

Određivanje uporabnih svojstava izolacijskih materijala

Tomičić, Samanta

Master's thesis / Diplomski rad

2024

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **University of Zagreb, Faculty of Chemical Engineering and Technology / Sveučilište u Zagrebu, Fakultet kemijskog inženjerstva i tehnologije**

Permanent link / Trajna poveznica: <https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:149:758639>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2024-07-18**



Repository / Repozitorij:

[Repository of Faculty of Chemical Engineering and Technology University of Zagreb](#)



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET KEMIJSKOG INŽENJERSTVA I TEHNOLOGIJE
SVEUČILIŠNI DIPLOMSKI STUDIJ

Samanta Tomičić

DIPLOMSKI RAD

Zagreb, svibanj 2024.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET KEMIJSKOG INŽENJERSTVA I TEHNOLOGIJE
POVJERENSTVO ZA DIPLOMSKE ISPITE

Kandidatkinja Samanta Tomičić

Predala je izrađen diplomski rad dana: 24. svibnja 2024.

Povjerenstvo u sastavu:

Prof. dr. sc. Igor Sutlović, Sveučilište u Zagrebu Fakultet
kemijskog inženjerstva i tehnologije

Prof. dr. sc. Emi Govorčin Bajsić, Sveučilište u Zagrebu
Fakultet kemijskog inženjerstva i tehnologije

Izv. prof. dr. sc. Vladimir Dananić, Sveučilište u Zagrebu
Fakultet kemijskog inženjerstva i tehnologije

Doc. dr. sc. Andrej Vidak, poslijedoktorand, Sveučilište u
Zagrebu Fakultet kemijskog inženjerstva i tehnologije
(zamjena)

povoljno je ocijenilo diplomski rad i odobrilo obranu diplomskog
rada pred povjerenstvom u istom sastavu.

Diplomski ispit održat će se dana: 29. svibnja 2024.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET KEMIJSKOG INŽENJERSTVA I TEHNOLOGIJE
SVEUČILIŠNI DIPLOMSKI STUDIJ

Samanta Tomičić

Određivanje uporabnih svojstava izolacijskih materijala

DIPLOMSKI RAD

Članovi ispitnog povjerenstva:

prof. dr. sc. Igor Sutlović (mentor),

prof. dr. sc. Emi Govorčin Bajsić,

izv. prof. dr. sc. Vladimir Dananić,

doc. dr. sc. Andrej Vidak (zamjena).

Zagreb, svibanj 2024.

Zahvaljujem mentoru, prof. dr. sc. Igoru Sutloviću na savjetima i pomoći.

Zahvaljujem i mentoru stručne prakse u Rockwoolu®, Nevenu Vlačiću, cijelom PQE timu, a posebno Anji, Luki i Neviji.

Hvala svim mojim prijateljima bez kojih bi studiranje, ali i život bili jednolični, a najviše hvala mojoj obitelji na ljubavi i podršci.

SAŽETAK

Cilj ovog rada je ispitati uporabna svojstva izolacijskih materijala od kamene vune. U eksperimentalnom dijelu mjerena su sljedeća mehanička svojstva: tlačna čvrstoća (engl. *compression strength* - CS), delaminacijska čvrstoća (engl. *delamination strength* - DS) i točkasto opterećenje (engl. *point load* - PL). Uz nabrojana mehanička svojstva, mjerila se i toplinska provodljivost izolacijskih proizvoda. Eksperimentalni dio rada izrađen je u sklopu obavljanja stručne prakse u tvornici Rockwool Adriatic d. o. o. Za potrebe diplomskog rada, testirana su i uspoređena četiri proizvoda kamene vune od kojih se tri koriste za kontaktne fasade (*Frontrock Max Plus*, *Frontrock Max E* i *Frontrock Extra*) dok se četvrti proizvod, *Hardrock Energy Plus* koristi za izolaciju ravnih i kosih krovova.

Ključne riječi: kamena vuna, delaminacijska čvrstoća, tlačna čvrstoća, točkasto opterećenje, toplinska provodljivost.

ABSTRACT

The aim of this paper is to examine the performance properties of stone wool insulation materials. In the experimental part, the following mechanical properties were measured: compression strength (CS), delamination strength (DS) and point load (PL). In addition to the listed mechanical properties, the thermal conductivity of the insulating products was also measured. The experimental part of the work was done as part of the professional practice at the Rockwool Adriatic d.o.o. factory. For the purposes of the thesis, four stone wool products were tested and compared, three of which are used for contact facades (*Frontrock Max Plus*, *Frontrock Max E* and *Frontrock Extra*), while the fourth product, *Hardrock Energy Plus*, is used to insulate flat and pitched roofs..

Key words: stone wool, delamination strength, compressive strength, point load, thermal conductivity.

SADRŽAJ

1.	UVOD	1
2.	PROIZVODNI PROCES KAMENE VUNE	2
2.1.	Opskrba sirovinama.....	3
2.2.	Taljenje sirovina	4
2.3.	Formiranje vlakana.....	5
2.4.	Formiranje primarnog madraca.....	7
2.5.	Formiranje sekundarnog madraca	8
2.6.	Zona hlađenja i završna obrada	10
3.	ODREĐIVANJE UPORABNIH SVOJSTAVA KAMENE VUNE.....	12
3.1.	Određivanje toplinske vodljivosti	13
3.2.	Određivanje ponašanja pri tlačnom opterećenju - engl. <i>compression</i> – CS.....	15
3.2.1.	Frontrock Max Plus (FMP)	16
3.2.2.	Frontrock Max E (FME)	17
3.2.3.	Frontrock Extra (FE)	18
3.2.4.	Hardrock Energy Plus (HEP)	19
3.3.	Određivanje ponašanja pod točkastim opterećenjem – engl. <i>point load</i> – PL	20
3.3.1.	Frontrock Max Plus (FMP)	21
3.3.2.	Frontrock Max E (FME)	22
3.3.3.	Frontrock Extra (FE)	23
3.3.4.	Hardrock Energy Plus (HEP)	24
3.4.	Delaminacijska čvrstoća.....	25
3.4.1.	Frontrock Max Plus (FMP)	27

3.4.2.	Frontrock Max E (FME)	28
3.4.3.	Frontrock Extra (FE)	29
3.4.4.	Hardrock Energy Plus (HEP)	30
4.	REZULTATI I RASPRAVA	31
5.	ZAKLJUČAK	34
6.	POPIS SIMBOLA I KRATICA.....	35
7.	LITERATURA	36
8.	ŽIVOTOPIS	37

1. UVOD

Potražnja za energijom je iz dana u dan u porastu pa sukladno sve većoj potražnji i potrošnji, raste i njezina cijena. To potiče upotrebu izolacijskih proizvoda u građevini jer primjenom odgovarajuće izolacije, smanjuje se i potrebna količina energije za grijanje odnosno hlađenje domova što rezultira nižim financijskim izdacima za potrošenu energiju. Energijska, a samim time i financijska ušteda ovisi o debljini, vrsti i kvaliteti izolacije, ali i o uvjetima u kojima se nalazi izolator (npr. poznato je da prisustvo vlage negativno utječe na kvalitetu izolatora).

