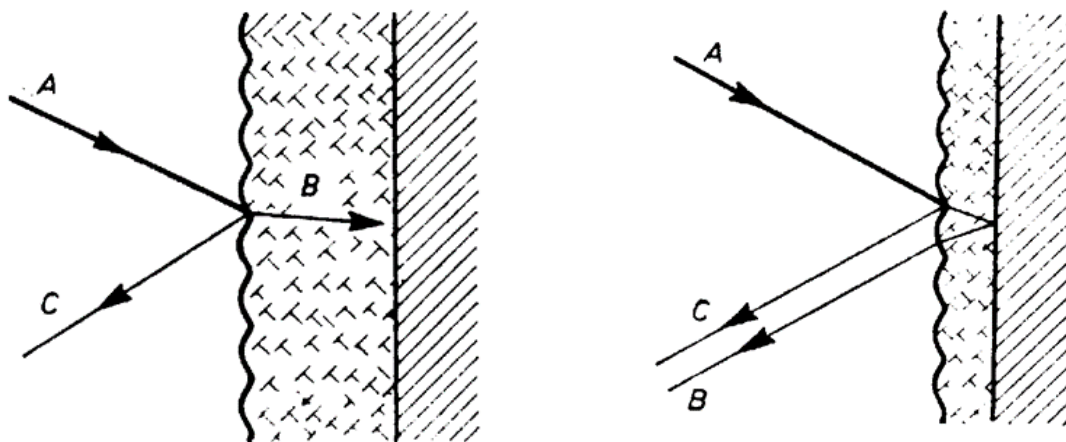
Слика 32. Графички приказ утицаја положаја материјала у односу на зид на коефицијент апсорпције материјала [75]

Коефицијент апсорпције порозних материјала је мали на ниским фреквенцијама, а његова вредност се може повећати тако што се растојања између порозних материјала и зида повећава. Максимални ефекат се постиже постављањем материјала на четвртину таласне дужине ($\lambda/4$) од зида а минимални на половину таласне дужине ($\lambda/2$). Ако је материјал тањи од граничних вредности, онда се мора узети у обзир и рефлексija на другом крају. Последице су: смањење коефицијента апсорпције на нижим фреквенцијама и извесна таласност криве фреквенцијске зависности

коефицијента звучне апсорпције. Физичко објашњење ове појаве налази се у чињеници да се због рефлексије јављају стојећи таласи, па је брзина честица уз круту површину зида једнака нули, а максимум достиже тек на растојању $\lambda/4$ од зида. Танак слој материјала не допире до свог максимума, где би иначе губици сила трења требало да буду највећи, па зато ефикасност апсорбера мора бити смањена.

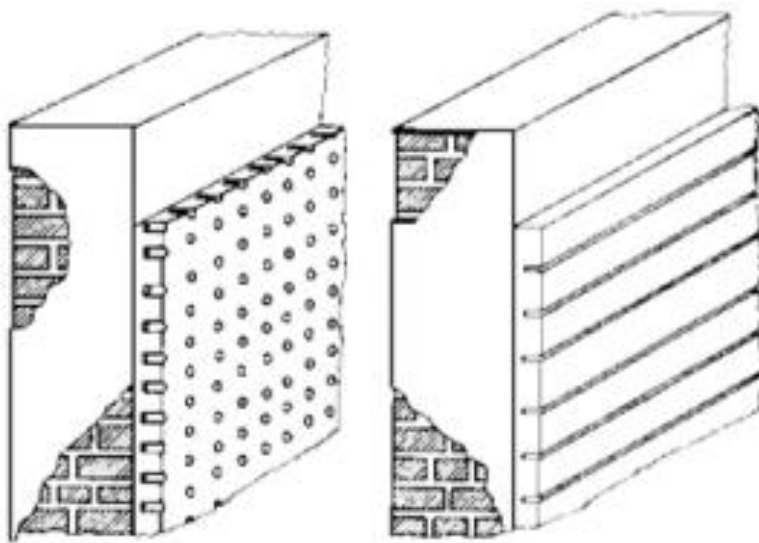
На слици 32. приказана је промена коефицијента звучне апсорпције у зависности од фреквенције за различите вредности растојања од зида на коме је постављен апсорпциони материјал исте дебљине. Може се закључити да са повећањем растојања од зида долази до повећања коефицијента звучне апсорпције у целокупном фреквенцијском подручју. Оно што се мора истаћи је да ова законитост не важи за било које растојање, већ само за онај скуп могућих растојања која представљају четвртину таласне дужине фреквенција које носе највећу звучну енергију.

Пример преграде са два слоја, једним јако порозним и другим мање порозним, приказује како дебљина порозног слоја утиче на коефицијент апсорпције звука. Звучна енергија која прође у порозни слој веће дебљине, се у потпуности апсорбује и претвара у топлотну енергију. Зато се коефицијент апсорпције одређује само на основу одбијеног дела звучног таласа. Ако је порозни слој танак, део звучне енергије, који прође кроз слој, одбија се од тврдог слоја материјала, што представља разлог мањег коефицијента апсорпције (Слика 33.).



Слика 33. Апсорпција звука у дебелом и танком слоју порозног апсорбера [74]

У пракси се врло често користе порозни апсорбери попут акустик плоча, на чијој се површини налазе отвори пречника 4 mm, размака око 15 mm, или урезане бразде (Слика 34.) [76]. Најчешћа примена ових плоча је у школама, болницама, хотелима, тачније, свуда где је потребно смањити буку.



Слика 34. Акустички њлоч

Минерална вуна, стаклена вуна, струготина, азмафон, производи од биљних влакана, као и одређене врсте пена спадају у групу најчешће коришћених порозних апсорбера (Слика 35.) [75].



а)

б)

в)

Слика 35. Примери порозних апсорбера: а) минерална вуна, б) акустичка пена, в) азмафон

Предности порозних апсорбера:

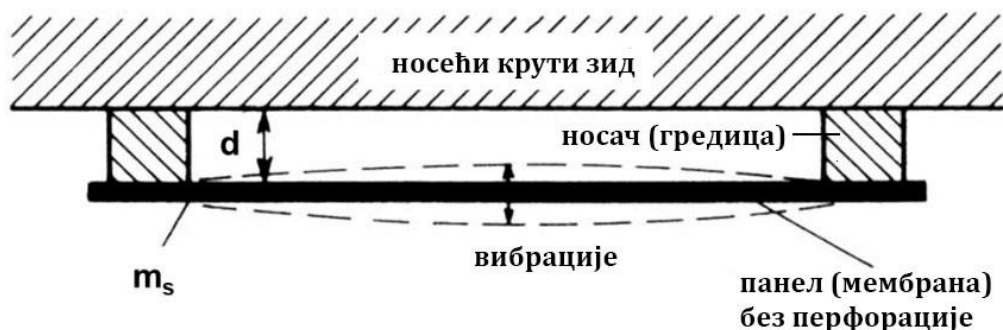
- Мала маса,
- Лако обликовање,
- Велики коефицијент апсорпције на средњим и високим фреквенцијама.

Недостаци порозних апсорбера:

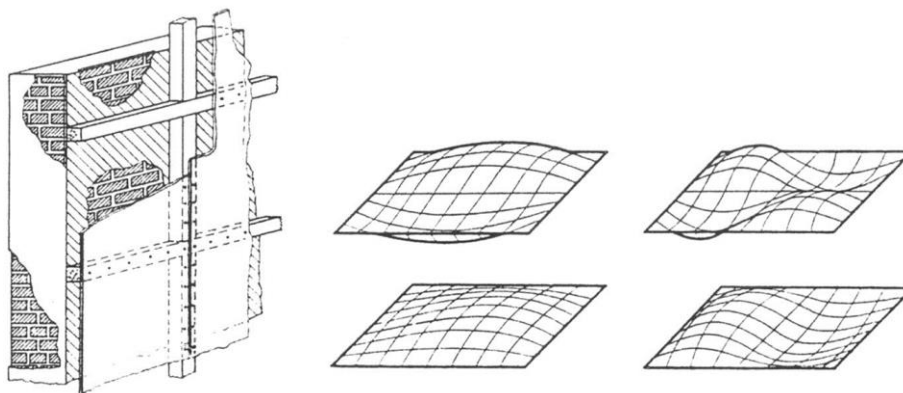
- Тешко постизање добрих коефицијената апсорпције на нижим фреквенцијама,
- Неким материјалима, попут минералне вуне, је неопходна носива конструкција,
- Лако оштећују, крзају.

3.5.1.2 Механички (мембрански) апсорбери

У свакодневном животу се користе мембрански апсорбери а да тога нисмо ни свесни. У ову групу апсорбера спадају врата, прозори, дрвени подови на гредама, зидови од гипса итд. Ова врста механичких система за апсорпцију звука се састоји од мембране која може бити танка дрвена, метална, стаклена, кожна или пластична, причвршћена на зид преко носача и ваздушне коморе која може и не мора бити испуњена порозним материјалом. Тачније, ови апсорбери су у облику равне кутије дубине 100 – 200 mm, чија је унутрашњост испуњена ваздухом или апсорбером преко кога се налази мембрана која вибрира под утицајем звучних таласа, при чему се троши звучна енергија (Слика 36.). На слици 37. приказани су начини савијања мембране на различитим фреквенцијама звучних таласа.

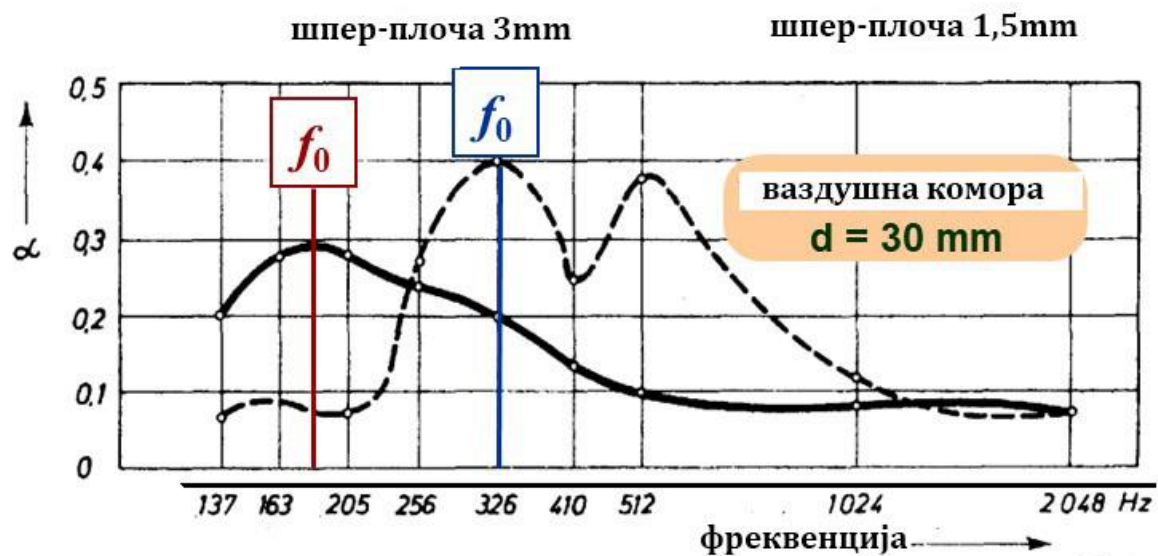


Слика 36. Мембрански апсорбер [75]

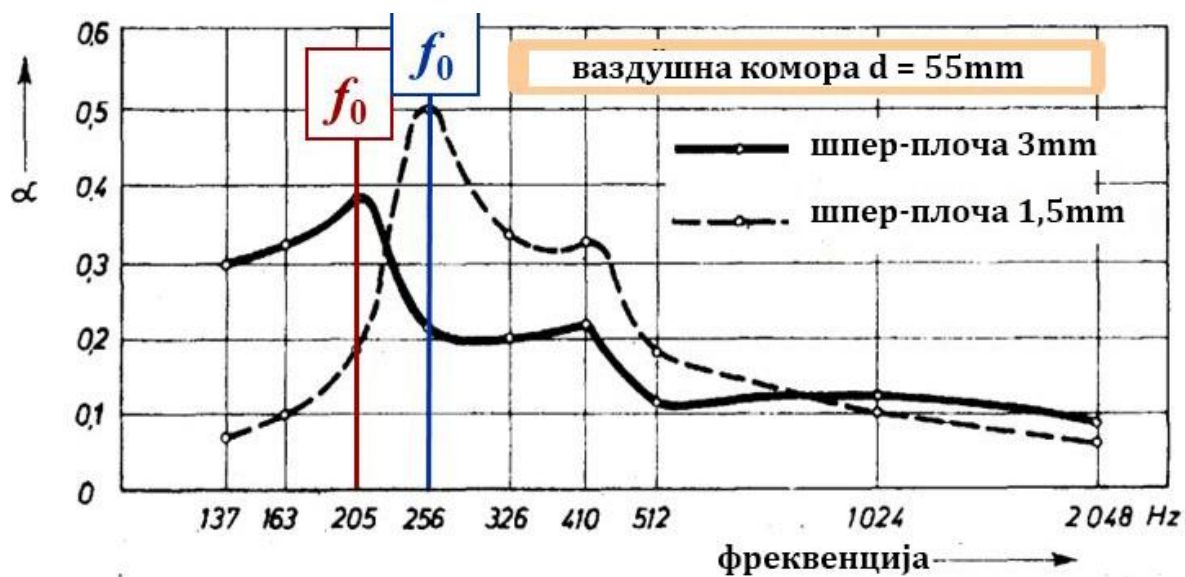


Слика 37. Начини савијања мембране на различитим фреквенцијама звучних таласа [75]

Са променом дебљине ваздушне коморе и мембране мења се коефицијент апсорпције и фреквенција мембране, што је представљено на слици 38. а и б. Начини промене фреквенције резонансе мембране зависе од величине и дебљине панела, растојања панела од зида и унутрашњег пригушења панела (Слика 39.).

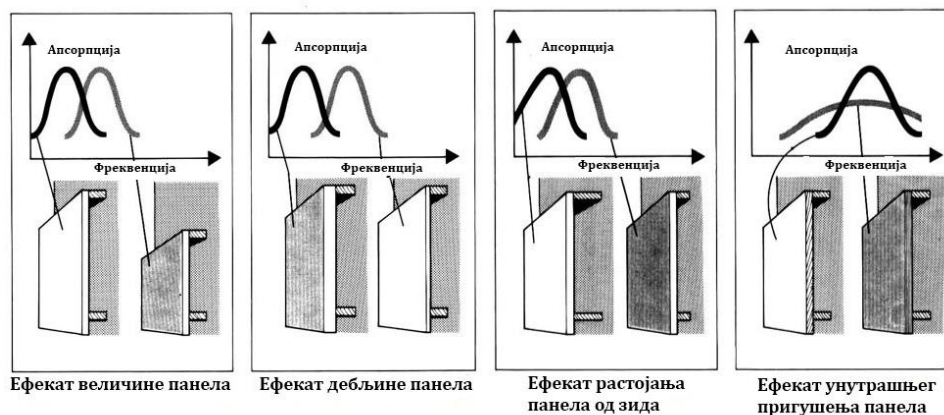


а)



б)

Слика 38 а и б. Промена фреквенције резонансе мембране са дебљином ваздушне коморе [75]



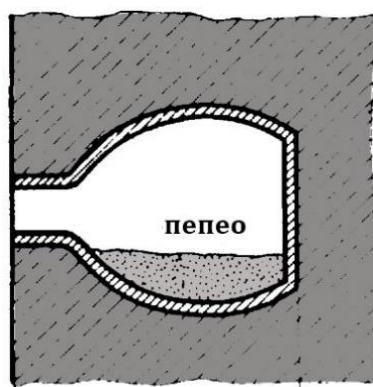
Слика 39. Начини промене фреквенције резонансе мембране [75]

Механички (мембрански) апсорбери се карактеришу својим предностима и манама. Ова врста апсорбера је погодна за ниже фреквенције и једноставни су за одржавање. Са друге стране са њима је тешко постићи коефицијент апсорпције изнад 0,5 и отежавајуће је пронаћи плоче довољно мале површинске масе а истовремено и довољне механичке чврстоће.

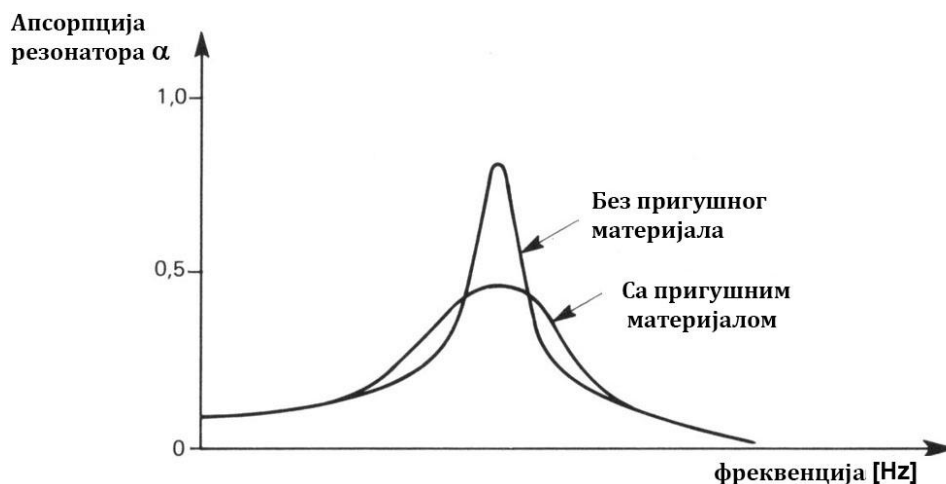
3.5.1.3 Резонаторски апсорбери

Трећи и веома важан тип апсорбера су резонаторски. У практичној примени се користе као појединачни резонатори (Helmholcov), спојени резонаторски системи или резонаторски системи са расцепом.

Helmholcov-и резонатори се израђују у облику посуда различитих облика, одређене запремине, са отвором у облику грла. Како би се проширило фреквенцијско подручје, са повећаном апсорпцијом, у Helmholcov резонатор се може додати пригушни материјал, на пример пепео (Слика 40.). Ефекат уношења апсорпционог материјала у комору приказан је на слици 41.



Слика 40. Helmholcov резонатор са пригушним материјалом [74]



Слика 41. Ефекат уношења апсорпционог материјала у комору [75]

Акустички резонатор са перфорираном плочом представља конструкцију која је састављена од плоче причвршћене на зид преко носача и ваздушне коморе или коморе испуњене порозним материјалом који се налази иза плоче (Слика 42.). Убацивањем апсорбујућег материјала унутар апсорбера постиже се побољшање акустичких особина овог система. У истом циљу врши се и перфорација плоча отворима кружног облика чији је пречник од 3 -5 mm, међусобног размака 10 -15 mm.



Слика 42. Акустички резонатор са и без апсорпционог материјала [75]

Као и предходне две групе апсорбера и резонаторски се одликују позитивним и негативним странама. Спадају у најчешће коришћену врсту апсорбера и омогућавају постизање одређене апсорпције у зависности за које фреквенцијско подручје се користи. Насупрот томе, осетљиви су на затварање перфорација јер на тај начин губе апсорпционе особине. Резонаторски апсорбери представљају прелаз између мембранских и порозних апсорбера.

3.5.2 Биоматеријали као звучни апсорбери

Константан развој индустрије довео је до значајног проблема загађења буком, која потиче из различитих извора. Бука је други по реду узрок тешких болести, после загађености ваздуха. Коришћење акустичких апсорпционих материјала представља најефикасније средство заштите од овог проблема. На овај зачин се смањује ниво звука у објектима, аутомобилима, па чак и на отвореном простору. Индустрија производње биоматеријала као акустичких апсорбера има велике потенцијале за позитиван помак према одрживој производњи и смањењу негативног еколошког утицаја и зато ово постаје једна од бројних области истраживања широм света. Познато је да су синтетички материјали попут стаклених влакана, полиестера, полимерних пена, минералне вуне итд. водећи звучно апсорбујући материјали у циљу заштите од буке. Међутим, највећа мана им је што се добијају из сировина чији су извор фосилна горива. У циљу добијања нових врста материјала, испитују се одрживи и обновљиви извори првенствено у циљу заштите животне средине.

Глобално загревање, уштеда енергије и питања анализе животног циклуса су фактори који су допринели брзој експанзији биљних материјала као изолације зграда, који се могу квалификовати као еколошки прихватљиви, одрживи и ефикасни мултифункционални материјали. Amziane [77] и остали су представили неколико врста материјала, биљног агрегата, за пројектовање грађевинских материјала који се све више употребљавају широм света. Употреба здробљених биљних врста, попут лана, кокосове љуске, конопље, повезане минералним везивом представљају најчешће решење за производњу грађевинских материјала. Примарна карактеристика биљних агрегата је висока порозност као и мала густина, што омогућава већу апсорпцију звука. Ово је једна од битних карактеристика по којој се биљни бетон разликује од традиционалног бетона. Испитивања су показала да због високе флексибилности агрегата, сам материјал трпи високе деформације под напрезањем. Као лоша страна бетона са агрегатом биљног порекла представљена је осетљивост на влагу, што утиче на трајност бетона и представља један од праваца даљег истраживања и унапређења ове врсте материјала. Да материјали на био бази имају мањи утицај на животну средину од традиционалних, синтетичких материјала као и да показују добре карактеристике по питању звучне изолације показали су нам Zhu и остали [78]. Ово истраживање представља приказ мултипорозних материјала на биолошкој бази, са dobrим својствима апсорпције звука, и разматрање модела преноса звука. Поред тога, испитивања се базирају и на оптимизацији биокомпозита за контролу звучне изолације. Ограничењем лошег утицаја на животну средину, изазваног коришћењем необновљивих ресурса, као и поновном употребом пољопривредних нуспроизвода као нове сировине бавили су се Liuzzi и остали [79]. Због наметања циља одрживости од стране европске директиве, подржавајући пасивна решења за смањење потрошње енергије, нови грађевински материјали за побољшање звучне и топлотне изолације

објекта постају главна тема истраживања. Зато је циљ овог истраживања процена физичких, акустичких и термичких карактеристика грађевинских панела добијених индустријском прерадом коре бадема. Испитивања су вршена на различитим мешавинама где је као везиво коришћен поливинил ацетатног лепка и раствор гумиарабике. Коефицијент апсорпције звука и отпор струјања ваздуха су мерени методом стојећих таласа, док су топлотна дифузивност и топлотна проводљивост мерени помоћу уређаја за транзијентни раван извор. Одређивање порозности допринело је проучавању корелације између везива и агрегата као и акустичких особина при различитим мешавинама. Резултати испитивања показују да се овај биокмползит може користити као замена за материјале који тренутно постоје на тржишту.

Да је порозност карактеристика материјала која је од примарне важности при контроли буке доказали су Shoshani и Yakubov [80]. Оптимални састав материјала је веома битан због утицаја порозности на коефицијент апсорпције звука што су наведени истраживачи и показали испитујући три траке од памука, акрилних влакана и полиестера. Размотрена су четири функционална облика порозности: линеарни, квадратни, логаритамски и експоненцијални. Резултати су показали да, за све разматране материјале, логаритамски облик даје највеће коефицијенте апсорпције звука.

За развој обновљивих, биоразградивих материјала коришћена су природна влакна од бамбуса, јуте и банана у циљу упијања звука, односно прављења материјала за звучну изолацију. Направљена су три типа материјала мешањем три врсте биљака са полипропиленским резаним влакнима у размери 50:50. Коефицијент апсорпције звука је испитан методом импедансне цеви. За све узорке извршено је поређење физичких својстава као што су површинска густина, дебљина, крутост, затезна чврстоћа, издужење, структурна својства и својства удобности као што су пропустљивост ваздуха и топлотна проводљивост. Утврђено је да је бамбус/полипропиленски неткани материјал са својом компактном структуром показао већу затезну чврстоћу, већу крутост, ниже издужење, нижу топлотну проводљивост, нижу пропусност ваздуха и добар коефицијент апсорпције од других и погодан је за контролу буке у унутрашњости аутомобила. На 800 Hz, коефицијент апсорпције бамбуса/полипропилена и јуте/полипропилена је еквивалентан циљном нивоу, али је нижи за 22% код банане/полипропилена [81]. Према дефиницији одрживости, производ се може сматрати одрживим ако његова производња омогућава да ресурси од којих је направљен и даље буду доступни будућим генерацијама. Одрживи производ се стога може стварати више пута без емитовања негативних ефеката на животну средину, без стварања отпадних производа или загађења и без угрожавања добробити радника или заједница. Последњих година многи нови материјали за контролу буке су проучавани и развијени као алтернативе традиционалним (стаклена или камена вуна). Ови материјали су или природни

(памук, целулоза, конопља, вуна, глина, итд.) или рециклирани (гума, пластика, тепих, плута, итд.). Предложене су различите методологије за процену одрживости материјала и производа (LCA, Ecoinvent, Ecoprofiles). Истраживања Euronoise-a [82] представљају ажурирани преглед акустичких својстава одрживих материјала, а посебно коефицијента апсорпције звука, податке о изолацији звука у ваздуху и звуку ударца, као и анализу поступака за процену одрживости ових материјала. Тежња ка ублажавању климатских промена, услед емисије гасова стаклене баште, довела је до испитивања влакана, као алтернативних материјала, за апсорпцију звука. Стога су Rwawiire и остали [26] вршили испитивања коре *Antiaris toxicaria* по питању звучне и топлотне изолације. Растућа еколошка свест довела је до развоја нових иновативних материјала за различите примене. Полимери синтетисани из природних ресурса, последњих година су стекли значајан истраживачки интерес. Стога Gurunathan и остали [83] су имали за циљ да пружи кратак преглед који покрива област биокompозита, главне класе биоразградивих полимера, природних влакана, као и њихове производне технике и својства. Укључене су различите методе модификације површине, што је резултирало побољшањем механичких својстава биокompозита. Испитивањем је установљено да биокompозити ове врсте материјала привлаче све већу пажњу за примену у различитим областима индустрије, од производње аутомобиле до грађевинске индустрије. Испитивањима је утврђено да употреба полиуретанских пена све више расте, стога је урађено истраживање где су хемијски третирана дрвена влакна уграђена у предходно наведене пене, како би се побољшао њихов коефицијент апсорпције звука. Отворена порозност композитних пена је снажно зависила од хемијског третмана дрвених влакана, као и од садржаја дрвених влакана у композитима, а била је повезана и са отпором протока ваздуха. Мерењима је утврђено да је висок отпор протока ваздуха довео и до високог коефицијента апсорпције звука што се сложило и са прорачунским делом истраживања [84]. ALRahman и остали [85] су извршили испитивање микропорозних материјала: влакана кокосовог ораха и палминог влакана. Испитивања су се кретала у правцу звучне апсорпције као и утицаја примене ових влакана на загађење животне средине. Истраживањем је утврђено да дебљина и густина материјала, који се испитује, утиче на његову апсорпцију звука, што је дефинисано након мерења у импедансној цеви. Повећањем дебљине слоја, као и густине, повећава се и апсорпција звука при нижим фреквенцијама. Мешавином ове две врсте влакана могу се заменити синтетички влакнасти материјали, попут камене и стаклене вуне или азбеста. Asdrubali и остали [86] су истраживали акустички одрживе материјале, било природне или направљене од рециклираних материјала. Утврђено је да се ови материјали могу користити за израду звучне изолације уместо синтетичких материјала. Тако на пример, влакна лана и рециклирана целулозна влакна су подједнако добра као и изолација од стаклене вуне. Плута или рециклирана гума могу бити веома ефикасни као звучна изолација, а примена ових материјала не може штетити људском здрављу и околини. M. Ramesh

Kumar [87] и остали су се такође бавили испитивањима материјала природног порекла. Испитивали су акустичка својства материјала од иверице, багрема, јуте, индустријског чаја, конопље и гуме.

Материјали од природних влакана (памук, лан, јута, конопља, рамија) и њихове акустичке особине су до сад били предмет интензивних истраживања због широке употребе за звучну изолацију у аутомобилској, грађевинској индустрији, саобраћају итд [88–90].

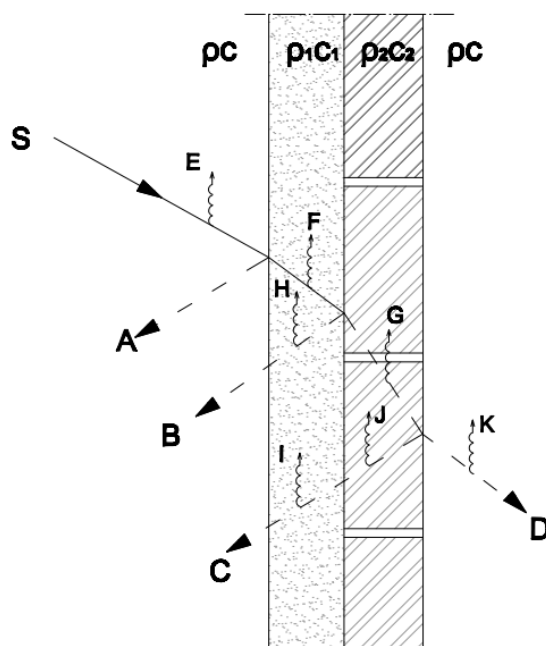
Када је реч акустичким особинама плетених и тканих целулозних материјала стоји чињеница да су мање проучене и поред њиховог великог значаја у изради производа за звучну изолацију нарочито у случајевима када морају бити испуњени и одређени естетски захтеви при уређењу ентеријера [91,92].

Поред материјала биљног порекла у пракси се често користе и рециклирани материјали. Порозне пене се могу производити од великог броја различитих материјала. Због тога је тешко дати уопштени приступ за проучавање акустичких особина пена. Полиуретанске пене се у пракси могу наћи у различитим густинама и дебљинама па се као такве користе у различитим гранама индустрије. Jin и остали [93] су вршили испитивања алуминијумских пена третираних плазма анодизацијом (електрохемијским површинским процесом). Истраживали су апсорпцију звука отворених једноћелијских алуминијумских пена направљених са различитим величинама пора. Увођењем ваздушног простора између испитиваног узорка и задње површине, коефицијент апсорпције је знатно побољшан. Са повећањем броја пора повећао се и коефицијент апсорпције. Максимални коефицијент је порастао за 5,5% након третирања плазма анодизацијом. Многи аутори су се бавили истраживањима рециклиране гуме као порозног материјала. Swift и остали [94] су својим испитивањима утврдили да овај материјал може добро да апсорбује звук, ако се величина гранула гуменог агрегата и везивно средство пажљиво одаберу и ускладе. У зависности од дебљине материјала може се остварити и одређена звучна апсорпција на одговарајућој фреквенцији. Horoshenkov i Swift [95] су такође показали да везива имају велики утицај на акустичка својства оваквих мешавина са рециклираном гумом. Pfretzschner [96] је доказао да рециклирана гума може бити добар звучни апсорбер за широкопојасну буку, што се може искористити као заштита од буке при пројектовању саобраћајница. Hong и остали [97] су се бавили изучавањем рециклиране гуме као јефтиног широкофреквентног апсорбера а самим тим и као материјала који се може користити за заштиту од буке код саобраћајница. Nan и остали [98] су потврдили остала истраживања, да грануле рециклиране гуме представљају одличан материјал за комбиновање са бетоном за израду звучних баријера поред фреквентних саобраћајница, на местима где оне пролазе кроз стамбена подручја. Мешавином влакана дрвета и рециклиране пластике бавили су се Soleimani и остали [99]. Након сушења узорцима је је додата наноглина при чему је утврђено да упијање воде опада, па чак, упијање воде код пластике иде и до вредности занемаривања. Mahzan и остали

[100] су истраживали како се кокос може користити као основна а рециклирана гума као секундарна сировина у мешавини која ће имати добре акустичке особине. Као везиво користили су полиуретан док су испитивања вршили на различитим узорцима са 25% и 35% полиуретана респективно. Обе врсте узорака су показале веће вредности коефицијента апсорпције за средње и високе фреквенције у опсегу од 1400 Hz до 6300 Hz. Узорци са мањим процентом полиуретана показују боље карактеристике од оних са већим процентом. Perná и остали [101] су се бавили композитним материјалима који настају мешавином геополимера и песка. Испитивањем су одређивали коефицијенте апсорпције као и количине песка и његове фракције у композитима.

3.5.3 Коефицијент апсорпције

Када звучни талас наиђе на средине са различитим специфичним импедансама део енергије звука се рефлектује на свим граничним површинама слојева. Укупна рефлектована енергија је једнака збиру ових рефлектованих зрака (А, В и С). Део енергије се неповратно губи кроз ваздушну средину (Е и К) као и при простирању таласа кроз слојеве материјала (F, G, H, J и I) узимајући у обзир све рефлектоване и преломљене таласе. Остали део енергије се преноси на другу страну граничне површине (D) (Слика 43.)[74].



Слика 43. Процеси који настају при наиласку звучних таласа на прејреку

Апсорбовање енергије се карактерише коефицијентом апсорпције који се дефинише као однос апсорбоване енергије у јединици времена, P_α , и укупне енергије у јединици времена P_u .

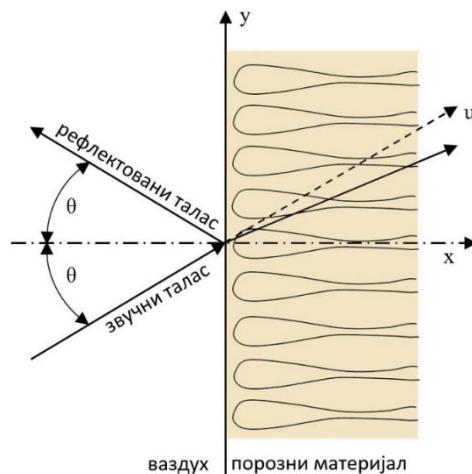
$$\alpha = \frac{P_\alpha}{P_u} \quad (17)$$

Према закону о одржавању енергије, укупна енергија једнака је збиру рефлектоване енергије, P_r , и апсорбоване енергије у јединици времена. На тај начин се остварује веза између коефицијента апсорпције и коефицијента рефлексије, r :

$$r = \frac{P_r}{P_u} = \frac{P_u - P_\alpha}{P_u} = 1 - \alpha \quad (18)$$

Познавање вредности коефицијента апсорпције за одређену дебљину и врсту материјала је јако битно при његовој уградњи и комбинацији са другим материјалима у заштити од буке. Коефицијент апсорпције се не мора увек прорачунавати, он се може одређивати експерименталним путем, применом неке од метода мерења, или применом резултата мерења за сличне материјале. Међутим, експериментална испитивања су обимна, дуготрајна и скупа, и као таква често не могу имати практичну примену.

На граничну површину неког материјала долазе звучни таласи и од импедансе тог материјала зависи који ће се део енергије рефлектовати а који апсорбовати (Слика 44.). Импеданса не зависи само од карактеристика самог материјала већ и од његове дебљине као и од импедансе онога што се налази иза порозног материјала. Коефицијент апсорпције зависи од упадног угла звучног таласа као и од низа других фактора попут масе, положаја материјала, величине његове површине и места уградње. Из предходно наведеног следи да је за одређивање коефицијента апсорпције материјала потребно знати и одређене карактеристике тог материјала.



Слика 44. Проси́рање звучно́г таласа кроз порозни ма́теријал

3.5.4 Параметри који утичу на апсорпцију звука материјала

Звучни апсорбујући материјали представљају групу материјала који смањују акустичку енергију приликом проласка звучног таласа кроз њих. Ови материјали апсорбују већи део упадне енергије звука док се мали део енергије рефлектује и на тај начин утичу на контролу буке. Апсорбујуће особине материјала зависе од фреквенције, дебљине, обраде површине, састава и начина постављања. Међутим без обзира на ове карактеристике, сви материјали који апсорбују звук се сматрају порозним и имају одређени коефицијент апсорпције звука. Звучни талас који падне на површину материјала продире у његову унутрашњост која се састоји од шупљина, канала и пора. На основу предходно реченог, могуће је извршити поделу порозних материјала према њиховој интеракцији са ваздухом.

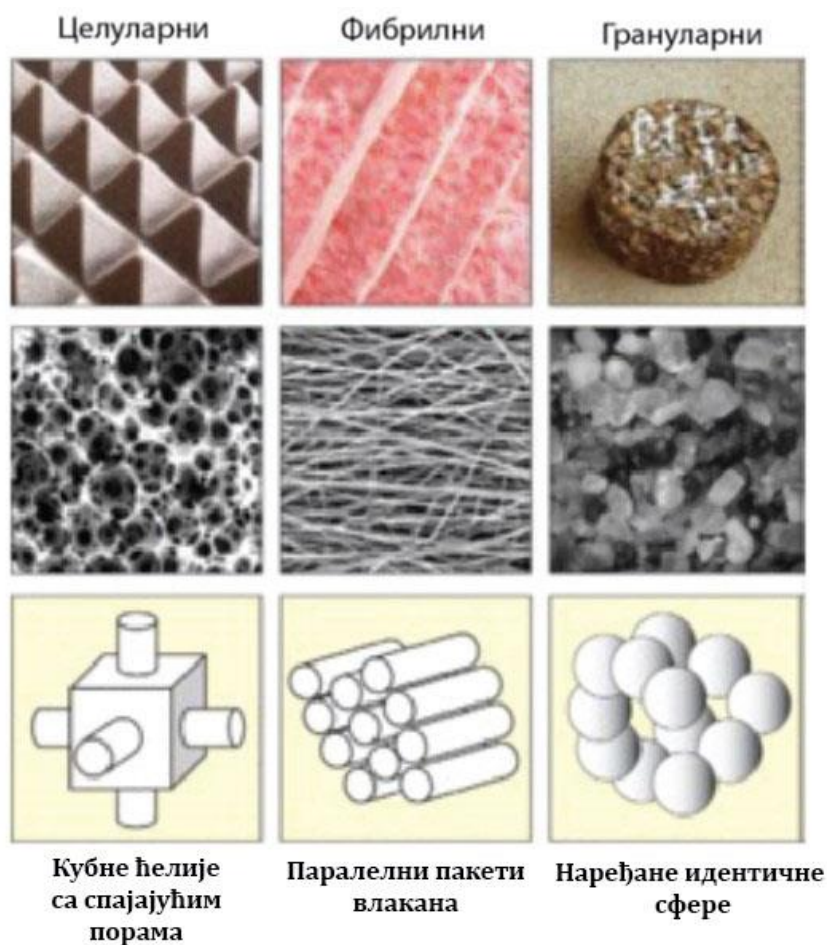


Слика 45. Графички приказ пресека порозног чврстог материјала [102]

На слици 45. је дат шематски приказ пресека чврстог, порозног материјала. Поре које имају утицај на макроскопске особине материјала попут, топлотне проводљивости, густине и механичких јачина, а изоловане су од осталих називају се затворене поре. Насупрот затвореним, постоје отворене поре које су доста значајније са аспекта звучне апсорпције. Отворене поре се карактеришу повезаношћу са спољашњом средином преко отворених канала. Ове поре се деле на слепе и пролазне, тачније затворене са једне стране или отворене на оба краја. Врста шупљина, тачније, да ли су оне отворене или затворене, представља значајан фактор за њихово понашање приликом проласка звучних таласа.

Порозни апсорбујући материјали се према својој микроскопској конфигурацији деле на: целуларне, влакнасте и гранулисане (Слика 46.). Примери целуларних материјала су разне врсте пена. Влакнасти материјали се састоје од низа тунела које формирају поре који се јављају између влакана материјала. У ову групу спадају материјали од природних и вештачких влакана, попут минералних и стаклених влакана. Трећа група порозних апсорбујућих влакана су гранулисани и састоје се од чврстих, макроскопских тела, чије су димензије нешто веће од празних међупростора. Ова група материјала се састоји од растресито распоређених појединачних делића (агрегата) [102]. Најкарактеристичнији материјали из ове групе су композити.

На слици 46. приказана су три основна типа порозних звучних апсорбера, њихов микроскопски изглед као и физички модели за објашњење њихових апсорбујућих особина.



Слика 46. Три основна типа порозних апсорбујућих материјала [102]

Основни параметри који карактеришу порозне апсорбујуће материјале су порозност, завојитост (структурални фактор), отпор протоку ваздуха, вискозна и термичка карактеристична дужина. Порозност, фактор структуре и наведене карактеристичне

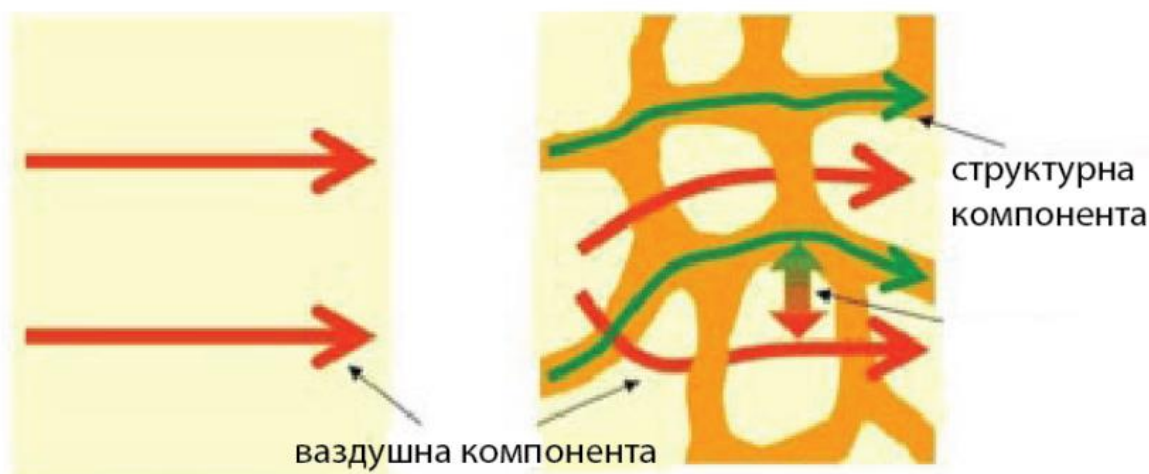
дужине највише утичу на апсорпцију звука на вишим фреквенцијама, док на нижим значајну улогу имају порозност, отпор протоку ваздуха и топлотна пропустљивост. Из предходно наведеног, може се закључити да је порозност јако битна и најутицајнија у целом опсегу фреквенција. Ипак, дебљина материјала, густина и димензије влакана су параметри који се не могу занемарити при апсорпцији звука на нижим фреквенцијама. Seddeq [103] је у свом истраживању потврдио да ефикасност материјала као звучног изолатора зависи од фреквенције звучног таласа који наилази на површину материјала, његове масе, пропустљивости материјала као и од своје дебљине и структуре.

Истраживања апсорпције звука биљних материјала су показала да способност звучне изолације углавном зависе од геометрије и структуре влакана (честица) материјала коју чине унутрашње особине као што су порозност, дебљина, тежина, покривни фактор, итд.

Порозност је најзначајнија карактеристика материјала са аспекта звучних апсорбера, обзиром да звучни талас мора да продре у материјал у коме долази до његовог расипања услед трења. При проучавању механизма апсорпције звука у порозним материјалима, број, величина и врста пора су важни фактори који се морају узети у обзир.

Како би се звук расуо услед трења, звучни талас мора да уђе у материјал. То значи да са већим бројем и већом величином пора звук лакше продире и бива пригушен у материјалу. Shoshani и остали су утврдили да код материјала са високим коефицијентом апсорпције звука, порозност треба да расте у правцу простирања звучног таласа [80].

Испитивањима пречника влакана (дебљине) бавили су се Koizumi и остали [104] при чему су дошли до сазнања да материјали са мањим пречником влакана имају већи коефицијент апсорпције. Овај закључак се објашњава чињеницом да су тања влакна покретљивија у интеракцији са звучним таласима. Осим тога, код материјала са тањим влакнима, потребно је више влакана за достизање исте запреминске густине, што истовремено значи више завојитих путања у материјалу, као и већи отпор протока ваздуха. Seddeq [103] је показао да је коефицијент апсорпције звука већи код материјала са мањим пречником влакана. Ова појава се објашњава већом покретљивошћу тањих влакана у интеракцији са звучним таласима. Поред тога, код влакана веће финоће потребно је више влакана за достизање исте запреминске густине, што доводи до више завојитих путања у материјалу и већем отпору протока ваздуха. Lee [105] и Tascan са својим сарадницима [90] су установили да се коефицијент апсорпције звука и отпор струјања ваздуха повећавају са финоћом влакана док су Bilova и сарадници [106] изучавали утицај структуралног фактора, тачније, однос пора и шупљина на понашање звучних апсорбујућих порозних материјала на вишим фреквенцијама (Слика 47.).



Слика 47. Простирање звучних таласа кроз ваздух и кроз систем пора и шупљина порозног материјала

Један од најважнијих фактора који утичу на звучно-апсорбујуће карактеристике лакнастих материјала је специфична отпорност протоку ваздуха. Константа простирања као и карактеристична импеданца, које описују акустичке особине неког порозног материјала, у великој мери зависе од отпорности протоку ваздуха предметног материјала [107]. Одређивање специфичне отпорности струјању ваздуха код неких материјала је јако лако измерити, као на пример сунђера. Разлог овога је хомогеност узорака. Са друге стране, нехомогени узорци, нарочито крути узорци су јако специфични и мерење специфичне отпорности ваздуха код њих захтева велику прецизност.

Када је реч о дебљини узорака истовремено се мисли и на завојитост која представља меру дужине пролаза звучног таласа кроз поре материјала у зависности од дебљине узорка. Истраживањима у области акустике утврђено је да утицај притиска узорака, при изради, на апсорпцију звука у материјалима није пуно испитан. Неки од научника су показали да апсорпција звука опада са компресијом. Услед ње долази до збијања агрегата или влакана материјала при чему не долази до промене димензије истих. Међутим, компресијом се постиже смањење дебљине узорака који се испитује, као и промена одређених физичких особина, попут завојитости, отпора протока ваздуха и порозности. На овај начин порозност материјала се смањује а отпор протока ваздуха повећава. Кпареп и сарадници [108] су испитивали утицај полимер/цемента, као везива, на отпор протока ваздуха зрнастих порозних материјала који се користе као подни и зидни елементи за апсорпцију звука.

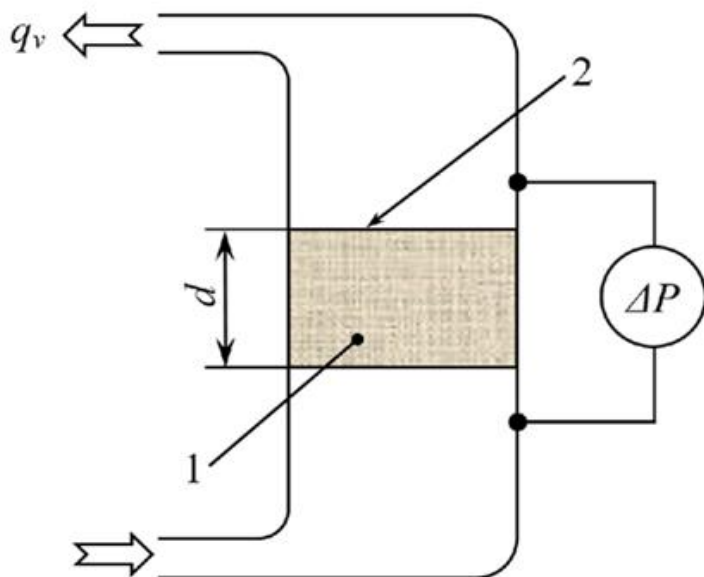
3.5.5 Методе за одређивање отпора протока ваздуха

Један од битних неакустичких параметара порозних материјала, који се користе у системима звучне изолације је отпорност струјању ваздуха. За одређивање овог параметра користе се мерни системи који омогућавају испитивање узорака у циљу развоја порозних апсорпционих материјала као и контролу квалитета материјала у процесу производње. Према стандарду SRPS ISO 9053 [109] постоје две методе за мерење отпорности струјању ваздуха и то:

- 1) Метода са сталним протоком ваздуха
- 2) Метода са променљивим протоком ваздуха

3.5.5.1 Метода са сталним протоком ваздуха

Метода са сталним протоком ваздуха се заснива на проласку једносмерног ваздушног протока кроз узорак. За дату методу узорци који се испитују су у облику кружног цилиндра или правоуглог паралелопипеда док се мерење резултујућег пада притиска врши између две слободне површине узорка (Слика 48.). Стварање ваздушног протока остварује се помоћу вакуум пумпе, ињектора, компримованог ваздуха и воденог резервоара док се мерење пада притиска врши помоћу диференцијалног мерача притиска [110].



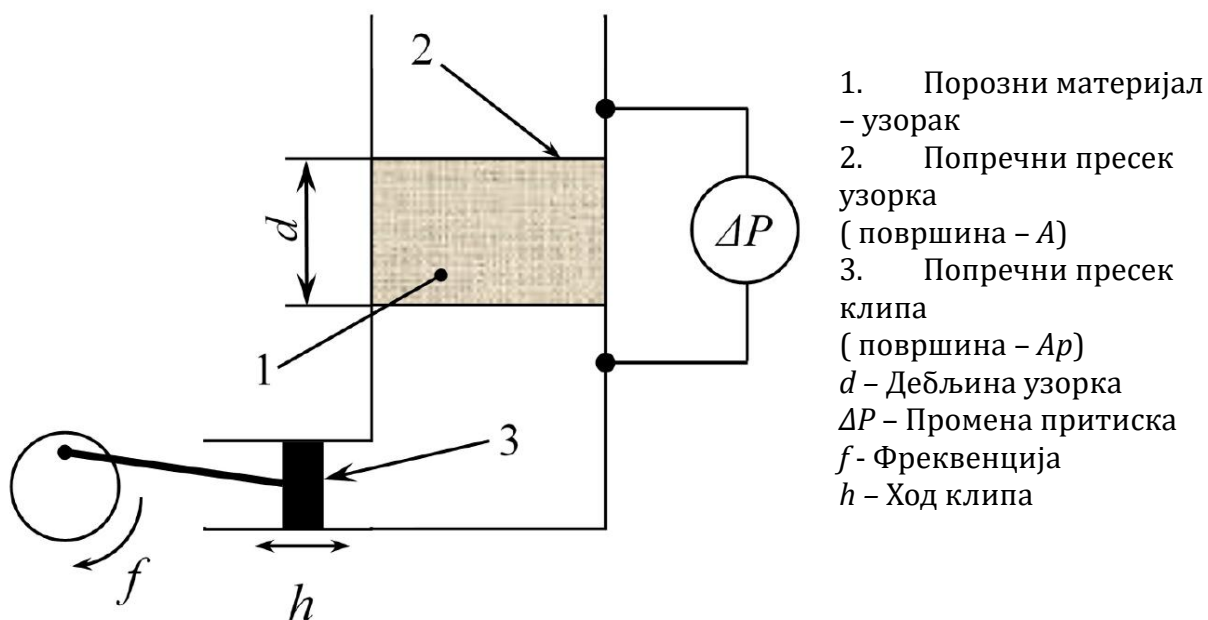
1. Порозни материјал-узорак
 2. Попречни пресек узорка (површина-А)
- q_v – Запремински проток ваздуха
 d – Дебљина узорка
 ΔP – Промена притиска

Слика 48. Метода са сталним протоком ваздуха

Када говоримо о брзинама протока, Bies и Hansen [111] препоручују 5×10^{-4} и $5 \times 10^{-2} \text{ms}^{-1}$, док Ingard [112] даје резултате који показују да брзина протока не би требала бити већа од $0,1 \text{ms}^{-1}$ како би добијени резултати били у складу са амплитудом брзине типичних звучних таласа у апсорберима.