Odabir izolacijskog materijala ovisi o puno čimbenika, prvenstveno o toplinskim svojstvima i cijeni, ekološkoj prihvatljivosti materijala, zapaljivosti, mogućoj štetnosti za zdravlje, svrsi korištenja materijala, ali i o želji korisnika.

Eksperimentalni dio ovog diplomskog rada izrađen je u sklopu obavljanja stručne prakse u tvornici Rockwool Adriatic d. o. o. u Potpićnu, u Istri. Navedena i opisana mjerenja sastavni su dio svakodnevnih ispitivanja u laboratoriju kvalitete. Cilj ovog rada je usporediti mehanička i toplinska svojstva četiri odabrana proizvoda.

Rockwool Adriatic d. o. o. poslovna je jedinica koja se bavi prodajom i distribucijom izolacije od kamene vune na području južnog europskog ogranka (LAT). Osnovno područje poslovanja je protupožarna, zvučna i toplinska izolacija za zgrade i industriju, a proizvodi imaju široku primjenu kao što su proizvodi za:

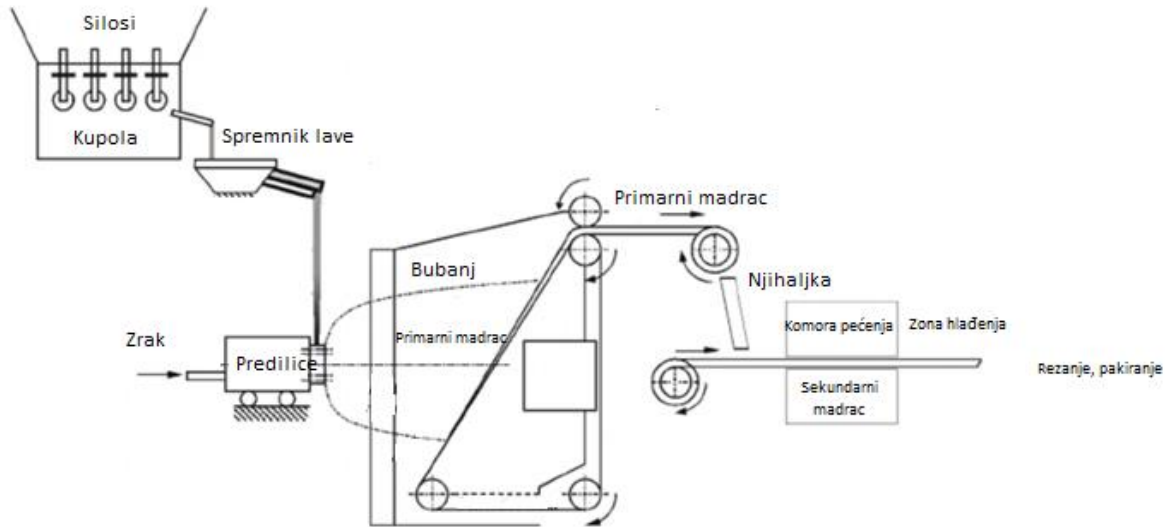
- ravne krovove,
- kose krovove i potkrovlja,
- podove i pregradne zidove,
- kontaktne i ventilirane fasade,
- industrijske i tehničke izolacije,
- zaštitu konstrukcije od požara.

2. PROIZVODNI PROCES KAMENE VUNE

Kamena vuna otkrivena je još davne 1900. na Havajima. Nakon erupcije vulkana, puhao je jak vjetar, a mještani su u blizini pronašli vlakna koja su izgledom ličila na ovčju vunu. Tada su vjerovali da je to kosa njihove božice vatre Pele. Nekoliko godina nakon toga, znanstvenici su otkrili kako ta „kosa” pruža toplinsku izolaciju i zaštitu od požara te su započeli s komercijalizacijom tog otkrića.¹ Od otkrića kamene vune do danas prošlo je više od sto godina, a u proteklom vremenu inženjeri su nalazili načine kako proizvod odnosno njegova svojstva prilagoditi zahtjevima tržišta. Proizvodnja kamene vune složen je tehnološki proces (Slika 1.) kojim se sirovine transformiraju u izolacijski materijal. Ovaj proces kombinacija je raznih sila, tehnologija i opreme te je u nastavku podijeljen na više područja i detaljnije opisan. Podjela procesa i potrebna procesna oprema navedeni su u Tablici 1.

Tablica 1. Dijelovi tehnološkog procesa proizvodnje kamene vune:

Područje procesa	Procesna oprema
1. Opskrba sirovinama i energentima	Pokretne trake, Silosi.
2. Taljenje sirovina	Kupola.
3. Formiranje vlakana	Predilice.
4. Formiranje primarnog madraca	Komora za sakupljanje, WBS bubanj, Pokretna traka, Njihalo – engl. <i>Pendulum</i> .
5. Formiranje sekundarnog madraca	Komora pečenja.
6. Završna obrada	Rezači, Stroj za pakiranje, Pokretne trake.



Slika 1. Proizvodni proces kamene vune.²

2.1. Opskrba sirovinama

Potrebne sirovine dovode se kamionima i istovare na otvoreno skladište na predviđeno natkriveno mjesto za pojedinu sirovinu. Sirovine u proizvodnom procesu kamene vune su: cementni briketi, kamenje bazalt, zgura (slag) i dijabaz (radlovac) čiji je kamenolom u hrvatskom gradu Orahovici. U sastavu bazalta (Slika 2.) nalazi se željezo koje pospješuje toplinsku stabilnost konačnog proizvoda zbog svoje visoke sposobnosti kristalizacije.³ Sirovina bazalt dovodi se iz Mađarske.

Kamen dijabaz (Slika 3.) naziv je dobio po eruptivnoj stijeni istoimenog naziva koja prema svojim kemijskim i mineraloškim svojstvima ima mali sadržaj štetnih elemenata kao što je sumpor, koje je u postupku proizvodnje kamene vune potrebno smanjiti na odgovarajuću razinu. Druga prednost dijabaza je relativno niska temperature tališta. Zbog tih prirodnih svojstava kamena postiže se maksimalna iskoristivost u proizvodnji kamene vune.⁴ Zgura (Slika 4.) je nusprodukt u metaloprerađivačkoj industriji nastala u proizvodnji željeza, a dovozi se iz Albanije. Omjer navedenih sirovina odnosno receptura ključna je za dobivanje zadovoljavajućih mehaničkih svojstava konačnog proizvoda. Pomoću pokretnih traka sirovine se transportiraju do silosa. Kako

bi se zadovoljila i pratila receptura, na dnu silosa nalazi se vaga. Nakon silosa, pokretnim trakama sirovine dolaze do vrha kupolne peći.



Slika 2. Basalt.⁴



Slika 3. Dijabaz (Radlovac).⁵



Slika 4. Zgura (Slag).⁶

2.2. Taljenje sirovina

Korišteno gorivo u procesu je koks (Slika 5.) koji se pali pomoću primarnog zraka temperature 750° C. Toplinom koja nastaje izgaranjem koksa, pokreće se taljenje sirovina. Većina kamenja ima temperaturu taljenja u rasponu 1300 – 1600 °C pa se tako i mineralna vuna proizvodi od vulkanske stijene koja se rastali na temperaturi 1400 – 1600 °C tvoreći visoko viskoznu tekućinu. Peći za taljenje ne služe samo za taljenje kamenja nego i za postizanje homogenosti taline. Proces taljenja bitan je i za dobivanje željenih kemijskih svojstava koje utječu na karakteristike materijala kao što su viskoznost i površinska napetost taline. Najvažnija svojstva taline koja je potrebno pratiti su viskoznost, gustoća, temperatura, površinska napetost.²



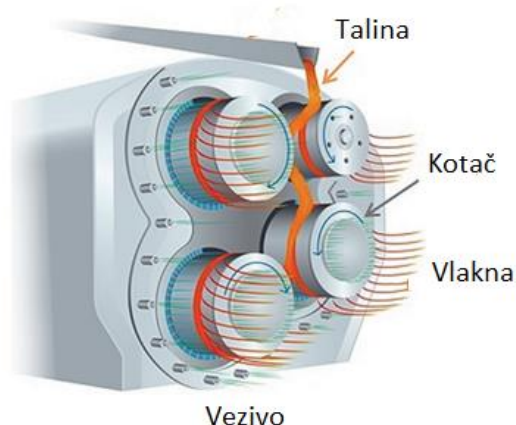
Slika 5. Koks, gorivo u procesu.⁷

Na vrhu kupole izlaze dimni plinovi (150 °C) koji se odvođe na filter za odvajanje čvrstih čestica, a nakon toga odlaze na CO spaljivač. Plinovi izgaraju i predgrijavaju zrak koji služi za paljenje koksa, nakon čega izlaze kroz dimnjak u atmosferu.

2.3. Formiranje vlakana

Nakon procesa taljenja, lava iz peći izlazi na sifon, raspoređuje se po žlijebovima koji ju dalje raspoređuju na sustav kotača to jest, po predilicama (Slika 6.). U ovom trenutku, vuni se kroz predilice dodaje i vezivo. Male količine vezivnog sredstva, obično organski fenol-formaldehid dodaje se vlaknima vune. Glavna funkcija veziva je držanje vlakana zajedno. Alternativna veziva kao što su veziva na bazi šećera uvode se zbog sve veće zabrinutosti oko kemikalija poput formaldehida koji je sastavni dio fenolne smole.

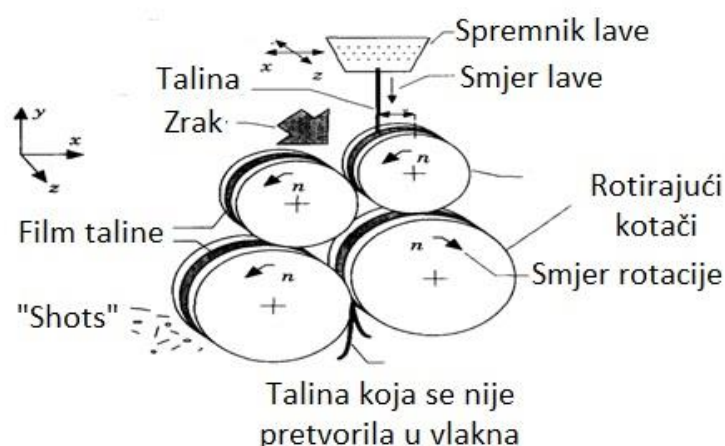
Zrak se usisava od periferije rotirajućih kotača, u smjeru osi rotacije kako bi se pospješilo formiranje vlakana vune te njihovo odvajanje od kotača. Turbulentni uvjeti u proizvodnoj komori koji su posljedica strujanja zraka dovode do nasumične raspodjele vlakana unutar konačnog proizvoda. Za hlađenje sustava kotača koristi se voda.



Slika 6. Predilice.⁸

Da bi došlo do stvaranja vlakana, talina izlivena iz spremnika dolazi do površine kotača. Mlaz taline najprije pada na prvi kotač i film taline oko kotača nastaje kao rezultat rotacije kotača, položaja mlaza i svojstva taline. Nakon prvog kotača, talina se prenosi na ostala tri kotača (Slika 7.).

Razne sile djelujući na sloj taline čine da talina postane nestabilna, nakon čega počinje odvajanje vanjskog sloja taline od površine kotača. Odvajanje nastaje kada centrifugalna sila nadvlada sile koje prevladavaju u sloju kao što su viskoznost i površinska napetost taline. Procesom raspadanja sloja tj. odvajanja sloja, započinje proces stvaranja vlakana.



Slika 7. Shematski prikaz predilica.⁹

Stvaranje vlakana iznimno je složen proces jer ovisi o nizu parametara i svojstvima taline kao što su viskoznost, površinska napetost, tendencija kristalizacije, ali i o vanjskim čimbenicima kao što su brzina okretaja predilica, protok zraka, hlađenje, kontakt taline s metalom.