3.5.5.2 Метода са променљивим протоком ваздуха

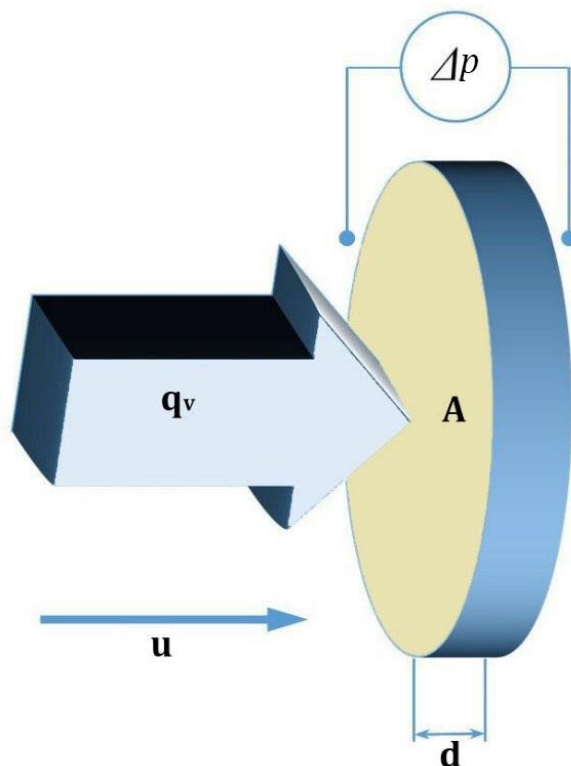
Принцип рада метода са променљивим протоком ваздуха (Слика 49.) се заснива на проласку споро променљивог ваздушног протока кроз узорак који може бити облика правоуглог паралелопипеда или кружног цилиндра, као и код методе са сталним протоком ваздуха. Код ове методе, мерење наизменичних компонената притиска у запреминском простору који узорак затвара врши се бочно монтираним кондензаторским микрофоном, који је повезан са једним мерним појачавачем. Наизменична брзина (запреминског) ваздушног протока производи се помоћу клипа чије је кретање синусоидно, фреквенцијом од око 2 Hz. Пре почетка мерења, опрема за мерење притиска мора да буде калибрисана пистонфоном везаним на држач узорака [110].



Слика 49. Метода са променљивим протоком ваздуха [110]

3.5.5.3 Основне величине и услови испитивања

На слици 50. приказан је процес мерења разлике притисака који се ствара са предње и задње стране узорка док кроз његову површину струји ваздух одређене брзине.



Слика 50. Шематски приказ мерења отпорности струјању ваздуха

Отпорност струјању ваздуха представља однос између разлике притиска и запреминског протока:

$$R = \frac{\Delta p}{q_v} \quad (19)$$

где Δp представља разлику ваздушног притиска испред и иза узорка за испитивање у односу на атмосферу док је q_v (запремински) ваздушни проток кроз узорак за испитивање.

У акустици, импеданса је представљена као специфична отпорност струјању вадуха, R_s , и од великог је значаја при упоређивању материјала који се користе као акустички изолатори. Ова величина не зависи од површине материјала али дебљина узорака као и величина пора мења њену вредност.

Специфична отпорност струјању ваздуха се израчунава према изразу:

$$R_s = R \cdot A \quad (20)$$

где R представља отпорност струјању ваздуха узорка и A површину попречног пресека узорка управну на правац протока.

Да дебљина материјала има утицаја на отпор струјања ваздуха може се видети у изразу за одређивање подужне (специфичне) отпорности струјању ваздуха:

$$r = \frac{R_s}{d} \quad (21)$$

где је d дебљина узорка за испитивање у правцу протока.

У случају примене методе са сталним протоком ваздуха, пад притиска Δp се може директно измерити при брзини од $0,5 \text{ m/s}$ или постепено снижавањем до најниже могуће границе брзине ваздуха. При постепеном смањењу брзине ваздуха, за сваки узорак даје се графички приказ специфичне отпорности струјању у функцији брзине ваздуха. Из дијаграма се одређује специфична отпорност струјању ваздуха при брзини струјања од $0,5 \cdot 10^{-3} \text{ m/s}$, графичким усредњавањем, или ако је то потребно, екстраполацијом [113].

У раду Бојковић са сарадницима [43] приказана је методологија пројектовања и реализације мерног система за мерење отпорности струјању ваздуха. Мерења везана за ову докторску дисертацију вршена су применом методе са сталним протоком ваздуха, у складу са стандардом SRPS ISO 9053 [109].

Dragonetti и остали тврде да је подужна отпорност струјању ваздуха основни опредељујући параметар за звучну апсорпцију порозних материјала [114]. Ови истраживачи су развили методу за мерење отпорности струјању ваздуха, заснованој на наизменичном протоку ваздуха, која се може реализовати помоћу инструмената и алата који су доступни у већини акустичких лабораторија и не захтева калибрацију уређаја. Ueno T. [115] је развио нови однос између густине и подужне отпорности струјању ваздуха користећи еквивалентни пречник влакна. Овај приступ су примењивали за испитивање меламинаске пене.

Yang и Chen [116] су испитивали филц од стакленог влакна и одређивали његову подужну отпорност струјању ваздуха. Установили су да подужна отпорност струјању ваздуха зависи од размака између влакана као и удела везивног средства, што је у овом случају била смола. Испитивањима је утврђено да подужна отпорност струјању ваздуха зависи и од смера протока кроз материјал, обзиром да су влакнасти материјали анизотропни. Инверзном методом одређивања подужне отпорности струјању ваздуха бавили су се Fernández и остали. Они су на основу мерења коефицијента звучне апсорпције у импедансној цеви дошли до вредности подужне отпорности струјања ваздуха као и пречника влакана. Mirowska и Czyzewski [117] представљају теоријску и емпиријску везу између коефицијента апсорпције звука и специфичне отпорности струјању ваздуха. Вредности коефицијента апсорпције који је прорачунат на овакав начин могу се упоредити са вредностима мерења у импедансној цеви или реверберационој комори. Ови истраживачи су одредили и

оптималну вредност подужне отпорности струјању ваздуха, након чега коефицијент звучне апсорпције не расте.

3.5.6 Модели за одређивање акустичких особина порозних материјала

Један од најчешћих проблема у заштити од буке је како конструисати звучни апсорбер а да се тиме испоштују сви пропратни захтеви као што су одговарајући коефицијент апсорпције звука, минимализација величине и цене апсорбера, заштита животне средине, издржљивост на неповољне климатске промене, попут високих температура. Поред свих наведених параметара који одређују акустичка својства одређеног материјала, потребно је дефинисати и специфичну акустичку импедансу Z_c (Pas/m) и таласни број k_c .

Карактеристична импеданца и таласни број се дефинишу изразима:

$$Z_c = R + jX \quad (22)$$

$$k_c = \alpha + j\beta \quad (23)$$

где је

R - реална компонента,

X - имагинарна компонента,

α - константа пригушења (dB/m),

β - фазна константа, при чему је $\beta = \frac{\omega}{c} \left(\frac{rad}{m} \right)$, ω -кружна фреквенција, c -брзина звука.

Користећи лабораторијски измерене вредности физичких особина материјала попут порозности, завојитости, отпорности протоку ваздуха, развијени су теоријски акустички модели чији је циљ описивање карактеристичне таласне импедансе и таласног броја [118].

Теоријски или такозвани феноменолошки приступ заснива се на апроксимацији флуида који испуњава порозни чврсти материјал са еквивалентним дисипативним флуидом. Morse и Ingard-a [119] су усвојили овај приступ док је Hamet [120] предложио проширени феноменолошки модел, узимајући у обзир вискозно и топлотно расипање. Међутим најзначајнији допринос у развоју ове теорије дао је Biot [121] развијајући општу теорију простирања таласа у флуидом засићеној порозној структури са еластичним оквиром. На резултатима Biotove теорије Lambert [122] је развио аналитички модел за високопорозне полиуретанске пене. Једна од мана оваквих феноменолошких модела је да се неки параметри, попут структуре материјала, не могу израчунати помоћу модела, већ се одређују мерењем неких акустичких

карактеристика. Сви ови модели захтевају пет независних параметара укључујући и статички и динамички фактор облика. Број параметара се може смањити на 4 користећи „фактор односа облика пора“ који је фреквенцијски зависна величина. Champroux и Stinson [123] су предложили модел са још пет параметара, укључујући два различита фактора облика за вискозне и термичке ефекте, док је Wilson [124] развио општи модел користећи три параметра вискозних и термичких својстава.

Као генерални закључак микроструктуралних модела може се рећи да исти обезбеђују физички увид механизма дисипације звучне енергије. Међутим, ови модели су јако сложени и садрже параметре који подразумевају познавање и микроструктуре материјала.

Акустичке особине порозних материјала се поред теоријских модела могу проучавати и помоћу емпиријских модела. Прегледањем литературе, може се истаћи да је назаступљенији емпиријски модел **Delany-Bazley** који се темељи на једноставним законитостима за одређивање акустичке импедансе и коефицијента простирања. Улазни параметар ове методе је подужна отпорност струјању ваздуха што је чини једноставнијом од других врста метода. Ови истраживачи су 1970. године представили модел за одређивање карактеристичне импедансе, Z_0 , и коефицијента простирања γ , у зависности од подужне отпорности струјању ваздуха порозног материјала, што се прорачунава према изразима 24. и 25. [125]:

$$Z_0 = R + jX \quad (24)$$

$$\gamma = \alpha + j\beta \quad (25)$$

где је

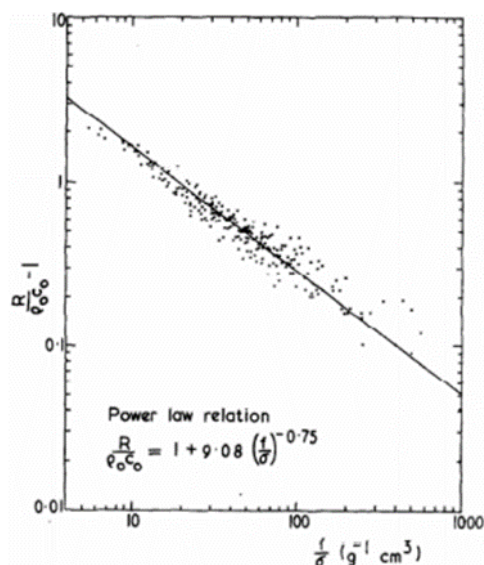
R- реална компонента,

X - имагинарни компонента,

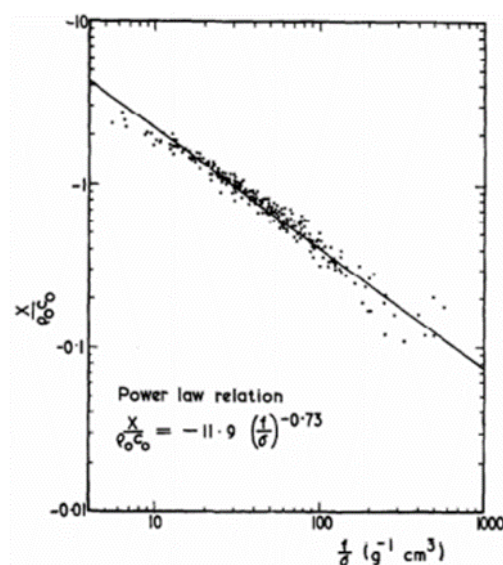
α - константа пригушења (dB/m),

β - фазна константа, при чему је $\beta = \frac{\omega}{c} \left(\frac{rad}{m} \right)$, ω -кружна фреквенција, c-брзина звука.

Delany и Bazley [125] су поставили законитости промене импедансе и коефицијента простирања у функцији односа фреквенције и подужне отпорности струјању ваздуха на основу великог броја мерења коефицијента апсорпције, које је извршено у Kunt-овој цеви (Слика 51 а и б). Овај темељ је постављен за материјала различите отпорности струјању ваздуха и специфичном фреквенцијском опсегу.



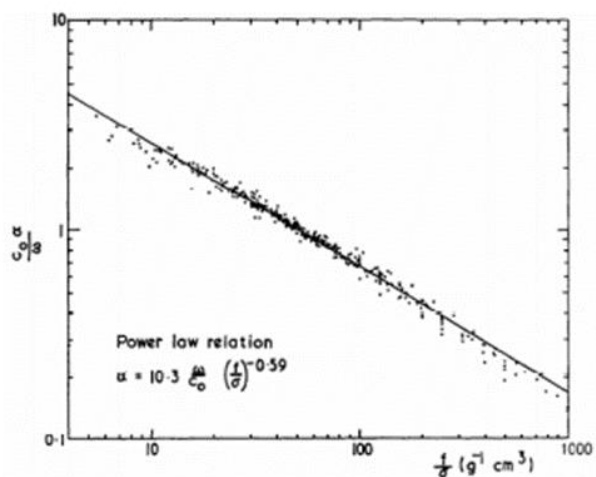
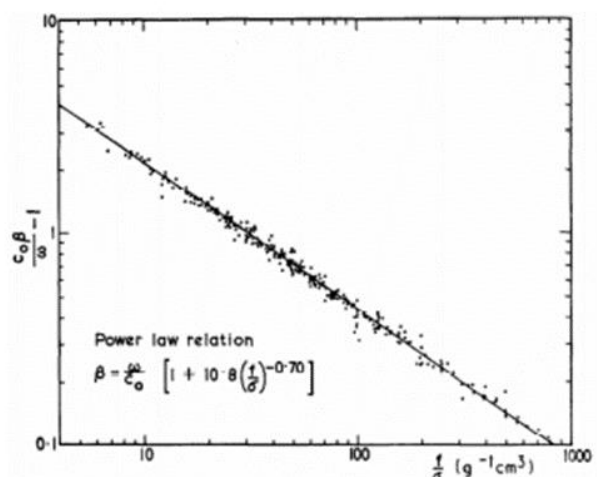
а) Реална компонента



б) Имагинарна компонента

Слика 51. Нормализована реална и имагинарна компонента карактеристичне импедансе у функцији од односа фреквенције и подужне отпорности струјању ваздуха

На слици 51. а и б дат је графички приказ експерименталних тачака и апроксимативне праве линеарне регресије, где су R и X означени реални и имагинарни део карактеристичне импедансе Z_0 респективно, док су на слици 52. а и б са α и β означени реални и имагинарни део коефицијента простирања.

а) Реална компонента α б) Имагинарна компонента β

Слика 52. Нормализована реална и имагинарна компонента карактеристичне импедансе у функцији од односа фреквенције и подужне отпорности струјању ваздуха

Законитости које су дефинисали Delany и Bazley се могу написати као функција бездимензионалног члана. Он се добија када се однос фреквенције и подужне отпорности струјању ваздуха помножи са густином флуида, $\rho_0 f / \sigma$, који Delany и Bazley називају нормализовани бездимензиони параметар. Узимајући у обзир међународни систем јединица наведене законитости се могу написати у следећем облику:

$$Z_c = \rho_0 c \left[1 + 0.0571 \left(\frac{\rho_0 f}{\sigma} \right)^{-0.574} - j 0.087 \left(\frac{\rho_0 f}{\sigma} \right)^{-0.732} \right] \quad (26)$$

$$k_c = \frac{\omega}{c} \left[1 + 0.0978 \left(\frac{\rho_0 f}{\sigma} \right)^{-0.7} - j 0.189 \left(\frac{\rho_0 f}{\sigma} \right)^{-0.595} \right] \quad (27)$$

Где је : $10 \leq f/\sigma \leq 1000$

Важно је напоменути да је овај модел примењиван на влакнасте материјале и да се опсег важења модела може изразити преко бездимензионалног параметра у следећем облику:

$$0.01 \leq \rho_0 f / \sigma \leq 1 \quad (28)$$

Dunn и Davern [126] су коришћењем исте једначине, коју су развили предходни истраживачи, дефинисали методу за израчунавање укупне акустичке импедансе вишеслојних апсорбера. Постигнута је подударност између израчунатих и измерених вредности, која су вршена у импедансној цеви. Ова метода се најчешће примењује како би се размотрили аспекти пројектовања равних зидова композитних облога. Предност овог поступка огледа се у брзом начину одређивања акустичких особина материјала, на супрот дуготрајним мерењима, комбинацијом материјала. Резултати добијени овом методом могу се проверити мерењем акустичких особина, коефицијента апсорпције, у импедансној цеви.

3.5.6.1 Импеданса једног хомогеног слоја

Zwikker и Kosten [127] су показали да се при нормалној инциденцији акустичка импеданса Z_i на предњој страни слоја хомогеног материјала дебљине L , може одредити према изразу:

$$Z_i = W \frac{Z_0 \cos h\gamma L + W \sin h\gamma L}{Z_0 \sin h\gamma L + W \cos h\gamma L} \quad (29)$$

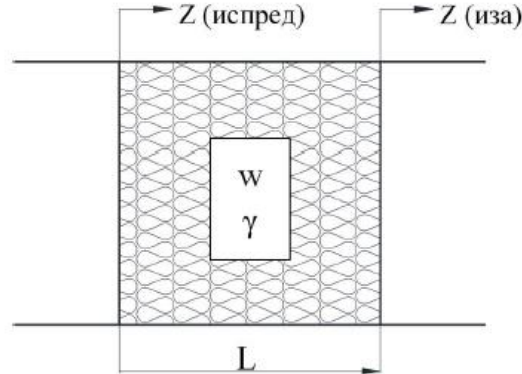
где је Z_0 -импеданса ослонца слоја материјала, W -таласна импеданса (карактеристична импеданса) слоја и γ -коефицијент простирања материјала. Карактеристична

импеданса и коефицијент простирања су фреквенцијски зависне величине и представљене су као (Слика 53.):

$$W = A + jB \quad (30)$$

$$\gamma = \alpha + j\beta \quad (31)$$

Док су A , B , α и β су реалне функције које зависе од фреквенције.



Слика 53. Ознаке коришћене за израчунавање импедансе једнослојног материјала [126]

Апсолутна вредност функције коју чине A и B функције може се изразити као:

$$|W| = \frac{1+R}{1-R} \quad (32)$$

где R представља коефицијент рефлексије за нормалну инциденцију.

Функција β је однос угаоне брзине и акустичке брзине таласа при фреквенцији f , што се може приказати као:

$$\beta = \frac{2\pi f}{v} \quad (33)$$

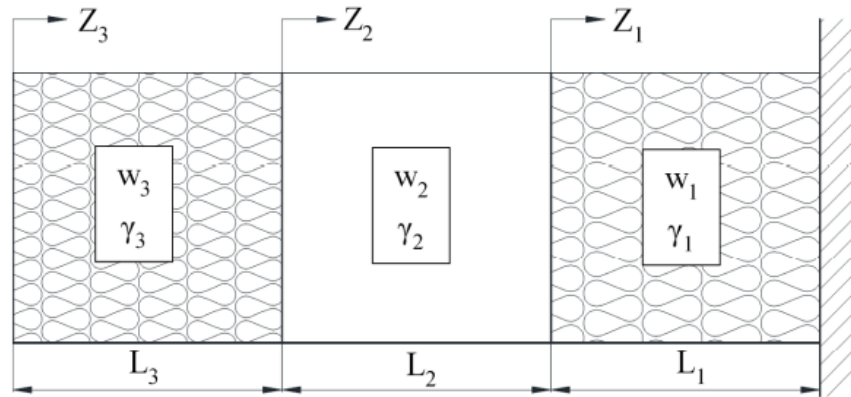
3.5.6.2 Импеданса вишеструког слоја

Када је реч о композитном слојевитом материјалу, импеданса на предњем делу се израчунава исто као и за једнослојни материјал. Међутим, код вишеслојног композитног материјала према Dunn-у и Davern-у она се рачуна на следећи начин [126]:

$$Z_i = W_i \frac{Z_{i-1} \cos h\gamma_i L_i + W_i \sin h\gamma_i L_i}{Z_{i-1} \sin h\gamma_i L_i + W_i \cos h\gamma_i L_i} \quad (34)$$

Ознака i се односи на i -ти слој, започињући од слоја најближег чврстој подлози.

У случају да неки од слојева представља ваздушни међупростор (Слика 54.) начин израчунавања импедансе је доста једноставнији.



Слика 54. Вишеслојни систем са ваздушним међупростором [126]

3.5.6.3 Одређивање таласне импедансе и константе простирања

За одређивање коефицијента простирања (γ) и акустичке импедансе (W), за сваку фреквенцију, неопходно је урадити по два независна мерења као и одређивање вредности реалних параметара A , B , α и β . Како би се утврдиле промене параметара на различитим фреквенцијама овај поступак мора бити поновљен више пута за сваки узорак.

Dunn и Davern [126] су анализирали узорке дужине L и $2L$, како би се смањио број мерења на различитим фреквенцијама и предвидели су следеће једначине које се решавају по W и γ :

$$Z_L = W \cot h \gamma L \quad (35)$$

$$Z_{2L} = W \cot h 2\gamma L \quad (36)$$

одакле следи:

$$W = \sqrt{(Z_L(2Z_{2L} - Z_L))} \quad (37)$$

$$\gamma = (1/2L) \ln[(Z_L - W)/(Z_L + W)] \quad (38)$$

Wu Qunli [128] је за стварање овог модела користио 15 врста пластичних пена са отвореним ћелијама, а самим тим и шири опсег вредности подужне оторности струјању ваздуха. Узорци који су се испитивали су били дебљине од 13 до 51 mm. Број узорака који се испитивао је износио 90 при чему су измерене вредности подужне отпорности струјању ваздуха у распону од 2900 до 24300 Pa·s/m², при фреквенцији од 200-2000 Hz.

Испитивачи су користили импедансну цев за одређивање акустичке импедансе, при чему су узорак постављали на два начина. Први начин је подразумевао остављање узорака на круту подлогу док је у другој варијанти иза узорка и круте подлоге направљен ваздушни простор чија је дебљина одговарала једној четвртини таласне дужине.

Према овом моделу, вредности карактеристичне импедансе Z_0 и коефицијента простирања Γ , могу се одредити на следећи начин:

$$Z_0 = \sqrt{Z_1 Z_2} \quad (39)$$

$$\Gamma = (1/l) \tan h^{-1} (\sqrt{Z_2/Z_1}) \quad (40)$$

Где Z_1 и Z_2 представљају импедансе за случај када је узорак постављен на чврст ослонац и једну четвртину таласне дужине у односу на ослонац, респективно, док l представља дебљину узорка.

Нормализоване вредности реалног и имагинарног дела импедансе, коефицијента слабљења и фазног коефицијента, приказани су у зависности од бездимензионог члана, $f\rho_0/r$, где је f - фреквенција, ρ_0 - густина ваздуха, r - подужна отпорност струјању ваздуха.

$$\frac{R}{\rho_0 c_0} = 1 + 0.212 \left(\frac{\rho_0 f}{r} \right)^{-0.455} \quad (41)$$

$$\frac{X}{\rho_0 c_0} = -0.105 \left(\frac{\rho_0 f}{r} \right)^{-0.607} \quad (42)$$

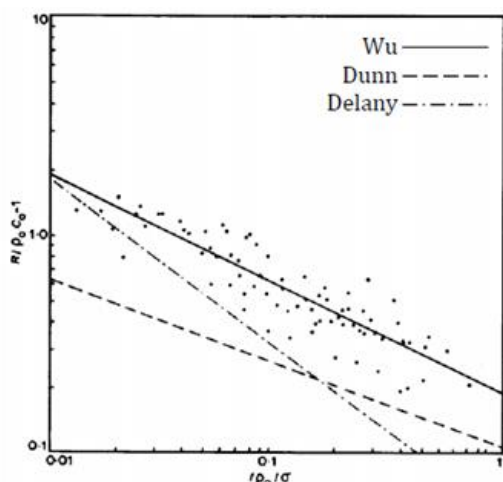
$$\frac{\alpha}{k} = 0.163 \left(\frac{\rho_0 f}{r} \right)^{-0.592} \quad (43)$$

$$\frac{\beta}{k} = 1 + 0.188 \left(\frac{\rho_0 f}{r} \right)^{-0.544} \quad (44)$$

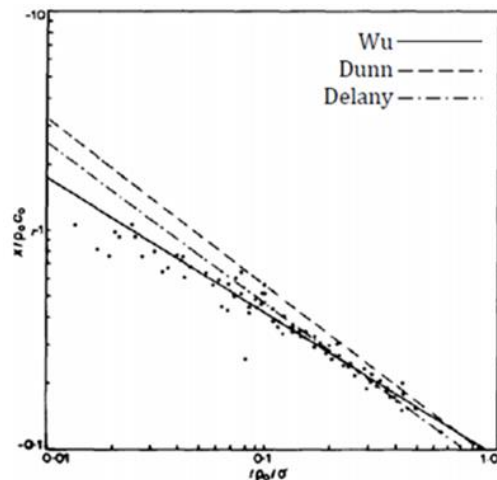
Карактеристична импеданса је изражена као $Z_0 = R + jX$, где су R и X њени реални и имагинарни делови. Коефицијент простирања је одређен изразом: $\Gamma = \alpha + j\beta$, где су α и β коефицијент слабљења и фазни коефицијент респективно.

На основу предходно наведених једначина може се уочити да је за израчунавање акустичких својстава потребан само један улазни параметар и то подужна отпорност струјању ваздуха.

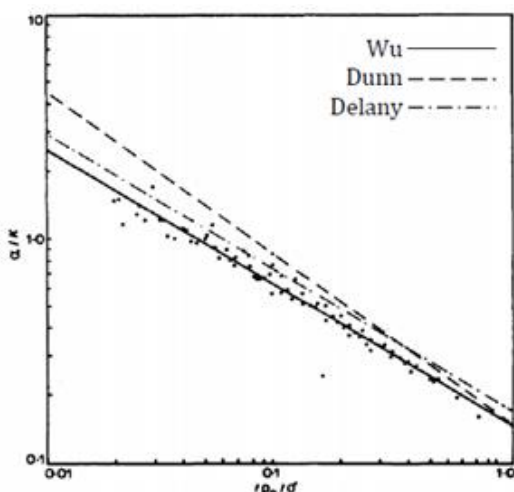
На сликама 55. и 56. представљене су нормализована реална и имагинарна компонента добијена кроз три модела и то Wu, Dunn и Delany [125,126,128], док су на сликама 57. и 58. представљене нормализоване константе слабљења као и фазна константа кроз иста три модела.



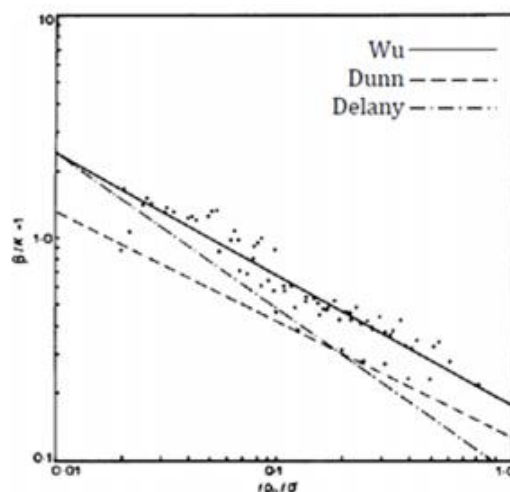
Слика 55. Нормализована реална компонента импедансе у функцији од бездимензионе променљиве $E=fr_0/\sigma$



Слика 56. Нормализована имагинарна компонента импедансе у функцији од бездимензионе променљиве $E=fr_0/\sigma$



Слика 57. Нормализована константа слабљења у функцији од бездимензионе променљиве $E=fr_0/\sigma$



Слика 58. Нормализована фазна константа у функцији од бездимензионе променљиве $E=fr_0/\sigma$

Garai и Pompoli [107] су развили нов модел за одређивање акустичких особина полиестер влакана. Мерења су вршена на полиестерским материјалима различите густине, дебљине и пречника влакна у распону од 18 до 48 μm . Нови модел може да предвиди акустичке особине полиестер влакнастих материјала, било које комбинације, различитих густина и дебљина влакана. Свој модел су развили на темељима модела Delany-Bazley [125].

$$Z_R = \rho_0 c_0 \left[1 + C_1 \left(\frac{\rho_0 f}{r} \right)^{-C_2} \right] \quad (45)$$

$$Z_I = -\rho_0 c_0 \left[C_3 \left(\frac{\rho_0 f}{r} \right)^{-C_4} \right] \quad (46)$$

$$\alpha = \left(\frac{2\pi f}{c_0} \right) \left[C_5 \left(\frac{\rho_0 f}{r} \right)^{-C_6} \right] \quad (47)$$

$$\beta = \left(\frac{2\pi f}{c_0} \right) \left[1 + C_7 \left(\frac{\rho_0 f}{r} \right)^{-C_8} \right] \quad (48)$$

Где су: Z_R и Z_I реални и имагинарни делови карактеристичне акустичке импедансе Z_c , а α и β су реални и имагинарни делови коефицијента простирања, ρ_0 – густина ваздуха, c_0 – брзина звука у ваздуху и f је фреквенција

$$Z_l = (Z_R + iZ_I)\rho_0 c [\cot h(\alpha + i\beta)l] = Z_{IR} + iZ_{II} \quad (49)$$

$$\alpha_n = \frac{4Z_{IR}\rho_0 c_0}{|Z_l|^2 + 2\rho_0 c_0 Z_{IR} + (\rho_0 c_0)^2} \quad (50)$$

Коефицијенти C_1 - C_8 у предходно наведеним једначинама (44-47) су варирани и њихове оптималне вредности су одређене методом најмањих квадрата. Међутим, усвајањем вредности за исте коефицијенте могу се израчунати реални и имагинарни делови како акустичке импедансе тако и коефицијента простирања:

$$Z_R = \rho_0 c_0 \left[1 + 0.078 \left(\frac{\rho_0 f}{r} \right)^{-0.623} \right] \quad (51)$$

$$Z_I = -\rho_0 c_0 \left[0.074 \left(\frac{\rho_0 f}{r} \right)^{-0.660} \right] \quad (52)$$

$$\alpha = \left(\frac{2\pi f}{c_0} \right) \left[0.159 \left(\frac{\rho_0 f}{r} \right)^{-0.571} \right] \quad (53)$$

$$\beta = \left(\frac{2\pi f}{c_0} \right) \left[1 + 0.121 \left(\frac{\rho_0 f}{r} \right)^{-0.530} \right] \quad (54)$$

Одређивањем емпиријских модела полиуретанских пена, користећи неуронске мреже бавили су се Gardner и остали [129]. Они су користили подужну отпорност струјању ваздуха као улазни параметар. Овом врстом модела бавили су се и други научници попут Voronina [130], Oliva и Hongisto [131], Doutres [132,133].

Досадашњом анализом литературе, може се рећи да се емпиријски модели, који се користе за утврђивање акустичких својстава порозних материјала, одликују својом једноставношћу јер имају само један улазни параметар, подужну отпорност струјања ваздуха, која се може лако измерити

IV ТЕОРИЈЕ ОДЛУЧИВАЊА

вишекритеријумска анализа

4.1 ОСНОВНИ ПОЈМОВИ ОДЛУЧИВАЊА

Како се живот развијао и постајао све комплекснији, а људска свест о догађајима све развијенија, наметнула се потреба за проширењем знања у циљу доношења исправних одлука у свим подручјима људских активности. Расуђивање о значају и последицама различитих одлука посебно добија на значају после Првог светског рата, након чега се формира нова научна дисциплина у области математике– операциона истраживања. Посебну област у оквиру операционих истраживања представља **Теорија одлучивања**, која проучава примену аналитичких метода за помоћ при одлучивању. Тек након Другог светског рата започиње научно изучавање одлучивања, односно, нагли развој теорије одлучивања као засебне научне дисциплине. У литератури се може наћи већи број дефиниција одлучивања. Тако на пример, Ћирић и Tumtala тврде да је одлука резултат избора једне, из скупа могућих алтернатива, односно акција, које доносиоцу одлуке стоје на располагању. Schermerhorn наводи да је одлука избор међу алтернативним могућностима за решавање проблема, док Harrison подразумева да је одлука акција у једном текућем процесу евалуације алтернатива који се спроводи ради постизања одређеног циља. На основу предходних дефиниција може се донети закључак да је одлука заправо резултат процеса одлучивања у коме се оцењују могуће алтернативе ради постизања жељеног циља [134].

Када су проблеми једноставне природе одлука се доноси на основу што једноставније анализе у што краћем року. Међутим, код сложенијих проблема процес одлучивања представља низ међусобно повезаних и условних радњи које се сукцесивно одвијају ради доношења коначне одлуке.

4.2 ВИШЕКРИТЕРИЈУМСКА АНАЛИЗА

Последњих година долази до све већег развоја и популарности метода вишекритеријумске анализе (ВКА) у циљу решавања сложенијих проблема. Стога, ВКА је постала једна од најпознатијих и најпопуларнијих области у терорији одлучивања. Предходно наведена анализа се може дефинисати као структурални оквир за анализу и решавање проблема одлучивања који се карактеришу вешеструким циљевима [135].

4.2.1 Методе вишекритеријумске анализе за избор изолационог материјала

Развој грађевинске делатности уско је повезан са прописима правилника који неки објекат треба да испуни, као и са очекиваним комфором објеката, ради удобнијег живота. Избор најбољег материјала или композита, као и дебљине истог у циљу

изолације објеката није ни мало једноставан процес. Ово захтева познавање бројних својстава материјала као и могућности мешавине истих у циљу добијања најбољег резултата. Насупрот традиционалном приступу где се материјал бира методом пробе или на основу предходних искустава, у савременом инжењерству за правилан и оптималан избор материјала се све више усваја метода ВКА, која се заснива на математичким моделима. ВКА методе су се показале као веома корисне за рангирање алтернатива, нарочито у случајевима када треба истовремено размотрити више комплексних критеријума [136].

4.2.1.1 Процес решавања проблема вишекритеријумске анализе

У процесу решавања вишекритеријумске анализе постоји више фаза и то [134]

- 1) дефинисање циљева;
- 2) избор критеријума по којима се мери достизање циљева;
- 3) трансформација перформанси алтернатива према различитим критеријумима, са истом метриком;
- 4) додељивање тежинских коефицијената критеријума како би се одредила релативна значајност;
- 5) избор одговарајуће методе ВКА за рангирање алтернатива;
- 6) одређивање најбоље алтернативе.

На почеку решавања проблема ВКА предходи препознавање самог проблема што подразумева прикупљање и класификацију, а затими и обраду података. Након идентификације проблема, без обзира која ће се од метода ВКА применити, процес решавања проблема се изводи у неколико етапа и може се представити на следећи начин (Слика 59.) [134].

Најважнији корак у примени ВКА је дефинисање проблема јер у зависности од тога следи и могућност његовог решења, а затим и крајњи исход. Дефинисање проблема није ни мало једноставан задатак, који укључује следеће активности:

- 1) Дефинисање критеријума,
- 2) Одређивање алтернатива,
- 3) На основу дефинисаних критеријума и алтернатива формира се матрица одлучивања.

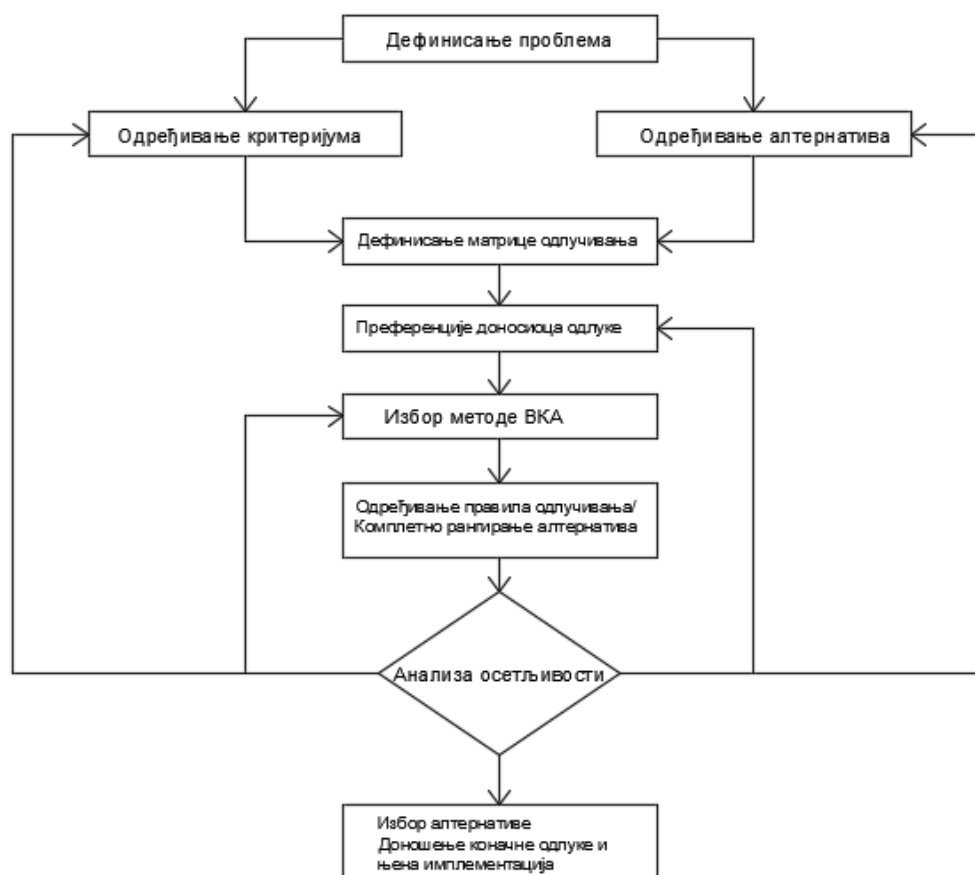
У **другом** кораку се дефинишу преференције у погледу значајности критеријума и изражене су преко тежинских коефицијената који се крећу у интервалу од 0 до 1. Мања вредност коефицијента значи мању релевантну значајност критеријума и обрнуто.

Трећи корак подразумева избор методе која зависи од проблема одлучивања као и циљева који су постављени. Математичким апаратом, који је карактеристичан за сваку методу појединачно, одређује се правило одлучивања, користећи податке

иницијалне матрице одлучивања као и преференције доносиоца одлуке, изражене кроз тежинске коефицијенте критеријума.

У **четвртом** кораку се врши рангирање алтернатива поступком анализе осетљивости. У овој фази може се утврдити да ли се са променом вредности тежинских коефицијената критеријума мења и рангирање алтернатива.

Последњи корак подразумева избор оптималне алтернативе. Након избора, решење се реализује, док се његови ефекти прате и анализирају.



Слика 59. Кораци у процеси решавања проблема избора материјала применом ВКА

4.2.1.2 Преглед постојећих метода вишекритеријумске анализе

Методе вишекритеријумске анализе су развијене као математички алати и засноване су на научним принципима који омогућавају одређивање оптималног решења. Научници који се баве овом тематиком су предложили велики број метода ВКА, почев од интуитивних па све до аналитичких, износећи различите начине избора најбоље алтернативе. Овај одабир је јако тежак јер не постоји универзалан скуп правила и

процедура које треба пратити како би се изабрала најбоља метода. Са друге стране, свака од метода мора да [134]:

- обезбеђује комплетно рангирање алтернатива,
- омогућава рад са приходним, расходним и циљаним атрибутима,
- омогућава рад са квантитативним и квалитативним подацима,
- буде релативно једноставна за разумевање и примену, следећи једноставну процедуру корак-по-корак,
- не захтева експертско знање из области операционих истраживања и математике,
- не захтева коришћење специјализованих софтверских пакета.

Polatidis и сарадници су установили да поред предходно наведених чињеница, свака метода ВКА мора да [137]:

1. Омогућава учешће већег броја доносилаца одлука,
2. Омогућава узимање у обзир непрецизних и неизвесних информација и података,
3. Има мале захтеве у погледу потребног времена имплементације ресурса,
4. Обезбеђује директну интерпретацију параметара.

Са порастом броја метода расте и број научних радова, тако на пример, Zavadskas и остали су 2012. године предложили методу WASPAS [138].

У табели 5. је дат преглед развијених метода вишекритеријумске анализе.

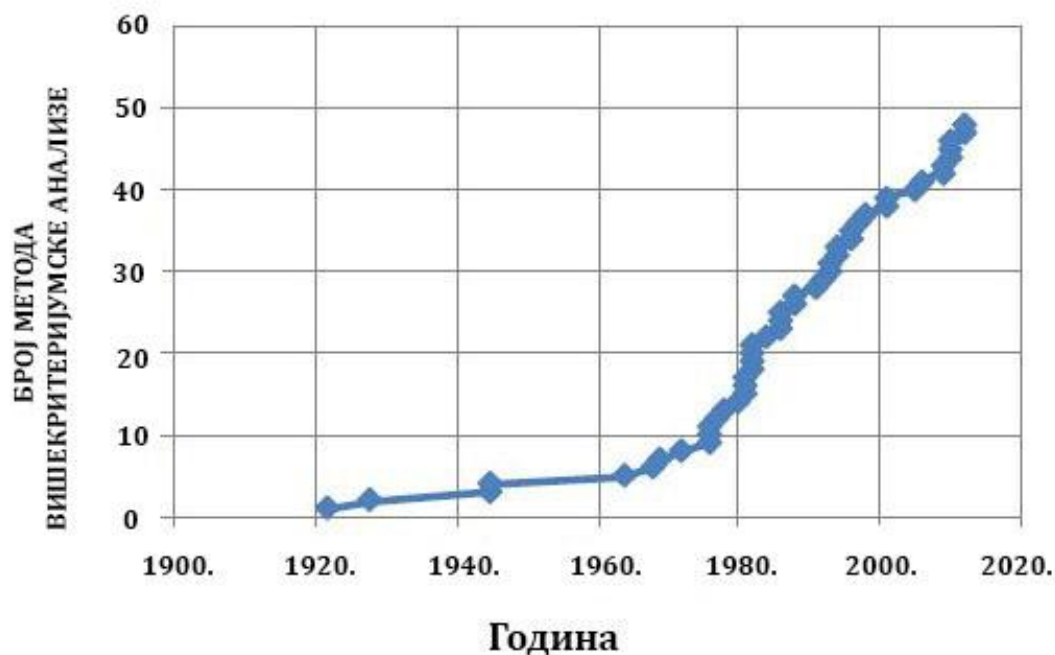
Табела 5. Преглед развијених метода вишекритеријумске анализе [134]

Акроним	Назив
AHP	Analytic Hierarchy Process
AIM	Aspiration-level Interactive Method
AIRM	Aggregated Indices Randomization Method
ANP	Analytic Network Process
ARAS	Additive Ratio Assessment
ARGUS	Achieving Respect for Grades by Using ordinal Scales only
AVE	Adapted Value Engineering
COPRAS	Complex Proportional Assessment
DEA	Data envelopment analysis
DEMATEL	DEcision-MAking Trial and Evaluation Laboratory
DM	Dominance method
DRSA	Dominance-based Rough Set Approach
ELECTRE	ELimination Et Choix Traduisant la REalité (ELimination and Choice Expressing REality)

EVAMIX	Evaluation of Mixed Criteria
GRA	Grey Relational Analysis
IDRA	Intercriteria Decision Rule Approach
LAM	Linear Assignment Method
LM	Lexicographic method
MACBETH	Measuring Attractiveness by a Categorical Based Evaluation Technique
MAGIQ	Multi-attribute global inference of quality
MAPPAC	Multicriterion Analysis of Preferences by Means of Pairwise Actions and Criterion Comparisons
MAUT	Multi-attribute utility theory
MAVT	Multi-attribute value theory
Maximin	Maximin
MELCHIOR	Methode d'ELimination et de Choix Incluant les relation d'Ordre
Minimax	Minimax
MOORA	Multi-Objective Optimization by Ratio Analysis
MOOSRA	Multi-Objective Optimisation on the basis of Simple Ratio Analysis
OCRA	Operational competitiveness rating analysis
ORESTE	Organization Rangement Et Synthese de dones relaTionnElles
PACMAN	Passive and active compensability multicriteria analysis
PAPRIKA	Potentially All Pairwise RanKings of all possible Alternatives
PRAGMA	Preference Ranking Global Frequencies in Multicriterion Analysis
PROMETHEE	Preference Ranking Organisation Method for Enrichment Evaluations
PSI	Preference selection index
-	Pugh method
QUALIFLEX	QUALItative FLEXible multiple criteria method
REMBRANDT	Ratio Estimation in Magnitudes or deci-Bells o Rate Alternatives which are Non-dominaTed
ROV	Range of Value

RPA	Reference Point Approach
SAW	Simple Additive Weighting (Weighted Sum Method)
SIR	Superiority and Inferiority Ranking
SWARA	Step-Wise Weight Assessment Ratio Analysis
TACTIC	Tratement des Actions Compte Tenu de l'Importance des Crite'res
TOPSIS	Technique for Order of Preference by Similarity to Ideal Solution
UTA	Utility Theory Additive
VIKOR	VIšekriterijumsko KOmpromisno Rangiranje
VIMDA	Visual Interactive Method for Dicrete Alternatives)
WASPAS	Weighted Aggregated Sum Product Assessment
WPM	Weighted Product Method
WUTA	Weighted Utility Additive method

Без обзира што ВКА, као научна дисциплина, има релативно кратку историју, од око 50 година, до данас је развијено преко 70 различитих метода, што је резултат великог броја истраживача. На слици 60. је дат графички приказ раста броја метода ВКА кроз године. Може се закључити да нагли пораст настаје 1980. године.



Слика 60. Хронолошки преглед метода виšekритеријумске анализе [134]

4.2.2 СИВА РЕЛАЦИОНА АНАЛИЗА (ГРА)

ГРА метод представља широко примењену технику вишекритеријумског одлучивања и део је теорије сивих система коју је развио Julong [139]. Главна предност наведене методе је релативна једноставност и флексибилност за анализу читавог низа скупова података, попут избора одређеног материјала [140]. Процес ГРА методе укључује неколико корака [43]:

1. Припрема и нормализација података: Овај корак укључује прикупљање и организовање података у матрични формат и свођење вредности критеријума на опсег [0–1]. Нормализација се врши за сваки појединачни критеријум у зависности од тога да ли га треба максимизирати или минимизирати. Нормализација подужног специфичног отпора струјању ваздуха се спроводи према критеријуму „више је боље“, т.ј. применом једначине:

$$x_i^*(k) = \frac{x_i^0(k) - \min(x_i^0(k))}{\max(x_i^0(k)) - \min(x_i^0(k))} \quad (55)$$

За топлотни ток, нормализација се спроводи применом критеријума „мање је боље“, применом једначине:

$$x_i^*(k) = \frac{\max(x_i^0(k)) - x_i^0(k)}{\max(x_i^0(k)) - \min(x_i^0(k))} \quad (56)$$

где су i – редни број алтернативе ($i=1,2,\dots,15$), k – редни број критеријума ($k=1,2$), $\min(x_i^0(k))$ и $\max(x_i^0(k))$ – минималне и максималне вредности за k – ту алтернативу.

2. Други корак у сивој релационој анализи укључује израчунавање сивог релационог коефицијента (ГРЦ) према једначини:

$$\xi_i(k) = \frac{\Delta_{\min} + \zeta \Delta_{\max}}{\Delta_{0i}(k) + \zeta \Delta_{\max}} \quad (57)$$

где су:

$\Delta_{0i}(k) = \|x_0(k) - x_i^*(k)\|$ а $x_0(k)$ = 1-референтна нормализована вредност,

$\Delta_{\min} = \min(\Delta_{0i}(k), i = 1,2, \dots, 15; k = 1,2), \Delta_{\max} = \max(\Delta_{0i}(k), i = 1,2, \dots, 15; k = 1,2), \zeta$

коефицијент разлике чија се вредност креће у границама [0,1]. Уобичајено се за вредност коефицијента разлике усваја $\zeta=0.5$; што је био случај и у току ове анализе.

3. Трећи корак у сивој релационој анализи подразумева израчунавање сиве релационе оцене на основу једначине:

$$\gamma_i = \sum_{k=1}^n \omega_k \xi_i(k) \quad (58)$$

где је n – укупни број критеријума, а ω_k – тежински коефицијент критеријума k при чему $\sum_{k=1}^n \omega_k = 1$

4. Четврти и последњи корак подразумева рангирање и избор најбоље алтернативе при чему се као боље рангиране узимају алтернативе са већом вредношћу сиве релационе оцене, γ_i .

V ЕКСПЕРИМЕНТАЛНО ИСТРАЖИВАЊЕ

5.1 УВОД

Анализом доступне литературе из области биокомпозитних материјала уочено је да пољопривредни отпад налази све већу примену и да неки од њих већ има утврђену употребу, као што је конопља, док се други и даље испитују у циљу њиховог максималног искоришћења. У тренутку састављања програма испитивања веома мали број истраживача је испитивао својства кукурузне биомасе у облику млевеног окласка кукуруза. Стога, предмет ове дисертације постају композити базирани на две различите врсте биомасе – пиљевини и кукурузовини (млевени окласак). Циљ истраживања је да се на основу експерименталног истраживања и добијених резултата дефинише нова примена биоматеријала насталог из дрвног и пољопривредног отпада. На тај начин се омогућава додатна употребна вредност овом отпадном материјалу, као изолационом материјалу и стварају услови за одрживи развој у овом сегменту привреде. Резултати истраживања и изведени закључци представљају подлогу за дефинисање могућности или ограничења за примену ових врста биокомпозита са различитим уделом и различитом врстом агрегата.

Део испитивања докторске дисертације су обављена у Лабораторији за испитивање грађевинских материјала Департмана за грађевинарство и геодезију и Лабораторији за испитивање материјала, Департмана за производно машинство Факултета техничких наука у Новом Саду. Преостала испитивања су урађена у Лабораторији за акустику и техничку дијагностику на Факултету за машинство и грађевинарство у Краљеву.