Formiranje vlakana je i najvažniji dio proizvodnog procesa u smislu kvalitete konačnog proizvoda. Kvaliteta konačnog proizvoda ovisi o:

- količini skrućene taline („shots“) koja se nije pretvorila u vlakna,
- prosječnom promjeru i duljini vlakana,
- statističkom odstupanju promjera i duljine vlakana,
- orijentaciji vlakana.⁸

2.4. Formiranje primarnog madraca

Ventilator odvlači vunu s predilica na WBS bubanj (Slika 8.) koji služi za formiranje primarnog madraca. Optimiziranje homogenosti primarnog sloja važan je element procesa. Zrak iz ventilatora se nakon bubnja filtrira tj. čisti od čvrstih čestica i štetnih tvari te se odvodi na dimnjak.



Slika 8. WBS bubanj.¹⁰

Geometrijska struktura isprepletenih vlakana i homogena raspodjela veziva na površini vlakana značajno utječe na kvalitetu konačnog proizvoda. Kriteriji kvalitete primarnog sloja ocijenjeni su na temelju homogenost i izotropnosti raspodjele vlakana u konačnom proizvodu.²

Kamena vuna sastoji se od velikog broja vrlo tankih vlakana koja se drže zajedno u obliku ploča. Svi proizvodi od kamene vune odlikuju se velikim brojem vlakana nasumično distribuiranih unutar proizvoda. Vlakno je osnovni element mineralne vune. Idealan slučaj je vlakno malog promjera, otprilike 10 mikrometara (0,001 cm) s dužinom od nekoliko centimetara, obično od 5 do 30 cm. Svojstvo toplinske izolacije materijala je prvenstveno određeno kvalitetom pojedinog vlakna i nesavršenostima prilikom formiranja vlakana.⁹

2.5. Formiranje sekundarnog madraca

Primarni madrac koji je nastao na WBS bubnju raspoređuje se preko njihaljke na slojeve. Ovisno o frekvenciji, brzini njihala te brzini pokretne trake tvori se višeslojna struktura mineralne vune. Tlačenjem se smanjuje debljina primarnog sloja kamene vune. Kada primarni sloj prolazi kroz tlačenje, smanjenje debljine sloja uzrokuje sabijanje kamene vune i promjenu njezine gustoće. Preraspodjela kamene vune u primarnom sloju također uzrokuje ponovno formiranje, odnosno preusmjeravanje vlakana u sloju i mijenjanje svojstava konačnog proizvoda.

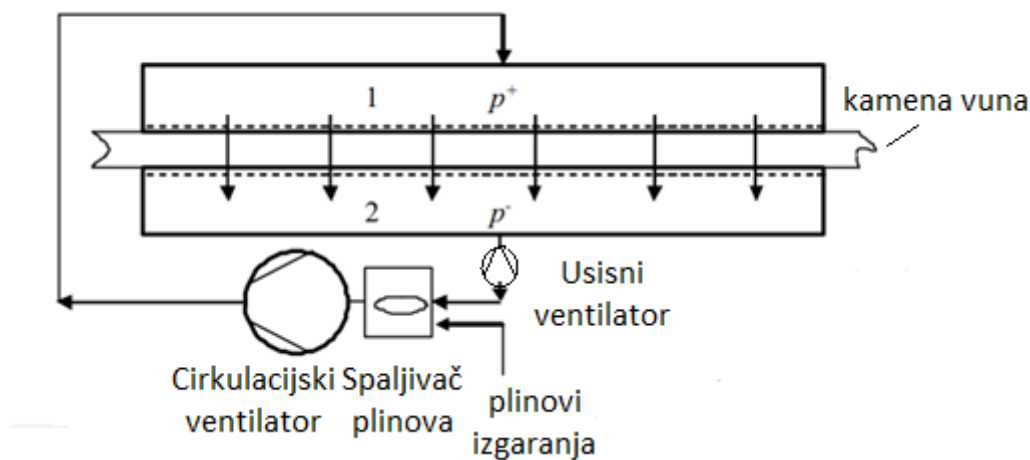
Svojstva kamene vune usko su povezana sa svojstvima osnovnih sastavnih dijelova (vlakna i veziva), ali i sa strukturom vlakana unutar proizvoda. Na primjer, poznato je da orijentacija vlakana ima veliki utjecaj na mehanička svojstva proizvoda. Slojevito slaganje vlakana tijekom proizvodnje rezultira laminarnom strukturom proizvoda od mineralne vune i stoga slabijom otpornošću na raslojavanje tj. delaminaciju.

Primarni madrac kamene vune ulazi u komoru za pečenje (Slika 9.) koja ima dva odvojena područja tlaka; gornji dio s višim tlakom i donji dio s nižim tlakom. U zoni pečenja nastaje tzv. sekundarni madrac. Postoje četiri zoni pečenja s različitim temperaturama i tlakovima. Ovisno o proizvodu, kamena vuna putuje perforiranim pokretnim trakama kroz četiri zone s različitim tlakovima i temperaturama. Razliku u tlakovima stvara cirkulacijski ventilator koji prenosi dimne plinove kroz sloj kamene vune. Dimni plinovi iz komore pečenja s nižim tlakom odlaze do spaljivača plinova gdje se zagrijevaju izgaranjem goriva i dovedenim zrakom potrebnim za izgaranje. Cirkulacijski ventilator prenosi zagrijane dimne plinove do gornjeg dijela komore s višim tlakom. Kako dimni plinovi nastali izgaranjem goriva pružaju dovoljno energije za zagrijavanje kamene vune i polimerizaciju veziva, količini dimnih plinova pridružuje se i produkt hlapljenja veziva.

U komori se peče vezivo odnosno dolazi do njegove polimerizacije. Vrijeme zadržavanja kamene vune na temperaturi iznad temperature aktivacije polimerizacije mora biti dovoljno dugo da se omogući kemijski procesa polimerizacije. Vezivo se stvrdnjava na temperaturi od oko 200 °C gdje dolazi do uzastopnog vezivanja vlakana. To rezultira poboljšanjem mehaničkih svojstava konačnog proizvoda. Na mikroskali, vezivanje se postiže kohezivnim vezanjem vlakana smole i kamene vune. Na mjestima gdje se vezivo i vuna sastaju, nastaju mehaničke veze.

S termodinamičkog gledišta, osim procesa vezivanja, prisutni su i procesi zagrijavanja vlakana te isparavanje i kondenzacija veziva.² Pravilno pečenje i stvrdnjavanje veziva također je važno kako bi se spriječilo kasnije otpuštanje formaldehida u zrak.

Nastali dimni plinovi ovise o količini goriva, zraka i količini vode koja isparava iz vune prilikom zagrijavanja. Kako bi se uklonili dimni plinovi dio komore s nižim tlakom spojen je na usisni ventilator koji služi za održavanje stacionarnih uvjeta tlaka te dimne plinove odvodi najprije na filtere pa kroz dimnjak u atmosferu. Režim rada usisnog ventilatora ovisi o uvjetima tlakova i o količini novonastalih dimnih plinova.



Slika 9. Komora pečenja.²

2.6. Zona hlađenja i završna obrada

Nakon izlaska iz komore pečenja slijedi hlađenje sekundarnog madraca. Hlađenje je potrebno provesti zbog kasnijeg pakiranja u folije.

Nakon zone hlađenja slijede postupci završne obrade kao što je rezanje rubova (engl. *edge trim*) vunenih ploča i definiranje širine linije. Nakon toga slijedi brušenje proizvoda (engl. *grinder*) za par milimetara čime se definira visina vune. Stroj za brušenje ploča namijenjen je za brušenja kod kojih su male tolerancije debljine u tehnološkom listu ili su takvi zahtjevi kupaca. Sam stroj sastoji se od gornjeg i donjeg dijela koji se zasebno mogu podešavati po visini. Prašina koja se javlja kod brušenja vune odsisava se u vrećasti filter i dalje se koristi za proizvodnju ulazne sirovine, briketa. Slijedi rezanje vune po visini (engl. *splitting*) u dva ili tri sloja te vertikalno rezanje.

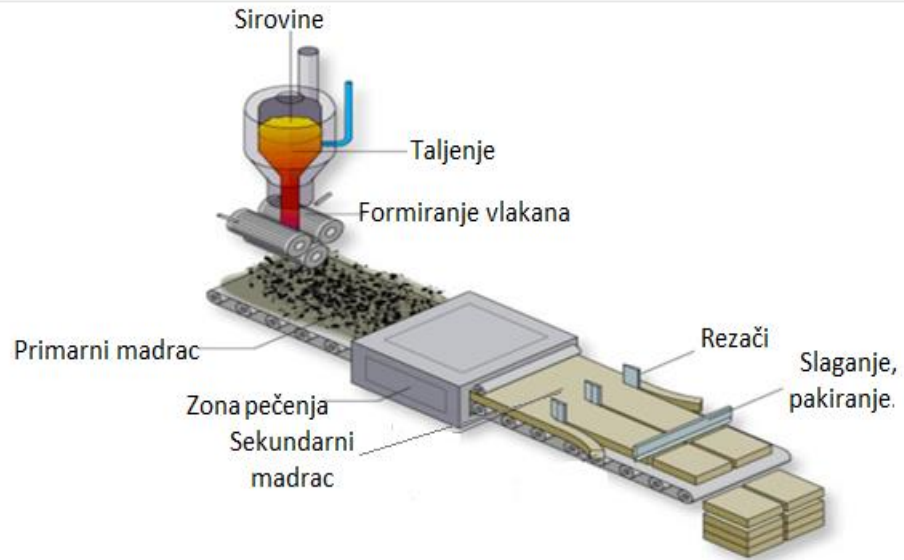
Prilikom vizualne provjere prati se kvaliteta vune i potencijalni izgoreni dijelovi koji se odvajaju za škart. U slučaju uočene nepravilnosti, radnik na liniji putem upute na stroju preusmjerava škart vunu od kvalitetnog proizvoda. S ovog dijela linije se uzimaju uzorci za testiranje u laboratoriju kvalitete. Nakon formiranja proizvoda kamena vuna dolazi do stroja za slaganje paketa (engl. *stacker*). Glavna funkcija stroja za pakiranje je složiti proizvod u pakete tražene visine i preusmjerit ga na pakiranje. Paneli se u pakete slažu ovisno o proizvodu, dimenzijama i zahtjevima kupca.

Ovisno o materijalima, vuna se može pakirati na više načina. Pakira se, umata u foliju i slaže na palete. Palete se odvoze na skladište.

Zbog svoje elastičnosti, mineralna vuna (niže gustoće) može se komprimirati kako bi se smanjio njezin volumen tijekom pakiranja, što proizvod čini jeftinijim te lakšim za transport i rukovanje.

Konačni proizvod smatra se kvalitetnim ako ispunjava standard proizvoda koja se odnosi na:

- učinkovitost toplinske izolacije,
- učinkovitost zvučne izolacije,
- mehanička svojstva proizvoda



Slika 10. Proizvodnja kamene vune.¹¹

3. ODREĐIVANJE UPORABNIH SVOJSTAVA KAMENE VUNE

Kako je izolacija kamenom vunom često korišten materijal za izolaciju građevina, važno je znati njezinu toplinsku provodljivost, tlačnu čvrstoću, točkasto opterećenje i delaminacijsku čvrstoću. Poznavajući navedena svojstva, osigurava se željena kvaliteta proizvoda. Nadalje, uspoređujući svojstva, moguće je izabrati najbolji proizvod za specifičnu primjenu.

Toplinska provodljivost kamene vune je svojstvo koje opisuje brzinu prijenosa topline kroz materijal. Što je niža toplinska provodljivost materijala, to će materijal biti učinkovitiji u smanjenju gubitka topline kroz građevinu. To znači da će građevina biti bolje izolirana i da će biti potrebno manje energije za grijanje ili hlađenje. Važno je mjeriti toplinsku provodljivost kamene vune kako bi se osigurala učinkovita izolacija i ušteda energije.

Tlačna čvrstoća kamene vune je svojstvo koje opisuje sposobnost materijala da se nosi s tlačnim opterećenjem. Kada se kamena vuna koristi za izolaciju, bitno je da ima sposobnost izdržati težinu (npr. težinu solarnih panela, postavljenog klima uređaja i snijega) bez puknuća ili oštećenja.

Točkasto opterećenje kamene vune je mjera koja se koristi za određivanje sposobnosti materijala da izdrži velika opterećenja na malim površinama tj. na određenim točkama. Primjer za točkasto opterećenje na krovu bila bi antena i hod ljudi zbog održavanja krova, dok bi na zidu to bilo opterećenje od npr. ljestvi.