5.2 ПРОГРАМ ЕКСПЕРИМЕНТАЛНОГ ИСТРАЖИВАЊА

У циљу спровођења свих активности предвиђених планом истраживања и контроле његове реализације, састављен је детаљан програм испитивања. Овај програм је обухватио:

- Формулисање циља истраживања,
- Анализу расположиве опреме и метода мерења,
- План експеримента,
- Припрему узорак, дефинисање облика, димензија и броја узорак за испитивање,
- Реализацију експеримента и бележење података,
- Анализу и интерпретацију резултата,

-Примену вишекритеријумске анализе ради одабира оптималног топлотног и акустичног изолатора.

Предмет испитивања су биокompозити израђени од биомасе као индустријског и пољопривредног отпада у циљу смањења загађења животне средине, очувања природних ресурса и смањења емисије CO₂. Одабране су три различите композитне мешавине и од њих припремљени узорци у пет различитих дебљина чије су ознаке представљене у табели 6. За мешавине су одабрани следећи материјали и њихови запремински удели:

1. **Композит П:** Пиљевина 53,5%, ЕПС 13,5%, кречно – гипсана паста 33% (креч : гипс = 4 : 1),
2. **Композит К:** Кукурузовина 53,5%, ЕПС 13,5%, кречно – гипсана паста 33% (креч : гипс = 4 : 1),
3. **Композит М:** Пиљевина 26,75%, кукурузовина 26,75%, ЕПС 13,5%, кречно – гипсана паста 33% (креч : гипс = 4 : 1)

Табела 6. Усвојене ознаке композиција за различите дебљине узорака

Дебљина узорка	Ознаке композита		
	П	К	М
10 mm	П1	К1	М1
20 mm	П2	К2	М2
30 mm	П3	К3	М3
40 mm	П4	К4	М4
50 mm	П5	К5	М5

5.3 КОМПОНЕНТНИ МАТЕРИЈАЛИ

За реализацију експерименталног истраживања ове докторске дисертације одабрани су природни агрегати биљног порекла. Ради максималног искоришћења отпадног материјала, који настаје услед дрвне или пољопривредне производње ова врста биомасе је искоришћена за прављење материјала за звучну и термо изолацију објеката. Како би се побољшале топлотне карактеристике композита, додате су грануле ЕПС, добро познатог термичког изолатора.

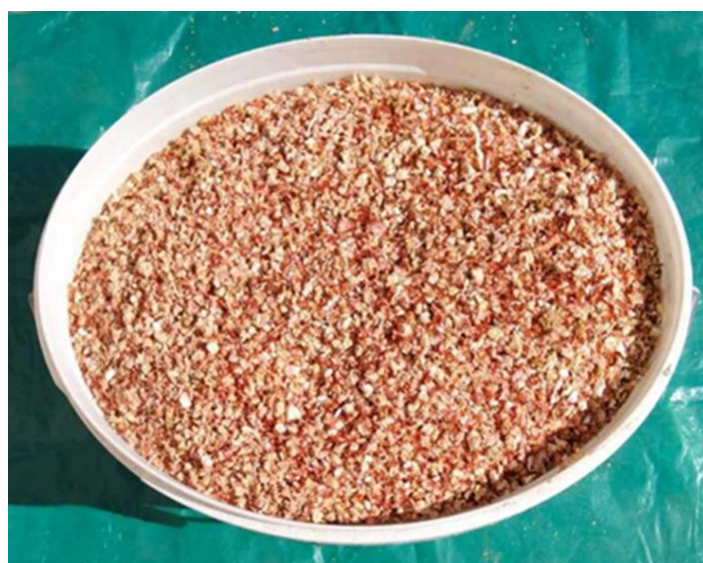
У овој дисертацији за прављење узорака је коришћена пиљевина буковог дрвета, приказана на слици 61.



Слика 61. Букова пиљевина коришћена за прављење узорака

Детаљним разматрањем својстава суве пиљевине, уочена је њена мала тежина. Индикатори густине су на нивоу од $220\text{--}580\text{ kg/m}^3$ (овај индикатор може варирати у зависности од нивоа влажности сировине). Коефицијент топлотне проводљивости је $0,06\text{ W/(m}\cdot\text{K)}$ док хемијски састав пиљевине садржи следеће компоненте: лингин; целулоза; хемицелулоза; азот; водоник; кисеоник; угљеник [141].

За експериментални део дисертације коришћен је и млевени окласак кукуруза приказан на слици 62.



Слика 62. Млевени окласак кукуруза

Просечна расподела честица у агрегату коришћеног за израду узорака приказана је у табели 7.

Табела 7. Просечна расподела честица у агрегату

Биокомпозит/ величина (mm)	<0,4	0,4-0,5	0,5-1	1-2	2-4	4-8	>8
Кукурузовина (%)	3,1	0,5	9,4	3,6	28,8	62,3	8,9
Дрвна пиљевина (%)	22,5	6,8	48,3	8,1	12,2	2,1	0

Као што се може видети обе мешавине агрегата су дисконтинуалне и доминантан опсег за агрегат од кукурузовине је 4-8 mm (~62 %) а потом опсег 2-4 mm (~29 %). У случају дрвне пиљевине доминантан опсег је 0,5-1 mm (~48 %) а потом честице мање од 0,4 mm (22,5 %).

Када говоримо о полистирену који свакодневно употребљавамо, његова порозност износи 98% а запреминска маса 25 kg/m³. Поред наведених својстава полистирен се карактерише и осталим позитивним странама као што су приступачна цена, лакоћа обраде, добра хемијска отпорност, мала апсорпија воде. ЕПС се сматра и одличним термичким изолатором. Топлотна проводљивост овог материјала је 0,035 - 0,040 W/mK. Због предходно наведеног, одлучено је да се грануле експандираног полистирена (Слика 63.) комбинују са биомасом у циљу побољшања термичких и акустичких својстава композита који се испитују у овој докторској дисертацији.



Слика 63. Грануле експандираног полистирена

Мешавина алабастер гипса и хидратисаног креча је коришћена као везивни материјал при изради узорака.

5.4 ИЗРАДА БИОКОМПОЗИТА П, К и М

За добијање нових композитних материјали, као агрегат, коришћен је дрвни отпад (букова пиљевина), пољопривредни отпад (млевени окласак кукуруза) и грануле ЕПС. Величина гранула ЕПС износи 0,3 cm, док су комади кукуруза доминантно величине 0,2–0,8 cm, добијени млевењем у млину. Као везиво је коришћена кречно – гипсана паста са односом креч : гипс = 4 : 1. За различите дебљине узорака материјала, запремински удео компоненти је исти. Како су испитиване три врсте композита, запремински удели компонената су следећи:

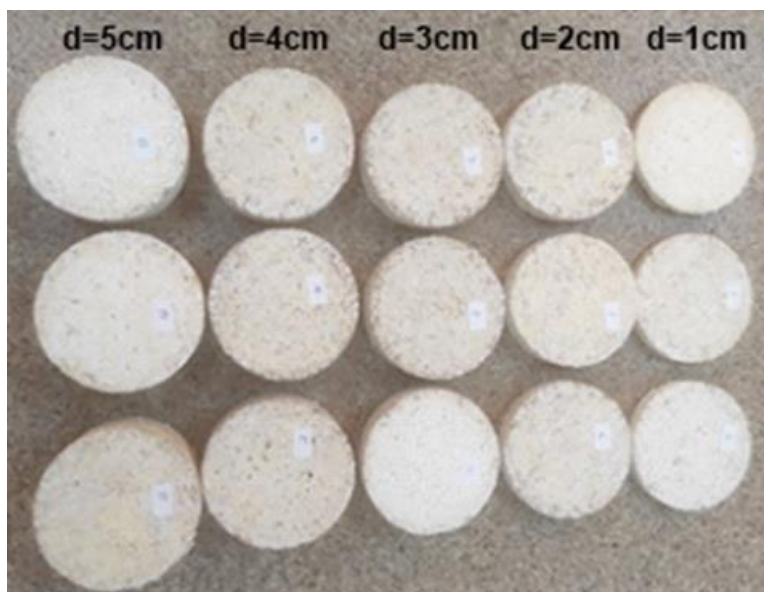
1. **Биокомпозит П:** Пиљевина 53,5%, ЕПС 13,5%, кречно – гипсана паста 33% (креч : гипс = 4 : 1),
2. **Биокомпозит К:** Кукуруз 53,5%, ЕПС 13,5%, кречно – гипсана паста 33% (креч : гипс = 4 : 1),
3. **Биокомпозит М:** Пиљевина 26,75%, клип кукуруза 26,75%, ЕПС 13,5%, кречно – гипсана паста 33% (креч : гипс = 4 : 1).

У циљу добијања узорака нових биокомпозитних материјала, компоненте су измешане према претходно дефинисаном запреминском уделу. Узорци су формирани без притиска помоћу калупа кружног попречног пресека, пречника 110 mm, за различите дебљине у распону од 10–50 mm (Слика 64.), при температури од $20\pm 2^{\circ}\text{C}$.



Слика 64. Калупи за узорке

За сваку дебљину и за сваку мешавину, направљено је по 3 узорка (Слика 65.). Нехомогеност се огледа у неравномерној расподели честица материјала који су ручно измешани, а саставни су делови сва три биокомпозита. Стога се као резултат мерења узима средња вредност измерених величина узорака исте дебљине. Узорци су тестирани након 28 дана сушење на температури од $20\pm 2^{\circ}\text{C}$ јер је дефинисано да је смеша спремна за испитивање након овог временског интервала [142].



Слика 65. Узорци

5.5 МЕТОДЕ И ОПРЕМА

5.5.1 Испитивање морфолошких својстава

Морфолошке карактеристике биокompозита М, П и К испитане су посматрањем унутрашње структуре на макроскопском и микроскопском нивоу. За микроскопска посматрања коришћен је *Carl Zeiss SteREO Discovery* стереоскопски микроскоп чије је максимално увећање до 80 х. Стереоскопски микроскоп омогућава сликање узорака у високој резолуцији и опремљен је камером са моторизованим увећањем које се контролише путем ZEN програмског пакета (Слика 66.).

Слика 66. Стереоскопски микроскоп *Carl Zeiss SteREO Discovery*

5.5.2 Одређивање порозности и упијања воде

Присуство празних простора у структури материјала од кога је узорак направљен објашњава се као порозност тог материјала. Ови простори се деле на шупљине, које су димензионо доста веће и јасно уочљиве и поре које су невидљиве голим оком. У структури материјала поре и шупљине се простиру у свим правцима и најчешће су неправилног облика. Могу бити отворене или затворене у зависности од њихове међусобне повезаности. Порозност материјала се изражава коефицијентом порозности ϕ .

Да би се порозност испитиваних биокомпозита одредила, узорци су прво сушени на температури од 70°C до константне масе (m_{dry}) а затим вакумирани при притиску од 680 mm/hg у временском интервалу од 3 сата. Након завршетка поступка вакумирања, у резервоар је сипана вода која је у потпуности прекрила узорке. Након наливања воде у резервоар, процес вакумирања је настављен у временском интервалу од 1h. Након искључивања пумпе узорци су стајали потопљени још 18±2h након чега се извршило мерење узорака засићених водом (m_{sat}) као и мерење на хидростатичкој ваги (m_{hydr}). Цео поступак се спровео у складу са истраживањем које је радио Lagouin са сарадницима [143].

Апаратура која је коришћена за одређивање порозности и упијања воде узорака је следећа:

- Сушница: Сутјеска, Београд (Слика 67.)
- Вага за мерење маса узорака: Прецизна вага CONTROLS 11-D0629/A (капацитет 4100gr) (Слика 68.)
- Вага за мерење узорака на хидростатичкој ваги: Прецизна вага KERN FKB 16K0.1 (капацитет 16000g) (Слика 69.)
- Вакуум пумпа са пратећим деловима: вакуум пумпа CONTROLOS 86-D2002, вакуум регулатор 86-D2004/1D (могућност регулисања до 760mm/hg) (Слика 70.)



Слика 67. Сушница



Слика 68. Вага
CONTROLS 11-D0629/A



Слика 69. Вага
KERN FKB 16K0.1



Слика 70. Поступак вакумирања узорака

Порозност материјала и упијање воде датих узорака су израчунати на основу измерених вредности маса према следећим формулама:

Порозност

$$\varphi = \frac{m_{sat} - m_{dry}}{m_{sat} - m_{hydr}} \cdot 100, \quad (59)$$

Упијање воде

$$U_v = \frac{m_{sat} - m_{dry}}{m_{dry}} \cdot 100 \quad (60)$$

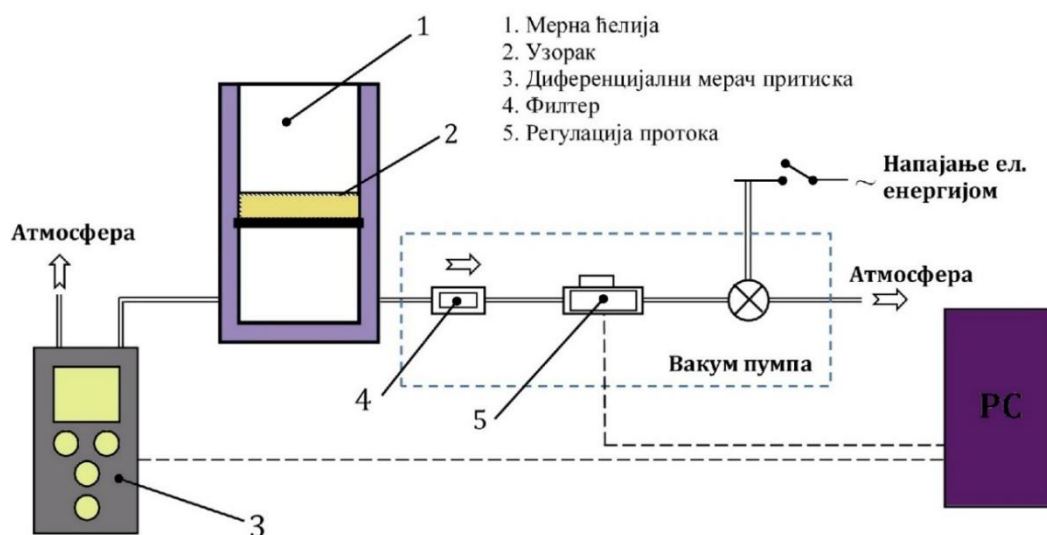
Запреминска маса је одређена на основу запремине тела неправилног облика (V) према [144]:

$$\gamma = \frac{m_{dry}}{V} \quad (61)$$

где је φ порозност, m_{hydr} маса узорака мерених на хидростатичкој ваги, m_{sat} маса засићених узорака, m_{dry} маса осушених узорака, γ запреминска маса материјала и V запремина тела неправилног облика.

5.5.3 Мерење отпора протока ваздуха

Познавање структурних и технолошких својстава апсорбујућих материјала је јако битно како за произвођаче тих материјала тако и за пројектанте система заштите од буке. Једна од битних карактеристика звучно-апсорбујућих материјала је отпор струјању ваздуха за чије су одређивање потребни посебни инструменти који се могу наћи само у специјализованим лабораторијама. Међутим, мерни систем за одређивање отпорности струјању ваздуха се може направити комбиновањем постојеће лабораторијске опреме која се може наћи у већини лабораторија за флуидну технику и акустику. За потребе овог истраживања такав мерни систем је реализован у лабораторији за акустику на Факултету за машинство у грађевинарство у Краљеву. Пре почетка пројектовања овог мерног система одабрана је метода са константним протоком ваздуха који обезбеђује вакуум пумпа. Узорци који се испитују на овакав начин, могу бити у облику кружног цилиндра, као у овој дисертацији, и правоугаоног паралелопипеда. Принцип рада се заснива на проласку ваздуха кроз узорак у једном смеру и мерења резултујућег пада притиска између две слободне површине узорка. Блок дијаграм мерног система, који се користи за мерење отпора протока ваздуха у овој докторској дисертацији је приказан на слици 71.



Слика 71. Блок дијаграм система са сталним протоком ваздуха

За стварање ваздушног протока користи се вакуум пумпа марке ZAMBELLI, типа ZB1, чије су карактеристике дате у табели 8. Пумпа је тешка 7 kg, што омогућава лако преношење и њену употребу како у лабораторијским тако и теренским мерењима. Коришћена пумпа је мембранског типа и остварује слободан проток ваздуха од 30 l/min док је подпритисак који она ствара већи од 0,773 bar (580 mmHg). На пумпи се

налазе два мерача протока ваздуха, један за ниже протоке од 0,2÷6 l/min и други за више протоке 5÷30 l/min, који раде по принципу ротаметра са куглицом. Проток ваздуха се регулише помоћу пригушних вентила. Максимална грешка која се јавља при мерењу протока је $\pm 2\%$. Довољно мала брзина ваздуха остварена пумпом омогућава да измерена отпорност стујању ваздуха не зависи од брзине ваздуха, што указује на добре карактеристике вакуум пумпе. Брзина струјања ваздуха у мерној ћелији износи $0,4 \cdot 10^{-3} \text{ m/s}$ што одговара препорукама стандарда SRPS ISO 9053 ($0,5 \cdot 10^{-3} \text{ m/s}$) [109].

Табела 8. Карактеристике вакуум пумпе

Прикључак за електричну енергију	110 V – 50 Hz
Потрошња	< 1 A
Максимални проток пумпе	> 34 l/min
Максимална пнеуматска компензација 800 mm H ₂ O	- 10% протока
Радни опсег	0.2 - 30 l/min
Мерач протока од 0.2 - 6 l/min	Подешава се на инструменту
Мерач протока од 5 - 32 l/min	Подешава се на инструменту
Максимални вакуум пумпе	> 52 cmHg
Пнеуматски губитак	< 0.2 l/min
Мерач протока сувог гаса	
Максимална грешка	$\pm 3\%$
Максимални проток	4m ³ /h
Минимални проток	16 dm ³ /h
Температурски опсег	0 - 60° C
Електрични термометар	-10° C - 110° C
Маса	12 kg
Спољне мере уређаја	350 x 300 x 280 mm

Када је реч о мерној ћелији, то је цев кружног облика, направљена од плексигласа, дужине 300 mm, унутрашњег пречника 100 mm. Величина пречника је условљена захтевом стандарда SRPS ISO 9053, да унутрашњи пречник мора бити већи од 95 mm као и да дужина мерне ћелије треба да буде бар 100 mm дужа од дебљине узорка. Цев је са једне стране добро заптивена како не би дошло до цурења ваздуха и везана је за носач мерне ћелије у вертикалном или хоризонталном положају. Постављањем узорка, са једне његове стране је атмосферски притисак, док је са друге стране подпритисак

који ствара вакуум пумпа, док је мерење разлике ова два притиска вршено помоћу диференцијалног мерача TESTO 511 (Слика 72.).

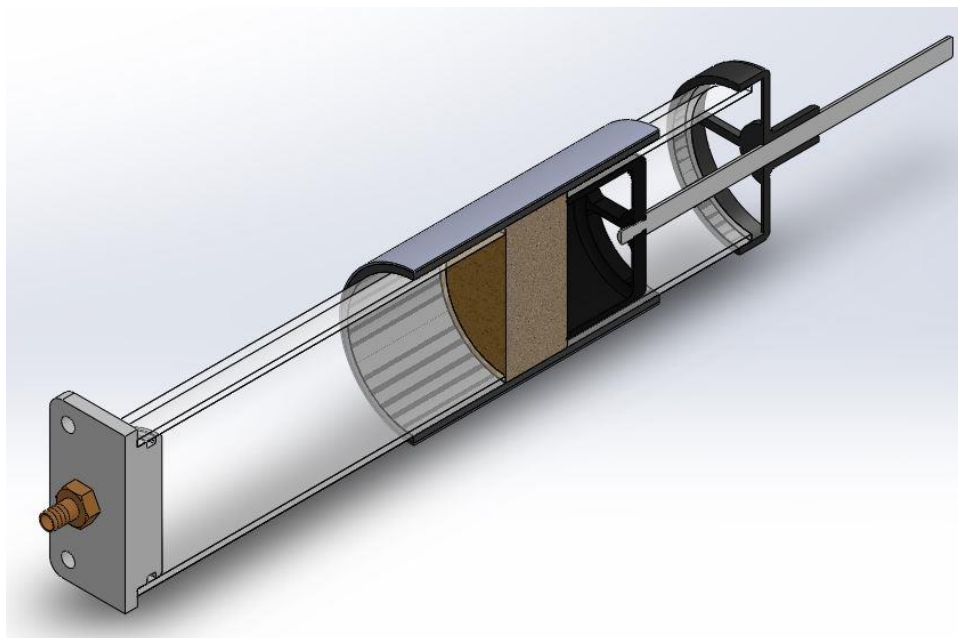


Слика 72. Диференцијални мерач TESTO 511

Узорак који се испитује поставља се у мерну ћелију, ослањајући се са једне стране на фиксни док се са друге стране убацује клизни држач, да се узорак не би померао током мерења. Фиксни ослонац треба да има равномерно распоређене отворе на најмање 50 % површине како се не би ограничио проток ваздуха кроз узорак. Међутим, врло често је тешко убацити узорак у цев од плексигласа због кртости самог материјала. Крућење ивица узорака даје нетачне вредности мерења због бочног цурења ваздуха. С обзиром да се за испитивања ове дисертације користе биокompозити који су крти, коришћен је модификован систем за мерење отпорности струјања ваздуха. Вредности измењеног система мерења се поклапају са вредностима добијеним првобитном апаратуром. Провера је извршена на узорцима азмафона различите дебљине.

Разлика ова два система се огледа у следећем:

- узорци новопојектованог система су већег пречника (пречник узорака се поклапа са спољашњим пречником мерне ћелије - 110 mm);
- узорци се не постављају у унутрашњост мерне ћелије већ се „лепе“ уз њене ивице (шематски приказ дат на слици 73.);
- користи се обујмица ради спајања две мерне цеви од плексигласа, а уједно и спречавања бочног цурења ваздуха (Слика 74.).

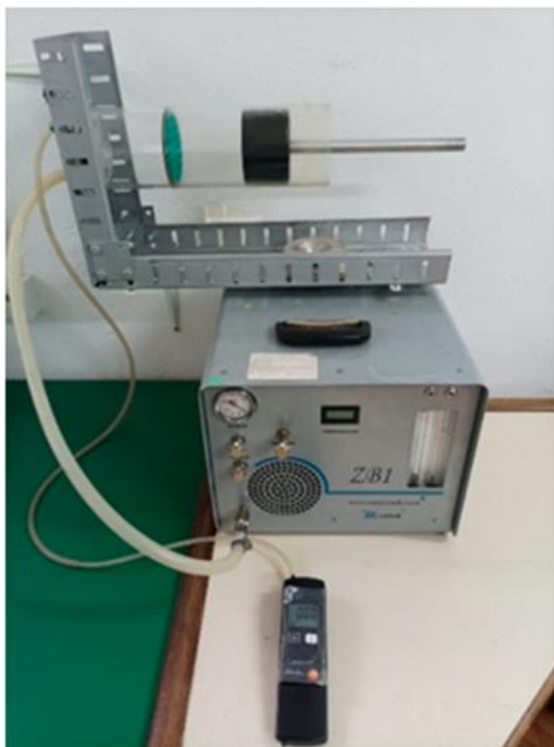


Слика 73. 3Г модел ѓресека мерне ћелије са узорком



Слика 74. Обујмица (сљојка) за цеви

Изглед мерног система постављеног на носач у хоризонталном положају, са свом потребном апаратуром за одређивање отпорности струјању ваздуха приказан је на слици 75.



Слика 75. Мерни систем за мерење отпора струјања ваздуха

5.5.3.1 Поступак испитивања и одређивање вредности отпорности струјању ваздуха

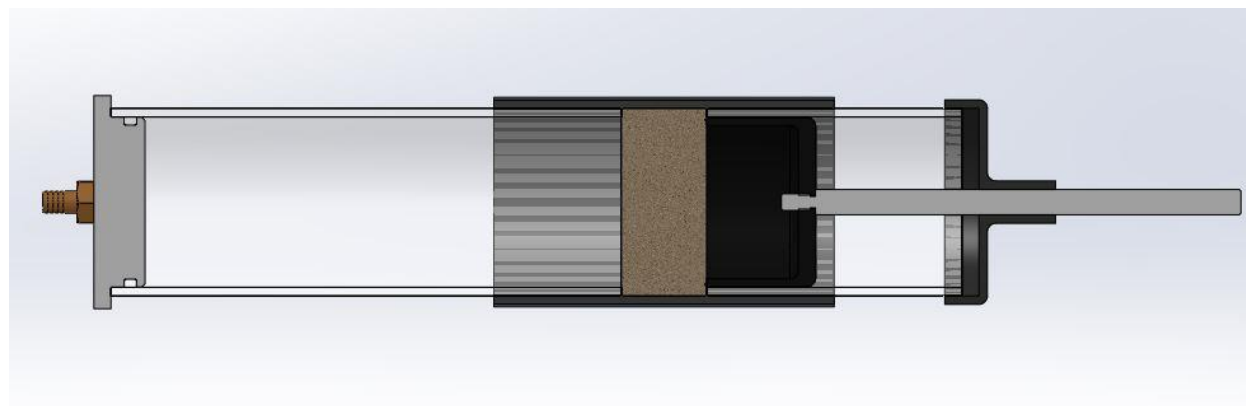
Постоје два начина постављања узорка и то: када се узорци увлаче у мерну ћелију и када се користи обујмица за додатно заптивање и причвршћивање узорка. За влакнасте и пенасте апсорпционе материјале најчешће није потребно никакво додатно заптивање и њихово постављање у мерну ћелију не захтева напоре. Међутим, ако су у питању крути узорци мора се обезбедити додатно заптивање. Стандард препоручује масе на бази битумена, како би се избегло цурење ваздуха, омогућило лако скидање са зидова мерне ћелије и не би ометала наредна мерења. Јако је битна чињеница за колико се заптивна маса стврдне и како је најлакше скинути а да се не оштете зидови мерне ћелије. Скидање заптивне масе употребом хемијских средстава знатно успорава процес мерења и ствара додатне трошкове.

С обзиром да су узорци који се испитују јако крти, а крућењем се смањује заптивеност која је неопходна како би мерења била тачна, одлучено је да се мерни систем модификује и прилагоди, како би се добили што тачнији резултати.

На већ постојећу мерну ћелију прислони се узорак, чији се отпор струјања ваздуха мери. Пречник узорка износи 110 mm што се поклапа са спољашњим пречником цеви од плексигласа. Са друге стране узорка постави се иста таква цев, дужине 150 mm. Ради постизања стабилности и добре заптивености, дужа цев, узорак и краћа цев

причвршћују се шелном (спојницом) дужине 200 mm чија је унутрашња страна обложена гумом. Навојним шрафовима се дефинише колико се мерна ћелија са узорком стеже.

С обзиром да дебљина зида мерних ћелија (цеви од плексигласа) износи 5 mm, а пречник узорка одговара спољашњој димензији цеви, следи да ваздух који се пропушта кроз узорак пролази кроз пречник од 100 mm. Самим тим бочно цурење ваздуха је онемогућено што се може уочити на подужном пресеку мерне ћелије са узорком (Слика 76.).



Слика 76. Подужни пресек мерне цеви са узорком

Када се говори о облику узорака, њега условљава облик мерне ћелије. При испитивању пенастих или влакнастих материјала пречник ових узорака је нешто већи од пречника мерне ћелије, док су мере код крутих материјала исте као и мерна ћелија.

Са порастом брзине ваздуха расте и специфична отпорност струјању ваздуха код многих апсорпционих материјала што захтева мерења при најмањој могућој брзини ваздуха. Као доња граница узима се брзина ваздуха од $0,5 \cdot 10^{-3} \text{ m/s}$ што одговара притиску звука од 0,2 Pa. Ако су узорци који се испитују недовољне дебљине што омогућава стварању мерљивог пада притиска, постоји могућност слагања једног на други узорак. Број узорака за испитивање мора бити најмање три и за сваки од њих се ради по три мерења.

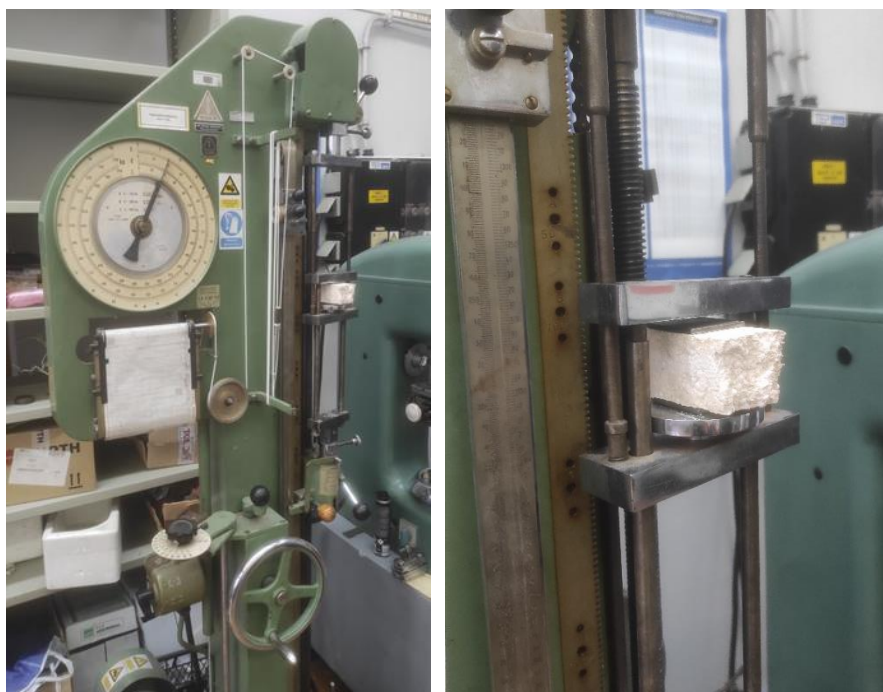
5.5.4 Чврстоћа при притиску

Испитивање чврстоће при притиску биокompозита (σ_p) урађено је према стандарду SRPS EN1015-11:2019 [144] на призмама димензија 40 x 40 x 160 mm, у Лабораторији за испитивање материјала, Департмана за производно машинство, Факултета техничких наука у Новом Саду. Направљено је по три узорка сваког биокompозита и након сушења од 28 дана урађено је њихово испитивање (Слика 77.).



Слика 77. Узорци за испитивање чврстоће при притиску

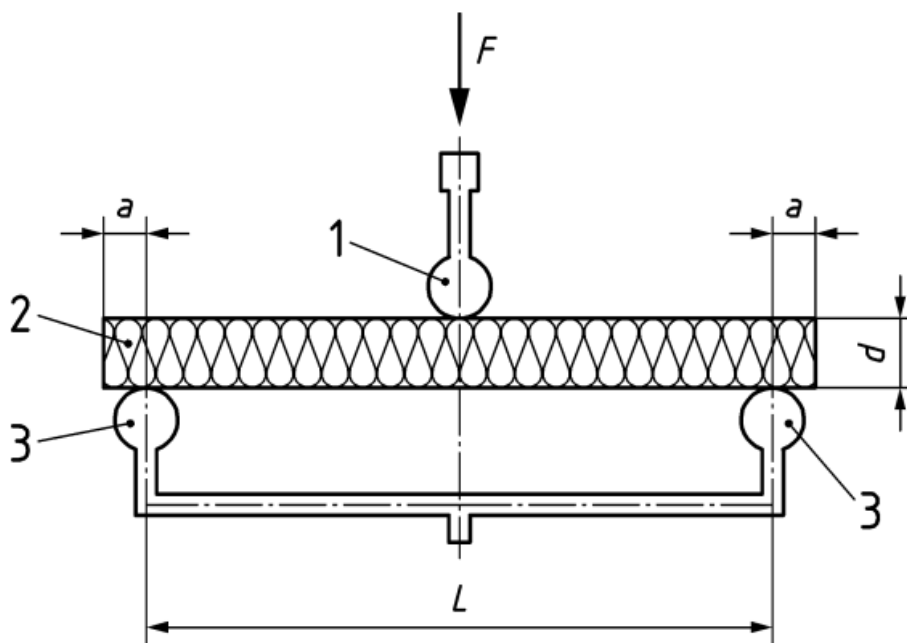
Ова врста испитивања је урађена како би се утврдило понашање материјала приликом излагања силама које делују на површине које нису примарно намењене за директно оптерећење. Механичка преса на Департману за производно машинство, ФТН-ВЕВ Leipzig; ZMGi, максималне силе 5 kN, опсега 1 kN је коришћена за испитивање чврстоће на притисак и приказана је на слици 78.



Слика 78. Испитивање чврстоће при притиску

5.5.5 Чврстоћа при савијању

За потребе ове докторске дисертације испитивања чврстоће при савијању (σ_s) су спроведена у складу са стандардом SRPS EN 12089:2013 [145] у Лабораторији за испитивање материјала, Департмана за производно машинство, Факултета техничких наука у Новом Саду. Испитивања су урађена постављањем узорка на два полуцилиндра пречника 40 mm и дужине 150 mm који су служили као ослонци узорка. Ослонци су постављени на 25mm размака од крајњих ивица узорка тако да је међусобно растојање полуцилиндара (L) износило 250 mm. Са горње стране узорка је постављен трећи цилиндар преко којег се сила преносила на централни део узорка. Поставка опреме приказана је на слици 79.



Слика 79. Механизам за ойшеређивање узорака при савијању према SRPS EN 12089 стандарду [145]

Где је:

- 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

5.5.6 Специфични топлотни капацитет

Специфични топлотни капацитет биокompatита се може израчунати без обзира на врсте материјала који улазе у састав биокompatита. Познавањем масеног удела као и специфичног топлотног капацитета сваког појединачног материјала одређеног правилником дефинише се специфични топлотни капацитет биокompatита [149]. С обзиром да на специфични топлотни капацитет утиче и влажност материјала, усвојена вредност за млевени окласак кукуруза је 1,484 KJ/KgK са 11-14% влаге, природно осушеног клипа [147].

Средњи топлотни капацитет биокompatита произилази из следећег образаца [146]:

$$C_{ps} = \sum_{i=1}^n g_i C_{pi} \quad (62)$$

прецизније,

$$C_{ps} = g_1 C_{p1} + g_2 C_{p2} + \dots + g_n C_{pn} \quad (63)$$

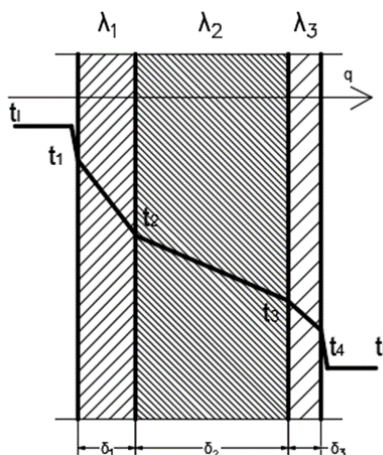
Где g_i – представља масени удео а C_{pi} специфични топлотни капацитет појединачног материјала.

5.5.7 Топлотна проводљивост

На слици 80. је приказан вишеслојни равни зид код кога се топлота преноси кондукцијом а топлотни флуks се рачуна по формули:

$$q = \frac{t_1 - t_{n+1}}{\sum_{i=1}^n \frac{\delta_i}{\lambda_i}} \quad (64)$$

где t_1 представља температуру унутрашње, топлије површине, t_{n+1} температуру последње, спољашње хладније површине зида, δ_i дебљину i - тог слоја зида, λ_i топлотну проводљивост i - тог слоја зида.



Слика 80. Стационарно провођење и пролаз топлоте кроз равни зид

Посебан случај преношења топлоте представља комбинација простирања топлоте кондукцијом и конвекцијом. Када је ваздух у просторији доста топлији од спољашњег ваздуха, топлота се преноси кроз конструкцијске елементе при чему долази до трансмисионих топлотних губитака зграде. Пренос топлоте трансмисијом подразумева размену топлоте кроз грађевински омотач зграде механизмом пролаза топлоте, који се карактерише преко коефицијента пролаза топлоте U (W/m^2K) и може се израчунати по следећој формули:

$$U = \frac{1}{R_{si} + \sum_{i=1}^n \frac{\delta_i}{\lambda_i} + R_{se}} \quad (65)$$

где R_{si} и R_{se} представљају отпоре прелазу топлоте са ваздуха на унутрашњу површину зида и са спољашње површине зида на ваздух и узимају се из одговарајућих правилника, док $\frac{\delta_i}{\lambda_i}$ представља отпор провођењу топлоте кроз i -ти слој конструкције дебљине δ_i и коефицијента топлотне проводљивости λ_i .

У случају када је топлотни флуks q познат, коефицијент пролаза топлоте се рачуна према следећој формули:

$$U = \frac{q}{t_u - t_s} \quad (66)$$

На основу измереног топлотног флуksа и применом предходно наведеног израза израчунат је коефицијент топлотне проводљивости композита чије се карактеристике испитују. Топлотни флуks је измерен помоћу сензора флуksметра марке Kyoto electronics HFM 201, сензор TR2-B који је приказан на слици 81. а чије су карактеристике дате у табели 9., док су плоче мерног система приказане на слици 82.



Слика 81. Флуksметар Kyoto electronics HFM 201, сензор TR2-B



Слика 82. Металне плоче као део опреме за формирање мерног ланца

Табела 9. Карактеристике флуksмeтpа Kyoto electronics HFM 201

Предмет	Спецификација
Мерни објект	Топлотни флуks и температура
Мерни опсег	Проток топлоте: : 0 - $\pm 9999 \text{ W/m}^2$ или $\text{kcal/m}^2\text{h}$
	Температура: Хром-Алуминијум термоелемент -99,9 – 999,9°C
	Температура: Бакар - Константан термоелемент -199,9 – 400,0°C
Јединице	Топлотни флуks: W/m^2 , $\text{kcal/m}^2\text{h}$ или Температура: °C
Амбијентални услови	Температура: 0 – 50 °C Влажност: 20 – 80 %RH (без кондензације)

5.5.8 Фактор отпора дифузији водене паре

Фактор отпора дифузији водене паре (μ) испитан је у лабораторији Департамента за грађевинарство и геодезију Факултета техничких наука Универзитета у Новом Саду. Испитивања су вршена према стандарду SRPS EN 12086:2013 [148]. Према дефинисаним захтевима овог стандарда направљене су цилиндричне посуде које су променљивог пречника (101 и 154 mm), висине 40 + 50 mm као и један шаблон за одређивање центра за насипање заптивне смесе. У посуде, на чијем се дну налази хигроскопна супстанца или засићен водени раствор соли, се постављају узорци који се заливају заптивном смесом (Слика 83.).



Слика 83. Посуда са узорком за испитивање отпора дифузији водене паре

Према стандарду SRPS EN 12086:2013 [148] биокomпозити, као хигроскопни материјали, се могу испитати на основу два сета услова средине који су приказани у табели 10.

Табела 10. Услови средине за испитивање фактора отпора дифузији водене паре за хигроскопне материјале према стандарду SRPS EN 12086:2013

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

При испитивању које се назива "dry cup test" или тест суве шоље (сет А), релативна влажност унутар посуде износи 0 %, док се влажност у климакомори креће у интервалу од 50 ± 3 %. Овај тест симулира услове које грејани објекат има на термоизолациони материјал при кишовитом времену при чему се влага креће из спољне средине ка грејаном простору. За сет услова А се на дно посуде поставља калцијум-хлорид (CaCl_2) док је за сет услова Б на дну посуде засићен водени раствор натријум-дихромата ($\text{Na}_2\text{Cr}_2\text{O}_7 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$). Овај раствор натријума унутар посуде остварује влажност од 52% а вредност релативне влажности у комори се одржава на 93 ± 3 %. Због високе влажности овај сет услова се назива и тест мокре шоље или "wet cup test" и симулира услове где се влага креће из унутрашњости ка спољашњој средини кроз омотач објекта.

За ово испитивање у оквиру дисертације коришћена је метода са калцијум-хлоридом (тест суве шоље) где је једна страна узорака окренута ка супстанци CaCl_2 и није у директном контакту са њом, док је друга страна изложена условима средине клима коморе (Слика 83.). Клима комора која је коришћена за кондиционирање узорака током овог експеримента има могућност регулисања температуре у опсегу од -40 до +160 °C и релативне влажности од 0 до 95 %. Ова клима комора је типа D1429/A произвођача Controls Италија (Слика 84.).



Слика 84. Климакомора

Испитивање је вршено на по 5 узорака за сваку врсту биокомпозита и изабрана је дебљина узорака од 5 cm. На узорке се поставља шаблон за одређивање центра (Слика 83.), око кога се наноси заптивна смеша у течном стању, састава 40 % парафина и 60 % пчелињег воска. Дефинисањем средишњег дела узорка, помоћу шаблона, обезбеђује се површина за размену водене паре са горње стране узорка која је иста као површина отвора унутар посуде.

Након хлађења заптивне смесе посудама је измерена маса, након чега се одлажу у клима комору. За мерење масе узорака коришћена је вага марке CONTROLS 11-D0629/A (Слика 68.). Периодичним мерењем масе посуда (не крајем од 24 часа) утврђује се брзина дифузије водене паре кроз узорке при стационарном току водене паре. Испитивање је вршено све док разлика пет узастопних мерења масе није била мања од 5%.

У овој докторској дисертацији спроведена је метода суве шоље.

5.6 ЕНЕРГЕТСКА ЕФИКАСНОСТ ЗИДНИХ СКЛОПОВА

За прорачун утицаја биокомпозита на енергетску ефикасност објекта, дефинисана су три склопа зида при чему се као изолација користе сва три испитивана биокомпозита појединачно. Понашање конструкције са различитим основним материјалом на истом зидном склопу приказано је у поглављу „Резултати и дискусија“. Сви прорачуни су изведени према Правилнику о енергетској ефикасности зграда [149].

У табели 11. приказани су склопови све три зидне конструкције са три врсте биокомпозита (П, К и М) као термоизолационог материјала, дебљине 5 cm.

Табела 11. Склопови зидних конструкција

	Склоп зида 1	Склоп зида 2	Склоп зида 3
1.	Продужни малтер	Продужни малтер	Продужни малтер
2.	Керам. блок/бетонско платно	Керам. блок/бетонско платно	Керам. блок/бетонско платно
3.	ТИ материјал П	ТИ материјал М	ТИ материјал К
4.	Спољни завршни малтер	Спољни завршни малтер	Спољни завршни малтер

VI РЕЗУЛТАТИ И ДИСКУСИЈА

6.1 МОРФОЛОШКА СВОЈСТВА

Прегледом попречног пресека предметних узорака може се тачно дефинисати о којој врсти биокompозита је реч. Узорци су посматрани под стереоскопским микроскопом са циљем утврђивања морфолошких својстава и упоредне анализе различитих мешавина композита на биљној бази.

На сликама 85 - 87 које су снимљене микроскопом могу се уочити сви материјали од којих се узорак састоји. Узорци су поприлично компактни са местимичним шупљинама које се могу уочити на појединим местима. На сликама 85-87 које су снимљене микроскопом са увећањем од 10x може се приметити да је биокompозит ознаке П најкомпактнији док се код биокompозита М и К примећују местимичне прслине као последица скупљања материјала.



Слика 85. Микроскопски приказ биокompозића М, 10x



Слика 86. Микроскопски приказ биокompозића К, 10x



Слика 87. Микроскопски приказ биокомпозиција П, 10х

6.2 ПОРОЗНОСТ, УПИЈАЊЕ ВОДЕ И ЗАПРЕМИНСКА МАСА БИОКОМПОЗИТА М, П, К

На основу резултата мерења и израчунатих вредности дефинисана су најбитнија својства предметних биокомпозиција планирана програмом испитивања. Добијене карактеристичне вредности својстава приказане су табеларно и у виду дијаграма у циљу што лакше анализе и извођења закључака.

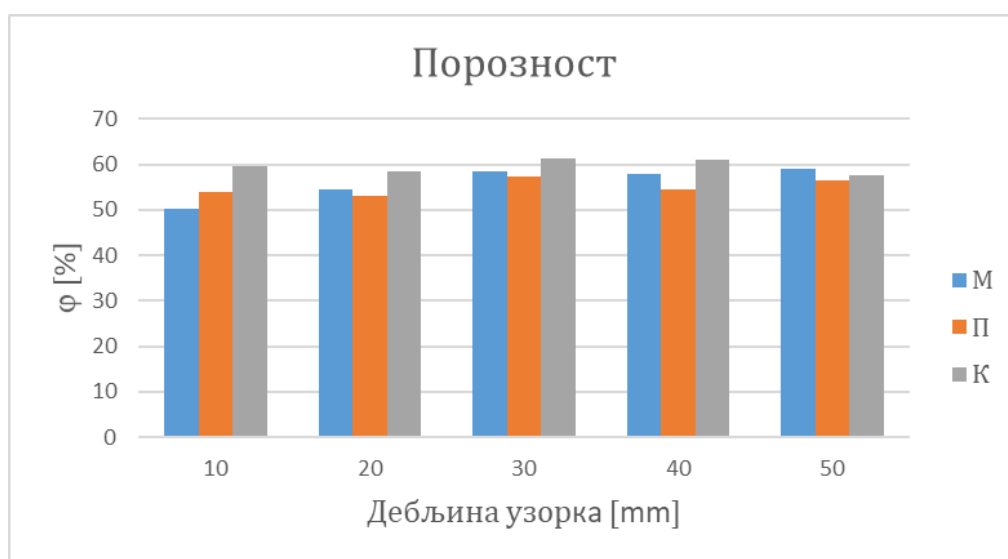
Одређивањем константне масе (m_{dry}) сушених узорака, масе узорака засићених водом (m_{sat}) као и мерење на хидростатичкој ваги (m_{hydr}) омогућило је дефинисање порозности узорака ϕ , упијање воде U_v , као и запреминске масе γ која је одређена преко методе предвиђене за тела неправилног облика.

За сваку дебљину материјала испитано је по 3 узорка. С обзиром на то да су разматране три врсте мешавина и 5 дебљина, укупан број испитиваних узорака износи 45. Као резултат мерења узима се средња вредност узорака исте дебљине из исте мешавине чије су вредности приказане у табели 12. Детаљан приказ свих резултата мерења и рачунски добијених вредности дато је у Прилогу 1 и 2.

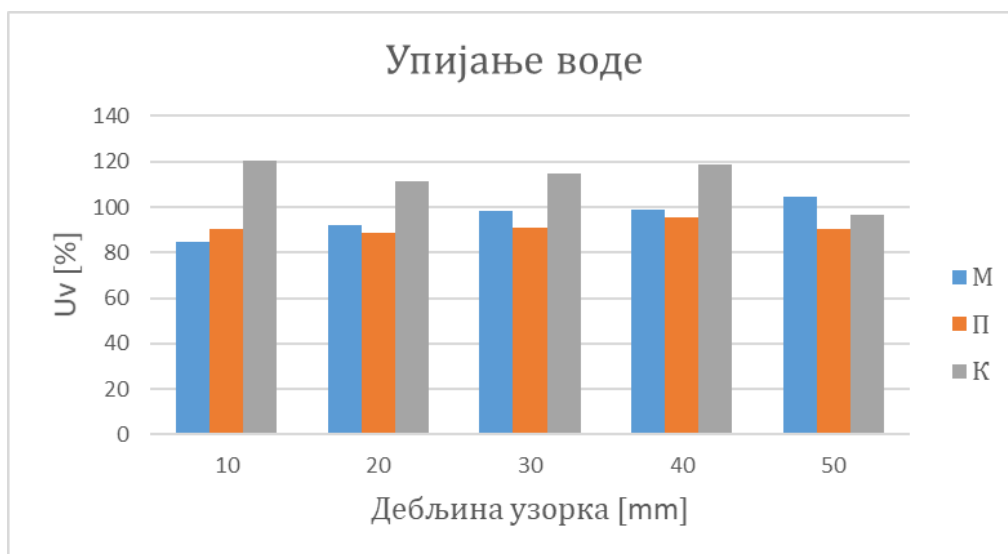
Табела 12. Резултати одређивања порозности, запреминске масе и упијања воде

Ознака	d (mm)	m _{dry} (g)	m _{sat} (g)	m _{hidr} (g)	φ (%)	U _v (%)	V (cm ³)	γ (g/cm ³)
М	10	65,163	120,213	10,433	50,144	84,668	109,78	0,594
П		54,583	103,733	12,567	53,920	90,250	91,167	0,598
К		50,563	111,217	9,360	59,491	120,332	101,857	0,495
М	20	103,423	198,403	24,633	54,632	91,951	173,77	0,595
П		106,660	201,033	30,167	53,230	88,500	170,867	0,624
К		102,893	217,393	21,733	58,523	111,342	195,66	0,571
М	30	161,907	320,990	49,433	58,582	98,263	271,557	0,596
П		163,477	312,433	52,733	57,354	91,135	259,70	0,629
К		162,810	380,143	44,467	61,242	114,869	305,343	0,590
М	40	208,887	415,233	58,700	57,877	98,854	356,533	0,586
П		205,45	401,200	60,467	54,458	95,484	343,733	0,603
К		200,913	438,590	48,333	60,908	118,465	390,257	0,554
М	50	250,357	512,567	69,600	59,176	104,769	442,967	0,566
П		266,093	504,600	81,773	56,447	90,172	422,827	0,628
К		275,303	540,753	80,500	57,714	96,569	460,253	0,623

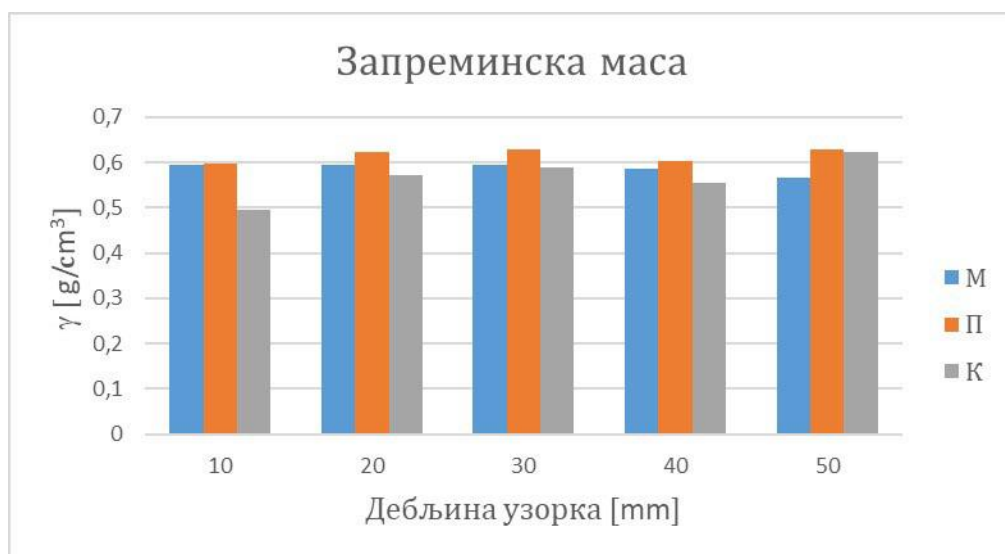
Добијене средње вредности за порозност, упијање воде и запреминску масу су такође приказане и на сликама 88-90, ради лакшег сагледавања резултата и њихове анализе.