Delaminacijska čvrstoća kamene vune izolacije je svojstvo koje opisuje sposobnost materijala da se odupre odvajanju slojeva. Ovo je posebno važno kod izolacijskih ploča koje su pričvršćene za zid ili kosi krov. Razlozi odvajanja materijala mogu biti vanjski čimbenici poput vremenskih uvjeta kao što je vjetar. Ako se materijal lako odvaja, to može uzrokovati ozbiljne probleme s toplinskom učinkovitošću i u konačnici dovesti do propadanja strukture.

Ukratko, mjerenje toplinske provodljivosti, tlačne čvrstoće, točkastog opterećenja i delaminacijske čvrstoće ključno je za osiguravanje kvalitete i trajnosti proizvoda za izolaciju građevina od kamene vune. Precizno mjerenje ovih karakteristika omogućuje inženjerima i građevinarima da odaberu najbolje materijale za specifičnu primjenu, a također osigurava sigurnost i učinkovitost izolacije.

Tablica 2. Nominalne vrijednosti za uporabna svojstva ispitivanih proizvoda:

Primjena	Fasada			Krov
Proizvod	FMP	FME	FE	HEP
λ_{10}, W/mK	0,035	0,036	0,036	0,035
CS, kPa	15	20	30	30
PL, N	200	250	500	450
DS, kPa	7,5	7,5	10	10

U Tablici 2. prikazane su nominalne vrijednosti sva četiri proizvoda za toplinsku provodljivost (λ_{10}), tlačnu čvrstoću (CS), točkasto opterećenje (PL) i delaminacijsku čvrstoću (DS). U eksperimentalnom dijelu rada izmjerene su i uspoređene navedene vrijednosti.

Svako ispitivanje koje se vrši u tvornici određeno je normom za ispitivanje, odnosno postoje smjernice za ispravno ispitivanje, dobivanje i obradu podataka te njihove interpretacije. Normama se štiti kupca, korisnika, ali i zaposlenika te se osigurava kvaliteta proizvoda. Točan naziv norme za pojedino ispitivanje naveden je u sljedećim poglavljima, prilikom opisivanja postupka provođenja ispitivanja. Sve navedene norme javno su dostupne.

3.1. Određivanje toplinske vodljivosti

Potrebno je odrediti toplinsku vodljivost (λ_{10} , W/mK) izolacijskih materijala pri prosječnoj temperaturi od 10 °C. Toplinska vodljivost je toplinski tok koji prođe kroz jedinicu površine materijala (m²), dok je razlika u temperaturi između gornjeg (T_k) i donjeg (T_v) dijela materijala 10 °C. Test je određen normom HRN EN 12667.

Toplinska vodljivost se određuje mjerenjem u uređaju za protok topline tj. na lambda aparatu (Slika 11.) na osnovi izračuna protoka topline kroz testni uzorak iz električnih signala od mjerača protoka topline. Toplinska vodljivost se može izračunati ako je poznata točna debljina testnog uzorka kao i pad temperature kroz testni uzorak pri stacionarnom protoku topline.

Potrebna aparatura:

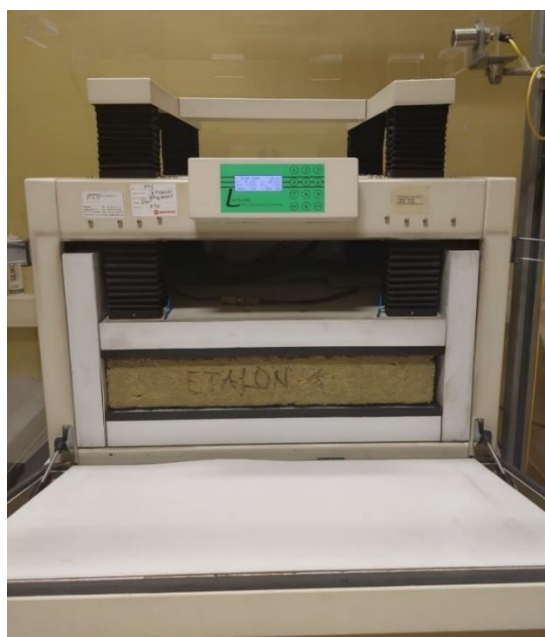
-uređaj za mjerenje debljine, preciznosti $\pm 0,5$ mm, opterećenje 50 Pa (za proizvode $\rho \leq 80$ kg/m² odnosno 250 Pa (za proizvode $\rho > 80$ kg/m²),

-vaga s preciznošću $\pm 0,5$ g,

-klimatska prostorija stabilne temperature (≤ 18 °C) i vlažnosti zraka (≤ 30 %),

-lambda uređaj, LaserComp FOX 600,

-lambda informatički uređaj.



Slika 11. Lambda uređaj, LaserComp FOX 600.

Uzorci veličine 600×600 mm, debljine 60 - 140 mm uzeti su slučajnim odabirom. Bitno je da su uzorci suhi jer toplinska vodljivost ovisi o sadržaju vlage u materijalu. Uzorak je stavljen na policu u predprostoriju sa stabilnom temperaturom i vlagom, nakon čega je stavljen u lambda uređaj koji ima dvije ploče: hladnu temperature 2 °C i toplu temperature 20 °C. U program na računalu upisani su osnovni podaci o modelu koji se testira (naziv proizvoda, debljina, datum testiranja). Pokrenut je START testiranja na računalu, a test je završen rezultatom koji je spremljen u bazu.

3.2. Određivanje ponašanja pri tlačnom opterećenju - engl. *compression* – CS

Potrebno je odrediti ponašanje izolacijskih proizvoda s obzirom na čvrstoću na sabijanje. Tlačna čvrstoća prikazuje se omjerom sile kojom se proizvod sabija 10 % od njegove ukupne visine i površine. Uređaj očitava krivulju deformacije zbog opterećenja. Test je određen normom HRN EN 826.

Potrebna aparatura:

-uređaj za testiranje Bent-Tram povezan s vagom i računalom, opterećenja 250 ± 10 Pa (Slika 12.),

-oprema za rezanje vune (pila).

Uzorkovanje se vrši slučajnim odabirom, a uzorci su izrezani na dimenzije $300 \pm 2 \times 300 \pm 2$ mm. Uzorak je stavljen na vagu povezanu s Bent Tram uređajem i u programu se automatski preuzima masa uzorka. Uzorak je centriran na nepomičnu donju ploču instrumenta, a gornja ploča je namještena na cca. 5 mm od vune. U programu je pritisnuta tipka START. Uzorak je komprimiran pri konstantnoj brzini, i zabilježena je tlačna čvrstoća pri deformaciji od 10 %, SIGMA10 (σ_{10}).