Слика 88. Средње вредности порозности за предмешне биокормозије



Слика 89. Средње вредности упијања воде за примерне биокмјозије



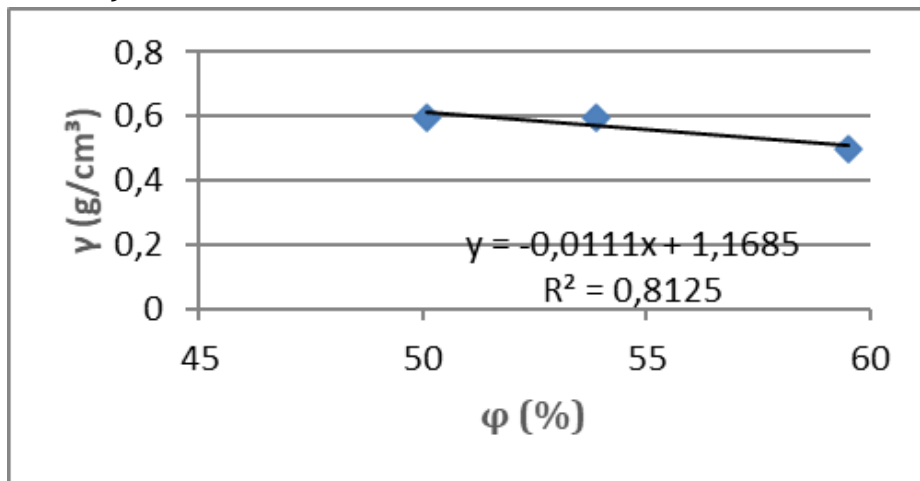
Слика 90. Средње вредности запреминске масе за примерне биокмјозије

Анализом резултата приказаних у табели 12. и на сликама 88-90, може се уочити да је структура узорка веома нехомогена и да свакако значајно утиче на резултате. Вредности порозности се крећу у границама 50-60% и највећа разлика између биокмјозита је уочена код узорка најмање дебљине (10 mm). Код осталих дебљина та разлика је мања. Једино се код узорка М може донекле уочити тренд повећања порозности са повећањем дебљине узорка. Када је у питању упијање воде примећује се да биокмјозит К генерално упија највише воде.

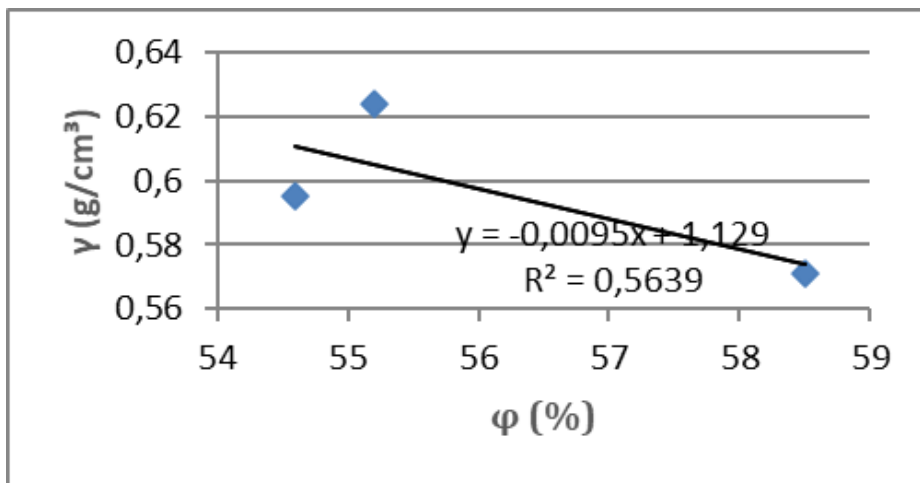
Резултати, такође, показују да са порастом порозности расте упијање воде док вредност запреминске масе опада, што је и очекивано. Ово се објашњава чињеницом да ако материјал има више пора и шупљина више ће упити и вероватно задржати воде

унутар своје структуре а као такав (порознији) ће имати и мању масу по јединици запремине.

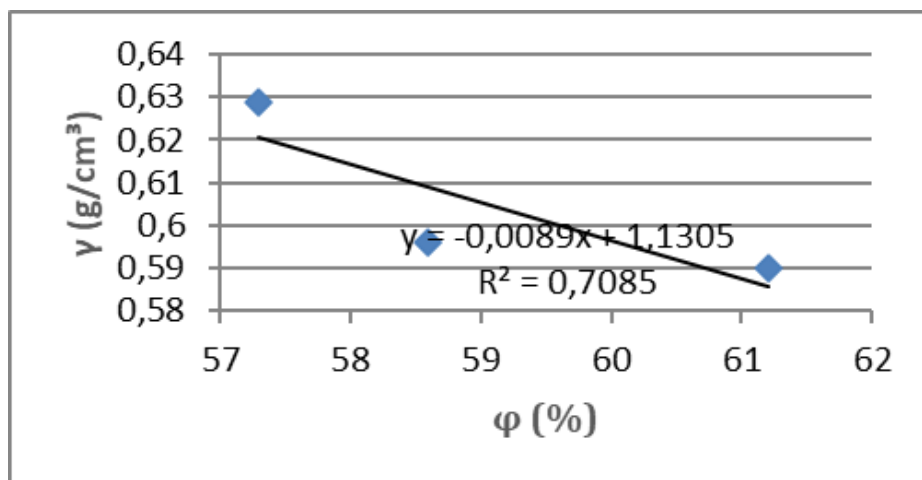
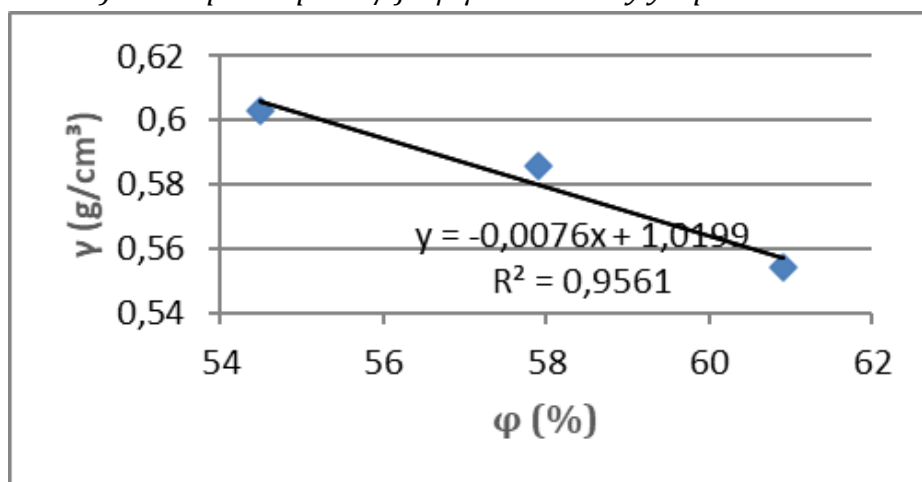
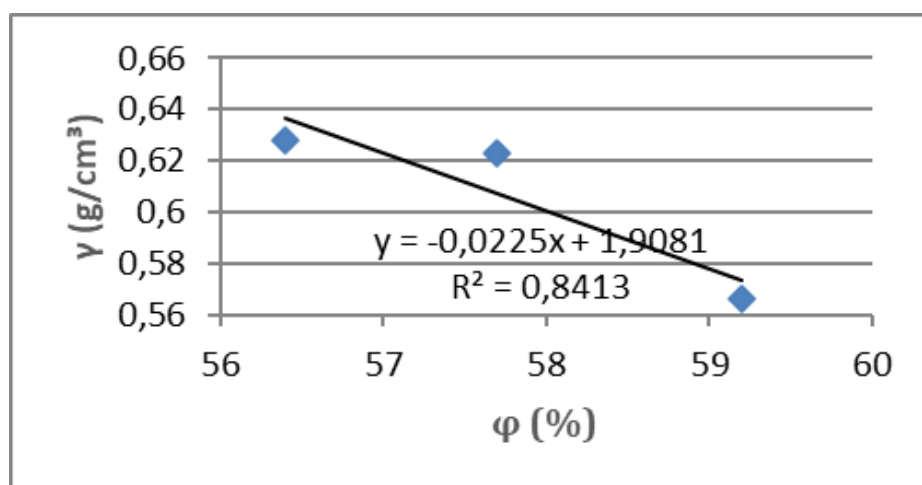
Да би се утврдило каква је међусобна веза између одређених добијених вредности направљена је линеарна корелација φ - γ за узорке исте дебљине, али различитог састава. Закључено је да постоји врло јака и јака корелација (линеарна) за дебљину узорка 40 mm ($R^2 = 0,9561$), 50 mm ($R^2 = 0,8413$), 10 mm ($R^2 = 0,8125$) и 30 mm ($R^2 = 0,7085$). Нешто слабија корелација је утврђена за узорке дебљине 20 mm ($R^2 = 0,5639$) (Слика 91. а,б,в,г,д).



а) Линеарна корелација φ - γ за дебљину узорака 10 mm



б) Линеарна корелација φ - γ за дебљину узорака 20 mm

в) Линеарна корелација ϕ - γ за дебљину узорака 30 ммг) Линеарна корелација ϕ - γ за дебљину узорака 40 ммд) Линеарна корелација ϕ - γ за дебљину узорака 50 ммСлика 91. Графички приказ линеарне корелације ϕ - γ по дебљинама узорака

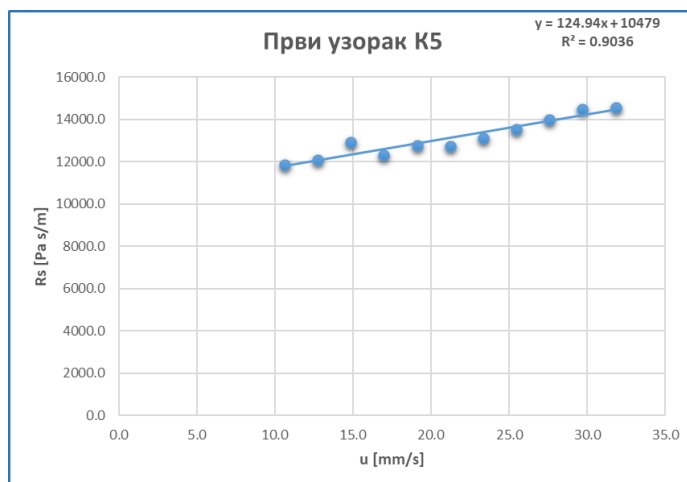
6.3 ОТПОР ПРОТОКА ВАЗДУХА

За одређивање специфичне отпорности струјању ваздуха одабрано је 11 вредности запреминског протока и за њих је измерен пад притиска кроз сваки узорак. У пракси се ламинирана брзина струјања ваздуха снижава све до граничне вредности од 0,5 mm/s јер би се у супротном вредност специфичне отпорности струјања ваздуха одређивала екстраполацијом. Дугогодишњом анализом је утврђено да отпорност струјања ваздуха линеарно зависи од запреминског протока ваздуха, односно брзине струјања. Ово је дефинисано једначином линеарне регресије која се одређује за сваки узорак појединачно док се једначина остварене везе дефинише коефицијентом детерминације (R^2). Мерење је извршено на 45 узорака, по 3 узорка за сваку дебљину од 10 - 50 mm.

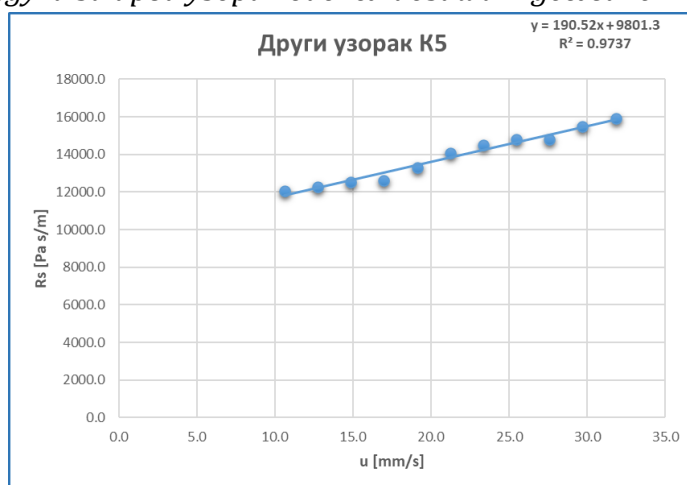
У табели 13. су приказане вредности запреминског протока (q_v), којима одговарају брзине струјања ваздуха (u) у мерној ћелији као след једначине континуитета. За такве брзине струјања измерен је пад притиска (Δp) на основу чега је добијена и отпорност струјања ваздуха (R), као однос запреминског протока и пада притиска. Одређивање специфичне отпорности струјању ваздуха у овом делу докторске дисертације је приказано на примеру биокompозита К, на три узорка дебљине 50 mm. Оваква процедура је примењена на свих 45 узорака а резултати су приказани у Прилогу 6. На основу 11 вредности запреминског протока ваздуха у распону од 5-15 l/min добијена је права линеарне регресије док је вредност отпорности струјања ваздуха за брзину од 0,5 mm/s одређена екстраполацијом. Са дијаграма 92-94., а на основу вредности коефицијената корелације (R^2) закључено је да је корелација између специфичне отпорности струјању и брзине струјања ваздуха веома висока и за први узорак износи $R^2=0,9036$, за други $R^2=0,9737$ док је вредност трећег $R^2=0,9137$.

Табела 13. Резултати мерења ошћорносћи сћрујању ваздуха за биокомјозић К
дебљине узорка 50 mm

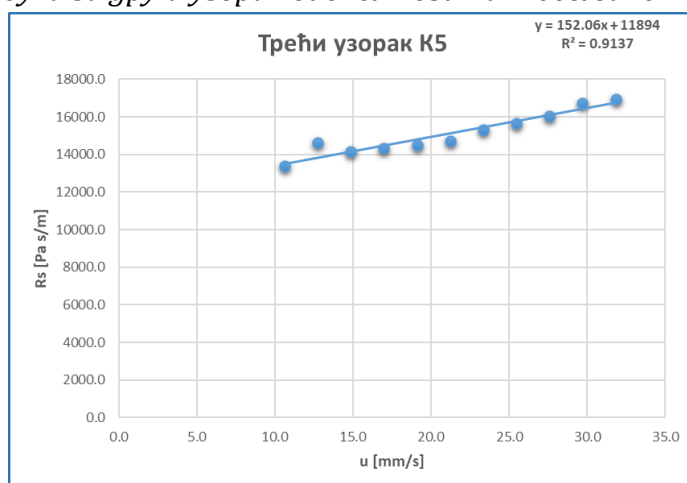
	q_v (lit/min)	u (mm/s)	Δp (Pa)	R (kPa·s/m ³)	R_s (kPa·s/m)	r (kPa·s/m ²)
Први узорак	5	10,6	126	1512,000	11,875	237,504
	6	12,7	154	1540,000	12,095	241,903
	7	14,9	192	1645,714	12,925	258,508
	8	17,0	209	1567,500	12,311	246,222
	9	19,1	244	1626,667	12,776	255,516
	10	21,2	270	1620,000	12,723	254,469
	11	23,3	306	1669,091	13,109	262,180
	12	25,5	345	1725,000	13,548	270,962
	13	27,6	386	1781,538	13,992	279,843
	14	29,7	431	1847,143	14,507	290,148
	15	31,8	464	1856,000	14,577	291,540
Други узорак	5	10,6	128	1536,000	12,064	241,274
	6	12,7	156	1560,000	12,252	245,044
	7	14,9	186	1594,286	12,521	250,430
	8	17,0	214	1605,000	12,606	252,113
	9	19,1	254	1693,333	13,299	265,988
	10	21,2	299	1794,000	14,090	281,801
	11	23,3	338	1843,636	14,480	289,598
	12	25,5	377	1885,000	14,805	296,095
	13	27,6	408	1883,077	14,790	295,793
	14	29,7	460	1971,429	15,484	309,671
	15	31,8	506	2024,000	15,896	317,929
Трећи узорак	5	10,6	142	1704,000	13,383	267,664
	6	12,7	186	1860,000	14,608	292,168
	7	14,9	210	1800,000	14,137	282,743
	8	17,0	243	1822,500	14,314	286,278
	9	19,1	277	1846,667	14,504	290,074
	10	21,2	312	1872,000	14,703	294,053
	11	23,3	357	1947,273	15,294	305,877
	12	25,5	399	1995,000	15,669	313,374
	13	27,6	443	2044,615	16,058	321,167
	14	29,7	497	2130,000	16,729	334,580
	15	31,8	539	2156,000	16,933	338,664



Слика 92. Корелација између специфичне отпорности струјања и брзине струјања ваздуха за први узорак биокомпозита К дебљине 50mm



Слика 93. Корелација између специфичне отпорности струјања и брзине струјања ваздуха за други узорак биокмползита К дебљине 50mm



Слика 94. Корелација између специфичне отпорности струјања и брзине струјања ваздуха за трећи узорак биокмползита К дебљине 50mm

На основу вредности специфичне отпорности струјања ваздуха R_s може се наћи аритметичка средина за сва три узорка за одговарајућу дебљину, након чега се израчунава средња вредност подужне специфичне отпорности струјању $r_{sr,d}$ за исту дебљину узорака. На крају се одређује подужна отпорност струјању ваздуха r као аритметичка средина подужних отпорности струјању ваздуха узимајући у обзир све дебљине узорака. У табелама 14-16. приказане су вредности аритметички добијених подужних специфичних отпорности за сва три биокмползита појединачно (М, П и К) и за све дебљине узорака.

Табела 14. Вредности отпорности струјања ваздуха и подужне отпорности струјању ваздуха за биокмползиј М

d (mm)	10	20	30	40	50
R_s (kPa·s/m)	6,783	8,377	8,382	11,226	9,201
$r_{sr,d}$ (kPa·s/m ²)	678,284	418,831	279,409	280,650	184,019
r (kPa·s/m ²)	368,239				

Табела 15. Вредности отпорности струјања ваздуха и подужне отпорности струјању ваздуха за биокмползиј П

d (mm)	10	20	30	40	50
R_s (kPa·s/m)	5,126	7,940	14,418	11,310	14,099
$r_{sr,d}$ (kPa s/m ²)	512,570	396,996	480,612	282,743	281,983
r (kPa·s/m ²)	390,981				

Табела 16. Вредности отпорности струјања ваздуха и подужне отпорности струјању ваздуха за биокмползиј К

d (mm)	10	20	30	40	50
R_s (kPa·s/m)	1,957	3,828	4,597	5,448	14,032
$r_{sr,d}$ (kPa s/m ²)	195,726	191,404	153,228	136,195	280,642
r (kPa·s/m ²)	191,439				

На основу резултата приказаних у предходне три табеле може се закључити да биокмползит П има највећу подужну (специфичну) отпорност r која износи 390,981 kPa·s/m². Насупрот овој вредности, најнижа вредност је 191,439 kPa·s/m² биокмползита К. Ова чињеница се објашњава уском повезаношћу отпора протока ваздуха са порозношћу материјала, као и са нехомогеношћу материјала. Биокмползит К се састоји од нешто крупнијих комада честица материјала (кукурузовине) са мањим учешћем ситнијих које би могле адекватно да попуне празан простор унутар

мешавине и самим тим у његовој структури остаје највише пора и шупљина. Ово се може видети и на основу табеле 7. (просечне расподеле честица у агрегату) јер су честице пиљевине доста ситније од агрегата кукуруза и на тај начин попуњавају празне просторе а самим тим је и порозност мања код биокомпозита П. Стога се може рећи да највише ваздуха прође кроз узорке биокомпозита К, односно отпор протока ваздуха је код ових узорака најмањи.

Када говоримо о биокомпозитима М, П и К, задржавајући се на њиховим дебљинама узорака, може се потврдити исто, тачније да са повећањем порозности опада отпор протока ваздуха (Табела 17.). То се објашњава чињеницом да када звучни талас удари у површину материјала, део његове енергије се рефлектује, део апсорбује, а преостали део пролази. Величина, облик и дужина унутрашњих пора у структури материјала игра значајну улогу у количини енергије звучног таласа која ће проћи кроз узорак. Самим тим са већим бројем и величином пора већа количина звучног таласа пролази кроз узорак што дефинише нижи отпор протока.

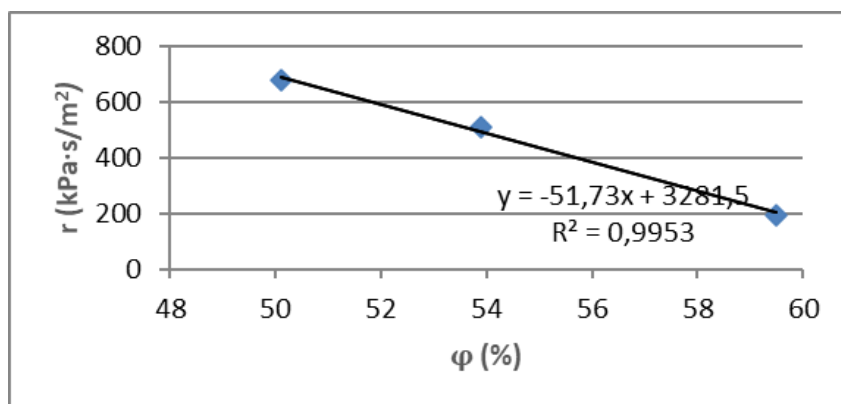
Табела 17. Зависност отпора протока ваздуха од порозности материјала по дебљинама узорака

Ознака	Дебљина узорака	Порозност	Подужна специфична отпорност струјању ваздуха
	d (mm)	φ (%)	г (kPa·s/m ²)
М	10	50,144	678,284
П	10	53,920	512,570
К	10	59,491	195,726
М	20	54,632	418,831
П	20	55,230	396,996
К	20	58,523	191,404
М	30	58,582	279,409
П	30	57,354	480,612
К	30	61,242	153,228
М	40	57,877	280,650
П	40	54,458	282,743
К	40	60,908	136,195
М	50	59,176	184,019
П	50	56,447	281,983
К	50	57,714	280,642

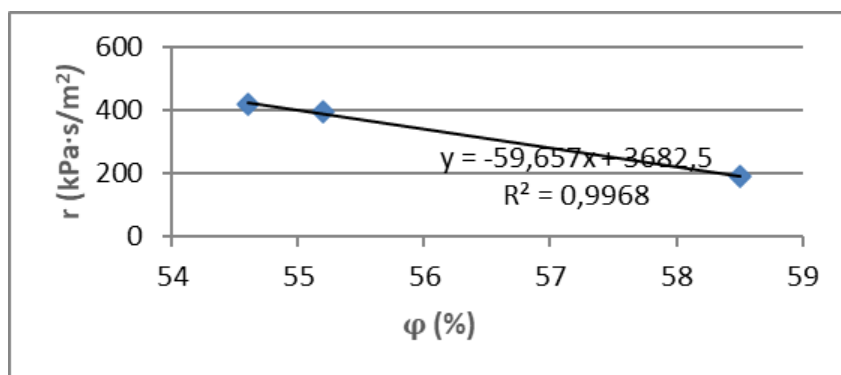
Дефинисањем отпора протока ваздуха, одређивањем порозности и запреминске масе истих узорак биокмползита М, П и К, направљена је корелација између споменутих параметара.

Корелација ϕ - r : за узорке дебљине 10 mm, 20 mm и 30 mm успостављена је врло јака линеарна корелација са следећим вредностима коефицијента корелације : $R^2 = 0,9953$ за 10 mm, $R^2 = 0,9968$ за 20 mm и $R^2 = 0,9001$ за 30 mm, док за узорке са дебљином од 40 mm и 50 mm вредност коефицијента корелације је била јака $R^2 = 0,7293$ за 40 mm и $R^2 = 0,7945$ за 50 mm (Слика 95. а, б, в, г, д).

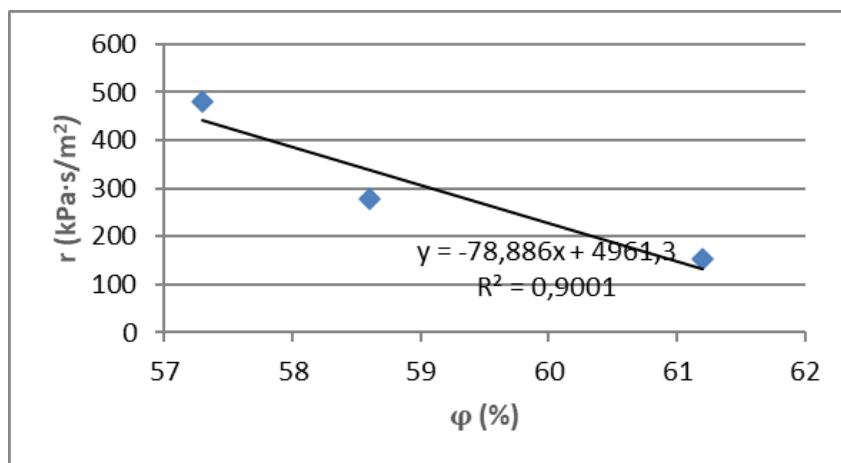
Корелација γ - r : за узорке дебљине 30 mm и 50 mm успостављена је врло јака корелација са следећим вредностима коефицијената корелације, $R^2 = 0,9394$ и $R^2 = 0,9963$, док је за узорке са дебљинама од 40 mm ($R^2 = 0,8912$), 10 mm ($R^2 = 0,8631$) била јака а за узорке дебљине 20 mm ($R^2 = 0,6191$) била слаба (Слика 96. а, б, в, г, д).



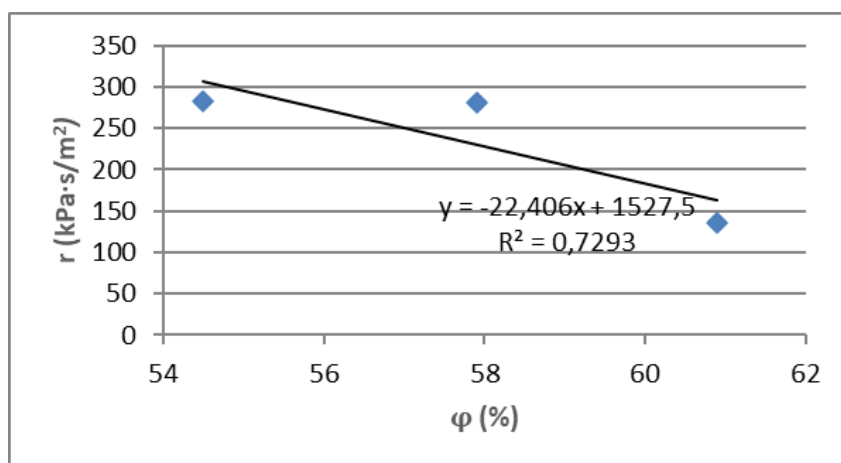
а) Линеарна корелација ϕ - r за дебљину узорак 10 mm



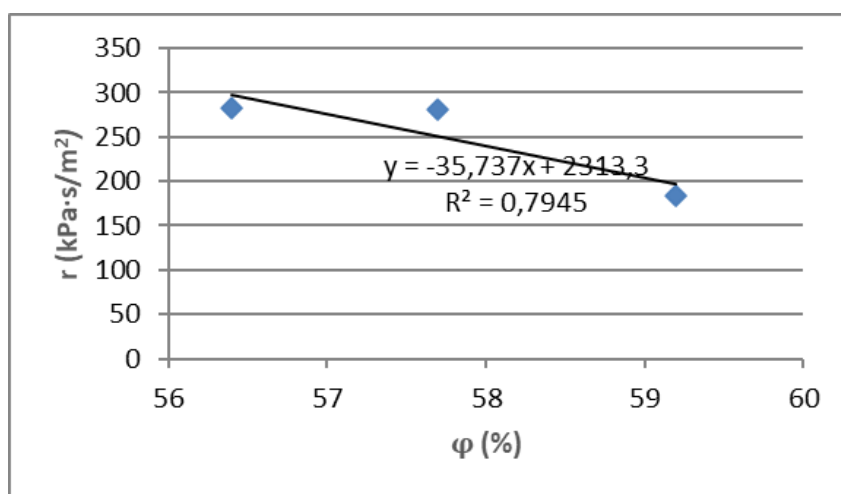
б) Линеарна корелација ϕ - r за дебљину узорак 20 mm



в) Линеарна корелација ϕ - r за дебљину узорака 30 mm

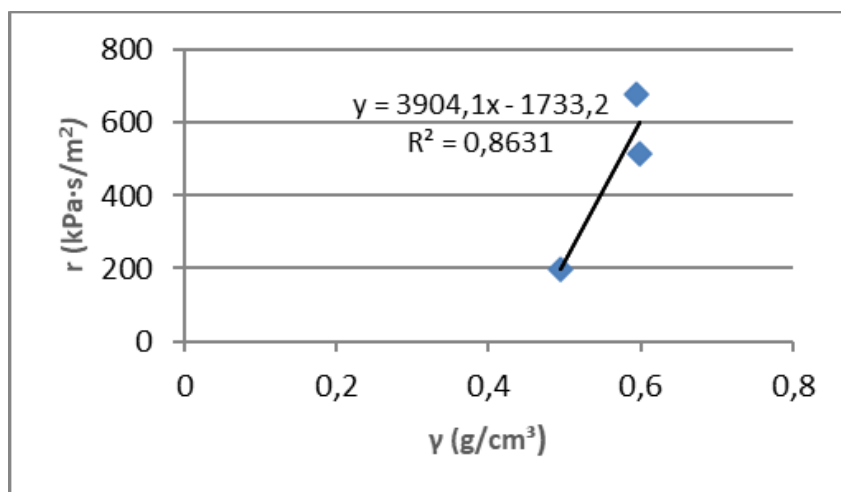


ђ) Линеарна корелација ϕ - r за дебљину узорака 40 mm

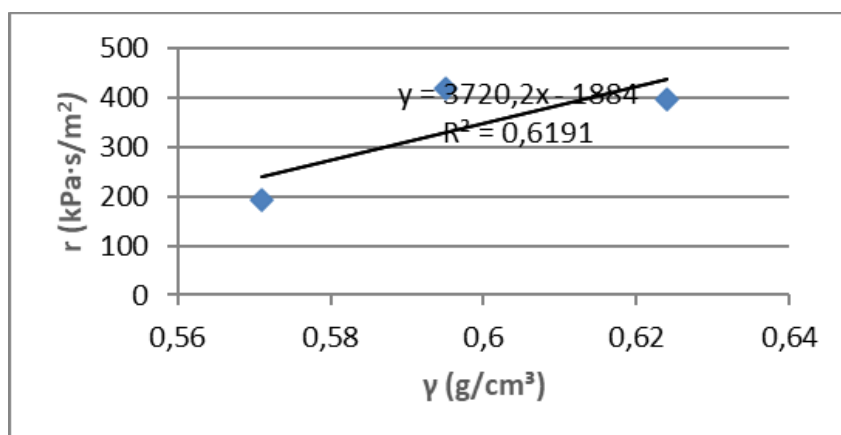


д) Линеарна корелација ϕ - r за дебљину узорака 50 mm

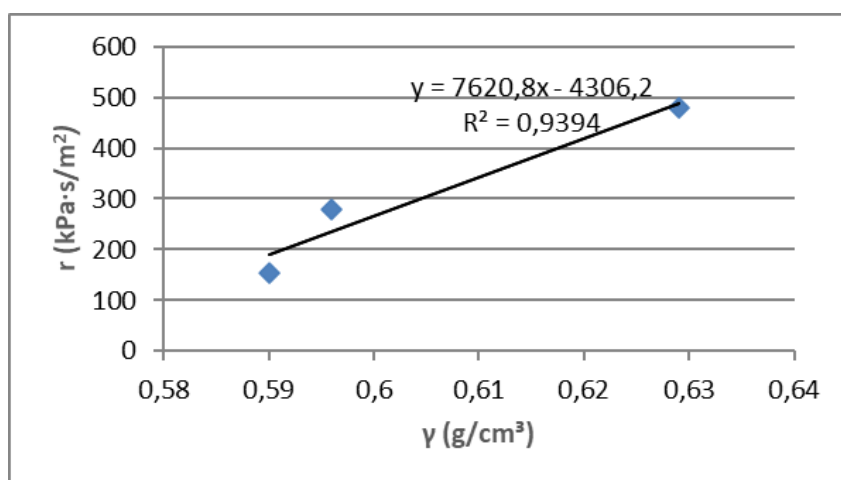
Слика 95. Графички приказ линеарне корелације ϕ - r по дебљинама узорака



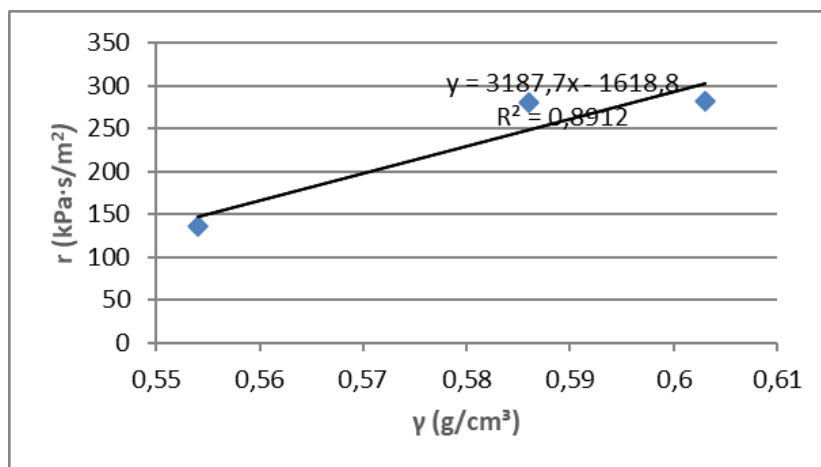
а) Линеарна корелација γ - r за дебљину узорака 10 mm



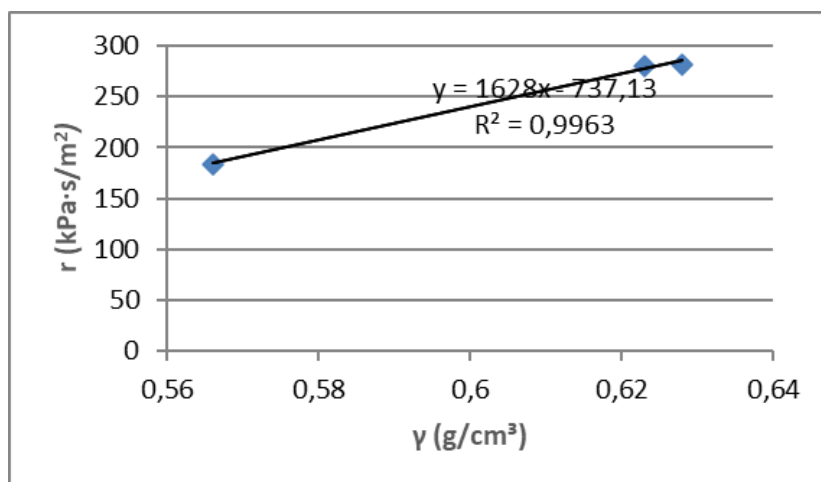
б) Линеарна корелација γ - r за дебљину узорака 20 mm



в) Линеарна корелација γ - r за дебљину узорака 30 mm



ѿ) Линеарна корелација γ - r за дебљину узорака 40 mm



д) Линеарна корелација γ - r за дебљину узорака 50 mm

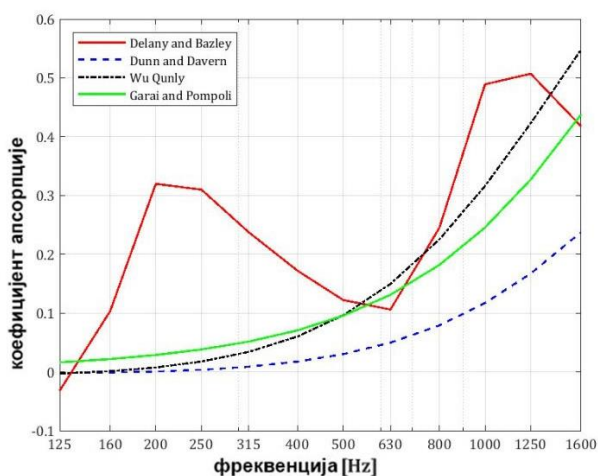
Слика 96. Графички приказ линеарне корелације γ - r по дебљинама узорака

На основу добијених вредности подужних (специфичних) отпора струјања ваздуха може се закључити какав је материјал са аспекта звучне изолације. Што је отпор струјања ваздуха већи, материјал је бољи звучни изолатор. У општем случају, где је прорачуната аритметичка средина подужног отпора струјања ваздуха за све дебљине узорака, као најбољи звучни изолатор се показао биокмозит П. Како би се прецизније одредила својства материјала по питању акустичких особина, може се одредити коефицијент апсорпције за сваки материјал.

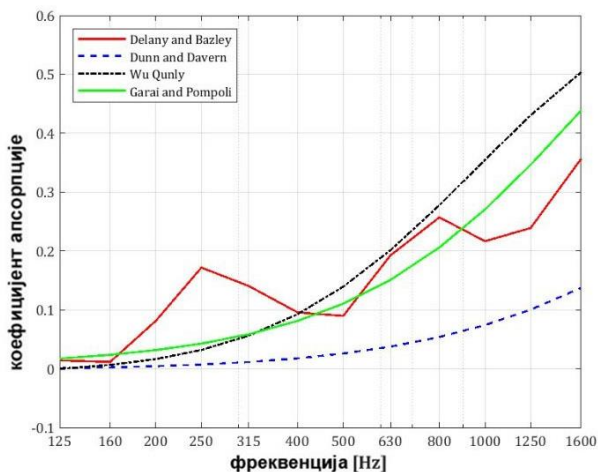
Вредности коефицијената апсорпције материјала могу се израчунати на основу подужног (специфичног) отпора струјања ваздуха применом различитих емпиријских модела. Основна предност емпиријских модела за одређивање коефицијента апсорпције α порозних материјала, огледа се у њиховој једноставности, јер имају један улазни параметар, подужну отпорност струјању ваздуха. Постоје два критеријума за

избор емпиријских модела и то на основу врсте материјала и вредности подужне отпорности струјању ваздуха. Прегледом литературе уочено је да су на овај начин ретко одређиване акустичке особине зрнастих материјала. У случају да не постоји модел за материјал који се испитује, усваја се модел за материјале који су по својој структури најсличнији испитиваном узорку. Са друге стране, јако је битно наћи модел који одговара опсегу вредности подужне специфичне отпорности струјању као што је измерено код испитиваног узорка материјала.

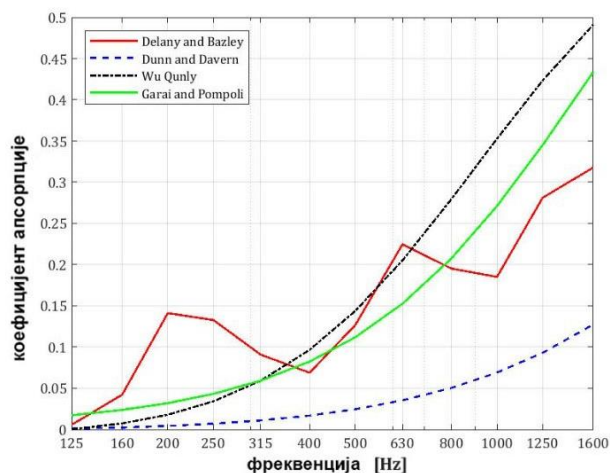
За потребе ове докторске дисертације урађена је упоредна анализа коефицијената апсорпције одређених применом четири различита емпиријска модела и то: Delany and Bazley [125], Dunn and Davern [126], Wu Qunly [128] и Garai and Pompoli [107]. Коефицијент апсорпције је одређен како за све три врсте тако и за свих пет дебљина биокмозита, при истим фреквенцијама (Слике 97-111.).



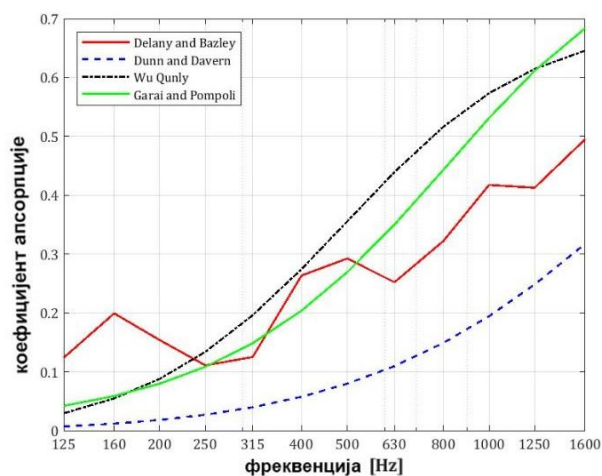
Слика 97. Упоредни приказ коефицијената апсорпције за биокмозит П дебљине узорка 10 mm



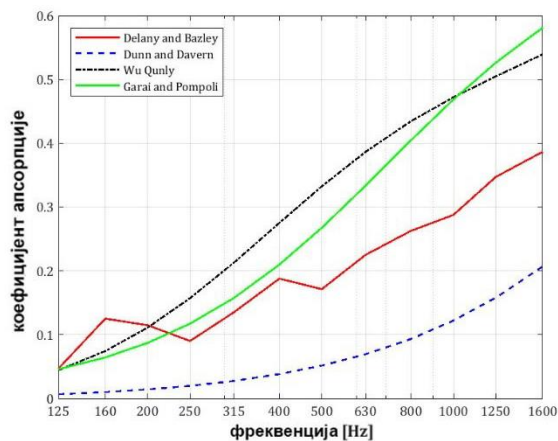
Слика 98. Упоредни приказ коефицијената апсорпције за биокмозит К дебљине узорка 10 mm



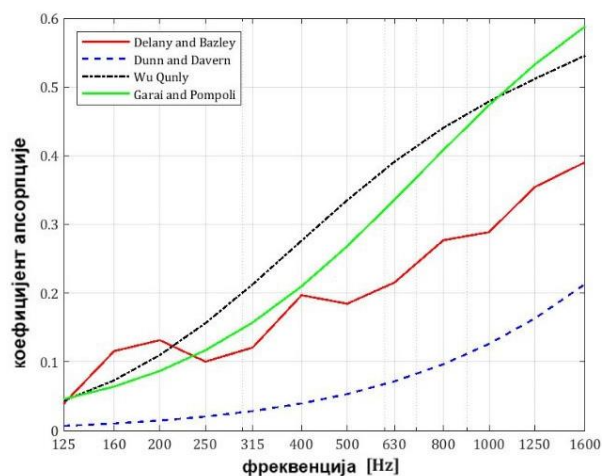
Слика 99. Упоредни приказ коефицијента апсорпције за биокомпозицију М дебљине узорка 10 mm



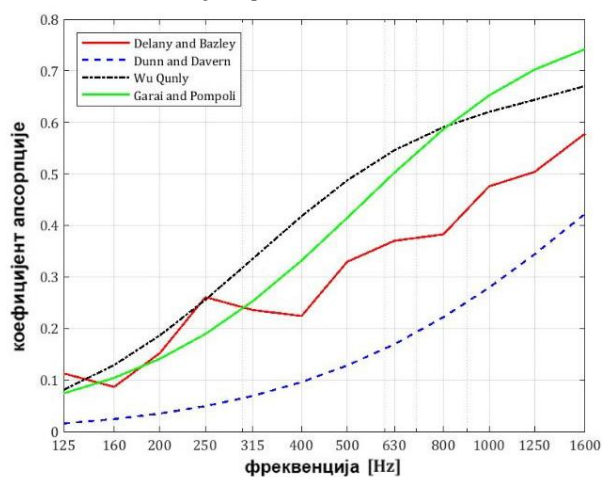
Слика 100. Упоредни приказ коефицијента апсорпције за биокомпозицију П дебљине узорка 20 mm



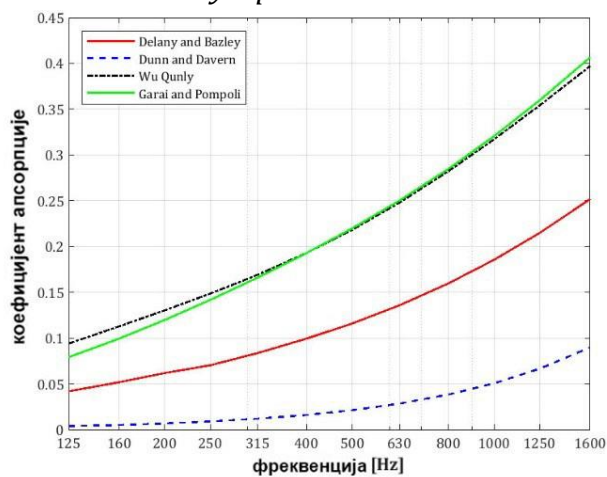
Слика 101. Упоредни приказ коефицијента апсорпције за биокомпозицију К дебљине узорка 20 mm



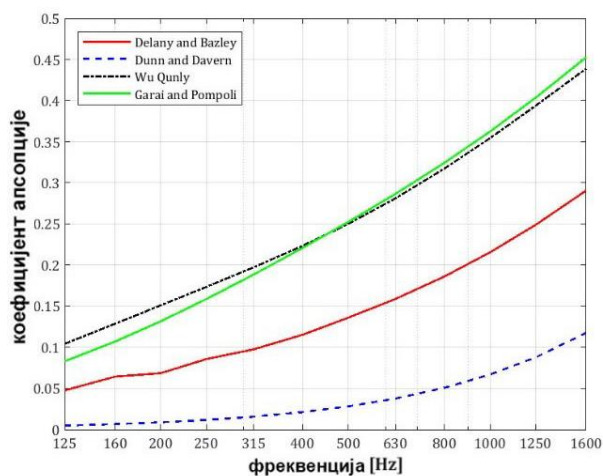
Слика 102. Ујоредни приказ коефицијената апсорпције за диокомјозић М дебљине узорака 20 mm



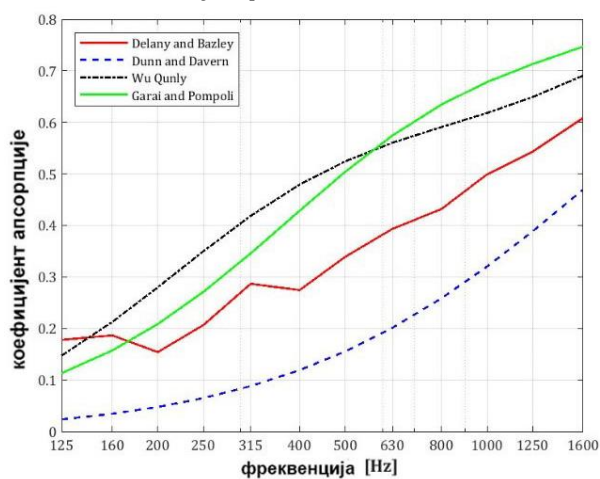
Слика 103. Ујоредни приказ коефицијената апсорпције за диокомјозић П дебљине узорака 30 mm



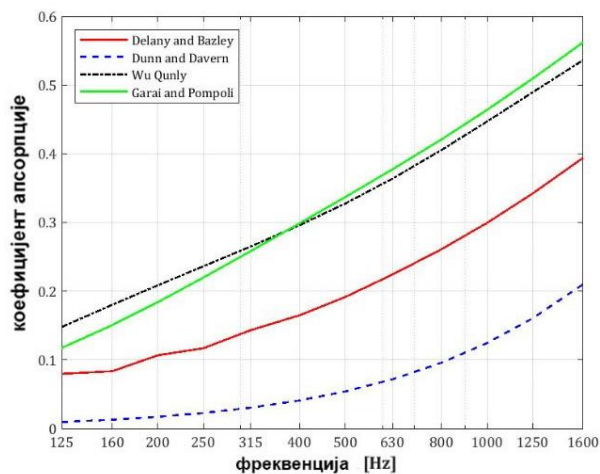
Слика 104. Ујоредни приказ коефицијената апсорпције за диокомјозић К дебљине узорака 30 mm



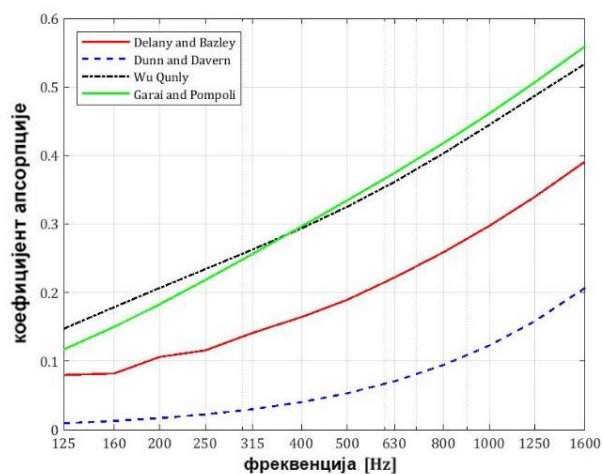
Слика 105. Ујоредни приказ коефицијенања апсорпције за биокомпозицију М дебљине узорака 30 mm



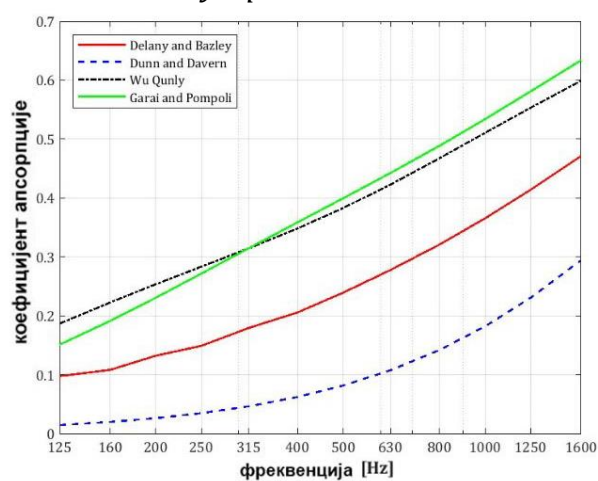
Слика 106. Ујоредни приказ коефицијенања апсорпције за биокомпозицију П дебљине узорака 40 mm



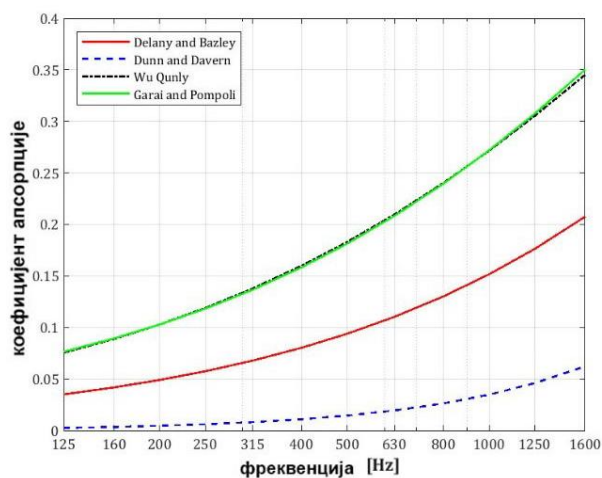
Слика 107. Ујоредни приказ коефицијенања апсорпције за биокомпозицију К дебљине узорака 40 mm



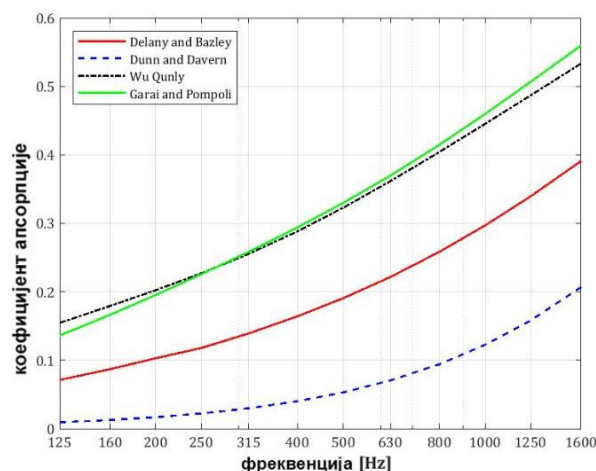
Слика 108. Ујоредни приказ коефицијената апсорпције за биокмјозић М дебљине узорака 40 mm



Слика 109. Ујоредни приказ коефицијената апсорпције за биокмјозић П дебљине узорака 50 mm



Слика 110. Ујоредни приказ коефицијената апсорпције за биокмјозић К дебљине узорака 50 mm



Слика 111. Упоредни приказ коефицијената апсорпције за биокмпозит М дебљине узорака 50 mm

Анализом графикона на којима су представљени коефицијенти апсорпције звука може се закључити да нема апсолутног поклапања коефицијената добијених применом четири различита емперијска модела. Најнижи коефицијент апсорпције за све три врсте и дебљине биокмпозита добијен је применом модела Dunn and Davern, док највише поклапања имају графикони добијени применом емперијских модела Garai and Pompoli и Wu Qunly, док је Delany and Bazley емперијски модел који код ове врсте материјала има највише одступања како у односу на друге моделе тако и у вредностима за исту дебљину различитих биокмпозита.