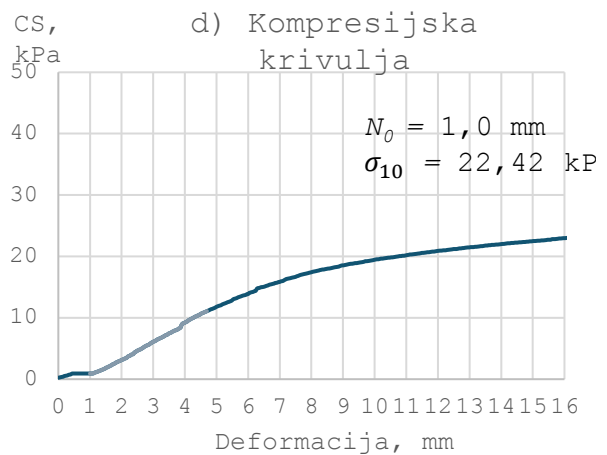
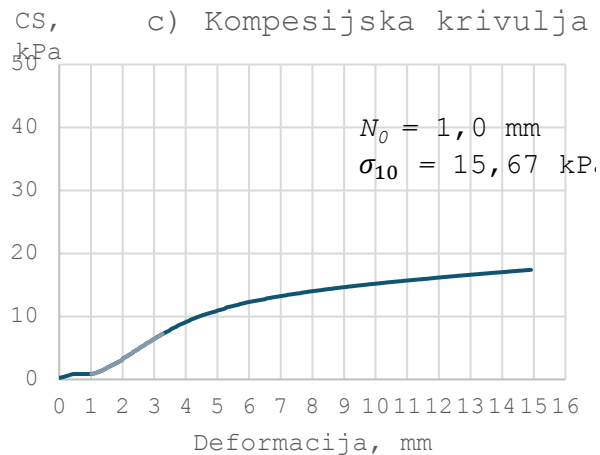
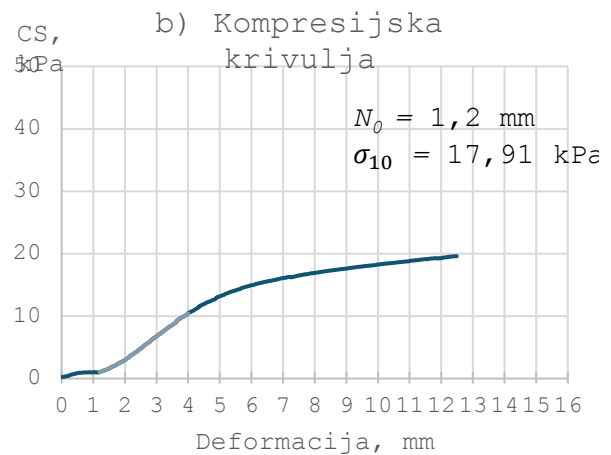
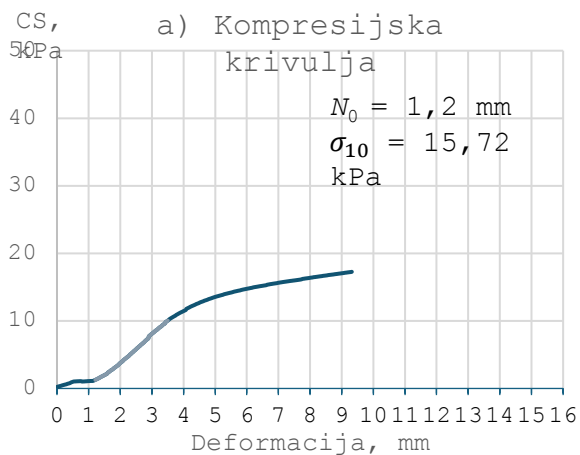


Slika 12. Uređaj Bent Tram, mjerenje tlačne čvrstoće.

Na računalu se kao rezultat dobiva tzv. kompresijska krivulja i očitani rezultati tlačne čvrstoće pri 10 % deformacije (σ_{10}). X-os kompresijske krivulje predstavlja deformaciju uzorka izraženu u

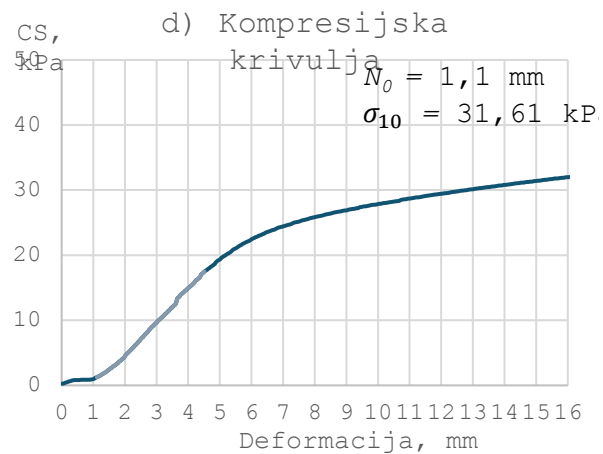
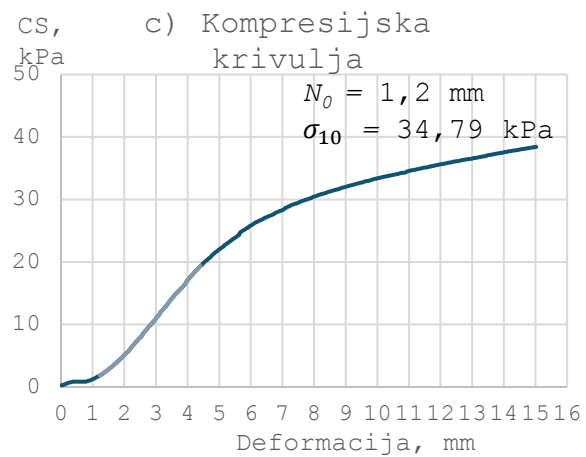
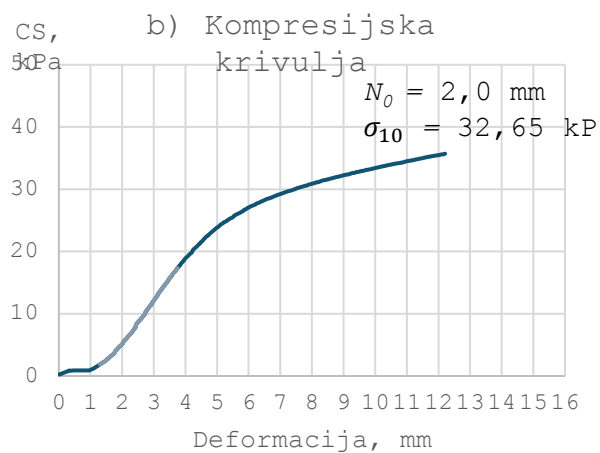
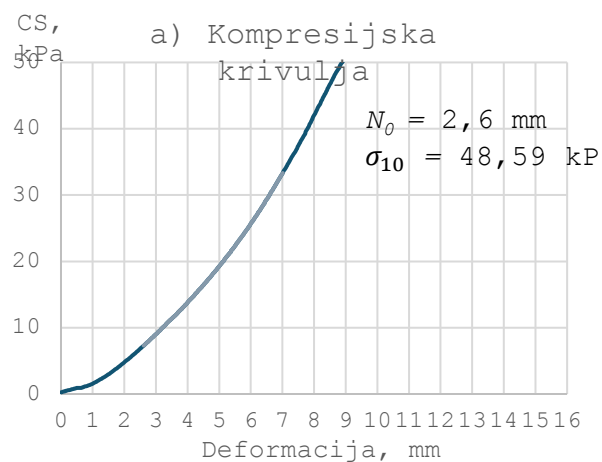
milimetrima, a y-os naziva se CS, skraćeno od kompresija odnosno tlačna čvrstoća u kilopaskalima. Tlačna čvrstoća očitava se pri 10 % vrijednosti debljine uzorka uvećano za početnu deformaciju (N_0) tj. deformaciju prije linearne zone krivulje.