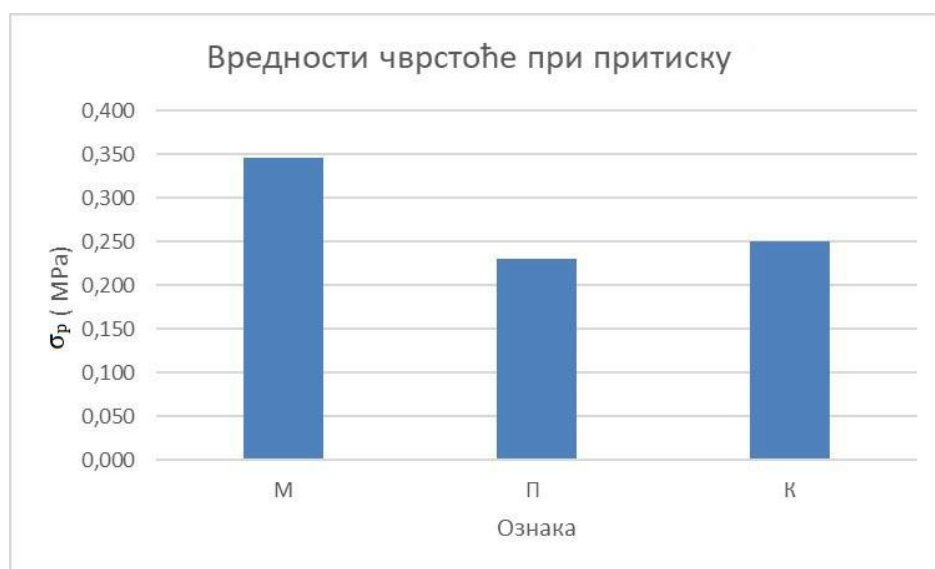
Међутим, велика је вероватноћа да вредности коефицијента апсорпције за испитиване материјале применом наведених емперијских модела не дају стварне вредности. Они само дају принципски оквир како се до тих вредности може доћи. Проблем се јавља у разлици у отпорности струјању ваздуха за материјале који су испитивани у односу на вредности при којима су ти модели формиран. Применом других модела или користећи методу најмањих квадрата могуће је одредити прецизније вредности коефицијената апсорпције. Међутим, додатном анализом предходно наведених могућности одређивања коефицијента апсорпције превазишао би се обим и захтеви ове докторске дисертације. Стога, овај део може представљати правац даљег истраживања у циљу унапређења нових биокмпозита и прорачуна коефицијента апсорпције звука.

Генерално, коефицијент апсорпције порозних материјала је мали на ниским фреквенцијама, а његова вредност се може повећати тако што се растојања између порозних материјала и зида (преграде) повећава. Максимални ефекат се постиже постављањем материјала на четвртину таласне дужине од зида а минимални на половини таласне дужине. Ако је материјал тањи од граничних вредности, онда се

мора узети у обзир и рефлексија због које се јављају стојећи таласи, па је брзина честица уз круту површину зида једнака нули, а максимум достиже тек на растојању $\lambda/4$ од зида. Као последица се може јавити смањење коефицијента апсорпције на нижим фреквенцијама.

6.4 ЧВРСТОЋА ПРИ ПРИТИСКУ

Биокомпозити који су подвргнути испитивању изложени су оптерећењу до граничних вредности притисне чврстоће при чему долази до деформација узорка. Две врсте биокомпозита М и П при оптерећењу су се понашале слично, тачније, долази до лома узорка у виду пукотина док су се узорци биокомпозита К приликом nanoшења оптерећења расипали. С обзиром да је чврстоћа при притиску испитивана на по три узорка за сваки биокомпозит, одређена је средња вредност која за мешавину М износи 0,346 МПа, за К 0,250 МПа док је вредност за биокомпозит П износила 0,230 МПа. Дијаграм вредности чврстоћа при притиску је приказан на слици 112. док су детаљнији резултати испитивања дати су у Прилогу 3.



Слика 112. Вредности чврстоће при притиску биокомпозита

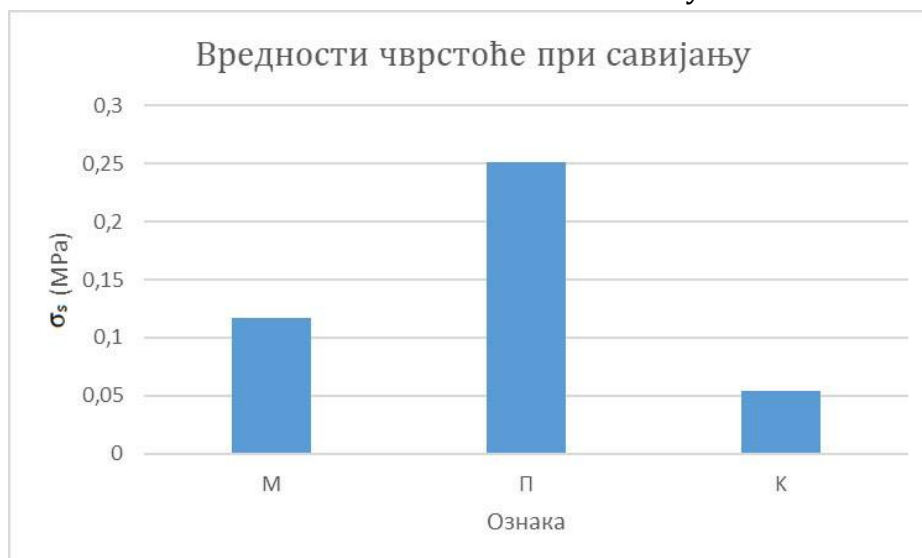
6.5 ЧВРСТОЋА ПРИ САВИЈАЊУ

Чврстоћа узорка на савијање одређена је на по пет узорка за сваки биокомпозит. Узорци су показали слично понашање приликом nanoшења оптерећења, односно у тренутку лома, без обзира на врсту биомасе од које су израђени. Сви узорци су имали крти лом, без деформација. Изглед узорка након лома приказан је на слици 113.



Слика 113. Лом узорка при испитивању чврстоће при савијању

Граничне вредности чврстоће биокompозита М утврђене приликом испитивања износе од 0,107 МПа до 0,138 МПа, за биокompозит П од 0,215 МПа до 0,287 МПа, док су вредности биокompозита К најниже и износе од 0,047 МПа до 0,058 МПа. На основу резултата (Прилог 4) уочава се да биокompозит П има највећу чврстоћу при савијању и то два пута већу од биокompозита М, односно за 100% већу чврстоћу на савијање од чврстоће биокompозита М и око пет пута већу од биокompозита К (Слика 114.). Ово се може оправдати чињеницом нехомогене структуре материјала, веће порозности композита М и К као и бољим паковањем и компактношћу биокompозита П.



Слика 114. Вредности чврстоће при савијању биокompозита

6.6 СПЕЦИФИЧНИ ТОПЛОТНИ КАПАЦИТЕТ

Специфични топлотни капацитет је израчунат на основу масеног удела и специфичног топлотног капацитета сваког материјала појединачно који улазе у састав биокмпозита. У Прилогу 5 су дати удели маса за по три узорка сва три биокмпозита. На основу ових вредности израчунат је средњи специфични топлотни капацитет за сваки биокмпозит применом обрасца (63). За биокмпозит П, C_{ps} износи 0,946 KJ/KgK, за биокмпозит К C_{ps} је 1,259 KJ/KgK, док је за биокмпозит М $C_{ps}=1,106$ KJ/KgK. На основу добијених резултата се може закључити да је биокмпозиту ознаке П потребно довести најмање топлоте како би се његова температура променила за 1K што би значило да ће се овај материјал са истом количином топлоте достићи највишу температуру у односу на остала два биокмпозита. Са друге стране, биокмпозит К ће имати најнижу температуру довођењем исте количине топлоте јер му је специфични топлотни капацитет највиши.

6.7 ТОПЛОТНА ПРОВОДЉИВОСТ

Применом наведеног израза (66) и измерених вредности топлотног флуksа и температура, добијене су вредности коефицијента топлотне проводљивости λ приказане у табели 18. и прилогу 7. Мерења су урађена на по три узорка за сваку дељину и за сва три биокмпозита М, П и К.

Табела 18. Вредности коеф. топлотне проводљивости биокмпозиција М, П и К

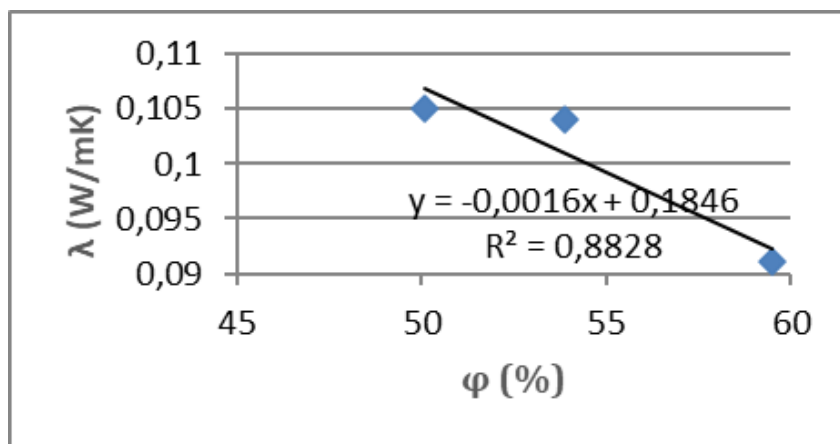
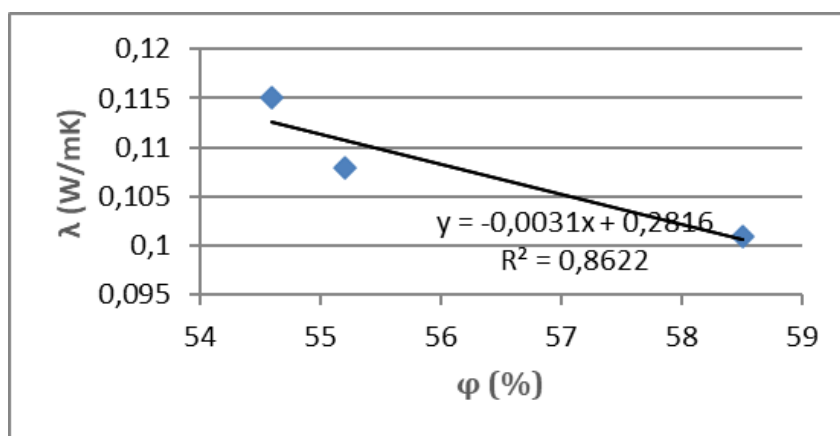
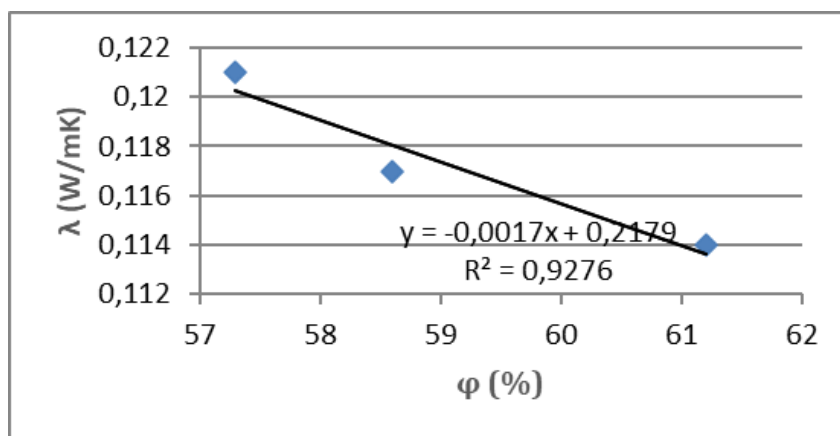
Ознака	Дебљина	Топлотни флуks	Коефицијент топлотне проводљивости
	d (mm)	q (W/m ²)	λ (W/mK)
М	10	105,0	0,105
П	10	104,0	0,104
К	10	91,0	0,091
М	20	57,5	0,115
П	20	54,0	0,108
К	20	50,5	0,101
М	30	39,0	0,117
П	30	40,3	0,121
К	30	38,0	0,114
М	40	30,3	0,121
П	40	30,3	0,121
К	40	29,5	0,118
М	50	23,8	0,119
П	50	28,2	0,141
К	50	25,0	0,125

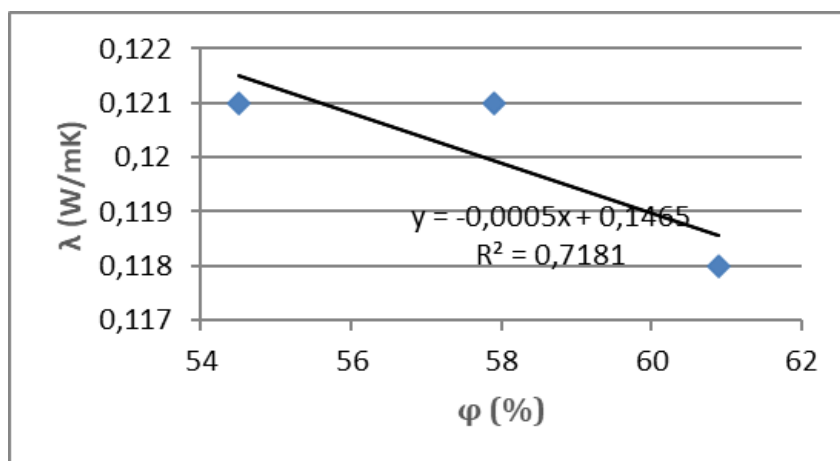
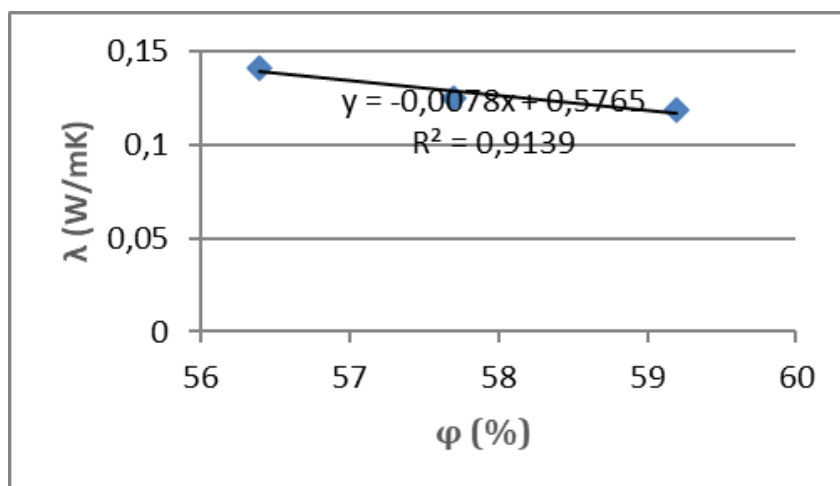
Анализирајући представљене резултате по дебљинама испитиваних биокомпозита може се уочити да са порастом топлотног флуksа узорак расте и коефицијент топлотне проводљивости. Насупрот томе, познавајући вредности порозности и коефицијента топлотне проводљивости а самим тим и топлотног флуksа, на основу кога је добијен коефицијент проводљивости (Табела 18.) може се приметити да са порастом порозности вредност коефицијента топлотне проводљивости опада. Разлог тога лежи у чињеници да већа вредност порозности значи више пора и шупљина, а самим тим и више ваздуха у структури узорка. С обзиром да ваздух има веома ниску топлотну проводљивост као и способност формирања џепова, заробљени ваздух делује као препрека топлотном протоку и спречава пренос топлоте кроз материјал. То значи да је бољи топлотни изолатор онај узорак који има више заробљеног ваздуха у својој структури, тачније, већу порозност и нижи коефицијент топлотне проводљивости.

Табела 19. Упоредна анализа порозности и коефицијента топлотне проводљивости биокомпозита М, П и К по дебљинама узорка

Ознака	Дебљина	Порозност	Коефицијент топлотне проводљивости
	d (mm)	φ (%)	λ (W/mK)
М	10	50,144	0,105
П	10	53,920	0,104
К	10	59,491	0,091
М	20	54,632	0,115
П	20	55,230	0,108
К	20	58,523	0,101
М	30	58,582	0,117
П	30	57,354	0,121
К	30	61,242	0,114
М	40	57,877	0,121
П	40	54,458	0,121
К	40	60,908	0,118
М	50	59,176	0,119
П	50	56,447	0,141
К	50	57,714	0,125

На основу резултата приказаних у табели 19. урађена је корелација ϕ - λ : Успостављена је јака линеарна корелација код свих узорак различитог састава и истих дебљина, што је било и очекивано али је овим потврђена зависност ова два параметра. За узорке са дебљином од 10 mm, $R^2 = 0,8828$; за 20 mm, $R^2 = 0,8622$; за 30 mm, $R^2 = 0,9276$; за 40 mm, $R^2 = 0,7181$; за 50 mm, $R^2 = 0,9139$ (Слике 115-119.).

Слика 115. Линеарна корелација φ - λ за дебљину узорака 10mmСлика 116. Линеарна корелација φ - λ за дебљину узорака 20mmСлика 117. Линеарна корелација φ - λ за дебљину узорака 30mm

Слика 118. Линеарна корелација ϕ - λ за дебљину узорка 40mmСлика 119. Линеарна корелација ϕ - λ за дебљину узорка 50mm

6.8 СТАНДАРДНА ДЕВИЈАЦИЈА

Разлике које се јављају у добијеним резултатима (Табела 20.), за исте биокompозите а различите дебљине узорка оправдане су већ споменутом чињеницом нехомогене структуре, као најутицајнијег фактора. Осим тога разлике се јављају и услед потешкоћа која се јављају приликом уграђивања материјала, разлика у порозности самог агрегата, као и могућности појаве грешака приликом мерења одређених величина. Све наведено се подводи под вредности стандардне девијације (СД) чије су вредности за различите параметре приказане у табелама 21-24. и на дијаграмима 120-123. На основу добијених СД резултата може се закључити да разлике између вредности за исту дебљину и врсту биокompозита нису значајне и у опсегу су грешке за сваку од испитиваних карактеристика.

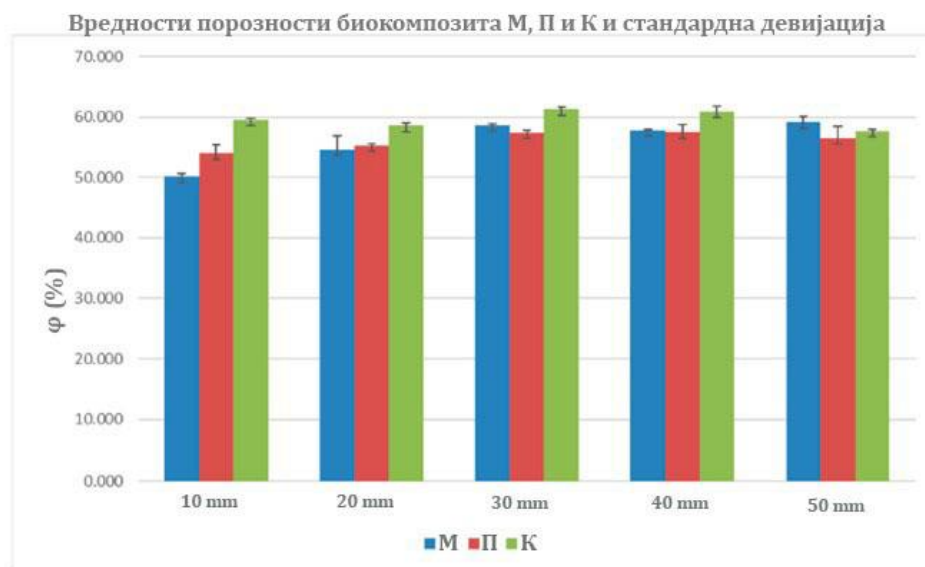
Табела 20. Резултати испитивања својстава биокмозија П, К и М

Ознака	Дебљина узорака	Порозност	Запреминска маса	Упијање воде	Топл. флуks	Коеф. топл. провод.	Подужна спец. отп. струјању ваздуха
	d (mm)	ϕ (%)	γ (g/cm ³)	Uv (%)	q (W/m ²)	λ (W/mK)	τ (kPa·s/m ²)
М	10	50,144	0,594	84,668	105,0	0,105	678,284
Р	10	53,920	0,598	90,250	104,0	0,104	512,570
К	10	59,491	0,495	120,332	91,0	0,091	195,726
М	20	54,632	0,595	91,951	57,5	0,115	418,831
Р	20	55,230	0,624	88,500	54,0	0,108	396,996
К	20	58,523	0,571	111,342	50,5	0,101	191,404
М	30	58,582	0,596	98,263	39,0	0,117	279,409
Р	30	57,354	0,629	91,135	40,3	0,121	480,612
К	30	61,242	0,590	114,869	38,0	0,114	153,228
М	40	57,877	0,586	98,854	30,3	0,121	280,650
Р	40	54,458	0,603	95,484	30,3	0,121	282,743
К	40	60,908	0,554	118,465	29,5	0,118	136,195
М	50	59,176	0,566	104,769	23,8	0,119	184,019
Р	50	56,447	0,628	90,172	28,2	0,141	281,983
К	50	57,714	0,623	96,569	25,0	0,125	280,642

Табела 21. Стандардна девијација вредности порозности за три биокмозита

d (mm)	Порозност М (%)	Станд. дев.	Порозност П (%)	Станд. дев.	Порозност К (%)	Станд. дев.
10	50,144	0,466	53,920	1,451	59,528	0,289
20	54,632	2,193	55,230	0,326	58,523	0,463
30	58,582	0,306	57,354	0,490	61,242	0,360
40	57,877	0,070	57,458	1,317	60,908	0,828
50	59,177	0,966	56,447	1,923	57,714	0,210

Када говоримо о стандардној девијацији порозности биокмозита М може се видети да је њена највећа вредност код узорака дебљине 20 mm а најмања код узорака 40 mm. Ако посматрамо биокмозит П уочавамо да је ова вредност највећа код узорака дебљине 50 mm а најнижа код дебљине 20 mm, док биокмозит К има највишу вредност за дебљину узорака 40 mm а најнижу за дебљину 50 mm.

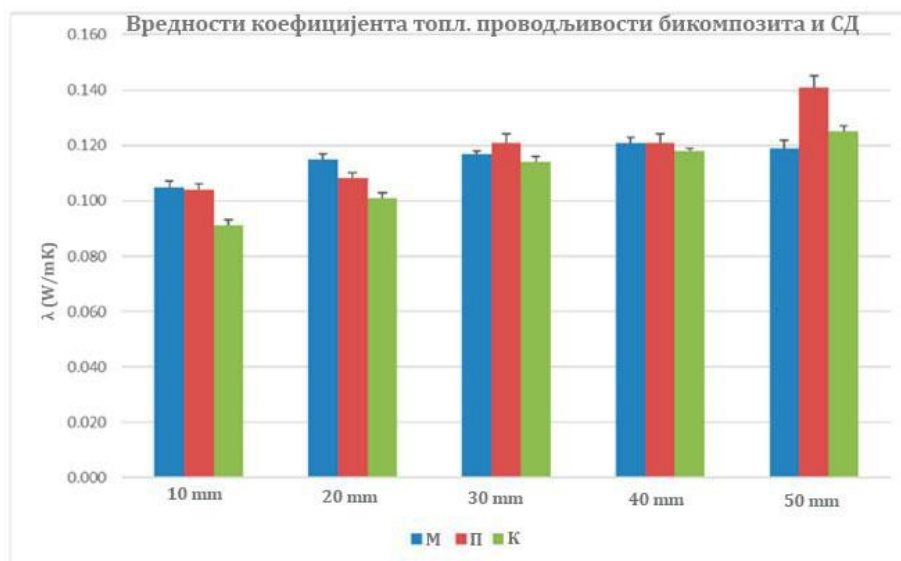


Слика 120. Вредности порозности за биокомпозите М, П и К по дебелинама

Табела 22. Стандардна девијација вредности коефицијента топлотне проводљивости за шри биокомпозита

d (mm)	Коеф. топ. пров. М (W/m·K)	Станд. дев.	Коеф. топ. пров. П (W/m·K)	Станд. дев.	Коеф. топ. пров. К (W/m·K)	Станд. дев.
10	0,105	0,002	0,104	0,002	0,091	0,002
20	0,115	0,002	0,108	0,002	0,101	0,002
30	0,117	0,001	0,121	0,003	0,114	0,002
40	0,121	0,002	0,121	0,003	0,118	0,001
50	0,119	0,003	0,141	0,004	0,125	0,002

Када говоримо о стандардној девијацији коефицијента топлотне проводљивости биокомпозита М може се видети да је њена највећа вредност код узорака дебљине 50mm а најмања код узорака 30 mm. Посматрањем биокомпозита П уочавамо да је ова вредност највећа код узорака дебљине 50 mm а најнижа код дебелина 10 mm и 20 mm, док се код биокомпозита К једино разликује вредност код узорака што уједно представља и најнижу вредност.

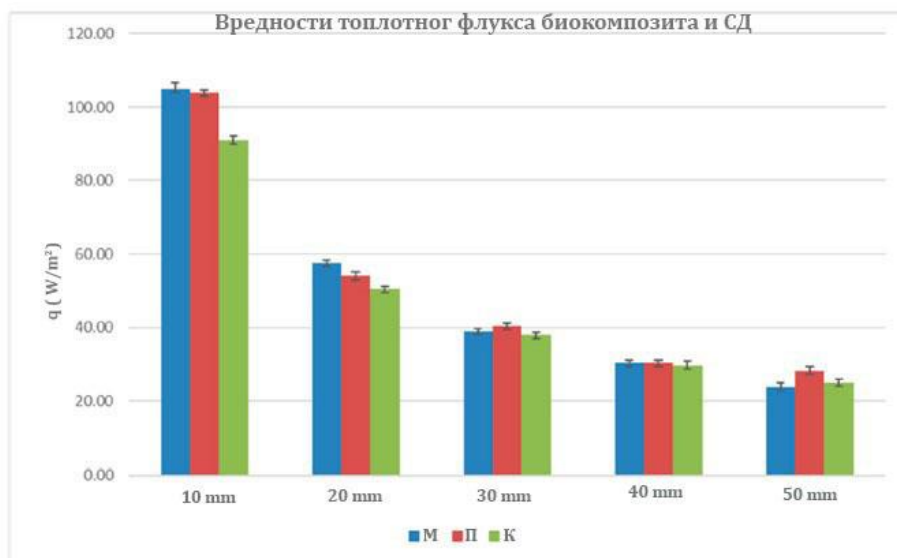


Слика 121. Вредности коефицијента топлојне проводљивости за биокмпозиће М, П и К по дебљинама

Табела 23. Стандардна девијација вредности топлојног флуksа за три биокмпозића

d (mm)	Топл. флуks М (W/m ²)	Станд. дев.	Топл. флуks П (W/m ²)	Станд. дев.	Топл. флуks К (W/m ²)	Станд. дев.
10	105,00	1,521	104,00	0,705	91,00	1,254
20	57,50	0,739	54,00	1,028	50,50	0,603
30	39,00	0,552	40,33	0,741	38,00	0,644
40	30,25	0,793	30,25	0,879	29,50	1,191
50	23,80	1,161	28,20	1,013	25,00	0,838

Анализом стандардне девијације топлотног флуksа биокмпозита М утврђено је да највећу вредност имају узорци дебљине 10 mm док је њена најнижа вредност код узорака дебљине 30 mm. Посматрањем биокмпозита П уочавамо да је вредност СД највећа код узорака дебљине 50 mm а најнижа код дебљине 10 mm, док се код биокмпозит К највиша вредност уочава при дебљини узорака од 10 mm а најнижа при дебљини од 20 mm.

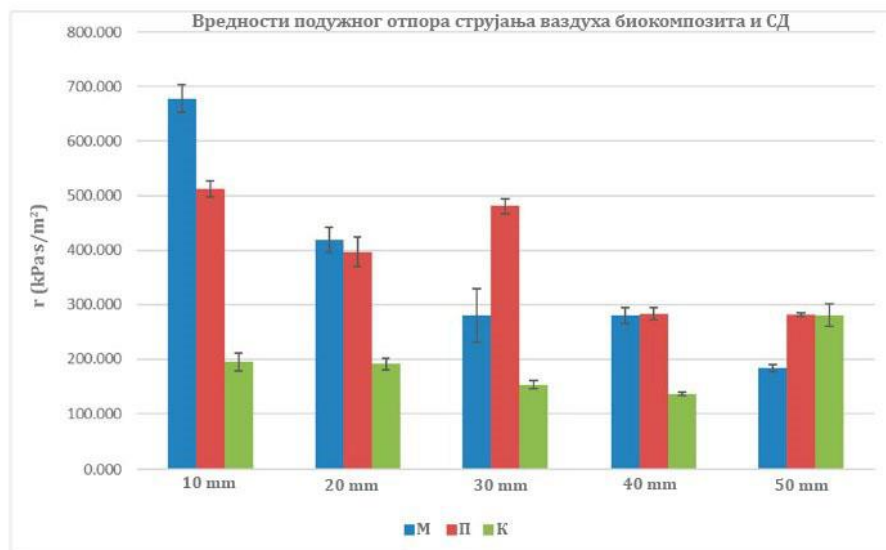


Слика 122. Вредности топлотног флуksа за биокомпозите М, П и К по дебљинама

Табела 24. Стандардна девијација вредности подужне отпорности струјању ваздуха за три биокомпозита

d (mm)	Под. спец. отпорност М (kPa·s/m²)	Станд. дев.	Под. спец. отпорност П (kPa·s/m²)	Станд. дев.	Под. спец. отпорност К (kPa·s/m²)	Станд. дев.
10	678,286	25,480	512,570	14,421	195,726	16,419
20	418,831	22,674	396,996	27,154	191,404	10,694
30	279,409	49,175	480,612	13,963	153,228	8,076
40	280,650	14,568	282,743	11,437	136,186	2,988
50	184,019	6,247	281,983	2,870	280,642	20,166

Прегледом добијених резултата стандардне девијације подужне отпорности струјању ваздуха биокомпозита М утврђено је да највећу вредност имају узорци дебљине 30 mm (то уједно представља и највећу вредност стандардне девијације за ову величину од свих посматраних узорака) док је њена најнижа вредност код узорака дебљине 50 mm. Анализом биокомпозита П уочавамо да је вредност СД највећа код узорака дебљине 20 mm а најнижа код дебљине 50 mm, док се код биокомпозита К највиша вредност уочава при дебљини узорака од 50 mm а најнижа при дебљини од 40 mm.



Слика 123. Вредности подужног отпора струјања ваздуха за биокомполитне М, П и К по дебљинама

6.9 ДИФУЗИЈА ВОДЕНЕ ПАРЕ И ЕНЕРГЕТСКА ЕФИКАСНОСТ

Вредности отпора дифузији водене паре су одређене према стандарду SRPS EN 12086:2013 [150] на 5 узорака, за услове 23-0/50 и средње вредности су приказане у табели 25:

Табела 25. Вредности отпора дифузији водене паре

Биокомполит	μ (-)
П	5,1
М	6,7
К	7,8

Прорачун топлотне проводљивости и дифузије водене паре за изабране склопове који чине спољашњи зид је дат у наставку рада.

1) Зидни склоп 1

А) ТИ биокомполит П/КЕРАМИЧКИ БЛОК

Карактеристике зидног склопа са ТИ ознаке П, дебљине 50 mm и **керамичким блоком** као основним материјалом дат је у табели 26:

Табела 26: Зидни склоп са ТИ ознаке П и керамичким блоком као основним материјалом

	Слојеви	d (m)	λ (W/mK)	μ	R (W/m ² K)
	и				0,125
1	продужни малтер	0,02	0,85	15	0,024
2a	керамички блок	0,19	0,61	6	0,311
2b	цементно-кречни малтер	0,19	0,87	15	0,218
3	ТИ материјал (П)	0,05	0,141	5,1	0,355
4	спољни завршни малтер	0,03	0,87	15	0,034
	е				0,04

Вредност коефицијента топлотне проводљивости "U" за приказани склоп је:

$$U = 1,138 \text{ m}^2\text{K/W}$$

Уколико би се уместо биокмпозита ставио ЕПС исте дебљине овај коефицијент би износио $U = 0,572 \text{ m}^2\text{K/W}$, а уколико би се уместо биокмпозита ставила камена вуна исте дебљине овај коефицијент би износио $U = 0,490 \text{ m}^2\text{K/W}$. Из предходно наведеног се закључује да је коефицијент топлотне проводљивости зида од керамичког блока и биокмпозитом П као термоизолационим материјалом око два пута већи него склопови са ЕПС и каменом вуном. Тачније, то би значило да је такав склоп по питању термоизолације два пута лошији од зидова са ЕПС и каменом вуном. Да би се постигле наведене вредности коефицијента топлотне проводљивости и са биокмпозитом потребно је поставити материјал са следећим дебљинама: 0,17 m у поређењу са ЕПС и 0,21 m у односу на камену вуну.

Прорачун дифузије водене паре

Прорачун дифузије водене паре приказан је у наредној табели 27:

Табела 27. Прорачун дифузије водене паре за склоп 1 са керамичким блоком

	Слојеви	d (m)	λ (W/mK)	μ	R (W/m ² K)	r (m)	t (°C)	p' (kPa)	p (kPa)
	и				0,125		20,00 15,12	2,337 1,716	1,285 1,285
1	продужни малтер	0,02	0,85	15	0,024	0,30	15,12 14,20	1,716 1,618	1,285 1,127
2	керамички блок	0,19	0,61	6	0,311	1,14	14,20 2,05	1,618 0,710	1,127 0,525
3	ТИ материјал (П)	0,05	0,141	5,1	0,355	0,26	2,05 -11,79	0,710 0,221	0,525 0,390
4	спољни завршни малтер	0,03	0,87	15	0,034	0,45	-11,79 -13,14	0,221 0,196	0,390 0,152
	е				0,04		-13,14 -14,70	0,196 0,169	0,152 0,152

Услови за прорачун дифузије водене паре су следећи: $t_i = -14,7^\circ\text{C}$, $\phi_i = 55\%$, $\phi_e = 90\%$. Из приложене табеле се може видети да се кондензација јавља између 3. и 4. слоја ($p > p'$) и при прорачуну она ће се исушити за 23 дана што се уклапа у дозвољене вредности предвиђене Правилником [147].

Б) ТИ биокompозит П/БЕТОНСКО ПЛАТНО

Карактеристике зидног склопа са ТИ ознаке **П**, дебљине 50 mm и **бетонским платном** као основним материјалом дат је у табели 28:

Табела 28. Зидни склоп са ТИ ознаке П и бетонским платном као основним материјалом

	Слојеви	d (m)	λ (W/mK)	μ	R (W/m ² K)
	и				0,125
1	продужни малтер	0,02	0,85	15	0,024
2	бетонско платно	0,1	2,04	60	0,049
3	ТИ материјал (П)	0,05	0,141	5,1	0,355
4	спољни завршни малтер	0,03	0,87	15	0,034
	е				0,04

Вредност коефицијента топлотне проводљивости "U" за приказани склоп је:

$$U = 1,596 \text{ m}^2\text{K/W}$$

Уколико би се уместо биокompозита ставио ЕПС исте дебљине овај коефицијент би износио $U = 0,670 \text{ m}^2\text{K/W}$, а уколико би се уместо биокompозита ставила камена вуна исте дебљине овај коефицијент би износио $U = 0,559 \text{ m}^2\text{K/W}$. Из предходно наведеног се закључује да је коефицијент топлотне проводљивости зида од бетонског платна и са биокompозитом П као термоизолационим материјалом око два и по пута већи него склопови са ЕПС и каменом вуном. Да би се постигле наведене вредности коефицијента топлотне проводљивости и са биокompозитом потребно је поставити материјал са следећим дебљинама: 0,17 m у случају ЕПС и 0,21 m у случају камене вуне.

Прорачун дифузије водене паре

Прорачун дифузије водене паре приказан је у наредној табели 29:

Табела 29: Прорачун дифузије водене паре за склоп 1 са бејтонским илајном

	Слојеви	d (m)	λ (W/mK)	μ	R (W/m ² K)	r (m)	t(°C)	p'(kPa)	p(kPa)
	и				0,125		20,00 13,08	2,337 1,506	1,285 1,285
1	продужни малтер	0,02	0,85	15	0,024	0,30	13,08 11,78	1,506 1,384	1,285 1,237
2	бетонско платно	0,1	2,04	60	0,049	6,00	11,78 9,06	1,384 1,156	1,237 0,266
3	ТИ материјал (П)	0,05	0,141	5,1	0,355	0,26	9,06 -10,58	1,156 0,245	0,266 0,225
4	спољни завршни малтер	0,03	0,87	15	0,034	0,45	-10,58 -12,49	0,245 0,207	0,225 0,152
	е				0,04		-12,49 -14,70	0,207 0,169	0,152 0,152

Из предходно наведене табеле се може видети да у овом склопу нема кондензације.

2) Зидни склоп 2 - ТИ биокмпозит М

А) ТИ биокмпозит М/КЕРАМИЧКИ БЛОК

Карактеристике зидног склопа са ТИ ознаке **М**, дебљине 50 mm и **керамичким блоком** као основним материјалом дат је у табели 30:

Табела 30. Зидни склоп са ТИ ознаке М и керамичким блоком као основним материјалом

	Слојеви	d (m)	λ (W/mK)	μ	R (W/m ² K)
	и				0,125
1	продужни малтер	0,02	0,85	15	0,024
2a	керамички блок	0,19	0,61	6	0,311
2b	цементно-кречни малтер	0,19	0,87	15	0,218
3	ТИ материјал (М)	0,05	0,119	6,7	0,420
4	спољни завршни малтер	0,03	0,87	15	0,034
	е				0,04

Вредност коефицијента топлотне проводљивости "U" за приказани склоп је:

$$U = 1,058 \text{ m}^2\text{K/W}$$

Уколико би се уместо биокомпозита ставио ЕПС исте дебљине овај коефицијент би износио $U = 0,572 \text{ m}^2\text{K/W}$, а уколико би се уместо биокомпозита ставила камена вуна исте дебљине овај коефицијент би износио $U = 0,490 \text{ m}^2\text{K/W}$. Из предходно наведеног се закључује да је коефицијент топлотне проводљивости зида од керамичког блока и са биокомпозитом М као термоизолационим материјалом око два пута већи него склопови са ЕПС и каменом вуном. Тачније то би значило да је такав склоп по питању термоизолације два пута лошији од зидова са ЕПС и каменом вуном. Да би се постигле наведене вредности коефицијента топлотне проводљивости и са биокомпозитом потребно је поставити материјал са следећим дебљинама: 0,15 m за ЕПС и 0,18 m за камену вуну.

Прорачун дифузије водене паре

Прорачун дифузије водене паре приказан је у наредној табели 31:

Табела 31. Прорачун дифузије водене паре за склоп 2 са керамичким блоком

	Слојеви	d (m)	λ (W/mK)	μ	R (W/m ² K)	r (m)	t(°C)	p' (kPa)	p (kPa)
	и				0,125		20,00 15,46	2,337 1,760	1,285 1,285
1	продужни малтер	0,02	0,85	15	0,024	0,30	15,46 14,60	1,760 1,661	1,285 1,133
2	керамички блок	0,19	0,61	6	0,311	1,14	14,60 3,28	1,661 0,774	1,133 0,552
3	ТИ материјал (М)	0,05	0,119	6,7	0,420	0,34	3,28 -11,99	0,774 0,217	0,552 0,381
4	спољни завршни малтер	0,03	0,87	15	0,034	0,45	-11,99 -13,25	0,217 0,193	0,381 0,152
	е				0,04		-13,25 -14,70	0,193 0,169	0,152 0,152

Услови за прорачун дифузије водене паре су следећи: $t_i = -14,7^\circ\text{C}$, $\phi_i = 55\%$, $\phi_e = 90\%$.

Из приложене табеле се може видети да се кондензација јавља између 3. и 4. слоја ($p > p'$) и при прорачуну она ће се исушити за 22 дана што се уклапа у дозвољене вредности.

Б) ТИ биокompозит М/БЕТОНСКО ПЛАТНО

Карактеристике зидног склопа са ТИ ознаке **М**, дебљине 50 mm и **бетонским платном** као основним материјалом дат је у табели 32:

Табела 32. Зидни склоп са ТИ ознаке М и бетонским платном као основним материјалом

	Слојеви	d (m)	λ (W/mK)	μ	R (W/m ² K)
	и				0,125
1	продужни малтер	0,02	0,85	15	0,024
2	бетонско платно	0,1	2,04	60	0,049
3	ТИ материјал (М)	0,05	0,119	6,7	0,420
4	спољни завршни малтер	0,03	0,87	15	0,034
	е				0,04

Вредност коефицијента топлотне проводљивости "U" за приказани склоп је:

$$U = 1,444 \text{ m}^2\text{K/W}$$

Уколико би се уместо биокompозита ставио ЕПС исте дебљине овај коефицијент би износио $U = 0,670 \text{ m}^2\text{K/W}$, а уколико би се уместо биокompозита ставила камена вуна исте дебљине овај коефицијент би износио $U = 0,559 \text{ m}^2\text{K/W}$. Из предходно наведеног се закључује да је коефицијент топлотне проводљивости зида од бетонског платна и са биокompозитом М као термоизолационим материјалом од два до два и по пута већи него склопови са ЕПС и каменом вуном. Тачније то би значило да је такав склоп по питању термоизолације два и по пута лошији од зидова са ЕПС и каменом вуном. Да би се постигле наведене вредности коефицијента топлотне проводљивости и са биокompозитом потребно је поставити материјал са следећим дебљинама: 0,15 m за ЕПС и 0,18 m за камену вуну.

Прорачун дифузије водене паре

Прорачун дифузије водене паре приказан је у наредној табели 33:

Табела 33. Прорачун дифузије водене паре за склоп 2 са бетонским платном

	Слојеви	d (m)	λ (W/mK)	μ	R (W/m ² K)	r (m)	T (°C)	p' (kPa)	p (kPa)
	и				0,125		20,00 13,73	2,337 1,568	1,285 1,285
1	продужни малтер	0,02	0,85	15	0,024	0,30	13,73 12,55	1,568 1,458	1,285 1,237
2	бетонско платно	0,1	2,04	60	0,049	6,00	12,55 10,10	1,458 1,236	1,237 0,278
3	ТИ материјал (М)	0,05	0,119	6,7	0,420	0,34	10,10 -10,97	1,236 0,237	0,278 0,224
4	спољни завршни малтер	0,03	0,87	15	0,034	0,45	-10,97 -12,69	0,237 0,204	0,224 0,152
	е				0,04		-12,69 -14,70	0,204 0,169	0,152 0,152

Из предходно наведене табеле се може видети да у овом склопу нема кондензације.

3) Зидни склоп 3 - ТИ биокмпозит К

А) ТИ биокмпозит К/КЕРАМИЧКИ БЛОК

Карактеристике зидног склопа са ТИ ознаке **К**, дебљине 50 mm и **керамичким блоком** као основним материјалом дат је у табели 34:

Табела 34. Зидни склоп са ТИ ознаке К и керамичким блоком као основним материјалом

	Слојеви	d (m)	λ (W/mK)	μ	R (W/m ² K)
	и				0,125
1	продужни малтер	0,02	0,85	15	0,024
2a	керамички блок	0,19	0,61	6	0,311
2b	цементно-кречни малтер	0,19	0,87	15	0,218
3	ТИ материјал (К)	0,05	0,125	7,8	0,400
4	спољни завршни малтер	0,03	0,87	15	0,034
	е				0,04

Вредност коефицијента топлотне проводљивости "U" за приказани склоп је:

$$U = 1,082 \text{ m}^2\text{K/W}$$

Уколико би се уместо биокompозита ставио ЕПС исте дебљине овај коефицијент би износио $U = 0,572 \text{ m}^2\text{K/W}$, а уколико би се уместо биокompозита ставила камена вуна исте дебљине овај коефицијент би износио $U = 0,490 \text{ m}^2\text{K/W}$. Из предходно наведеног се закључује да је коефицијент топлотне проводљивости зида од керамичког блока и са биокompозитом К као термоизолационим материјалом око два пута већи него склопови са ЕПС и каменом вуном. Тачније то би значило да је такав склоп по питању термоизолације два пута лошији од зидова са ЕПС и каменом вуном. Да би се постигле наведене вредности коефицијента топлотне проводљивости и са биокompозитом потребно је поставити материјал са следећим дебљинама: 0,16 m за ЕПС и 0,19 m за камену вуну.

Прорачун дифузије водене паре

Прорачун дифузије водене паре приказан је у наредној табели 35:

Табела 35. Прорачун дифузије водене паре за склоп 2 са керамичким блоком

	Слојеви	d (m)	λ (W/mK)	μ	R (W/m ² K)	r (m)	T (°C)	p' (kPa)	p (kPa)
	и				0,125		20,00 15,36	2,337 1,749	1,285 1,285
1	продужни малтер	0,02	0,85	15	0,024	0,30	15,36 14,48	1,749 1,650	1,285 1,136
2а	керамички блок	0,19	0,61	6	0,311	1,14	14,48 2,92	1,650 0,752	1,136 0,570
3	ТИ материјал (К)	0,05	0,125	7,8	0,400	0,39	2,92 -11,93	0,752 0,219	0,570 0,376
4	спољни завршни малтер	0,03	0,87	15	0,034	0,45	-11,93 -13,21	0,219 0,195	0,376 0,152
	е				0,04		-13,21 -14,70	0,195 0,169	0,152 0,152

Услови за прорачун дифузије водене паре су следећи: $t_i = -14,7^\circ\text{C}$, $\phi_i = 55\%$, $\phi_e = 90\%$.

Из приложене табеле се може видети да се кондензација јавља између 3. и 4. слоја ($p > p'$) и при прорачуну она ће се исушити за 15 дана што се уклапа у дозвољене вредности.

Б) ТИ биокompозит К/БЕТОНСКО ПЛАТНО

Карактеристике зидног склопа са ТИ ознаке К, дебљине 50 mm и бетонским платном као основним материјалом дат је у табели 36:

Табела 36. Зидни склоп са ТИ ознаке К и бейонским њлајном као основним материјалом

	Слојеви	d (m)	λ (W/mK)	μ	R (W/m ² K)
	и				0,125
1	продужни малтер	0,02	0,85	15	0,024
2	бетонско платно	0,1	2,04	60	0,049
3	ТИ материјал (К)	0,05	0,125	7,8	0,400
4	спољни завршни малтер	0,03	0,87	15	0,034
	е				0,04

Вредност коефицијента топлотне проводљивости "U" за приказани склоп је:

$$U = 1,488 \text{ m}^2\text{K/W}$$

Уколико би се уместо биокмпозита ставио ЕПС исте дебљине овај коефицијент би износио $U = 0,670 \text{ m}^2\text{K/W}$, а уколико би се уместо биокмпозита ставила камена вуна исте дебљине овај коефицијент би износио $U = 0,559 \text{ m}^2\text{K/W}$. Из предходно наведеног се закључује да је коефицијент топлотне проводљивости зида од бетонског платна и са биокмпозитом К као термоизолационим материјалом око два и по пута већи него склопови са ЕПС и каменом вуном. Тачније то би значило да је такав склоп по питању термоизолације два и по пута лошији од зидова са ЕПС и каменом вуном. Да би се постигле наведене вредности коефицијента топлотне проводљивости и са биокмпозитом потребно је поставити материјал са следећим дебљинама: 0,16 m за ЕПС и 0,19 m за камену вуну.

Прорачун дифузије водене паре

Прорачун дифузије водене паре приказан је у наредној табели 37:

Табела 37. Прорачун дифузије водене паре за склоп 3 са бетонским платном

	Слојеви	d (m)	λ (W/mK)	μ	R (W/m ² K)	r (m)	t (°C)	p' (kPa)	p (kPa)
	и				0,125		20,00 13,55	2,337 1,557	1,285 1,285
1	продужни малтер	0,02	0,85	15	0,024	0,3	13,55 12,33	1,557 1,430	1,285 1,238
2	бетонско платно	0,1	2,04	60	0,049	6,00	12,33 9,80	1,430 1,212	1,238 0,285
3	ТИ материјал (К)	0,05	0,125	7,8	0,400	0,39	9,80 -10,85	1,212 0,240	0,285 0,224
4	спољни завршни малтер	0,03	0,87	15	0,034	0,45	-10,85 -12,63	0,240 0,205	0,224 0,152
	е				0,04		-12,63 -14,70	0,205 0,169	0,152 0,152

Из предходно наведене табеле се може видети да у овом склопу нема кондензације.

Крајњом анализом добијених вредности, представљених у табелама овог поглавља може се истаћи да се у оба склопа, са основним материјалом од керамичког блока, кондензација јавља између 3 и 4 слоја. У случају склопова бетонским платном као основним материјалом нема кондензације. Међутим, и ако се у склоповима са бетонским платном није јавила кондензација они се по питању коефицијента топлотне проводљивости U , добијеног прорачуном EE , нису показали као најбољи. У табели 38 приказано је рангирање унутар самих склопова на основу предходно наведеног параметра U . Анализом предходно споменуте табеле се закључује да зидни склопови са керамичким блоком дају боље резултате параметра U док се као најбољи склоп показао Склоп 2 (М) са основним материјалом од керамичког блока чија је вредност параметра $U = 1,058 \text{ m}^2\text{K/W}$.

Табела 38. Рангирање зидних склопова на основу параметра U

Назив зидног склопа	Основни материјал	$U \text{ (m}^2\text{K/W)}$	Ранг
Склоп 1 (П)	Керамички блок	1,138	1.
Склоп 1 (П)	Бетонско платно	1,596	2.
Склоп 2 (М)	Керамички блок	1,058	1.
Склоп 2 (М)	Бетонско платно	1,444	2.
Склоп 3 (К)	Керамички блок	1,082	1.
Склоп 3 (К)	Бетонско платно	1,488	2.

6.10 СИВА РЕЛАЦИОНА АНАЛИЗА (ГРА)

Претходна анализа резултата се може сматрати погодном али не и потпуном у погледу избора биокомпозита као доброг топлотног и звучног изолатора истовремено. Због тога је неопходно применити технику одлучивања са више критеријума (MCDM), односно, урађена је Grey Relational Analysis (ГРА). Топлотни флуks и подужни специфични отпор струјања ваздуха изабрани су као релевантни критеријуми за избор оптимално доброг биокомпозита по питању топлотне и акустичке изолације истовремено, где се алтернатива која максимизира подужни специфични отпор протока ваздуха и минимизира топлотни флуks узима као оптимално решење. Табела 39. представља резултате нормализације на основу ГРА.

Табела 39. Нормализација вредности алтернатива за оба критеријума

Ознака	d (mm)	Алтернатива редни бр.	Подужна специфична отпорност (kPa·s/m ²)	Топлотни флукс (W/m ²)	Нормализоване вредности	
					Под. спец. отпорност	Топлотни флукс
М	10	1.	678,284	105,00	1,00	0,00
П		2.	512,570	57,50	0,52	0,58
К		3.	195,726	39,00	0,26	0,81
М	20	4.	418,831	30,25	0,27	0,92
П		5.	396,996	23,80	0,09	1,00
К		6.	191,404	104,00	0,69	0,01
М	30	7.	279,409	54,00	0,48	0,63
П		8.	480,612	40,33	0,64	0,80
К		9.	153,228	30,25	0,27	0,92
М	40	10.	280,650	28,20	0,27	0,95
П		11.	282,743	91,00	0,11	0,17
К		12.	136,195	50,50	0,10	0,67
М	50	13.	184,019	38,00	0,03	0,83
П		14.	281,983	29,50	0,00	0,93
К		15.	280,642	25,00	0,27	0,99

Табела 40. Резултати ГРА

Алтернат. редни бр.	Δ_{oi}		$\xi_i(k)$		γ_i	Ранг
	Подуж. отпор. струј. ваздуха	Топлотни флукс	Подуж. отпор. струј. вазд.	Топлотни флукс		
1.	0,00	1,00	1,00	0,33	0,67	3
2.	0,48	0,42	0,51	0,55	0,53	12
3.	0,74	0,19	0,40	0,73	0,57	9
4.	0,73	0,08	0,41	0,86	0,63	7
5.	0,91	0,00	0,35	1,00	0,68	2
6.	0,31	0,99	0,62	0,34	0,48	14
7.	0,52	0,37	0,49	0,57	0,53	11
8.	0,36	0,20	0,58	0,71	0,64	5
9.	0,73	0,08	0,41	0,86	0,63	6
10.	0,73	0,05	0,41	0,90	0,65	4
11.	0,89	0,83	0,36	0,38	0,37	15
12.	0,90	0,33	0,36	0,60	0,48	13
13.	0,97	0,17	0,34	0,74	0,54	10
14.	1,00	0,07	0,33	0,88	0,61	8
15.	0,73	0,01	0,41	0,97	0,69	1

На основу резултата приказаних у табели 40., може се закључити да се са аспекта топлотне и звучне изолације по ГРА најбоље рангира алтернатива број 15. Ова алтернатива је биоккомпозит К (кукуруз 53,5 %, ЕПС 13,5 %, кречно-гипсана паста 33 %), дебљине 5 cm и представља најбољи избор материјала по питању топлотне и звучне изолације истовремено, применом ГРА.

6.11 ПРАКТИЧНА ПРИМЕНА БИОКОМПОЗИТА

На основу резултата и изведених закључака за три нова биоккомпозита П, К и М испробана је донекле и њихова примена у пракси. Као најважнији фактори за примену ових биоккомпозита су они који одређују термичка и акустичка својства истих док су остали испитани параметри детаљније описали биоккомпозите при тој примени. Тако на пример, од механичких својстава зависи место, начин и могућност примене изолационог материјала.

С обзиром да су испитивани изолациони материјали са ниским вредностима чврстоћа, ови недостаци се могу превазићи различитим системима градње и применом на одговарајућим позицијама како у спољном омотачу тако и у унутрашњости објекта али и побољшањем састава. Приликом искоришћења ових биоккомпозита као спољашње изолације, препоручује се његова уградња у оквиру скелетног система градње префабрикованих монтажних објеката. Због велике тежине биоккомпозитних плоча, као додатна сигурност при причвршћивању, требало би користити и PVC сидра са широком главом.

На сликама 124. и 125. дати су примери практичне примене термоизолационих плоча све три врсте биоккомпозита. На зидове од керамичког блока и бетона, (бетонско платно) грађевинским лепком су лепљене плоче димензија 500 x 500 mm.



Слика 124. Биоккомпозити П, К и М као изолациони материјали на фасадном зиду од грађевинског блока, плоча димензија 500 x 500 mm



Слика 125. Биокомпозицији П, К и М као изолациони материјали на фасадном зиду од беџона, њихова димензија 500 x 500 mm

Иако је утврђено да ови биокомпозити, са аспекта термичких и акустичких карактеристика, нису бољи од комерцијалних изолационих материјала приликом избора није довољно само посматрати параметре попут коефицијента топлотне проводљивости и апсорпције звука. Због свог органског порекла и нискоенергетског производног процеса ови биокомпозити имају значајан утицај на очување животне средине. Смањена емисија CO₂ као и еколошки аспект сматрају се позитивном страном ових биокомпозита што значајно унапређује њихов положај на лествици штетности по људско здравље, односно утицаја на животну средину.

6.12 ПРАВЦИ ДАЉЕГ ИСТРАЖИВАЊА

У оквиру теоријско-истраживачког дела је наглашено да је пронађен релативно мали број научних радова у којима је истраживана могућност примене млевеног окласка кукуруза као агрегата, нарочито у мешавини са пиљевином и гранулама ЕПС. У постојећим радовима, кукурузовина је углавном коришћена као самостални агрегат са везивом од креча или гипса.

Предметним истраживањем је доказано да се испитиване врсте биоматеријала могу користити за прављење термичке, односно акустичке изолације објеката. Испитивања су рађена након 28 дана сушења узорак у лабораторијским условима при температури од ~20°C при чему је претпостављено (али треба и доказати) да ови материјали имају повољан еколошки утицај: искоришћење био и индустријског отпада, самим тим и редукција отпада на депонијама, смањење емисије гасова, итд. Сви наведени ефекти оправдавају могућност примене све три врсте нових биокомпозита. Међутим, постоје правци даљих истраживања који би могли унапредити како саме биокомпозите тако и њихову примену.

Повећање или смањење количине агрегата или везива као и променом њихових односа могу се добити биокомпозити са новим вредностима дефинисаних параметара а самим тим и новим својствима. С обзиром да су испитивани узорци нехомогени, како

због самог састава тако и због ручног мешања материјала, увођење машинског начина справљења и уграђивања узорака значајно би допринело квалитету биокомпозита и добијање нових, побољшаних, вредности испитиваних параметара на потпуно истим мешавинама.

У даљем истраживању је неопходно испитати понашање предметних мешавина када су изложене повишеним вредностима релативне влажности ваздуха и евентуално директном контакту са водом.

С обзиром да се ради о изолационом материјалу, правци будућег истраживања могу бити испитивање запаљивости и токсичности као и анализа животног циклуса.

6.13 ЗАКЉУЧАК

Свакодневном применом и анализом конвенционалних изолационих материјала може се закључити да је једна од њихових карактеристика негативни утицај на животну средину. То се огледа у потрошњи ограничених природних ресурса као и у погледу значајних енергетских захтева приликом њихове производње. Такође, ови материјали могу негативно утицати и на људско здравље а проблем се јавља и на крају њиховог животног века у смислу складиштења и решавања отпада.

На основу предходно наведеног дошло се до дефинисања циља овог истраживања - да се произведе изолациони материјал са што мањим утицајем на животну средину и људско здравље, који би могао да замени већ постојеће материјале. Стога су урађена испитивања и мерења у циљу дефинисања својстава нових материјала и оцењивања могућности њихове примене у реалним условима. На овај начин се дефинише нова употребна вредност отпадних материјала од којих су сачињени предметни биокомпозити и на тај начин се потврђује хипотеза 1 ове докторске дисертације.

Мерењем и анализом **порозности и упијања воде** закључено је да нехомогеност представља доминантну карактеристику узорака све три врсте биокомпозита. Без обзира на дебљину узорака, порозност и упијање воде варирају у значајној мери. Оно што је забележено а уједно је и очекивани след, је да са повећањем порозности расте и упијање воде док вредност запреминске масе опада. Генерално гледано може се рећи да биокомпозит П има најмању порозност па самим тим и најмање упијање воде, што се анализом добијених резултата потврђује а што је последица финијег паковања честица пиљевине. За разлику од овог, изолациони материјал биокомпозит К има највећу порозност која је у поређењу са биокомпозитом П већа за 10% за дебљине узорака од 10 mm и 20mm, 7% за 30mm, 12% за 40mm и 2% за узорке дебљине 50mm. Што се тиче упијања воде, такође биокомпозит К има највеће добијене вредности и оне су у односу на биокомпозит П веће за 33% за узорке дебљине 10mm (у односу на М разлика је 42%), 26% за 20mm, 17% за 30mm, 24% за узорке дебљине 40mm. У случају узорака дебљине 50mm највећу вредност има биокомпозит М и то за 7% у односу на биокомпозит П.

На основу резултата **подужне (специфичне) отпорности** струјања ваздуха закључује се да нехомогеност биокмпозита, а самим тим и порозност значајно утиче и на ове вредности. Већа порозност је предуслов да већа количина звучног таласа прође кроз материјал, што значи да је отпор мањи. Упоредном анализом три изолациона материјала најнижу вредност специфичне отпорности има биокмпозит К док је највиша вредност биокмпозита П. Разлике се крећу од 53% за узорке дебљине 50mm до 250% за узорке дебљине 10mm. Међутим на коефицијент апсорпције звука, поред отпора протока утиче и положај материјала у односу на преграду као и дебљина изолационог материјала.

Након добијених вредности за **чврстоће при притиску** може се рећи да све три врсте биокмпозита имају вредности које се међусобно разликују. Биокмпозит П има најнижу вредност овог параметра која је за 50% нижа од вредности чврстоће при притиску биокмпозита М чија је вредност највиша, што се може приписати финој упакованости честица кукурузовине и пиљевине. Вредност чврстоће при притиску биокмпозита К је нижа за 38% у односу на биокмпозит М.

Ипак код вредности **чврстоће при савијању** биокмпозит П има највећу вредност и то дупло већу од биокмпозита М и око пет пута већу од биокмпозита К што би у процентима износило да биокмпозит П има за 100% већу чврстоћу при савијању од биокмпозита М и око 500% у односу на биокмпозит К. Као и код предходних испитивања ово се може објаснити мањом порозношћу и већом збијености (бољој упакованости) компонентних материјала (пре свега агрегата).

Након дефинисања **специфичног топлотног капацитета**, биокмпозит М се рангира као средњи међу преостала два, П чија је вредност најнижа и чини 65% вредности специфичног топлотног капацитета биокмпозита К, док вредност биокмпозита М представља 85% од вредности добијене за К. Стога се може рећи да биокмпозит К има највишу вредност и који ће довођењем исте количине топлоте имати најнижу температуру. Са тог аспекта биокмпозит К се рангира као најквалитетнији.

Анализирајући **коефицијенте топлотне проводљивости** сва три биокмпозита у пет дебљина закључено је да је биокмпозит К дебљине 10 mm најбољи топлотни изолатор односно да има најнижи коефицијент топлотне проводљивости 0,091 W/mK, што још једном указује да је пресудни фактор нехомогеност материјала. Разлике у добијеним вредности коефицијента топлотне проводљивости се крећу од 2% за узорке дебљине 40mm до 19% за узорке дебљине 50mm. Упоређујући добијени коефицијент биокмпозита К са коефицијентом топлотне проводљивости ЕПС или камене вуне можемо рећи да је овај ТИ материјал од два до два и по пута лошији термички изолатор од напоменutih конвенционалних материјала. Упоређујући ову величину, као и све остале, потврђујемо другу хипотезу докторске дисертације.

Након урађеног прорачуна за ЕЕ, у овом случају два зидна склопа, где долази до промене ТИ материјала (П, М, К) као и основног материјала (керамички блок, бетонско платно) може се рећи да Склоп 2 са основним материјалом од керамичког блока и ТИ

од биокompозита М дебљине 50 mm има најнижи коефицијент топлотне проводљивости који износи $U=1,058 \text{ m}^2\text{K/W}$ што га декларише као најбољи склоп по питању термоизолације, између преосталих пет.

Како би се одредио оптимално добар ТИ биокompозит са аспекта термичке и звучне изолације истовремено неопходно је било применити вишекритеријумску анализу одлучивањан на основу које се биокompозит К дебљине 50 mm дефинише као најбољи ТИ и звучно изолациони материјал. На овај начин је потврђена хипотеза 3 - могуће је дефинисати оптималан састав биокompозитног материјала, који ће се у исто време сматрати добрим термичким и звучним изолатором.

VII ЛИТЕРАТУРА

1. Hamilton, I.; Rapf, O.; Kockat, D.J.; Zuhair, D.S.; Abergel, T.; Oppermann, M.; Otto, M.; Loran, S.; Fagotto, I.; Steurer, N. Global Status Report for Buildings and Construction; 2020;
2. Gupta, A. Building a Green Home Using Local Resources and Sustainable Technology in Jammu Region – A Case Study. *Energy Procedia* 2017, 115, 59–69, doi:10.1016/J.EGYPRO.2017.05.007.
3. Šupić, S. UNIVERZITET U NOVOM SADU FAKULTET TEHNIČKIH NAUKA U NOVOM SADU PRIMENA PEPELA NASTALOG SAGOREVANJEM ŽETVENIH OSTATAKA KAO MINERALNOG DODATKA U CEMENTNIM KOMPOZITIMA DOKTORSKA DISERTACIJA.
4. IEA – International Energy Agency Available online: <https://www.iea.org/> (accessed on 25 April 2024).
5. Taffese, W.Z.; Abegaz, K.A. Embodied Energy and CO₂ Emissions of Widely Used Building Materials: The Ethiopian Context. *Buildings* 2019, 9, doi:10.3390/BUILDINGS9060136.
6. Lin, L.; Fan, Y.; Xu, M.; Sun, C. A Decomposition Analysis of Embodied Energy Consumption in China's Construction Industry. *Sustainability* 2017, Vol. 9, Page 1583 2017, 9, 1583, doi:10.3390/SU9091583.
7. Curto, D.; Guercio, A.; Franzitta, V. Investigation on a Bio-Composite Material as Acoustic Absorber and Thermal Insulation. *Energies* 2020, Vol. 13, Page 3699 2020, 13, 3699, doi:10.3390/EN13143699.
8. Pakdel, A.; Ayatollahi, H.; Sattary, S. Embodied Energy and CO₂ Emissions of Life Cycle Assessment (LCA) in the Traditional and Contemporary Iranian Construction Systems. *Journal of Building Engineering* 2021, 39, doi:10.1016/j.job.2021.102310.
9. Vázquez-Calle, K.; Guillén-Mena, V.; Quesada-Molina, F. Analysis of the Embodied Energy and CO₂ Emissions of Ready-Mixed Concrete: A Case Study in Cuenca, Ecuador. *Materials* 2022, Vol. 15, Page 4896 2022, 15, 4896, doi:10.3390/MA15144896.
10. Yoon, Y.C.; Kim, K.H.; Lee, S.H.; Yeo, D. Sustainable Design for Reinforced Concrete Columns through Embodied Energy and CO₂ Emission Optimization. *Energy Build* 2018, 174, 44–53, doi:10.1016/J.ENBUILD.2018.06.013.
11. Republika Srbija AP Vojvodina Sekretarijat Za Energetiku i Mineralne Sirovine.
12. Kronja J., A.S., M.V., T.D., K.A., R.J., M.J., R.D., A.M. Strategija Evropa_2020/Četiri Godine Kasnije; 2015; ISBN 978-86-82391-97-5.

13. Demis, S.; Tapali, J.G.; Papadakis, V.G. An Investigation of the Effectiveness of the Utilization of Biomass Ashes as Pozzolan Materials. *Constr Build Mater* 2014, 68, 291–300, doi:10.1016/J.CONBUILDMAT.2014.06.071.
14. Poljoprivredni fakultet, N.S. Potencijali i Mogućnosti Briketiranja i Peletiranja Otpadne Biomase Na Teritoriji Pokrajine Vojvodine;
15. Ećim Đurić, O.; Kreculj, D.; Živojinović, D.; Vorkapić, M. Potential of Agricultural Biomass in Biogas Production Systems in the Republic of Serbia. In *Proceedings of the Proceedings of the 8th International Conference on Renewable Electrical Power Sources; SMEITS, December 20 2020*; pp. 63–70.
16. Gu, R.; Sain, M.M.; Konar, S.K. A Feasibility Study of Polyurethane Composite Foam with Added Hardwood Pulp. *Ind Crops Prod* 2013, 42, 273–279, doi:10.1016/J.INDCROP.2012.06.006.
17. CEDEF Investiciona Konferencija – Biomasa – Mogućnosti i Izazovi Available online: <https://www.tehnologijahrane.com/seminari/cedef-investiciona-konferencija-biomasa-mogucnosti-i-izazovi> (accessed on 9 May 2024).
18. Žeželj, B. MODEL EFIKASNOG UPRAVLJANJA I NAČINA FINALNE PRERADE BIOMASE Doktorska Disertacija.
19. Маринковић, М.М. УНИВЕРЗИТЕТ У БЕОГРАДУ ШУМАРСКИ ФАКУЛТЕТ ПРОИЗВОДНИ ПОТЕНЦИЈАЛ ДРВНЕ БИОМАСЕ И УТИЦАЈ НА ЦИЉЕВЕ ГАЗДОВАЊА ШУМАМА Докторска Дисертација, 2018.
20. Mineralna veziva
https://www.vggs.rs/gradjevinski_odsek/predmeti_ispiti/gradjevinski_materijali/predavanja/Mineralna_veziva-converted.pdf (accessed on 25 April 2024).
21. Yang, W.D.; Li, Y. Sound Absorption Performance of Natural Fibers and Their Composites; Springer Verlag, 2012; Vol. 55;.
22. Oldham, D.J.; Egan, C.A.; Cookson, R.D. Sustainable Acoustic Absorbers from the Biomass. *Applied Acoustics* 2011, 72, 350–363, doi:10.1016/J.APACoust.2010.12.009.
23. Moszynski, P. WHO Warns Noise Pollution Is a Growing Hazard to Health in Europe. 2011.
24. Nick, A.; Becker, U.; Thoma, W. Improved Acoustic Behavior of Interior Parts of Renewable Resources in the Automotive Industry. *J Polym Environ* 2002, 10, 115, doi:10.1023/A:1021124214818.
25. Berardi, U.; Iannace, G. Acoustic Characterization of Natural Fibers for Sound Absorption Applications *, doi:10.1016/j.buildenv.2015.05.029.

26. Rwawiire, S.; Tomkova, B.; Militky, J.; Hes, L.; acoustics, B.K.-A.; 2017, undefined Acoustic and Thermal Properties of a Cellulose Nonwoven Natural Fabric (Barkcloth). Elsevier, doi:10.1016/j.apacoust.2016.09.027.
27. Pochwała, S.; Makiola, D.; Anweiler, S.; Böhm, M. The Heat Conductivity Properties of Hemp–Lime Composite Material Used in Single-Family Buildings. *Materials* 2020, Vol. 13, Page 1011 2020, 13, 1011, doi:10.3390/MA13041011.
28. Brzyski, P.; Lagód, G. Physical and Mechanical Properties of Composites Based on Hemp Shives and Lime. *E3S Web of Conferences* 2018, 49, 00010, doi:10.1051/E3SCONF/20184900010.
39. Ninikas, K.; Mitani, A.; Koutsianitis, D.; Ntalos, G.; Taghiyari, H.R.; Papadopoulos, A.N. Thermal and Mechanical Properties of Green Insulation Composites Made from Cannabis and Bark Residues. *Journal of Composites Science* 2021, 5, doi:10.3390/jcs5050132.
30. Kosiński, P.; Brzyski, P.; Tunkiewicz, M.; Suchorab, Z.; Wiśniewski, D.; Palczyński, P. Thermal Properties of Hemp Shives Used as Insulation Material in Construction Industry. *Energies (Basel)* 2022, 15, doi:10.3390/en15072461.
31. Khoukhi, M.; Dar Saleh, A.; Hassan, A.; Abdelbaqi, S. Thermal Characterization of a New Bio-Based Insulation Material Containing Puffed Rice. *Energies (Basel)* 2021, 14, doi:10.3390/en14185700.
32. Maglic, K.; Cezairliyan, A.; Peletsky, V. *Compendium of Thermophysical Property Measurement Methods: Vol. 1, Survey of Measurement Techniques*; 1984; ISBN 978-1-4615-6680-9.
33. Sáez-Pérez, M.P.; Brümmer, M.; Durán-Suárez, J.A. A Review of the Factors Affecting the Properties and Performance of Hemp Aggregate Concretes. *Journal of Building Engineering* 2020, 31, 101323, doi:10.1016/j.jobbe.2020.101323.
34. Instruments, B.F.-R. of S.; 1997, undefined A Steady-State High-Temperature Apparatus for Measuring Thermal Conductivity of Ceramics. *aip.scitation.org. Rev. Sci. Instrum.* 1997, 68, 2822–2829
35. Society, W. dos S.-J. of the E.C.; 2008, undefined Advances on the Hot Wire Technique. Elsevier, doi:10.1016/j.jeurceramsoc.2007.04.012.
36. Terzić, M. *Određivanje Toplotne Provodnosti Slabo Provodnih Čvrstih Materijala Metodom Jednostrane Zaštićene Tople Ploče*, 2019.
37. Ingersoll, L.R. *Methods of Measuring Thermal Conductivity in Solids and Liquids**. *JOSA*, Vol. 9, Issue 4, pp. 495-501 1924, 9, 495–501, doi:10.1364/JOSA.9.000495.

-
38. Salmon, D.R.; Tye, R.P. An Inter-Comparison of a Steady-State and Transient Methods for Measuring the Thermal Conductivity of Thin Specimens of Masonry Materials. *J Build Phys* 2011, 34, 247–261, doi:10.1177/1744259109360060.
 39. Cha, J.; Seo, J.; Kim, S. Building Materials Thermal Conductivity Measurement and Correlation with Heat Flow Meter, Laser Flash Analysis and TCi. *J Therm Anal Calorim* 2011, 109, 295–300, doi:10.1007/S10973-011-1760-X.
 40. Rudtsch, S.; Hammerschmidt, U. Intercomparison of Measurements of the Thermophysical Properties of Polymethyl Methacrylate. *Int J Thermophys* 2004, 25, 1475–1482.
 41. Wulf, R.; Barth, G.; Gross, U. Intercomparison of Insulation Thermal Conductivities Measured by Various Methods. *Int J Thermophys* 2007, 28, 1679–1692.
 42. Tritt, T. *Thermal Conductivity: Theory, Properties, and Applications*; 2005; ISBN 0-306-48327-0.
 43. Bojković, J.; Marašević, M.; Stojić, N.; Bulatović, V.; Radičević, B. Thermal and Sound Characterization of a New Biocomposite Material. *Materials* 2023, 16, 4209, doi:10.3390/ma16124209.
 44. EN 12667:2001 - Thermal Performance of Building Materials and Products - Determination of Thermal;
 45. ASTM C518-17 - Standard Test Method for Steady-State Thermal Transmission Properties by Means of the Heat Flow Meter Apparatus;
 46. ASTM E1530-06, Standard Test Method for Evaluating the Resistance to Thermal Transmission of Materials by Guarded Heat Flow Meter Technique. - References - Scientific Research Publishing;
 47. Salmon, D. Thermal Conductivity of Insulations Using Guarded Hot Plates, Including Recent Developments and Sources of Reference Materials.
 48. Zarr, R.R. Assessment of Uncertainties for the NIST 1016 Mm Guarded-Hot-Plate Apparatus: Extended Analysis for Low-Density Fibrous-Glass Thermal Insulation. *J Res Natl Inst Stand Technol* 2010, 115, 23, doi:10.6028/JRES.115.004.
 49. Taylor, R.E.; Davis, F.E.; Powell, R.W. DIRECT HEATING METHODS FOR MEASURING THERMAL CONDUCTIVITY OF SOLIDS AT HIGH TEMPERATURES. *High Temp. - High Pressures* 1: 663-73(1969). 1969.
 50. Yüksel, N.; Yüksel, N. The Review of Some Commonly Used Methods and Techniques to Measure the Thermal Conductivity of Insulation Materials. *Insulation Materials in Context of Sustainability* 2016, doi:10.5772/64157.

-
51. Carslaw, H.S.; Jaeger, J.J.C. CONDUCTION OF HEAT IN SOLIDS. 2nde Edition, Edition Anglaise. 1986, 510.
 52. Elliott, A.; Ambrose, E.J.; Robinson ; Elliott, A.; Ambrose, ' E J; Temple, R.B.; Huggins, M.L.; Lundgren, H.P.; Palmer, K.J.; Galvin, J.A.; Richards, R.E.; et al. The Thermal Conductivities of Some Dielectric Solids at Low Temperatures (Experimental). Proc R Soc Lond A Math Phys Sci 1951, 208, 90–108, doi:10.1098/RSPA.1951.0146.
 53. Xing, C.; Folsom, C.; Jensen, C.; Ban, H.; Marshall, D.W. A Correction Scheme for Thermal Conductivity Measurement Using the Comparative Cut-Bar Technique Based on 3D Numerical Simulation. Meas Sci Technol 2014, 25, 055602, doi:http://doi.org/10.1088/0957-0233/25/5/055602.
 54. Didion, D.A. II AN ANALYSIS AND DESIGN OF A LINEAR GUARDED CUT-BAR APPARATUS FOR THERMAL CONDUCTIVITY MEASUREMENTS. NTIS. i; 1968;
 55. Springer Handbook of Materials Measurement Methods.
 56. Roder, H.M. A Transient Hot Wire Thermal Conductivity Apparatus for Fluids. J Res Natl Bur Stand (1934) 1981, 86, 457, doi:10.6028/JRES.086.020.
 57. Kawaguchi, N.; Nagasaka, Y.; Nagashima, A. Fully Automated Apparatus to Measure the Thermal Conductivity of Liquids by the Transient Hot-wire Method. Review of Scientific Instruments 1985, 56, 1788–1794, doi:10.1063/1.1138095.
 58. Hammerschmidt, U.; Sabuga, W. Transient Hot Wire (THW) Method: Uncertainty Assessment. Int J Thermophys 2000, 21, 1255–1278, doi:10.1023/A:1006649209044/METRICS.
 59. Lockmuller, N.; Redgrove, J.; Kubičár, L. Measurement of Thermal Conductivity with the Needle Probe. High Temp High Press 2003, 35–36, 127–138, doi:10.1068/htjr099.
 60. Hammerschmidt, U.; Sabuga, W. Transient Hot Strip (THS) Method: Uncertainty Assessment. Int J Thermophys 2000, 21, 217–248, doi:10.1023/A:1006621324390/METRICS.
 61. K.D. Antoniadis, Measurement of the Thermal Conductivity of Composite Solid Materials, PhD thesis, Aristotle University of Thessaloniki, 2011
 62. Gustafsson, S.E. Transient Plane Source Techniques for Thermal Conductivity and Thermal Diffusivity Measurements of Solid Materials. Review of Scientific Instruments 1991, 62, 797–804, doi:10.1063/1.1142087.
 63. Boumaza, T.; Redgrove, J. Use of the Transient Plane Source Technique for Rapid Multiple Thermal Property Measurements. Int J Thermophys 2003, 24, 501–512, doi:10.1023/A:1022928206859/METRICS.

64. Abid, M.; Multan, : Thermophysical Properties of a Moist Porous Material.
65. Li, Y.; Dorantes-Gonzalez, D.J.; Shi, C.; Liu, J.; Liu, E.; Shao, J.; Chen, Z.; Dorantes-Gonzalez, D.J.; Hu, X. Improving the Accuracy of the Transient Plane Source Method by Correcting Probe Heat Capacity and Resistance Influences Improving the Accuracy of the Transient Plane Source Method by Correcting Probe Heat Capacity and Resistance Influences Improving the Accuracy of the Transient Plane Source Method by Correcting Probe Heat Capacity and Resistance Influences. *Measurement Science and Technology Meas. Sci. Technol* 2013, 25, 7, doi:10.1088/0957-0233/25/1/015006.
66. Gustavsson, M.; Karawacki, E.; Gustafsson, S.E. Thermal Conductivity, Thermal Diffusivity, and Specific Heat of Thin Samples from Transient Measurements with Hot Disk Sensors. *Review of Scientific Instruments* 1994, 65, 3856–3859, doi:10.1063/1.1145178.
67. Kubičár, L.; Boháč, V.; Vretenár, V. Transient Methods for the Measurement of Thermophysical Properties: The Pulse Transient Method. *High Temp High Press* 2002, 34, 505–514, doi:10.1068/htjr053.
68. Kubičár, L.; Boháč, V.; Vretenár, V.; Barta, Š.; Neuer, G.; Brandt, R. Thermophysical Properties of Heterogeneous Structures Measured by Pulse Transient Method. *Int J Thermophys* 2005, 26, 1949–1962, doi:10.1007/s10765-005-8607-2.
69. Baba, T.; Ono, A. Improvement of the Laser Flash Method to Reduce Uncertainty in Thermaldiffusivity Measurements. *Meas Sci Technol* 2001, 12, 2046, doi:10.1088/0957-0233/12/12/304.
70. Hay, B.; Filtz, J.R.; Hameury, J.; Rongione, L. Uncertainty of Thermal Diffusivity Measurements by Laser Flash Method. *Int J Thermophys* 2005, 26, 1883–1898, doi:10.1007/s10765-005-8603-6.
71. Cahill, D.G.; Pohl, R.O. Thermal Conductivity of Amorphous Solids above the Plateau. *Phys Rev B* 1987, 35, 4067–4073, doi:10.1103/PHYSREVB.35.4067.
72. Birge, N.O.; Nagel, S.R. Wide-frequency Specific Heat Spectrometer. *Review of Scientific Instruments* 1987, 58, 1464–1470, doi:10.1063/1.1139434.
73. Gu, M.; Wang, J.L.; Zhang, X. Thermal-Conductivity Measurements of Polymers by a Modified 3ω Technique. *Int J Thermophys* 2009, 30, 851–861, doi:10.1007/s10765-009-0611-5.
74. Prašćević, M.R.; Cvetković, D.S.; Mihajlov, D.I. *BUKA U ŽIVOTNOJ SREDINI*; ISBN 868026153X.

-
75. Akusticka Obrada Prostorija | PDF Available online: <https://www.scribd.com/presentation/705220803/3-Akusticka-Obrada-Prostorija> (accessed on 25 April 2024).
76. Koski, Z., P.M. Poblisanje Akustike Prostorija Apsorpcijskim Materijalima i Elementima. 1 2010, 101–104.
77. Amziane, S.; Sonebi, M. Overview on Biobased Building Material Made with Plant Aggregate; 2016; Vol. 1;.
78. Zhu, X.; Kim, B.-J.; Wang, Q.; Wu, Q. Recent Advances in the Sound Insulation Properties of Bio-Based Materials. *Bioresources* 2014, 9.
79. Liuzzi, S.; Rubino, C.; Stefanizzi, P.; Materials, F.M.-; 2020, undefined Performance Characterization of Broad Band Sustainable Sound Absorbers Made of Almond Skins. *mdpi.com*, doi:10.3390/ma13235474.
80. Shoshani, Y.; Yakubov, Y. Use of Nonwovens of Variable Porosity as Noise Control Elements. *International Nonwovens Journal* 2001, os-10, 1558925001os-155892500110, doi:10.1177/1558925001OS-1000407.
81. Thilagavathi, G.; Pradeep, E.; Kannaian, T.; Sasikala, L. Development of Natural Fiber Nonwovens for Application as Car Interiors for Noise Control. *Journal of Industrial Textiles* 2010, 39, 267–278, doi:10.1177/1528083709347124.
82. Euronoise, F.A.-P. Survey on the Acoustical Properties of New Sustainable Materials for Noise Control. In *Proceedings of the Euronoise, Tampere, Finland, 30 May–1 June 2006*.
83. Gurunathan, T.; Mohanty, S.; Science, S.N.-C.P.A.A.; 2015, undefined A Review of the Recent Developments in Biocomposites Based on Natural Fibres and Their Application Perspectives. Elsevier, doi:10.1016/j.compositesa.2015.06.007.
84. Choe, H.; Sung, G.; Kim, J.H. Chemical Treatment of Wood Fibers to Enhance the Sound Absorption Coefficient of Flexible Polyurethane Composite Foams. *Compos Sci Technol* 2018, 156, 19–27.
85. ALRahman, L.A.; Raja, R.I.; Rahman, R.A. Experimental Study on Natural Fibers for Green Acoustic Absorption Materials. *Am J Appl Sci* 2013, 10, 1307–1314, doi:10.3844/ajassp.2013.1307.1314.
86. Asdrubali F., D'Alessandro F., Schiavoni S., Sound absorbing properties of materials made of rubber crumbs, *J. Acoust. Soc. Am.*, 2008, Vol. 123, p. 3037, DOI:10.1121/1.2932706
87. Ramesh Kumar M., Alagisamy P.S., Sakthivel M., Mahalingam A., Rao B.V.A., A Review of Building Acoustic Materials, *Acoust. 2013 New Delhi*, 2013, p. 107–112;

-
88. Parikh, D. V.; Chen, Y.; Sun, L. Reducing Automotive Interior Noise with Natural Fiber Nonwoven Floor Covering Systems. <http://dx.doi.org/10.1177/0040517506063393> 2006, 76, 813–820, doi:10.1177/0040517506063393.
89. Al-Oqla, F.M.; Sapuan, S.M. Natural Fiber Reinforced Polymer Composites in Industrial Applications: Feasibility of Date Palm Fibers for Sustainable Automotive Industry. *J Clean Prod* 2014, 66, 347–354, doi:10.1016/j.jclepro.2013.10.050.
90. Tascan, M.; Vaughn, E.A. Effects of Total Surface Area and Fabric Density on the Acoustical Behavior of Needle punched Nonwoven Fabrics. *Textile Research Journal* 2008, 78, 289–296, doi:10.1177/0040517507084283.
91. Dias, T.; Monaragala, R. Sound Absorption in Knitted Structures for Interior Noise Reduction in Automobiles. *Meas Sci Technol* 2006, 17, 2499–2505, doi:10.1088/0957-0233/17/9/018.
92. Soltani, P.; Zerrebini, M. The Analysis of Acoustical Characteristics and Sound Absorption Coefficient of Woven Fabrics. *Textile Research Journal* 2012, 82, 875–882, doi:10.1177/0040517511402121.
93. Jin, W.; Liu, J.; Wang, Z.; Wang, Y.; Cao, Z.; Liu, Y.; Zhu, X. Sound Absorption Characteristics of Aluminum Foams Treated by Plasma Electrolytic Oxidation. *Materials* 2015, 8, 7511–7518, doi:10.3390/ma8115395.
94. Swift, M.J.; Briš, P.; Horoshenkov, K. V. Acoustic Absorption in Re-Cycled Rubber Granulate. *Applied Acoustics* 1999, 57, 203–212, doi:10.1016/S0003-682X(98)00061-9.
95. Horoshenkov K. V., Swift M.J., The effect of consolidation on the acoustic properties of loose rubber granulates, *Appl. Acoust.*, 2001, Vol. 62, № 6, p. 665–690, DOI:10.1016/S0003-682X(00)00069-4
96. Pfretzschner J., Rubber crumb as granular absorptive acoustic material, *Forum Acusticum Sevilla* 2002, 2002, p. 1–6
97. Hong Z., Bo L., Guangsu H., Jia H., A novel composite sound absorber with recycled rubber particles, *J. Sound Vib.*, 2007, Vol. 304, № 1-2, p. 400–406, DOI:10.1016/j.jsv.2007.02.024
98. Han Z., Chunsheng L., Kombe T., Thong-On N., Crumb rubber blends in noise absorption study, *Mater. Struct.*, 2008, Vol. 41, № 2, p. 383–390, DOI:10.1617/s11527-007-9252-y
99. Soleimani, H.; Kord, B.; Pourpasha, M.M.; Pourabbasi, S. The Relationship between Plastic Virginity and Engineering Properties of Wood Plastic Composites. *World Appl Sci J* 2012, 19, 395–398, doi:10.5829/idosi.wasj.2012.19.03.1973.

100. Mahzan, S.; Zaidi, A.M.A.; Arsat, N.; Hatta, M.N.M.; Ghazali, M.I.; Mohideen, S.R. Study on Sound Absorption Properties of Coconut Coir Fibre Reinforced Composite with Added Recycled Rubber;
101. Perná, I.; Hanzlíček, T.; Straka, P.; Steinerová, M. ACOUSTIC ABSORPTION OF GEOPOLYMER/SAND MIXTURE; 2009; Vol. 53;.
102. Arenas M, Crocker J, Recent Trends in Porous Sound-Absorbing Materials, Noise Vib.Control Mag. (2010) 12–17
103. Seddeq, H.S. Factors Influencing Acoustic Performance of Sound Absorptive Materials. Aust J Basic Appl Sci 2009, 3, 4610–4617.
104. Koizumi, T.; Tsujiuchi, N.; Adachi, A. Using Natural Bamboo Fibers The Development of Sound Absorbing Materials. 2002.
105. Lee, Y.; Journal, C.J.-A.R.; 2003, undefined Sound Absorption Properties of Recycled Polyester Fibrous Assembly Absorbers. autextrj.com 3.
106. Bilova M, Ervin Lumnitzer, Acoustical parameters of porous materials and their measurement, ACTA TECHNICA CORVINIENSIS – BULLETIN of ENGINEERING(2011) ISSN:2067-3809;
107. Garai, M.; Pompoli, F. A Simple Empirical Model of Polyester Fibre Materials for Acoustical Applications. Applied Acoustics 2005, 66, 1383–1398, doi:10.1016/j.apacoust.2005.04.008.
108. Knapen E, R. Lanoye, G. Vermeir and D. Van Gemert, 2003. “Sound Absorption By Polymer- Modified Porous Cement Mortars”, 6th International Conference on Materials Science and Restoration, MSR-VI Aedificatio Publishers, pp: 347-358
109. SRPS EN ISO 9053-1; Acoustics—Determination of Airflow Resistance—Part 1: Static Airflow Method. Institute for Standardization of Serbia: Belgrade, Serbia, 2019.
110. Bojković, J.; Bulatović, V.; Radičević, B.; Stojić, N.; Marašević, M. Methods for Determining the Characteristics of Biocomposites; INTERNATIONAL Triennial Conference Heavy Machinery 11 ; 2023 ;Vrnjačka Banja ISBN 978-86-82434-01-6
111. Hansen Hbk, C.H.; Fahy, F.; Walker, J.; Hansen, C.H.; Snyder, S.D.; Ahnert, W.; Steffen, F. Engineering Noise Control: Theory and Practice, Third Edition. 2003, doi:10.1201/9781482264739.
112. Engel, Z. Notes on Sound Absorption Technology, K.U. INGARD. Archives of Acoustics 2014, 21, 115–117.

-
113. Radičević, B. DEVELOPMENT OF A DECISION-MAKING MODEL FOR CHOOSING THE OPTIMUM MIXTURES OF SOUND ABSORBING MATERIALS. Ph.D. Thesis, University of Kragujevac, Faculty of Mechanical Engineering and Civil Engineering in Kraljevo, Serbia, 2016
114. Dragonetti R., Ianniello C., Romano R.A., Measurement of the resistivity of porous materials with an alternating air-flow method, J. Acoust. Soc. Am., Acoustical Society of America, 2011, Vol. 129, № 2, p. 753–764, DOI:10.1121/1.3523
115. Ueno T., Comparisons between characteristic lengths and fibre equivalent diameters in glass fibre and melamine foam materials of similar flow resistivity, Appl. Acoust., 2008, Vol. 69, № 4, p. 325–331, DOI:10.1016/j.apacoust.2006.11.008
116. Yang, Y.; Chen, Z. A Model for Calculating the Air Flow Resistivity of Glass Fiber Felt. Applied Acoustics 2015, 91, 6–11, doi:10.1016/j.apacoust.2014.11.006.
117. Mirowska M., Czyżewski K., Estimation of Sound Absorption Coefficients of Porous Materials, Int. Congr. Sound Vib., Cairns, 2007, p. 1–7
118. Beranek, L. Leo, 1992. "Noise and Vibration Control Engineering, Principles and Applications" Chapter 8: Sound-Absorbing Materials And Sound Absorbers, Wiley, New York
119. Morse P.M., Ingard K.U., Theoretical Acoustics, McGraw-Hill, Inc., McGraw-Hill, Inc., 1968, 950 p., DOI:10.1119/1.1976432
120. Hamet, J. Modélisation Acoustique d'un Enrobe Drainant: Prise En Compte Des Phénomènes de Thermoconductivité Dans Une Nouvelle Formulation Phénoménologique; 1992;
121. America, M.B.-T.J. of the acoustical S. of; 1956, undefined Theory of Propagation of Elastic Waves in a Fluid-saturated Porous Solid. II. Higher Frequency Range. pubs.aip.org 1956, 28, 179–191, doi:10.1121/1.1908241i.
122. Lambert, R.F. The Acoustical Structure of Highly Porous Open-Cell Foams. Journal of the Acoustical Society of America 1982, 72, 879–887, doi:10.1121/1.388167.
123. Champoux, Y.; Stinson, M.R. On Acoustical Models for Sound Propagation in Rigid Frame Porous Materials and the Influence of Shape Factors. J Acoust Soc Am 1992, 92, 1120–1131, doi:10.1121/1.405281.
124. Wilson, D.K. Relaxation-matched Modeling of Propagation through Porous Media, Including Fractal Pore Structure. J Acoust Soc Am 1993, 94, 1136–1145, doi:10.1121/1.406961.
125. Delany M.E., Bazley E.N., Acoustical properties of fibrous absorbent materials, Appl. Acoust., 1970, Vol. 3, № 2, p. 105–116, DOI:10.1016/0003-682X(70)90031-9;

-
126. Dunn I.P., Davern W.A., Calculation of acoustic impedance of multi-layer absorbers, *Appl. Acoust.*, 1986, Vol. 19, № 5, p. 321–334, DOI:10.1016/0003-682X(86)90044-7
127. Zwikker C., Kosten C.W., *Sound Absorbing Materials*, Elsevier Publishing Company, 1949, 174 p
128. Qunli, W. Empirical Relations between Acoustical Properties and Flow Resistivity of Porous Plastic Open-Cell Foam. *Applied Acoustics* 1988, 25, 141–148, doi:10.1016/0003-682X(88)90090-4.
129. Gardner G.C., O'Leary M.E., Hansen S., Sun J.Q., Neural networks for prediction of acoustical properties of polyurethane foams, *Appl. Acoust.*, 2003, Vol. 64, № 2, p. 229–242, DOI:10.1016/S0003-682X(02)00089-0.
130. Voronina N., Acoustic properties of fibrous materials, *Appl. Acoust.*, 1994, Vol. 42, № 2, p.165–174, DOI:10.1016/0003-682X(94)90005-1
131. Oliva, D.; Acoustics, V.H.-A.; 2013, undefined Sound Absorption of Porous Materials–Accuracy of Prediction Methods. Elsevier 2013, 74, 1473–1479, doi:10.1016/j.apacoust.2013.06.004.
132. Doutres, O.; Atalla, N.; Physics, K.D.-J. of A.; 2011, undefined Effect of the Microstructure Closed Pore Content on the Acoustic Behavior of Polyurethane Foams. *pubs.aip.org* 2011, 110, doi:10.1063/1.3631021.
133. Doutres, O.; Atalla, N.; Dong, K. A Semi-Phenomenological Model to Predict the Acoustic Behavior of Fully and Partially Reticulated Polyurethane Foams. *J Appl Phys* 2013, 113, doi:10.1063/1.4789595.
134. Lj Petković, D. UNIVERZITET U NIŠU MAŠINSKI FAKULTET IZBOR BIOMATERIJALA-VIŠEKRITERIJUMSKA ANALIZA I RAZVOJ SISTEMA ZA PODRŠKU ODLUČIVANJU.
135. Zeleny, M. *MCDM : Past Decade and Future Trends : A Source Book of Multiple Criteria Decision Making*. 1984.
136. Jahan, A.; Edwards, K.L. *Multi-Criteria Decision Analysis for Supporting the Selection of Engineering Materials in Product Design*; Elsevier, 2013; ISBN 9780080993867.
137. Polatidis, H.; Haralambopoulos, D.A.; Munda, G.; Vreeker, R. Selecting an Appropriate Multi-Criteria Decision Analysis Technique for Renewable Energy Planning. *Energy Sources, Part B: Economics, Planning and Policy* 2006, 1, 181–193, doi:10.1080/009083190881607.
138. Zavadskas, E.; Turskis, Z.; ... J.A.-E. ir; 2012, undefined Optimization of Weighted Aggregated Sum Product Assessment. *eejournal.ktu.lt* EK Zavadskas, Z Turskis, J Antucheviciene, A Zakarevicius *Elektronika ir elektrotechnika*, 2012, *eejournal.ktu.lt*.

-
139. Julong, D. Introduction to Grey System Theory. The Journal of grey system 1989, 1, 1
140. Maidin, N.A.; Mohd Sapuan, S.; Taha, M.M.; Yusoff, M.Z.M. Material Selection of Natural Fibre Using a Grey Relational Analysis (GRA) Approach. Bioresources 2022, 17, 109, doi:10.15376/biores.17.1.109-131.
141. Piljevina: Granulisana Piljevina u Vrećama, Toplotna Provodljivost i Gustina. Шта Je To? Građevinski Bor i Druga Piljevina, Težina Available online: <https://ibuilder-sr.techinfus.com/opilki/harakteristiki/> (accessed on 25 April 2024).
142. Italian Ministry for Infrastructures and Transport Norme Tecniche per le Construzioni. DM 17/1/2018; Gazzetta Ufficiale della Repubblica Italiana (18A00716): Rome, Italy. 2018. Available online: <https://www.gazzettaufficiale.it/eli/id/2018/2/20/18A00716/sg> (accessed on 10 April 2023).
143. Lagouin, M.; Magniont, C.; Sénéchal, P.; Moonen, P.; Aubert, J.E.; Laborel-préneron, A. Influence of Types of Binder and Plant Aggregates on Hygrothermal and Mechanical Properties of Vegetal Concretes. Constr Build Mater 2019, 222, 852–871, doi:10.1016/j.conbuildmat.2019.06.004.
144. SRPS EN 1015-10:2008/A1:2008. Methods of test for mortar for masonry-Part 10: Determination of dry bulk density of hardened mortar. Retrieved February 1, 2023, from
145. BSI Standards Publication Thermal Insulating Products for Building Applications-Determination of Bending Behaviour; 2013; ISBN 9780580780547.
146. Kalinić, A., B.M. Parni Kotlovi/Sveska 1/Teorijske Osnove; 1969; Vol. 1;.
147. Czajkowski, Ł.; Wojcieszak, D.; ... W.O.-C. and B.; 2019, undefined Thermal Properties of Fractions of Corn Stover. ElsevierŁ Czajkowski, D Wojcieszak, W Olek, J PrzybyłConstruction and Building Materials, 2019Elsevier.
148. BSI Standards Publication Thermal Insulating Products for Building Applications-Determination of Water Vapour Transmission Properties; 2013; ISBN 9780580780455.
149. Pravilnik O Energetskoj Efikasnosti Zgrada. Available online: <https://www.mgsi.gov.rs/lat/dokumenti/pravilnik-o-energetskojefikasnosti-zgrada> (accessed on 10 April 2023).; 148. BSI Standards Publication Thermal Insulating Products for Building Applications-Determination of Water Vapour Transmission Properties; 2013; ISBN 9780580780455.

VIII ПРИЛОЗИ

Прилог 1- порозност и упијање воде

Табела 41. Резултати испитивања порозности и упијања воде биокомпозиција

	Ознака	fi	h				V	g (g/cm³)	mdry	msat	mhidr	φ	Uv
М	1	105,87	11,73	11,77	11,02	11,51	101,24	0,63	64,16	120,42	8,80	50,40	87,69
	1	106,11	11,71	11,20	11,44	11,45	101,20	0,62	62,35	117,22	8,40	50,42	88,00
	1	105,25	11,48	11,55	11,64	11,56	100,50	0,69	68,98	123,00	14,10	49,61	78,31
	2	105,89	20,09	19,95	19,58	19,87	174,92	0,61	106,25	195,13	24,60	52,12	83,65
	2	104,18	19,72	20,36	20,78	20,29	172,84	0,60	104,21	204,28	26,10	56,16	96,03
	2	105,71	18,97	19,34	19,46	19,26	168,92	0,59	99,81	195,80	23,20	55,61	96,17
	3	105,85	31,61	31,18	30,45	31,08	273,36	0,60	163,27	321,92	49,80	58,30	97,17
	3	106,29	31,31	31,52	31,61	31,48	279,18	0,58	162,53	322,56	50,90	58,91	98,46
	3	106,18	31,35	30,61	30,95	30,97	274,09	0,58	159,92	318,49	47,60	58,54	99,16
	4	106,29	40,28	40,05	40,98	40,44	358,62	0,56	202,21	405,40	54,80	57,95	100,48
	4	105,22	41,37	41,29	42,56	41,74	362,76	0,60	218,97	429,20	65,60	57,82	96,01
	4	105,97	40,60	40,27	40,72	40,53	357,28	0,58	205,48	411,10	55,70	57,86	100,07
	5	106,48	49,88	50,85	50,90	50,54	449,85	0,55	245,97	513,00	67,00	59,87	108,56
	5	106,47	48,97	48,57	48,45	48,66	433,04	0,58	252,63	501,30	73,10	58,07	98,43
	5	105,99	51,80	52,15	51,66	51,87	457,42	0,55	252,47	523,40	68,70	59,58	107,31
П	1	102,38	10,51	10,36	10,38	10,42	85,71	0,60	51,16	98,90	11,40	54,56	93,32
	1	104,24	10,72	10,98	10,74	10,81	92,24	0,63	57,96	106,30	13,80	52,26	83,40
	1	102,50	10,95	11,10	10,87	10,97	90,50	0,60	54,63	106,00	12,50	54,94	94,03
	2	102,44	20,52	20,67	20,40	20,53	169,12	0,65	109,22	203,70	31,70	54,93	86,50
	2	103,63	20,03	21,37	20,11	20,50	172,85	0,61	105,74	202,50	28,40	55,58	91,51
	2	103,76	19,68	19,04	19,38	19,37	163,68	0,64	105,02	196,90	30,40	55,18	87,49
	3	105,66	31,30	30,33	30,39	30,67	268,81	0,62	167,67	318,40	55,20	57,27	89,90
	3	104,33	30,30	29,85	29,92	30,02	256,54	0,64	164,83	315,90	54,90	57,88	91,65
	3	101,30	30,67	29,90	30,09	30,22	243,43	0,65	157,93	303,00	48,10	56,91	91,86
	4	104,62	40,11	40,18	39,91	40,07	344,26	0,63	217,86	410,90	65,90	55,95	88,61
	4	104,38	39,73	40,33	39,91	39,99	342,02	0,59	201,05	400,80	58,80	58,41	99,35
	4	102,08	39,66	39,19	39,57	39,47	322,89	0,61	197,44	391,90	56,70	58,01	98,49
	5	103,27	49,61	50,02	49,64	49,76	416,55	0,66	275,60	512,80	85,40	55,50	86,07
	5	101,49	49,94	49,91	49,45	49,77	402,40	0,59	238,51	477,90	69,80	58,66	100,37
	5	106,42	50,11	50,95	50,21	50,42	448,28	0,63	284,17	523,10	90,12	55,18	84,08
К	1	106,29	11,20	11,06	11,56	11,27	99,98	0,49	49,00	110,12	8,05	59,49	120,33
	1	106,22	12,83	12,18	13,15	12,72	112,66	0,57	64,00	138,73	13,80	59,82	116,77
	1	105,40	10,85	10,57	10,41	10,61	92,53	0,53	49,50	110,83	7,30	59,24	123,90
	2	105,87	20,41	21,18	20,47	20,69	182,01	0,58	105,74	222,71	24,10	58,89	110,62
	2	105,61	20,59	21,37	20,95	20,97	183,60	0,57	105,44	221,10	21,70	58,00	109,69
	2	105,82	19,43	20,31	19,92	19,89	174,81	0,56	97,50	208,37	19,40	58,67	113,71
	3	106,14	31,31	32,10	32,17	31,86	281,76	0,59	165,42	354,96	47,40	61,63	114,58
	3	105,32	31,51	31,76	31,13	31,47	273,99	0,60	163,77	350,59	43,90	60,91	114,07
	3	105,95	31,05	30,92	30,49	30,82	271,58	0,59	159,24	343,88	42,10	61,18	115,95
	4	105,20	41,58	40,82	41,16	41,19	357,81	0,59	210,92	446,27	53,90	59,98	111,58
	4	106,22	41,36	41,31	41,49	41,39	366,56	0,54	197,54	440,00	43,60	61,17	122,74
	4	106,80	40,89	40,41	40,49	40,60	363,50	0,53	194,28	429,50	47,50	61,58	121,07
	5	105,56	50,87	50,12	49,83	50,27	439,75	0,61	269,33	533,35	77,50	57,92	98,03
	5	105,85	50,69	50,86	49,82	50,46	443,78	0,62	274,88	540,72	80,20	57,73	96,71
	5	106,07	49,72	49,56	50,21	49,83	440,09	0,64	281,17	548,19	83,80	57,50	94,97

Прилог 2 – запреминска маса*Табела 42. Вредности за запреминске масе биокomпозитија*

	10mm	20mm	30mm	40mm	50mm
М	0,575	0,623	0,600	0,577	0,552
	0,573	0,585	0,598	0,602	0,590
	0,633	0,578	0,590	0,578	0,555
П	0,585	0,635	0,637	0,631	0,645
	0,627	0,607	0,632	0,588	0,584
	0,584	0,631	0,620	0,589	0,656
К	0,495	0,532	0,538	0,538	0,591
	0,512	0,529	0,534	0,498	0,597
	0,478	0,516	0,528	0,509	0,605

Прилог 3 - чврстоћа при притиску

Табела 43. Вредности чврстоће при притиску биокмозија

Ознака	a (cm)	b (cm)	l (cm)	V (cm ³)	m (g)	g (g/cm ³)	F (kN)	σ_p (MPa)	σ_p (kPa)
M1	39,14	41,33	161,53	263793,5	168	0,637	0,5808	0,373	373,4
	39,55	41,72	161,39				0,6141		
M2	39,68	41,30	161,46	265328,0	168	0,633	0,5238	0,327	327,4
	39,57	41,63	161,51				0,5239		
M3	39,64	40,98	161,88	262667,5	165	0,628	0,5356	0,338	338,1
	39,18	41,37	161,86				0,5464		
P1	38,94	41,81	160,63	260539,2	152	0,583	0,3708	0,235	234,5
	39,05	41,60	159,78				0,3796		
P2	38,79	41,43	159,63	258360,2	152	0,588	0,3090	0,206	206,3
	39,61	41,03	160,08				0,3512		
P3	38,94	41,81	160,63	260539,2	156	0,599	0,3787	0,249	249,3
	39,05	41,60	159,78				0,4189		
K1	39,87	40,97	162,67	265721,6	157	0,591	0,3904	0,254	253,8
	40,11	40,99	161,62				0,4218		
K2	38,74	43,27	161,68	271846,4	157	0,578	0,4395	0,231	231,5
	39,90	42,05	162,45				0,3012		
K3	40,81	41,64	161,99	277214,1	155	0,559	0,4022	0,264	263,9
	40,01	43,01	162,17				0,4424		

Прилог 4 - чврстоћа при савијању*Табела 44. Вредности чврстоће при савијању биокмозија*

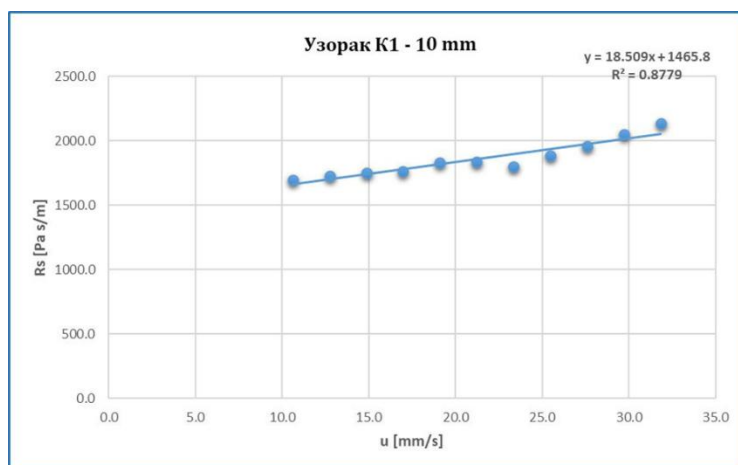
Ознака	a	b	l	F(kg)	F(N)	σ_s (MPa)	σ_s (MPa)
M1	54	154	301	10,8	105,948	0,107	0,117
M2	53	153	305	13,2	129,492	0,138	
M3	53	152	303	11,5	112,815	0,120	
M4	54	154	303	10,9	106,929	0,108	
M5	53	153	301	11,1	108,891	0,114	
П1	51	152	301	22,3	218,763	0,250	0,251
П2	52	151	299	25,2	247,212	0,272	
П3	52	151	301	26,5	259,965	0,287	
П4	52	150	302	19,6	195,219	0,215	
П5	52	152	303	21,4	194,740	0,232	
K1	54	158	310	5,8	56,898	0,057	0,054
K2	55	157	308	6,1	59,841	0,058	
K3	55	156	306	4,9	48,069	0,047	
K4	55	157	311	5,7	55,917	0,055	
K5	60	160	317	6,8	66,708	0,055	

Прилог 5 - специфични топлотни капацитет*Табела 45. Вредности масеног удела материјала који улазе у састав биокอมпозиција*

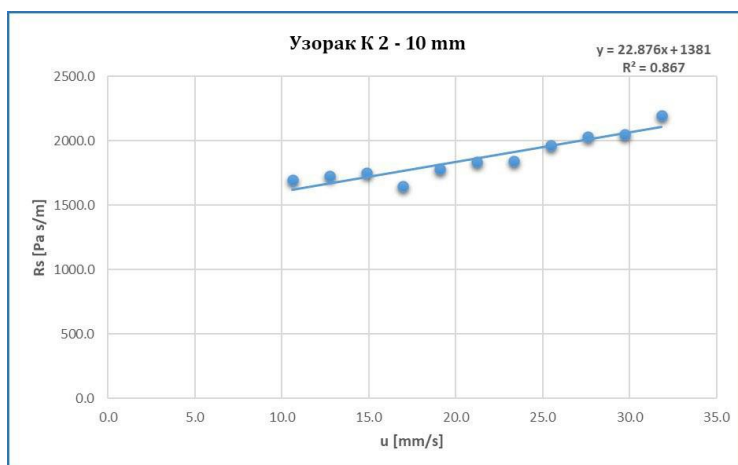
Ознака	Укупна маса узорка $m_s(\text{gr})$	Пиљевина (gr)	Кукуруз (gr)	ЕПС (gr)	Креч (gr)	Гипс (gr)
П1	262	140,2	-	35,4	69,4	17,0
П2	261	139,6	-	35,2	69,2	17,0
П3	266	142,3	-	35,9	70,5	17,3
К1	255	-	136,4	34,4	67,6	16,6
К2	255	-	136,4	34,4	67,6	16,6
К3	258	-	138,0	34,8	68,4	16,8
М1	266	71,2	71,2	35,9	70,5	17,3
М2	264	70,6	70,6	35,6	70,0	17,2
М3	268	71,7	71,7	36,2	71,0	17,4

Прилог 6 - отпор протока ваздуха*Табела 46. Вредности отпора протока ваздуха биокмпозиција К дебљине узорка 10 mm*

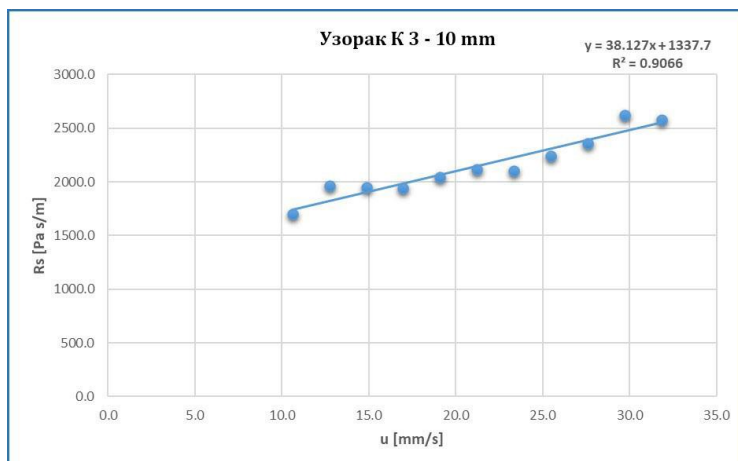
Три узорка биокмпозиција К дебљине 10 mm						
	q_v	u	Δp	R	R_s	r
	(lit/min)	(mm/s)	(Pa)	(kPa·s/m ³)	(kPa·s/m)	(kPa·s/m ²)
Први узорак	5	10,6	18	216,086	1,697	169,714
	6	12,7	22	220,000	1,728	172,788
	7	14,9	26	222,857	1,750	175,032
	8	17,0	30	225,000	1,767	176,715
	9	19,1	35	233,333	1,833	183,259
	10	21,2	39	234,000	1,838	183,783
	11	23,3	42	229,091	1,799	179,927
	12	25,5	48	240,000	1,885	188,495
	13	27,6	54	249,231	1,987	195,745
	14	29,7	61	261,428	2,053	205,325
	15	31,8	68	272,000	2,136	213,628
Други узорак	5	10,6	18	216,086	1,697	169,713
	6	12,7	22	220,000	1,727	172,787
	7	14,9	26	222,857	1,750	175,031
	8	17,0	28	210,000	1,649	164,933
	9	19,1	34	226,667	1,780	178,023
	10	21,2	39	234,000	1,837	183,783
	11	23,3	43	234,545	1,842	184,211
	12	25,5	50	250,000	1,963	196,349
	13	27,6	56	258,461	2,030	202,995
	14	29,7	61	261,28	2,053	205,325
	15	31,8	70	280,000	2,199	219,911
Трећи узорак	5	10,6	18	216,086	1,697	169,713
	6	12,7	25	250,000	1,963	196,349
	7	14,9	29	248,571	1,952	195,227
	8	17,0	33	247,500	1,943	194,386
	9	19,1	39	260,000	2,042	204,203
	10	21,2	45	270,000	2,120	212,057
	11	23,3	49	267,272	2,099	209,915
	12	25,5	57	285,000	2,238	223,838
	13	27,6	65	300,000	2,356	235,619
	14	29,7	78	334,285	2,625	262,547
	15	31,8	82	328,000	2,576	257,610



Слика 126. Корелација између специфичне отпорности циркулања и брзине циркулања ваздуха за први узорак диокомјозиџа К дебљине 10mm



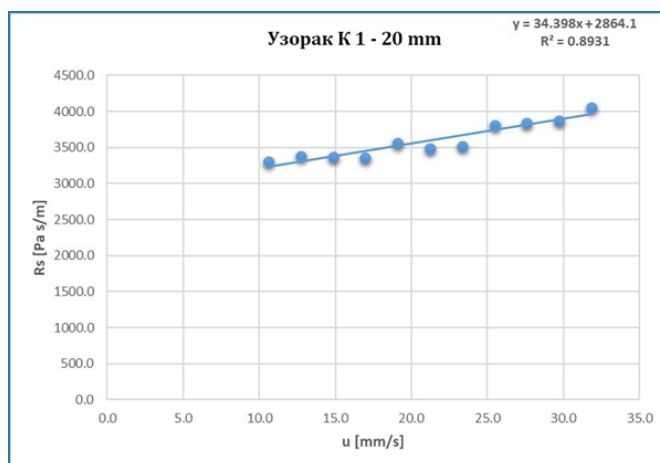
Слика 127. Корелација између специфичне отпорности циркулања и брзине циркулања ваздуха за други узорак диокомјозиџа К дебљине 10mm



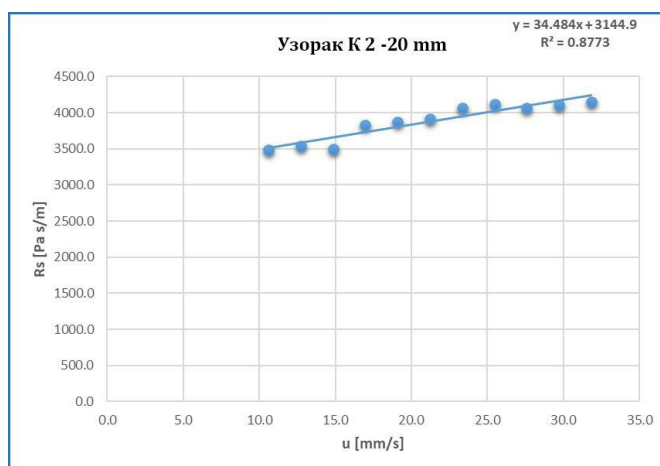
Слика 128. Корелација између специфичне отпорности циркулања и брзине циркулања ваздуха за трећи узорак диокомјозиџа К дебљине 10mm

Табела 47. Вредности ошћора пројока ваздуха биокомпозија К дебљине узорака 20 mm

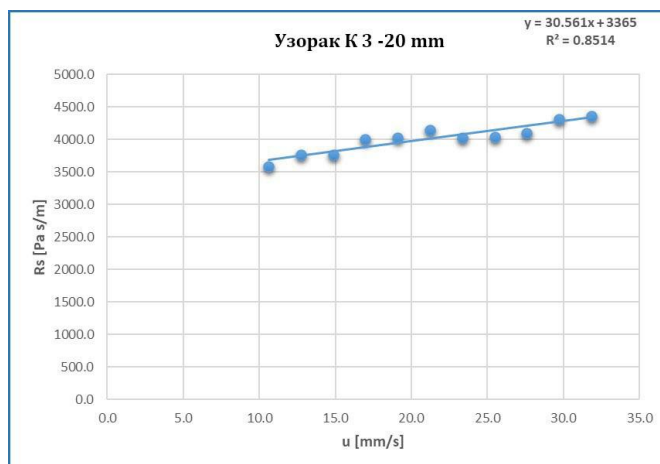
Три узорка биокомпозија К дебљине 20 mm						
	q_v	u	Δp	R	R_s	r
	(lit/min)	(mm/s)	(Pa)	(kPa·s/m ³)	(kPa·s/m)	(kPa·s/m ²)
Први узорак	5	10,6	35	420,000	3,298	164,933
	6	12,7	43	430,000	3,377	168,860
	7	14,9	50	428,571	3,366	168,299
	8	17,0	57	427,500	3,357	167,878
	9	19,1	68	453,333	3,560	178,023
	10	21,2	74	444,000	3,487	174,358
	11	23,3	82	447,272	3,512	175,643
	12	25,5	97	485,000	3,809	190,459
	13	27,6	106	489,230	3,842	192,120
	14	29,7	115	492,857	3,870	193,544
	15	31,8	129	516,000	4,052	202,632
Други узорак	5	10,6	37	444,000	3,487	174,358
	6	12,7	45	450,000	3,534	176,714
	7	14,9	52	445,714	3,500	175,031
	8	17,0	65	487,500	3,828	191,440
	9	19,1	74	493,333	3,874	193,731
	10	21,2	83	498,000	3,911	195,564
	11	23,3	95	518,181	4,069	203,489
	12	25,5	105	525,000	4,123	206,167
	13	27,6	112	516,923	4,059	202,995
	14	29,7	122	522,857	4,106	205,325
	15	31,8	132	528,000	4,146	207,345
Трећи узорак	5	10,6	38	456,000	3,581	179,070
	6	12,7	48	480,000	3,769	188,495
	7	14,9	56	480,000	3,769	188,495
	8	17,0	68	510,000	4,005	200,276
	9	19,1	77	523,333	4,031	201,585
	10	21,2	88	528,000	4,146	207,345
	11	23,3	94	512,727	4,027	201,347
	12	25,5	103	515,000	4,044	202,240
	13	27,6	113	521,538	4,096	204,807
	14	29,7	128	548,571	4,308	215,423
	15	31,8	139	556,000	4,366	218,340



Слика 129. Корелација између специфичне отпорности циркулања и брзине циркулања ваздуха за први узорак биокмјозија К дебљине 10mm



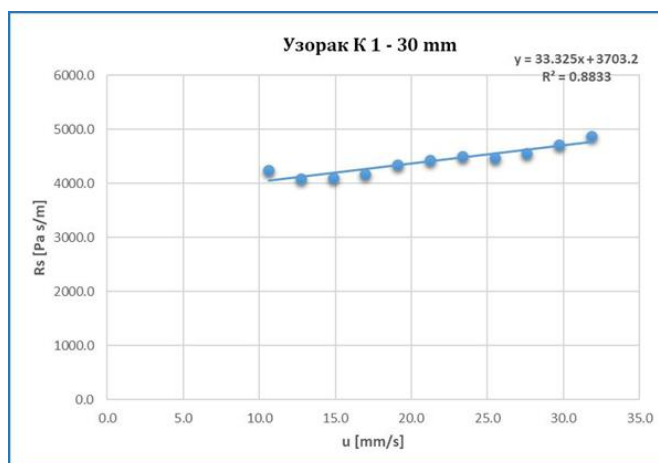
Слика 130. Корелација између специфичне отпорности циркулања и брзине циркулања ваздуха за други узорак биокмјозија К дебљине 20mm



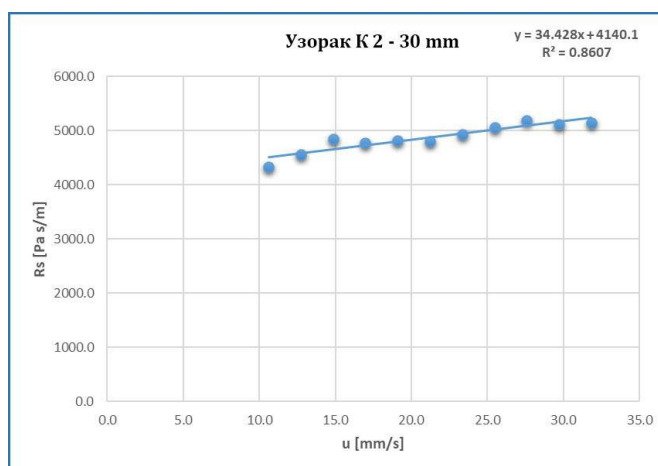
Слика 131. Корелација између специфичне отпорности циркулања и брзине циркулања ваздуха за трећи узорак биокмјозија К дебљине 20mm

Табела 48. Вредности ошћора прохода ваздуха биокмпозиџа К дебљине узорака 30 mm

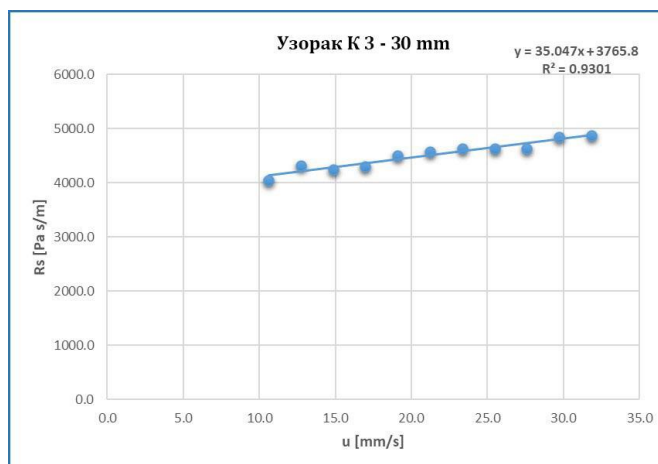
Три узорка биокмпозиџа К дебљине 30 mm						
	q_v	u	Δp	R	R_s	r
	(lit/min)	(mm/s)	(Pa)	(kPa·s/m ³)	(kPa·s/m)	(kPa·s/m ²)
Први узорак	5	10,6	45	540,000	4,241	141,371
	6	12,7	52	520,000	4,084	136,135
	7	14,9	61	522,857	4,106	136,883
	8	17,0	71	532,500	4,182	139,408
	9	19,1	83	553,333	4,345	144,862
	10	21,2	94	564,000	4,429	147,654
	11	23,3	105	572,727	4,498	149,939
	12	25,5	114	570,000	4,476	149,225
	13	27,6	126	581,538	4,567	152,246
	14	29,7	140	600,000	4,712	157,079
	15	31,8	155	620,000	4,869	162,315
Други узорак	5	10,6	46	552,000	4,335	144,513
	6	12,7	58	580,000	4,555	151,843
	7	14,9	72	617,142	4,847	161,567
	8	17,0	81	607,500	4,771	159,043
	9	19,1	92	613,333	4,817	160,570
	10	21,2	102	612,000	4,806	160,221
	11	23,3	115	627,272	4,926	164,219
	12	25,5	129	645,000	5,065	168,860
	13	27,6	143	660,000	5,183	172,787
	14	29,7	152	651,428	5,116	170,543
	15	31,8	164	656,000	5,152	171,740
Трећи узорак	5	10,6	43	516,000	4,052	135,088
	6	12,7	55	550,000	4,319	143,989
	7	14,9	63	540,000	4,241	141,371
	8	17,0	73	547,500	4,300	143,335
	9	19,1	86	573,333	4,502	150,098
	10	21,2	947	582,000	4,571	152,367
	11	23,3	108	589,090	4,626	154,223
	12	25,5	118	590,000	4,633	154,461
	13	27,6	128	590,769	4,639	154,663
	14	29,7	144	617,142	4,847	161,567
	15	31,8	155	620,000	4,869	162,315



Слика 132. Корелација између специфичне отпорности циркуању и брзине циркуања ваздуха за први узорак биокмјозија К дебљине 30mm



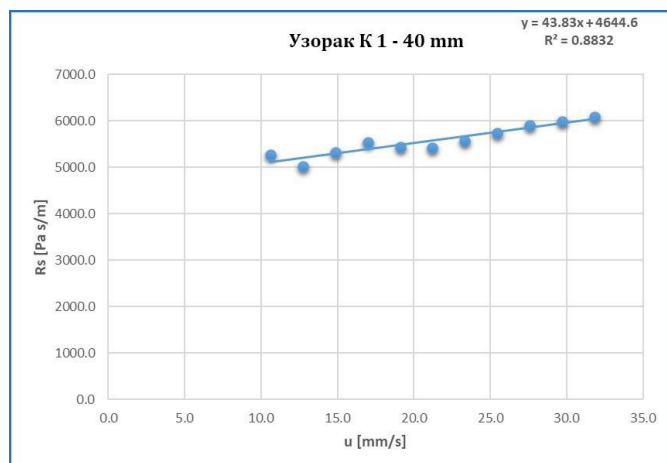
Слика 133. Корелација између специфичне отпорности циркуању и брзине циркуања ваздуха за други узорак биокмјозија К дебљине 30mm



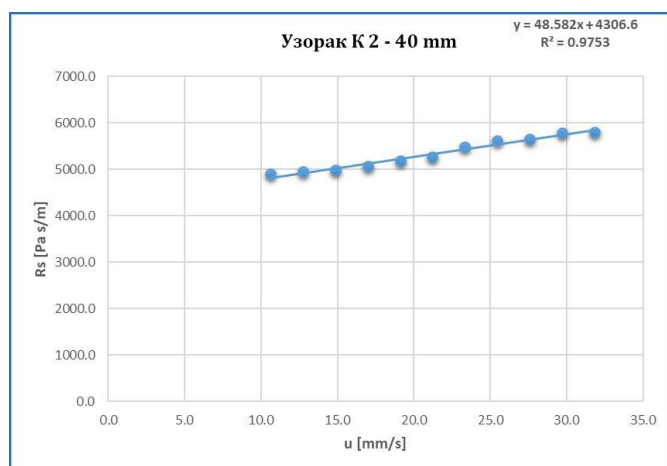
Слика 134. Корелација између специфичне отпорности циркуању и брзине циркуања ваздуха за трећи узорак биокмјозија К дебљине 30mm

Табела 49. Вредности ошћора проточа ваздуха биокмпозиџа К дебљине узорака 40 mm

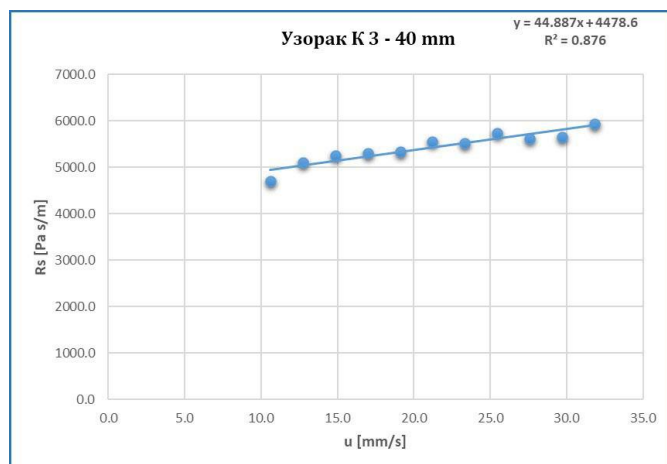
Три узорка биокмпозиџа К дебљине 40 mm						
	q_v	u	Δp	R	R_s	r
	(lit/min)	(mm/s)	(Pa)	(kPa·s/m ³)	(kPa·s/m)	(kPa·s/m ²)
Први узорак	5	10,6	56	672,000	5,277	131,946
	6	12,7	64	640,000	5,026	125,663
	7	14,9	79	677,142	5,318	132,956
	8	17,0	94	705,000	5,537	138,426
	9	19,1	104	693,333	5,445	136,135
	10	21,2	115	690,000	5,419	135,481
	11	23,3	130	709,090	5,569	139,229
	12	25,5	146	730,000	5,733	143,335
	13	27,6	163	752,307	5,908	147,715
	14	29,7	178	762,857	5,991	149,786
	15	31,8	194	776,000	6,094	152,367
Други узорак	5	10,6	52	624,000	4,900	122,522
	6	12,7	63	630,000	4,948	123,700
	7	14,9	74	634,285	4,981	124,541
	8	17,0	86	645,000	5,065	126,645
	9	19,1	99	660,000	5,183	129,590
	10	21,2	112	672,000	5,277	131,946
	11	23,3	128	698,181	5,483	137,087
	12	25,5	143	715,000	5,615	140,389
	13	27,6	156	720,000	5,654	141,371
	14	29,7	172	737,142	5,789	144,737
	15	31,8	185	740,000	5,811	145,298
Трећи узорак	5	10,6	50	600,000	4,712	117,809
	6	12,7	65	650,000	5,105	127,627
	7	14,9	78	668,571	5,250	131,273
	8	17,0	90	675,000	5,301	132,535
	9	19,1	102	680,000	5,340	133,517
	10	21,2	118	70,000	5,560	139,015
	11	23,3	129	703,636	5,526	138,158
	12	25,5	146	730,000	5,733	143,335
	13	27,6	155	715,384	5,618	140,465
	14	29,7	168	720,000	5,654	141,371
	15	31,8	189	756,000	5,937	148,440



Слика 135. Корелација између специфичне отпорности циркулања и брзине циркулања ваздуха за први узорак биокмјозија К дебљине 40mm



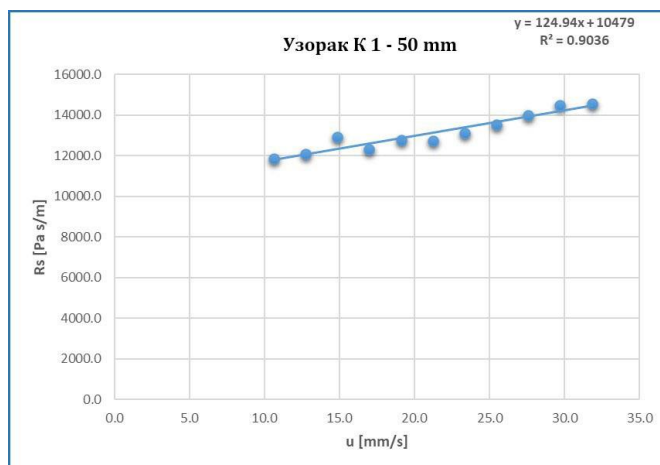
Слика 136. Корелација између специфичне отпорности циркулања и брзине циркулања ваздуха за други узорак биокмјозија К дебљине 40mm



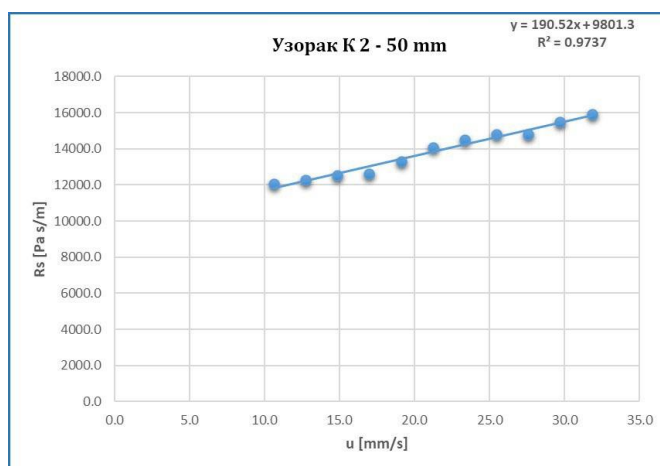
Слика 137. Корелација између специфичне отпорности циркулања и брзине циркулања ваздуха за трећи узорак биокмјозија К дебљине 40mm

Табела 50. Вредности ошћора пројока ваздуха биокомпозија К дебљине узорака 50 mm

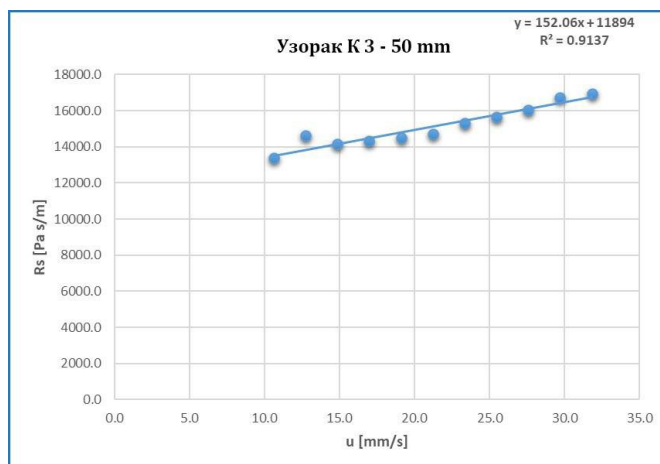
Три узорка биокомпозита К дебљине 50 mm						
	q_v	u	Δp	R	R_s	r
	(lit/min)	(mm/s)	(Pa)	(kPa·s/m ³)	(kPa·s/m)	(kPa·s/m ²)
Први узорак	5	10,6	126	1512,000	11,875	237,504
	6	12,7	154	1540,000	12,095	241,903
	7	14,9	192	1645,714	12,925	258,508
	8	17,0	209	1567,500	12,311	246,222
	9	19,1	244	1626,667	12,776	255,516
	10	21,2	270	1620,000	12,723	254,469
	11	23,3	306	1669,091	13,109	262,180
	12	25,5	345	1725,000	13,548	270,962
	13	27,6	386	1781,538	13,992	279,843
	14	29,7	431	1847,143	14,507	290,148
	15	31,8	464	1856,000	14,577	291,540
Други узорак	5	10,6	128	1536,000	12,064	241,274
	6	12,7	156	1560,000	12,252	245,044
	7	14,9	186	1594,286	12,521	250,430
	8	17,0	214	1605,000	12,606	252,113
	9	19,1	254	1693,333	13,299	265,988
	10	21,2	299	1794,000	14,090	281,801
	11	23,3	338	1843,636	14,480	289,598
	12	25,5	377	1885,000	14,805	296,095
	13	27,6	408	1883,077	14,790	295,793
	14	29,7	460	1971,429	15,484	309,671
	15	31,8	506	2024,000	15,896	317,929
Трећи узорак	5	10,6	142	1704,000	13,383	267,664
	6	12,7	186	1860,000	14,608	292,168
	7	14,9	210	1800,000	14,137	282,743
	8	17,0	243	1822,500	14,314	286,278
	9	19,1	277	1846,667	14,504	290,074
	10	21,2	312	1872,000	14,703	294,053
	11	23,3	357	1947,273	15,294	305,877
	12	25,5	399	1995,000	15,669	313,374
	13	27,6	443	2044,615	16,058	321,167
	14	29,7	497	2130,000	16,729	334,580
	15	31,8	539	2156,000	16,933	338,664



Слика 138. Корелација између специфичне отпорности циркуања и брзине циркуања ваздуха за први узорак биокмјозија К дебљине 50mm



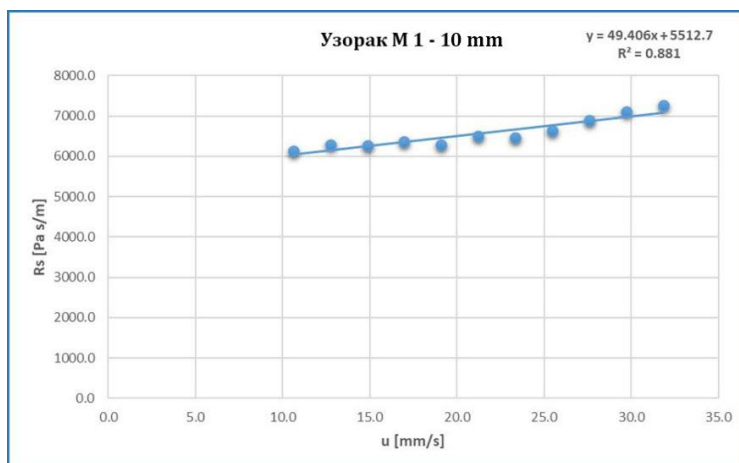
Слика 139. Корелација између специфичне отпорности циркуања и брзине циркуања ваздуха за други узорак биокмјозија К дебљине 50mm



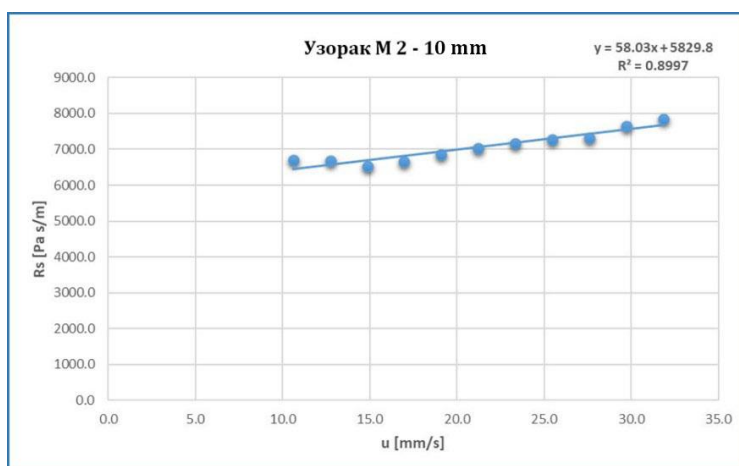
Слика 140. Корелација између специфичне отпорности циркуања и брзине циркуања ваздуха за трећи узорак биокмјозија К дебљине 50mm

Табела 51. Вредности ошћора проточа ваздуха биокмпозиџа М дебљине узорака 10 mm

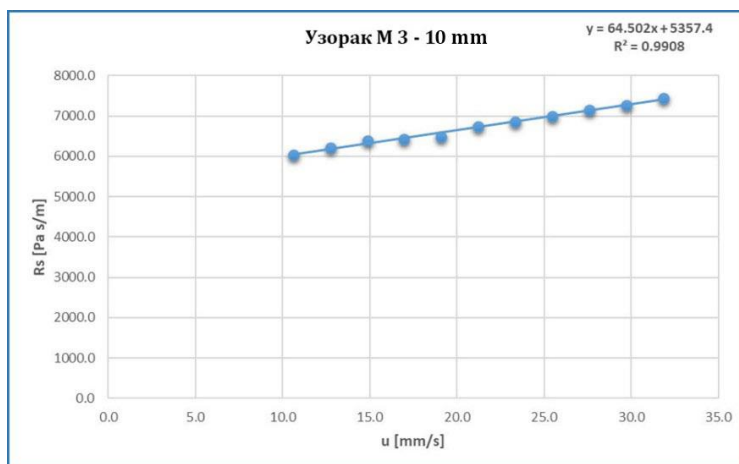
Три узорка биокмпозиџа М дебљине 10 mm						
	q_v	u	Δp	R	R	r
	(lit/min)	(mm/s)	(Pa)	(kPa·s/m ³)	(kPa·s/m)	(kPa·s/m ²)
Први узорак	5	10,6	65	780,312	6,128	612,855
	6	12,7	80	800,000	6,283	628,318
	7	14,9	93	797,142	6,260	626,074
	8	17,0	108	810,000	6,361	636,172
	9	19,1	120	800,000	6,283	628,318
	10	21,2	138	828,000	6,503	650,309
	11	23,3	151	823,636	6,468	646,882
	12	25,5	169	845,000	6,636	663,661
	13	27,6	190	876,923	6,887	688,733
	14	29,7	211	904,285	7,102	710,224
	15	31,8	231	924,000	7,257	725,707
Други узорак	5	10,6	71	852,340	6,694	669,427
	6	12,7	85	850,000	6,675	667,588
	7	14,9	97	831,428	6,530	653,002
	8	17,0	113	847,500	6,656	665,624
	9	19,1	131	873,333	6,859	685,914
	10	21,2	149	894,000	7,021	702,145
	11	23,3	167	910,909	7,154	715,426
	12	25,5	185	925,000	7,264	726,493
	13	27,6	202	932,307	7,322	732,232
	14	29,7	227	972,857	7,640	764,080
	15	31,8	250	100,000	7,854	785,398
Трећи узорак	5	10,6	64	768,307	6,034	603,427
	6	12,7	79	790,000	6,204	620,464
	7	14,9	95	814,285	6,395	639,538
	8	17,0	109	817,500	6,420	642,063
	9	19,1	124	826,666	6,492	649,262
	10	21,2	143	858,000	6,738	673,871
	11	23,3	160	872,727	6,854	685,438
	12	25,5	178	890,000	6,990	699,004
	13	27,6	197	909,230	7,141	714,108
	14	29,7	216	925,714	7,270	727,054
	15	31,8	237	948,000	7,445	744,557



Слика 141. Корелација између специфичне опшорности струјању и дрзине струјања ваздуха за први узорак биоконозија М дебљине 10mm



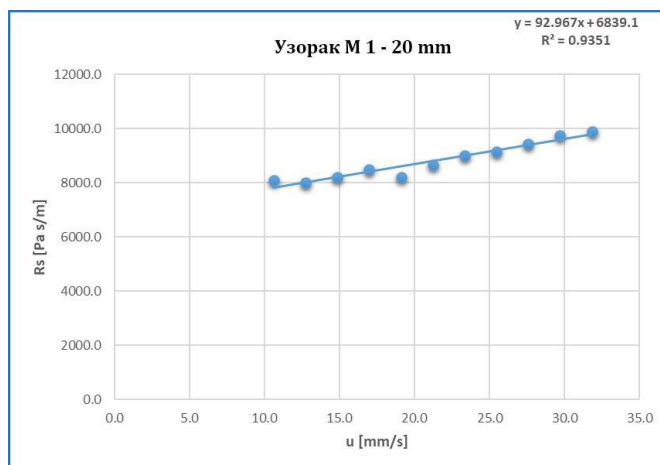
Слика 142. Корелација између специфичне опшорности струјању и дрзине струјања ваздуха за други узорак биоконозија М дебљине 10mm



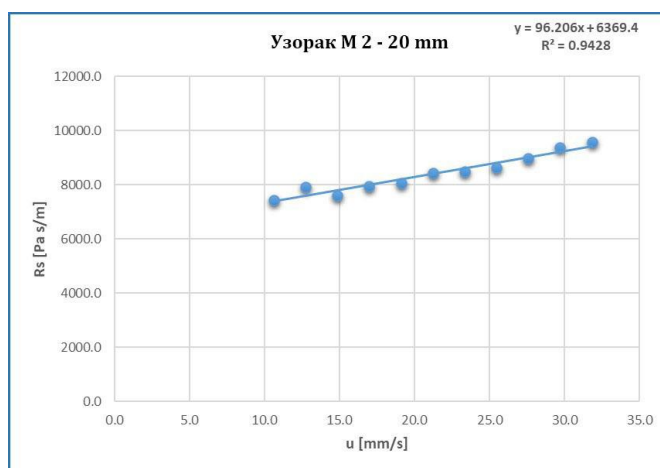
Слика 143. Корелација између специфичне опшорности струјању и дрзине струјања ваздуха за трећи узорак биоконозија М дебљине 10mm

Табела 52. Вредности ошћора проточа ваздуха биокмјозија М дебљине узорак 20 mm

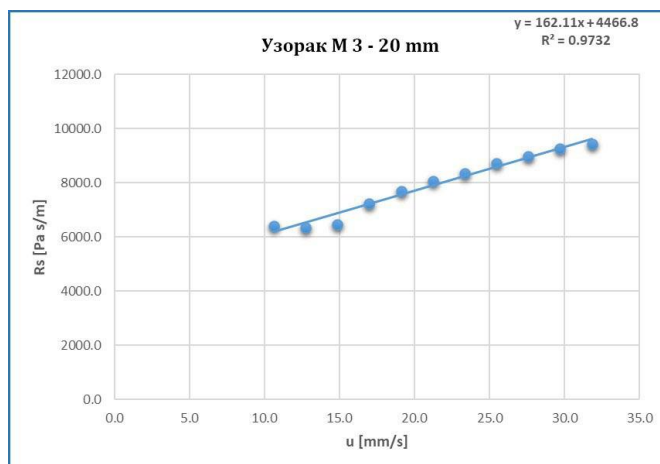
Три узорка биокмјозија М дебљине 20 mm						
	q_v	u	Δp	R	R_s	r
	(lit/min)	(mm/s)	(Pa)	(kPa·s/m ³)	(kPa·s/m)	(kPa·s/m ²)
Први узорак	5	10,6	86	1032,000	8,105	405,265
	6	12,7	102	1020,000	8,011	400,553
	7	14,9	122	1045,714	8,213	410,651
	8	17,0	144	1080,000	8,482	424,115
	9	19,1	157	1046,000	8,220	411,025
	10	21,2	184	1104,000	8,670	433,539
	11	23,3	210	1145,454	8,996	449,818
	12	25,5	233	1165,000	9,149	457,494
	13	27,6	260	1200,000	9,424	471,238
	14	29,7	290	1242,857	9,761	488,068
	15	31,8	315	1260,000	9,896	494,800
Други узорак	5	10,6	79	948,000	7,445	372,278
	6	12,7	101	1010,000	7,932	396,626
	7	14,9	113	968,571	7,607	680,357
	8	17,0	135	1012,500	7,952	397,607
	9	19,1	154	1026,666	8,063	403,171
	10	21,2	179	1074,000	8,435	421,758
	11	23,3	198	1080,000	8,482	424,115
	12	25,5	220	1100,000	8,639	431,968
	13	27,6	248	1144,615	8,989	449,489
	14	29,7	279	1195,714	9,391	469,555
	15	31,8	305	1220,000	9,581	479,092
Трећи узорак	5	10,6	68	816,000	6,408	320,442
	6	12,7	81	810,000	6,361	318,086
	7	14,9	96	822,857	6,462	323,135
	8	17,0	123	922,500	7,245	362,264
	9	19,1	147	980,000	7,986	384,845
	10	21,2	171	1026,000	8,058	402,909
	11	23,3	195	1063,636	8,353	417,689
	12	25,5	222	1110,000	8,717	435,895
	13	27,6	248	1144,615	8,989	449,489
	14	29,7	275	1178,571	9,256	462,823
	15	31,8	300	1200,000	9,424	471,238



Слика 144. Корелација између специфичне отпорности циркулања и брзине циркулања ваздуха за први узорак биокмјозија М дебљине 20mm



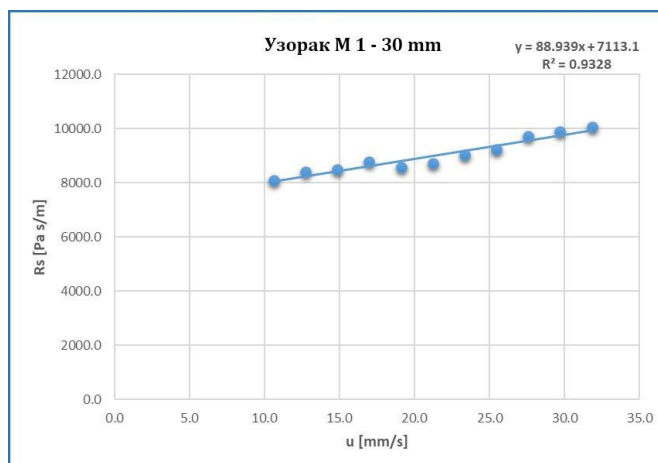
Слика 145. Корелација између специфичне отпорности циркулања и брзине циркулања ваздуха за други узорак биокмјозија М дебљине 20mm



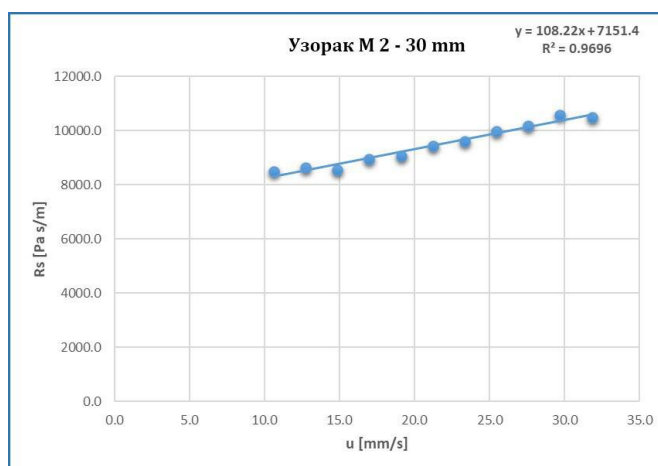
Слика 146. Корелација између специфичне отпорности циркулања и брзине циркулања ваздуха за трећи узорак биокмјозија М дебљине 20mm

Табела 53. Вредности ошћора проточка ваздуха биокмјозија М дебљине узорак 30 mm

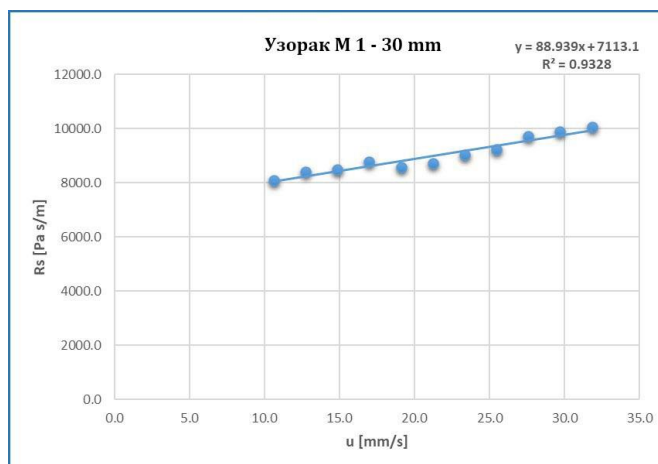
Три узорка биокмјозија М дебљине 30 mm						
	q_v	u	Δp	R	R_s	r
	(lit/min)	(mm/s)	(Pa)	(kPa·s/m ³)	(kPa·s/m)	(kPa·s/m ²)
Први узорак	5	10,6	86	1032,000	8,105	270,176
	6	12,7	107	1070,000	8,403	280,125
	7	14,9	126	1080,000	8,482	282,743
	8	17,0	149	1117,500	8,776	292,560
	9	19,1	164	1093,333	8,587	286,234
	10	21,2	185	1110,000	8,717	290,597
	11	23,3	211	1150,909	9,039	301,307
	12	25,5	235	1175,000	9,228	307,614
	13	27,6	268	1236,923	9,714	323,825
	14	29,7	294	1260,000	9,896	329,867
	15	31,8	320	1280,000	10,053	335,103
Други узорак	5	10,6	90	1080,000	8,482	282,743
	6	12,7	110	1100,000	8,639	287,979
	7	14,9	127	1088,571	8,549	284,987
	8	17,0	152	1140,000	8,953	298,451
	9	19,1	173	1153,333	9,058	301,941
	10	21,2	200	1200,000	9,424	314,159
	11	23,3	224	1221,818	9,596	319,871
	12	25,5	254	1270,000	9,974	332,485
	13	27,6	281	1296,923	10,186	339,533
	14	29,7	314	1345,714	10,569	352,307
	15	31,8	334	1336,000	10,492	349,763
Трећи узорак	5	10,6	63	756,000	5,937	197,920
	6	12,7	78	780,000	6,126	204,203
	7	14,9	92	788,571	6,193	206,447
	8	17,0	106	795,000	6,243	208,130
	9	19,1	126	840,000	6,597	219,911
	10	21,2	142	852,000	6,691	223,053
	11	23,3	163	889,090	6,982	232,763
	12	25,5	181	905,000	7,107	236,928
	13	27,6	196	904,615	7,104	236,827
	14	29,7	222	951,428	7,472	249,083
	15	31,8	230	920,000	7,225	240,855



Слика 147. Корелација између специфичне отпорности циркулања и брзине циркулања ваздуха за први узорак биокмјозија М дебљине 30mm



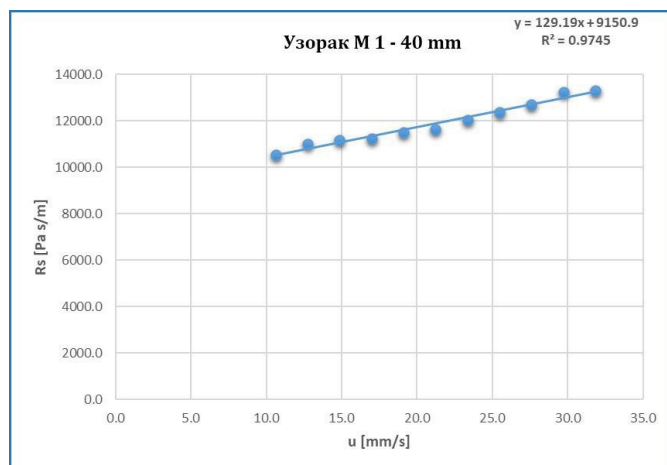
Слика 148. Корелација између специфичне отпорности циркулања и брзине циркулања ваздуха за други узорак биокмјозија М дебљине 30mm



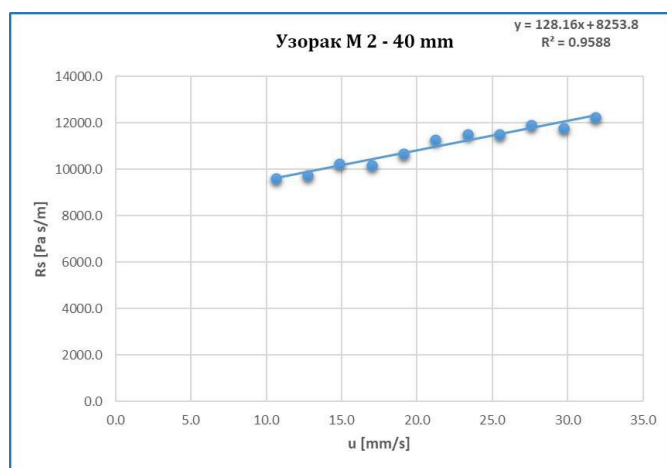
Слика 149. Корелација између специфичне отпорности циркулања и брзине циркулања ваздуха за трећи узорак биокмјозија М дебљине 30mm

Табела 54. Вредности ошћора проточа ваздуха биокмпозиџа М дебљине узорака 40 mm

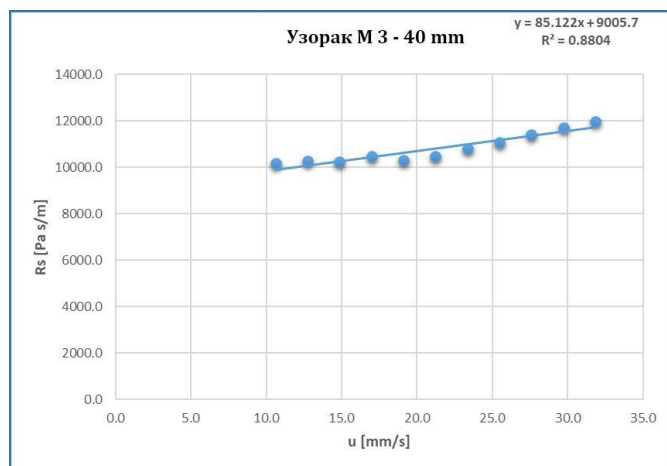
Три узорка биокмпозиџа М дебљине 40 mm						
	q_v	u	Δp	R	R_s	r
	(lit/min)	(mm/s)	(Pa)	(kPa·s/m ³)	(kPa·s/m)	(kPa·s/m ²)
Први узорак	5	10,6	112	1344,000	10,555	263,893
	6	12,7	140	1400,000	10,995	274,889
	7	14,9	166	1422,857	11,175	279,377
	8	17,0	191	1432,500	11,250	281,270
	9	19,1	220	1466,666	11,519	287,979
	10	21,2	247	182,000	11,639	290,990
	11	23,3	281	1532,727	12,038	300,950
	12	25,5	315	1575,000	12,370	309,250
	13	27,6	351	1620,000	12,723	318,086
	14	29,7	393	1684,285	13,228	330,708
	15	31,8	424	1696,000	13,320	333,008
Други узорак	5	10,6	102	1224,000	9,613	240,331
	6	12,7	124	1240,000	9,738	243,473
	7	14,9	152	1302,857	10,232	255,815
	8	17,0	173	1297,500	10,190	254,763
	9	19,1	204	13600,000	10,681	267,035
	10	21,2	239	1434,000	11,262	281,565
	11	23,3	269	1467,272	1,523	288,098
	12	25,5	293	1465,000	11,506	287,652
	13	27,6	329	1518,461	11,926	298,149
	14	29,7	350	1500,000	11,781	294,524
	15	31,8	390	1560,000	12,252	306,305
Трећи узорак	5	10,6	108	1296,000	10,178	254,469
	6	12,7	131	1310,000	10,288	257,217
	7	14,9	152	1302,857	10,232	255,815
	8	17,0	178	1335,000	10,485	262,126
	9	19,1	197	1313,333	10,314	257,872
	10	21,2	222	1332,000	10,461	261,537
	11	23,3	252	1374,545	10,795	269,891
	12	25,5	282	1410,000	11,074	276,852
	13	27,6	315	1453,846	11,418	285,462
	14	29,7	348	1491,428	11,713	292,841
	15	31,8	381	1524,000	11,969	299,236



Слика 150. Корелација између специфичне отпорности циркуања и брзине циркуања ваздуха за први узорак биокмјозија М дебљине 40mm



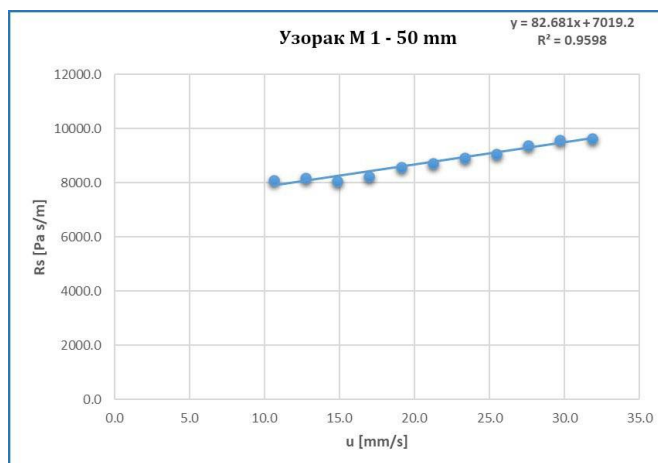
Слика 151. Корелација између специфичне отпорности циркуања и брзине циркуања ваздуха за други узорак биокмјозија М дебљине 40mm



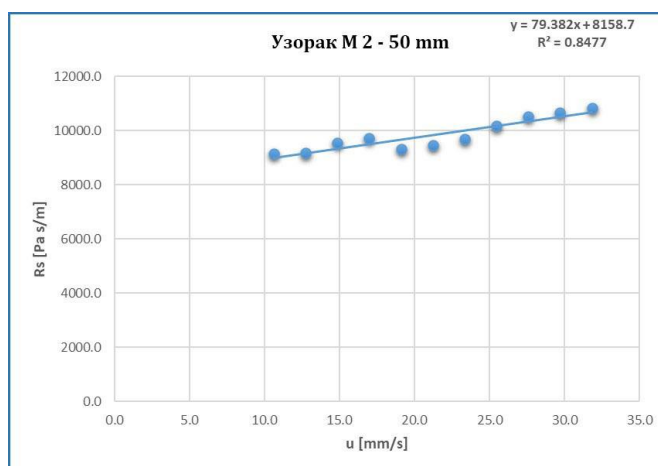
Слика 152. Корелација између специфичне отпорности циркуања и брзине циркуања ваздуха за трећи узорак биокмјозија М дебљине 40mm

Табела 55. Вредности ошћора проточа ваздуха биокмпозиџа М дебљине узорака 50 mm

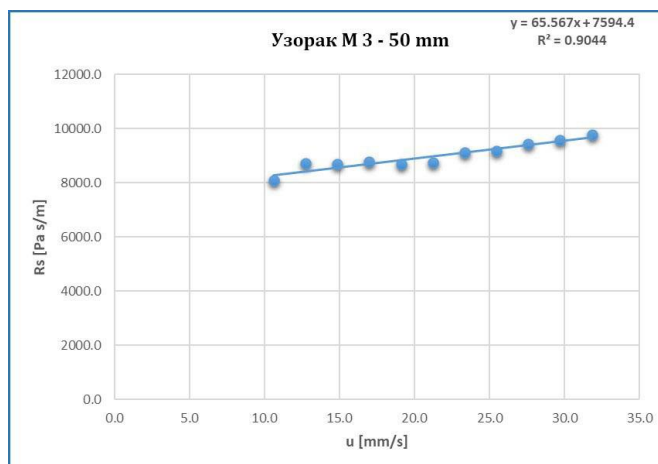
Три узорка биокмпозиџа М дебљине 50 mm						
	q_v	u	Δp	R	R_s	r
	(lit/min)	(mm/s)	(Pa)	(kPa·s/m ³)	(kPa·s/m)	(kPa·s/m ²)
Први узорак	5	10,6	86	1032,000	8,105	162,106
	6	12,7	104	1040,000	8,168	163,362
	7	14,9	120	1028,571	8,078	161,567
	8	17,0	140	1050,000	8,246	164,933
	9	19,1	164	1093,333	8,587	171,740
	10	21,2	185	1110,000	8,717	174,358
	11	23,3	208	1134,545	8,910	178,213
	12	25,5	231	1155,000	9,071	181,426
	13	27,6	259	1195,384	9,388	187,770
	14	29,7	285	1221,428	9,593	191,861
	15	31,8	307	1228,000	9,644	192,893
Други узорак	5	10,6	97	1164,00	9,142	182,840
	6	12,7	117	1170,000	9,189	183,783
	7	14,9	142	1217,142	9,559	191,188
	8	17,0	165	1237,500	9,719	194,386
	9	19,1	178	1186,666	9,320	186,401
	10	21,2	201	1206,000	9,471	189,438
	11	23,3	226	1232,727	9,681	193,636
	12	25,5	259	1295,000	10,170	203,418
	13	27,6	290	1338,461	10,512	210,245
	14	29,7	317	1358,571	10,670	213,403
	15	31,8	345	1380,000	10,838	216,769
Трећи узорак	5	10,6	86	1032,000	8,105	162,106
	6	12,7	111	1110,000	8,717	174,358
	7	14,9	129	1105,714	8,684	173,685
	8	17,0	149	1117,500	8,776	175,536
	9	19,1	166	1106,666	8,691	173,834
	10	21,2	186	1116,000	8,765	175,300
	11	23,3	213	1161,818	9,124	182,497
	12	25,5	234	1170,000	9,189	183,783
	13	27,6	260	1200,000	9,424	188,495
	14	29,7	285	1221,428	9,593	191,861
	15	31,8	311	1244,000	9,770	195,407



Слика 153. Корелација између специфичне опшорности струјању и брзине струјања ваздуха за први узорак биокмјозија М дебљине 50mm



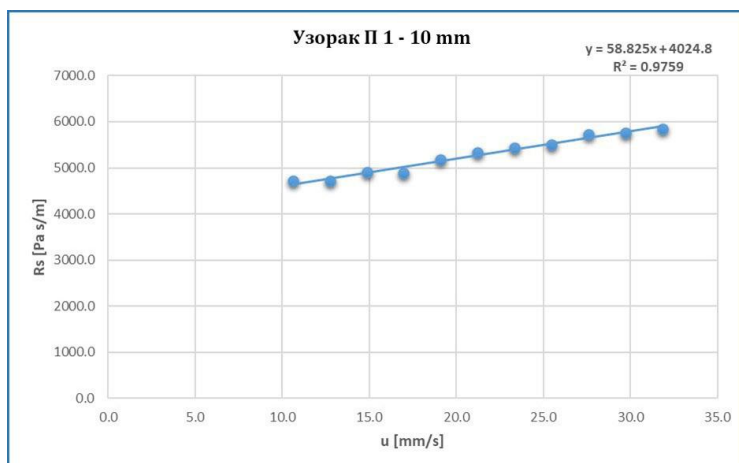
Слика 154. Корелација између специфичне опшорности струјању и брзине струјања ваздуха за други узорак биокмјозија М дебљине 50mm



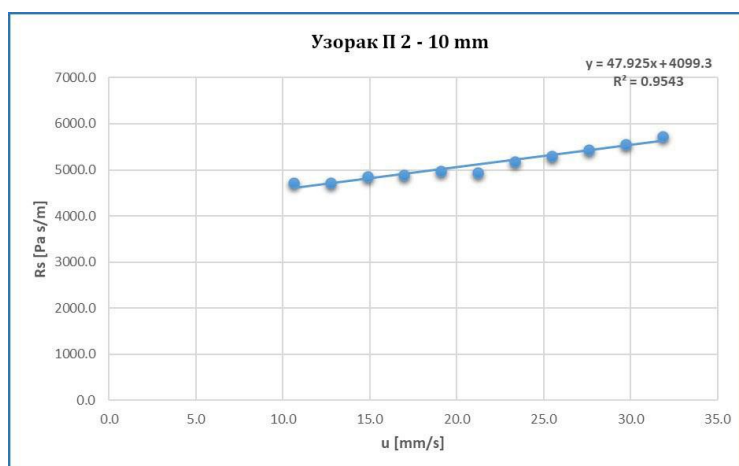
Слика 155. Корелација између специфичне опшорности струјању и брзине струјања ваздуха за трећи узорак биокмјозија М дебљине 50mm

Табела 56. Вредности ошћора пројока ваздуха биокомпозија П дебљине узорака 10 mm

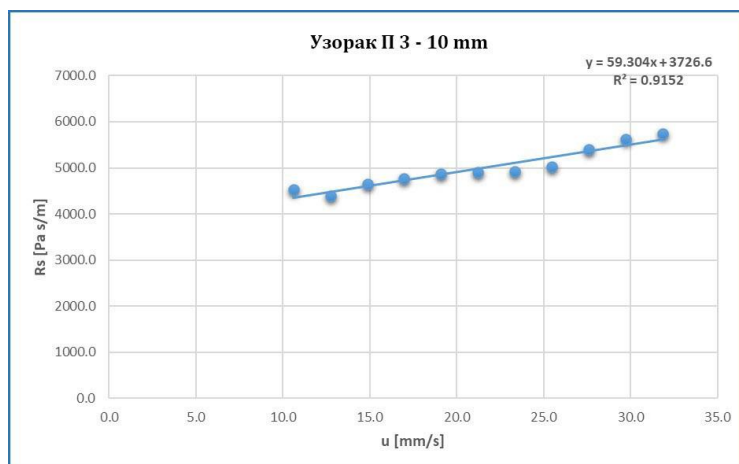
Три узорка биокомполита П дебљине 10 mm						
	q_v	u	Δp	R	R_s	r
	(lit/min)	(mm/s)	(Pa)	(kPa·s/m ³)	(kPa·s/m)	(kPa·s/m ²)
Први узорак	5	10,6	50	600,240	4,714	471,427
	6	12,7	60	600,000	4,712	471,238
	7	14,9	73	625,714	4,914	491,434
	8	17,0	83	622,500	4,889	488,910
	9	19,1	99	660,000	5,183	518,362
	10	21,2	113	678,000	5,325	532,499
	11	23,3	127	692,727	5,440	544,066
	12	25,5	140	700,000	5,497	549,778
	13	27,6	158	729,230	5,727	572,736
	14	29,7	171	732,857	5,755	575,584
	15	31,8	186	744,000	5,843	584,336
Други узорак	5	10,6	50	600,240	4,714	471,427
	6	12,7	60	600,000	4,712	471,238
	7	14,9	72	617,142	4,847	484,702
	8	17,0	83	622,500	4,889	488,910
	9	19,1	95	633,333	4,974	497,418
	10	21,2	105	630,000	4,948	494,800
	11	23,3	121	660,000	5,183	518,362
	12	25,5	135	675,000	5,301	530,143
	13	27,6	150	692,307	5,437	543,737
	14	29,7	165	707,142	5,553	555,388
	15	31,8	182	728,000	5,717	571,769
Трећи узорак	5	10,6	48	576,230	4,525	452,570
	6	12,7	56	560,000	4,398	439,822
	7	14,9	69	591,428	4,645	464,506
	8	17,0	81	607,500	4,771	477,129
	9	19,1	93	620,000	4,869	486,946
	10	21,2	104	624,000	4,900	490,088
	11	23,3	115	627,272	4,926	492,685
	12	25,5	128	640,000	5,026	502,654
	13	27,6	149	687,692	5,401	540,112
	14	29,7	167	715,714	5,621	562,120
	15	31,8	183	732,000	5,749	574,911



Слика 156. Корелација између специфичне отпорности циркулања и брзине циркулања ваздуха за први узорак биокмјозија П дебљине 10mm



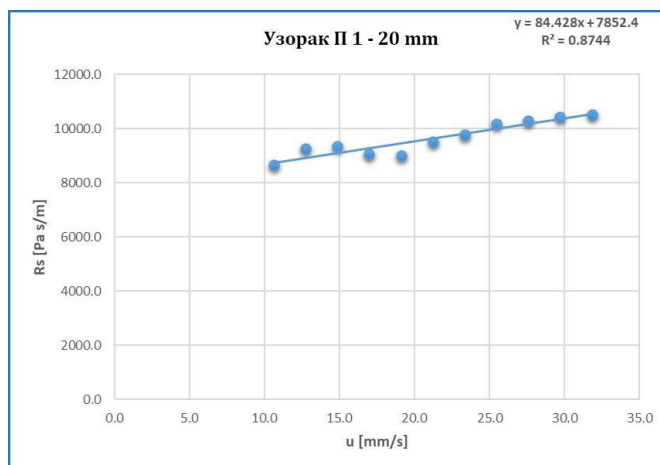
Слика 157. Корелација између специфичне отпорности циркулања и брзине циркулања ваздуха за други узорак биокмјозија П дебљине 10mm



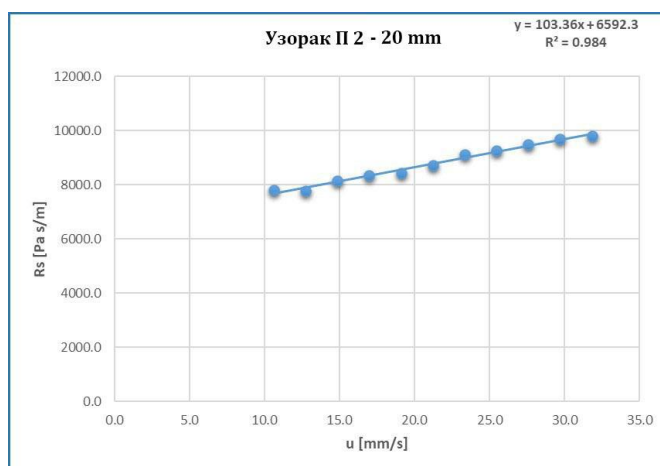
Слика 158. Корелација између специфичне отпорности циркулања и брзине циркулања ваздуха за трећи узорак биокмјозија П дебљине 10mm

Табела 57. Вредности ошћора проточа ваздуха биокмозија П дебљине узорак 20 mm

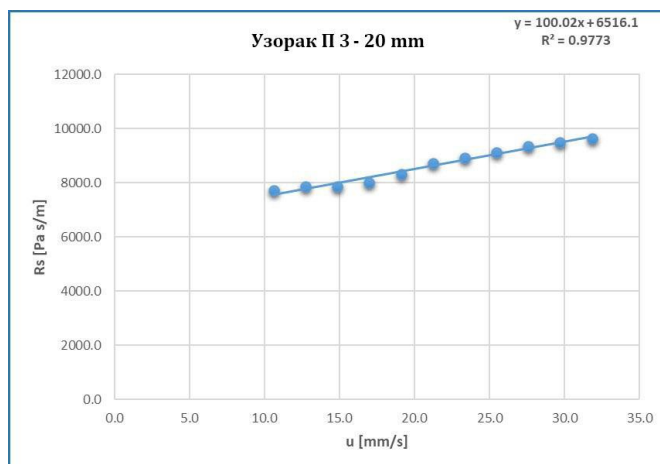
Три узорка биокмозија П дебљине 20 mm						
	q_v	u	Δp	R	R_s	r
	(lit/min)	(mm/s)	(Pa)	(kPa·s/m ³)	(kPa·s/m)	(kPa·s/m ²)
Први узорак	5	10,6	92	1104,000	8,670	433,539
	6	12,7	118	1180,000	9,267	463,384
	7	14,9	139	1191,428	9,357	467,872
	8	17,0	154	1155,000	9,071	453,567
	9	19,1	172	1146,666	9,005	450,294
	10	21,2	202	1212,000	9,519	475,951
	11	23,3	228	1243,636	9,767	488,374
	12	25,5	259	1295,000	10,170	508,545
	13	27,6	284	1310,769	10,294	514,737
	14	29,7	310	1328,571	10,434	521,728
	15	31,8	335	1340,000	10,524	526,216
Други узорак	5	10,6	83	996,000	7,822	391,128
	6	12,7	99	990,000	7,775	388,772
	7	14,9	121	1037,142	8,145	407,285
	8	17,0	142	1065,000	8,364	418,224
	9	19,1	161	1073,333	8,429	421,497
	10	21,2	185	1110,000	8,717	435,895
	11	23,3	213	1161,818	9,124	456,244
	12	25,5	236	1180,000	9,267	463,384
	13	27,6	262	1209,230	9,497	474,863
	14	29,7	288	1234,285	9,694	484,702
	15	31,8	312	1248,000	9,801	490,088
Трећи узорак	5	10,6	82	984,000	7,728	386,415
	6	12,7	100	1000,000	7,854	392,699
	7	14,9	117	1002,857	7,876	393,821
	8	17,0	136	1020,000	8,011	400,553
	9	19,1	159	1060,000	8,325	416,261
	10	21,2	185	1110,000	8,717	435,895
	11	23,3	208	1134,545	8,910	445,534
	12	25,5	232	1160,000	9,110	455,530
	13	27,6	258	1190,769	9,352	467,613
	14	29,7	282	1208,571	9,492	474,604
	15	31,8	307	1228,000	9,644	482,234



Слика 159. Корелација између специфичне отпорности циркуања и брзине циркуања ваздуха за први узорак биокмјозија П дебљине 20mm



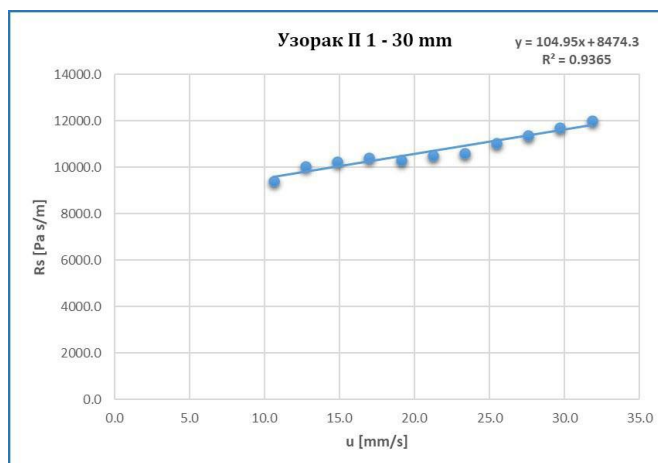
Слика 160. Корелација између специфичне отпорности циркуања и брзине циркуања ваздуха за други узорак биокмјозија П дебљине 20mm



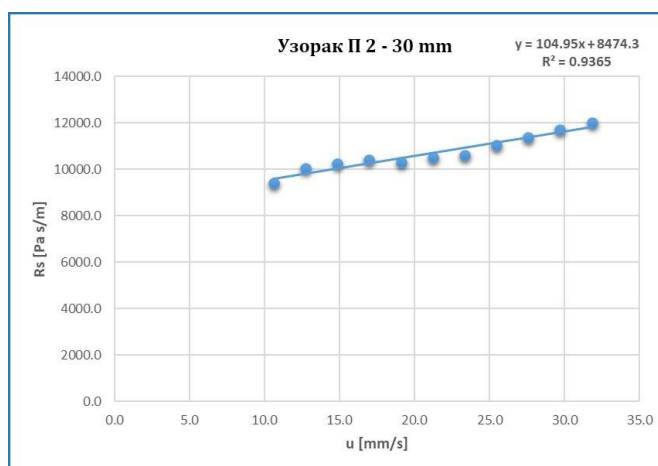
Слика 161. Корелација између специфичне отпорности циркуања и брзине циркуања ваздуха за трећи узорак биокмјозија П дебљине 20mm

Табела 58. Вредности ошћора пројока ваздуха биокомпозија П дебљине узорака 30 mm

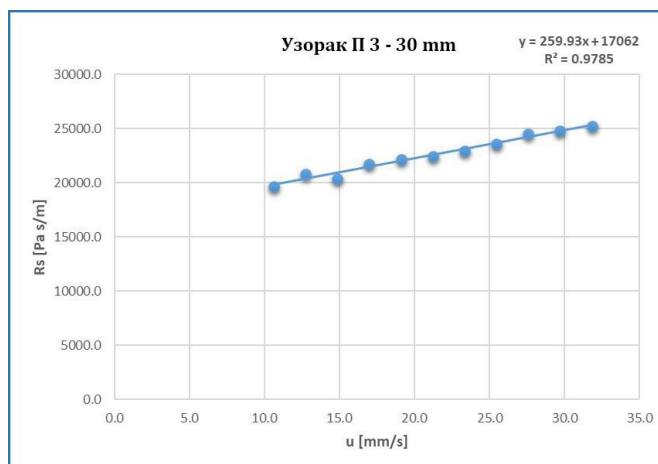
Три узорка биокомполита П дебљине 30 mm						
	q_v	u	Δp	R	R_s	r
	(lit/min)	(mm/s)	(Pa)	(kPa·s/m ³)	(kPa·s/m)	(kPa·s/m ²)
Први узорак	5	10,6	100	1200,000	9,424	314,159
	6	12,7	128	1280,000	10,053	335,103
	7	14,9	152	1302,857	10,232	341,087
	8	17,0	177	1327,500	10,426	347,538
	9	19,1	197	1313,333	10,314	343,829
	10	21,2	223	1338,000	10,508	350,287
	11	23,3	248	1352,727	10,624	354,143
	12	25,5	281	1405,000	11,034	367,828
	13	27,6	314	1449,230	11,382	379,407
	14	29,7	348	1491,428	11,713	390,455
	15	31,8	382	1528,000	12,000	400,029
Други узорак	5	10,6	96	1152,000	9,047	301,592
	6	12,7	116	1160,000	9,110	303,687
	7	14,9	138	1182,857	9,290	309,671
	8	17,0	159	1192,500	9,365	312,195
	9	19,1	186	1240,000	9,738	324,631
	10	21,2	209	1254,000	9,848	328,296
	11	23,3	239	1303,636	10,238	341,291
	12	25,5	265	1325,000	10,406	346,884
	13	27,6	291	1343,076	10,548	351,616
	14	29,7	318	1362,857	10,703	356,795
	15	31,8	364	1456,000	11,435	381,179
Трећи узорак	5	10,6	209	2508,000	19,697	656,592
	6	12,7	265	2650,000	20,813	693,768
	7	14,9	303	2597,142	20,397	679,930
	8	17,0	369	2767,500	21,735	724,529
	9	19,1	423	2820,000	22,148	738,274
	10	21,2	476	2856,000	22,431	747,699
	11	23,3	536	2923,636	22,962	765,406
	12	25,5	600	3000,000	23,561	785,398
	13	27,6	677	3124,615	24,540	818,022
	14	29,7	737	3158,571	24,807	826,912
	15	31,2	804	3216,000	25,258	841,946



Слика 162. Корелација између специфичне отпорности циркуању и брзине циркуања ваздуха за први узорак биокмјозија П дебљине 30mm



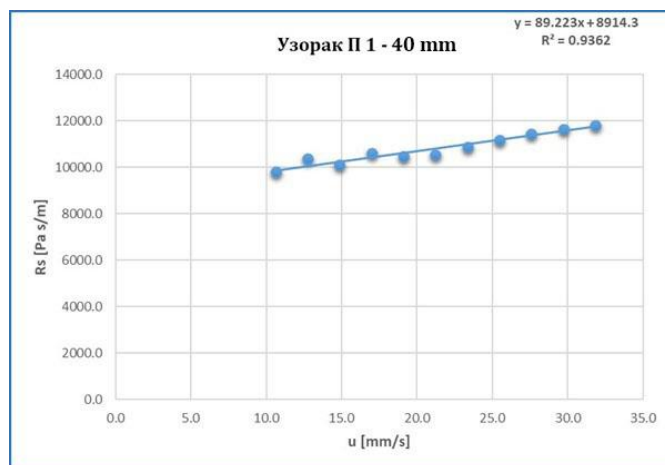
Слика 163. Корелација између специфичне отпорности циркуању и брзине циркуања ваздуха за други узорак биокмјозија П дебљине 30mm



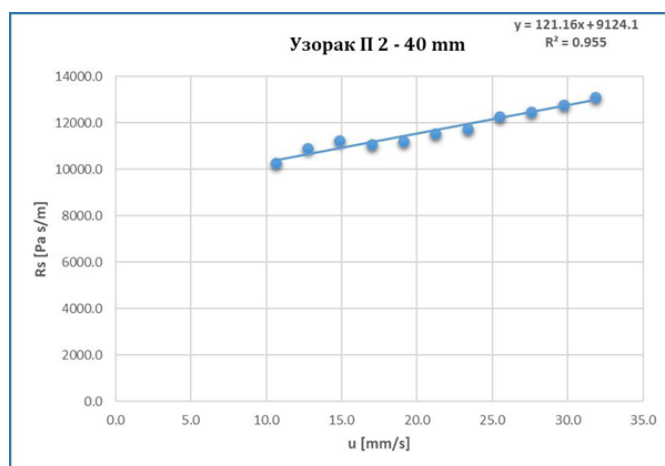
Слика 164. Корелација између специфичне отпорности циркуању и брзине циркуања ваздуха за трећи узорак биокмјозија П дебљине 30mm

Табела 59. Вредности ошћора пројока ваздуха биокомпозија П дебљине узорака 40 mm

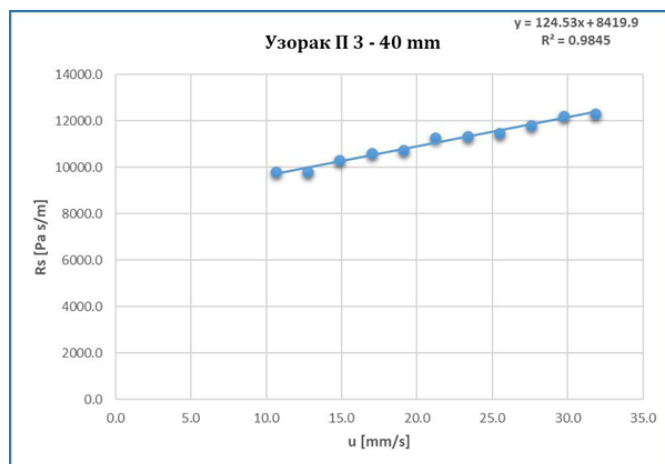
Три узорка биокомпозита П дебљине 40 mm						
	q_v	u	Δp	R	R_s	r
	(lit/min)	(mm/s)	(Pa)	(kPa·s/m ³)	(kPa·s/m)	(kPa·s/m ²)
Први узорак	5	10,6	104	1248,000	9,801	245,044
	6	12,7	132	1320,000	10,367	259,181
	7	14,9	150	1285,714	10,098	252,449
	8	17,0	180	1350,000	10,602	265,071
	9	19,1	200	1333,333	10,472	261,799
	10	21,2	224	1344,000	10,555	263,893
	11	23,3	254	1385,454	10,881	272,033
	12	25,5	285	1425,000	11,191	279,798
	13	27,6	316	1458,461	11,454	286,368
	14	29,7	346	1482,857	11,646	291,158
	15	31,8	376	1504,000	11,812	295,309
Други узорак	5	10,6	109	1308,000	10,273	256,825
	6	12,7	139	1390,000	10,917	272,925
	7	14,9	167	1431,428	11,242	281,060
	8	17,0	188	1410,000	11,074	276,852
	9	19,1	214	1426,666	11,205	280,125
	10	21,2	245	1470,000	11,545	288,633
	11	23,3	274	1494,545	11,738	293,453
	12	25,5	313	1565,000	12,291	307,287
	13	27,6	344	1587,692	12,469	311,742
	14	29,7	380	1628,571	12,790	319,769
	15	31,8	417	1668,000	13,100	327,511
Трећи узорак	5	10,6	104	1248,000	9,801	245,044
	6	12,7	125	1250,000	9,817	245,436
	7	14,9	153	1311,428	10,299	257,498
	8	17,0	180	1350,000	10,602	265,071
	9	19,1	205	1366,666	10,733	268,344
	10	21,2	239	1434,000	11,262	281,565
	11	23,3	265	1445,454	11,352	283,814
	12	25,5	292	1460,000	11,466	286,670
	13	27,6	326	1504,615	11,817	295,430
	14	29,7	363	1555,714	12,218	305,463
	15	31,8	392	1568,000	12,315	307,876



Слика 165. Корелација између специфичне отпорности циркуања и брзине циркуања ваздуха за први узорак биокмјозија П дебљине 40mm



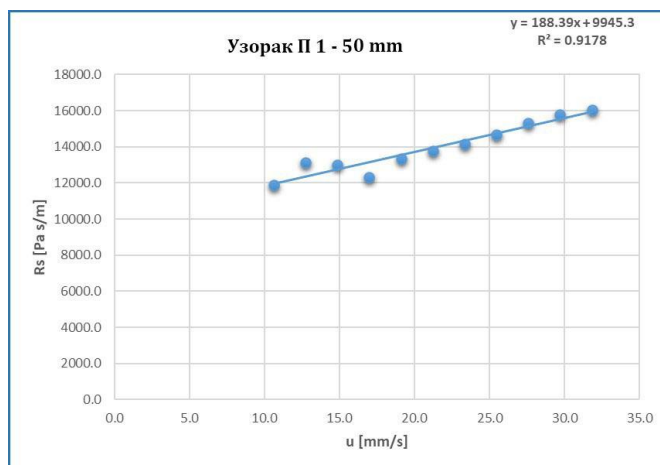
Слика 166. Корелација између специфичне отпорности циркуања и брзине циркуања ваздуха за други узорак биокмјозија П дебљине 40mm



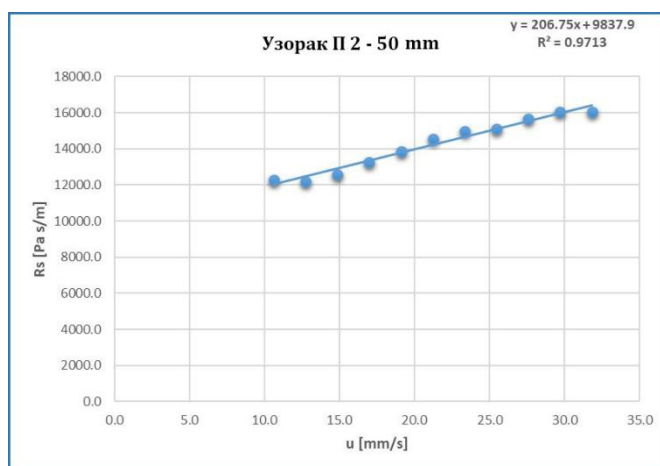
Слика 167. Корелација између специфичне отпорности циркуања и брзине циркуања ваздуха за трећи узорак биокмјозија П дебљине 40mm

Табела 60. Вредности ошћора пројока ваздуха биокомпозија П дебљине узорака 50 mm

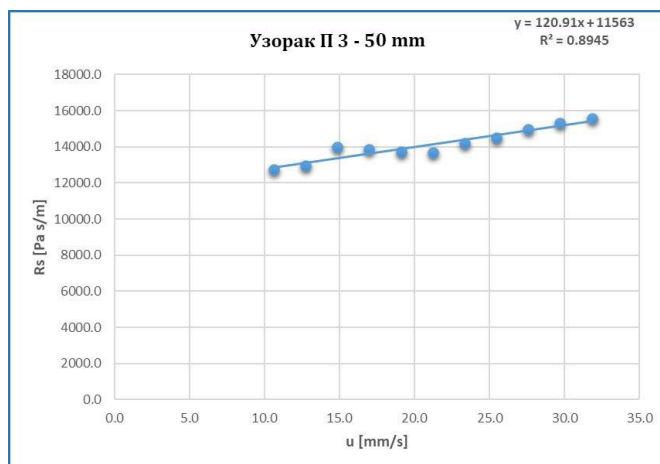
Три узорка биокомпозија П дебљине 50 mm						
	q_v	u	Δp	R	R_s	r
	(lit/min)	(mm/s)	(Pa)	(kPa·s/m ³)	(kPa·s/m)	(kPa·s/m ²)
Први узорак	5	10,6	126	1512,000	11,875	237,504
	6	12,7	167	1670,000	13,116	262,322
	7	14,9	193	1654,285	12,992	259,854
	8	17,0	209	1567,500	12,311	246,222
	9	19,1	255	1700,000	13,351	267,035
	10	21,2	292	1752,000	13,760	275,203
	11	23,3	330	1800,000	14,137	282,743
	12	25,5	374	1870,000	14,686	293,738
	13	27,6	423	1952,307	15,333	306,667
	14	29,7	469	2010,000	15,786	315,730
	15	31,8	510	2040,000	16,022	320,442
Други узорак	5	10,6	130	1560,000	12,252	245,044
	6	12,7	155	1550,000	12,173	243,473
	7	14,9	187	1602,857	12,588	251,776
	8	17,0	225	1687,500	13,253	265,071
	9	19,1	265	1766,666	13,875	277,507
	10	21,2	309	1854,000	14,561	291,225
	11	23,3	349	1903,636	14,951	299,022
	12	25,5	385	1925,000	15,118	302,378
	13	27,6	432	1993,846	15,659	313,192
	14	29,7	476	2040,000	16,022	320,442
	15	31,8	510	2040,000	16,022	320,442
Трећи узорак	5	10,6	135	1620,000	12,723	254,469
	6	12,7	165	1650,000	12,959	259,181
	7	14,9	208	1782,857	14,002	280,050
	8	17,0	235	1762,500	13,842	276,852
	9	19,1	262	1746,666	13,718	274,365
	10	21,2	290	1740,000	13,665	273,318
	11	23,3	331	1805,454	14,180	283,600
	12	25,5	369	1845,000	14,490	289,811
	13	27,6	413	1906,153	14,970	299,417
	14	29,7	455	1950,000	15,315	306,305
	15	31,8	495	1980,000	15,550	311,017



Слика 168. Корелација између специфичне отпорности циркулања и брзине циркулања ваздуха за први узорак биокмјозија П дебљине 50mm



Слика 169. Корелација између специфичне отпорности циркулања и брзине циркулања ваздуха за други узорак биокмјозија П дебљине 50mm



Слика 170. Корелација између специфичне отпорности циркулања и брзине циркулања ваздуха за трећи узорак биокмјозија П дебљине 50mm

Прилог 7 – коефицијент топлотне проводљивости*Табела 61. Вредности коефицијента топлотне проводљивости биокмозија*

	λ (10 mm)	λ (20 mm)	λ (30 mm)	λ (40 mm)	λ (50 mm)
М	0,103	0,114	0,116	0,120	0,118
	0,106	0,114	0,120	0,119	0,119
	0,105	0,116	0,116	0,122	0,119
П	0,101	0,110	0,119	0,121	0,140
	0,105	0,107	0,122	0,121	0,142
	0,106	0,107	0,121	0,120	0,141
К	0,091	0,103	0,113	0,115	0,126
	0,089	0,099	0,115	0,119	0,125
	0,093	0,101	0,114	0,120	0,124

Овај Образац чини саставни део докторске дисертације, односно докторског уметничког пројекта који се брани на Универзитету у Новом Саду. Попуњен Образац укорицити иза текста докторске дисертације, односно докторског уметничког пројекта.

План третмана података

Назив пројекта/истраживања
<u>Развој композита на бази биомасе за унапређење термичких и звучних својстава грађевинских објеката</u>
Назив институције/институција у оквиру којих се спроводи истраживање
<u>а) Факултет техничких наука Нови Сад, Универзитета у Новом Саду- Лабораторији за испитивање грађевинских материјала Департмана за грађевинарство и геодезију</u> <u>б) Факултет техничких наука Нови Сад, Универзитета у Новом Саду- Лабораторији за испитивање материјала, Департмана за производно машинство</u> <u>в) Факултет за машинство и грађевинарство у Краљеву, Универзитета у Крагујевцу- Лабораторији за акустику и техничку дијагностику</u>
Назив програма у оквиру ког се реализује истраживање
<u>Истраживање се реализује у оквиру израде докторске дисертације на студијском програму грађевинарство.</u>
1. Опис података
1.1 Врста студије <i>Укратко описати тип студије у оквиру које се подаци прикупљају</i> <u>Докторска дисертација</u> 1.2 Врсте података а) квантитативни б) квалитативни 1.3. Начин прикупљања података а) анкете, упитници, тестови б) клиничке процене, медицински записи, електронски здравствени записи в) генотипови: навести врсту _____

г) административни подаци: навести врсту: Актуелна литература у области истраживања

д) узорци ткива: навести врсту _____

ђ) снимци, фотографије: навести врсту _____

е) текст, навести врсту _____

ж) мапа, навести врсту _____

з) остало: описати Сопствено експериментално истраживање

1.3 Формат података, употребљене скале, количина података

1.3.1 Употребљени софтвер и формат датотеке:

а) Excel фајл, датотека _____ .xls _____

б) SPSS фајл, датотека _____

в) PDF фајл, датотека _____ .pdf _____

г) Текст фајл, датотека _____ JPEG _____

д) JPG фајл, датотека _____

е) Остало, датотека _____

1.3.2. Број записа (код квантитативних података)

а) број варијабли _____

б) број мерења (испитаника, процена, снимака и сл.) _____ Велики број _____

1.3.3. Поновљена мерења

а) да

б) не

Уколико је одговор да, одговорити на следећа питања:

а) временски размак измедју поновљених мера је _____

б) варијабле које се више пута мере односе се на _____

в) нове верзије фајлова који садрже поновљена мерења су именоване као _____

Напомене: _____

Да ли формати и софтвер омогућавају дељење и дугорочну валидност података?

а) Да

б) Не

Ако је одговор не, образложити _____

2. Прикупљање података

2.1 Методологија за прикупљање/генерисање података

2.1.1. У оквиру ког истраживачког нацрта су подаци прикупљени?

а) експеримент, навести тип Експерименталним путем је одређена порозност биокompatibilitета, упијање воде, отпор протока ваздуха, топлотни флуks, дифузија водене паре, чврстоћа на притисак, чврстоћа на савијање

б) корелационо истраживање, навести тип _____

ц) анализа текста, навести тип Прикупљање података анализом доступне литературе

д) остало, навести шта _____

2.1.2 Навести врсте мерних инструмената или стандарде података специфичних за одређену научну дисциплину (ако постоје).

Стереоскопски микроскоп Carl Zeiss SteREO Discovery, Сушница: Сутјеска, Београд, Прецизна вага CONTROLS 11-D0629/A, Прецизна вага KERN FKB 16KO.1, вакуум пумпа CONTROLOS 86-D2002, вакуум регулатор 86-D2004/1D, диференцијалног мерача TESTO 511, пумпа марке ZAMBELLI, типа ZB1, Механичка преса ФТН-VEB Leipzig; ZMGi, Флуksметар Kyoto electronics HFM 201, сензор TR2-B, клима комора је типа D1429/A произвођача Controls Италија.

2.2 Квалитет података и стандарди

EN 12667:2001, ASTM C518-17, ASTM E1530-06, SRPS EN ISO 9053-1, SRPS EN 1015-10:2008/A1:2008, BSI Standards Publication Thermal Insulating Products for Building Applications-Determination of Bending Behaviour; 2013; ISBN 9780580780547, BSI Standards Publication Thermal Insulating Products for Building Applications-Determination of Water Vapour Transmission Properties; 2013; ISBN 9780580780455

2.2.1. Третман недостајућих података

а) Да ли матрица садржи недостајуће податке? Да Не

Ако је одговор да, одговорити на следећа питања:

- а) Колики је број недостајућих података? _____
- б) Да ли се кориснику матрице препоручује замена недостајућих података? Да Не
- в) Ако је одговор да, навести сугестије за третман замене недостајућих података
- _____

2.2.2. На који начин је контролисан квалитет података? Описати

Подаци у овом раду су резултат различитих експеримената и прорачуна. Квалитет, тј. поузданост добијених података се обезбеђује бирањем одговарајућег броја узорака тако да се при обради резултата могу применити статистичке методе. Поступак рада у сваком експерименту је или дефинисан одговарајућим стандардом/техничком регулативом или релевантном стручном литературом.

2.2.3. На који начин је извршена контрола уноса података у матрицу?

3. Третман података и пратећа документација

3.1. Третман и чување података

3.1.1. Подаци ће бити депоновани у Репозиторијум докторских дисертација на Универзитету у Новом Саду.

3.1.2. URL адреса _____ <https://cris.uns.ac.rs/searchDissertations.jsf> _____

3.1.3. DOI _____

3.1.4. Да ли ће подаци бити у отвореном приступу?

- а) **Да**
- б) Да, али после ембарга који ће трајати до _____
- в) **Не**

Ако је одговор не, навести разлог _____

3.1.5. Подаци неће бити депоновани у репозиторијум, али ће бити чувани.

Образложење

3.2 Метаподаци и документација података

3.2.1. Који стандард за метаподатке ће бити примењен? _____

3.2.1. Навести метаподатке на основу којих су подаци депоновани у репозиторијум.

Ако је потребно, навести методе које се користе за преузимање података, аналитичке и процедуралне информације, њихово кодирање, детаљне описе варијабли, записа итд.

3.3 Стратегија и стандарди за чување података

3.3.1. До ког периода ће подаци бити чувани у репозиторијуму? _____

3.3.2. Да ли ће подаци бити депоновани под шифром? Да **Не**

3.3.3. Да ли ће шифра бити доступна одређеном кругу истраживача? Да **Не**

3.3.4. Да ли се подаци морају уклонити из отвореног приступа после извесног времена?

Да **Не**

Образложити

4. Безбедност података и заштита поверљивих информација

Овај одељак МОРА бити попуњен ако ваши подаци укључују личне податке који се односе на учеснике у истраживању. За друга истраживања треба такође размотрити заштиту и сигурност података.

4.1 Формални стандарди за сигурност информација/података

Истраживачи који спроводе испитивања с људима морају да се придржавају Закона о заштити података о личности (https://www.paragraf.rs/propisi/zakon_o_zastiti_podataka_o_licnosti.html) и одговарајућег институционалног кодекса о академском интегритету.

4.1.2. Да ли је истраживање одобрено од стране етичке комисије? Да **Не**

Ако је одговор Да, навести датум и назив етичке комисије која је одобрила истраживање

4.1.2. Да ли подаци укључују личне податке учесника у истраживању? Да **Не**

Ако је одговор да, наведите на који начин сте осигурали поверљивост и сигурност информација везаних за испитанике:

- а) Подаци нису у отвореном приступу
 - б) Подаци су анонимизирани
 - ц) Остало, навести шта
-
-

5. Доступност података

5.1. Подаци ће бити

а) јавно доступни

б) доступни само уском кругу истраживача у одређеној научној области

ц) затворени

Ако су подаци доступни само уском кругу истраживача, навести под којим условима могу да их користе:

Ако су подаци доступни само уском кругу истраживача, навести на који начин могу приступити подацима:

5.4. Навести лиценцу под којом ће прикупљени подаци бити архивирани.

6. Улоге и одговорност

6.1. Навести име и презиме и мејл адресу власника (аутора) података

Јована Бојковић, cokakalicanin@yahoo.com, bojkovic.j@mfkv.kg.ac.rs

6.2. Навести име и презиме и мејл адресу особе која одржава матрицу с подацима

Јована Бојковић, cokakalicanin@yahoo.com , bojkovic.j@mfkv.kg.ac.rs

6.3. Навести име и презиме и мејл адресу особе која омогућује приступ подацима другим истраживачима

Јована Бојковић, cokakalicanin@yahoo.com, bojkovic.j@mfkv.kg.ac.rs