3.2.1. Frontrock Max Plus (FMP)



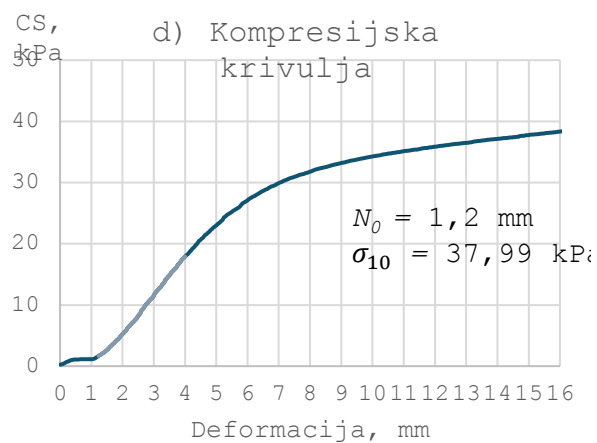
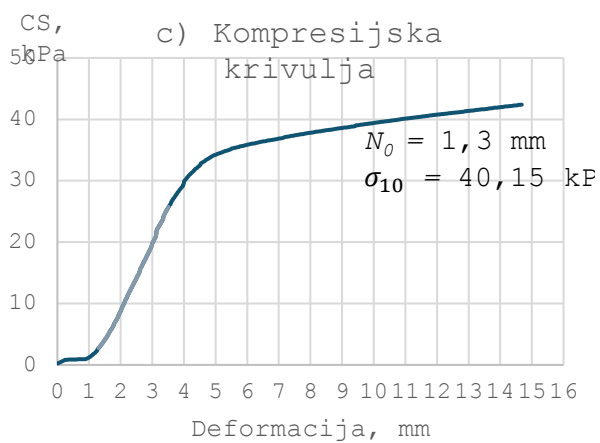
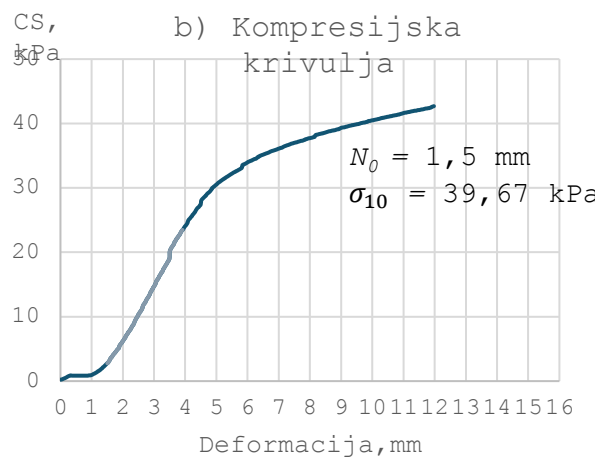
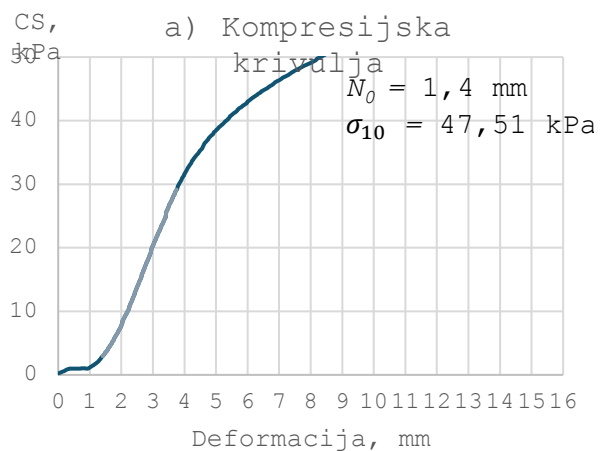
Slika 13. Krivulja deformacije FMP, 60 mm (a), 80 mm (b), 100 mm (c), 140 mm (d).

3.2.2. Frontrock Max E (FME)



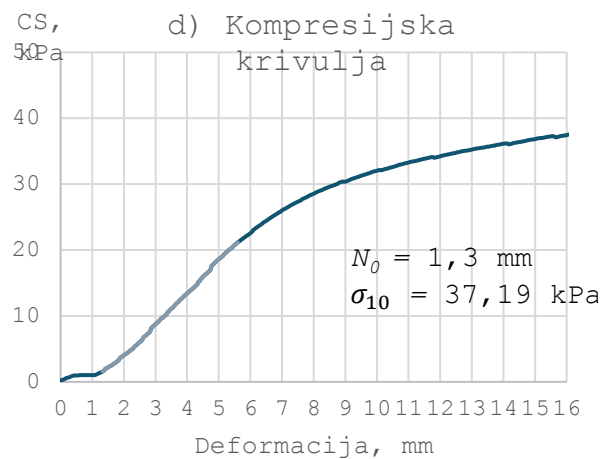
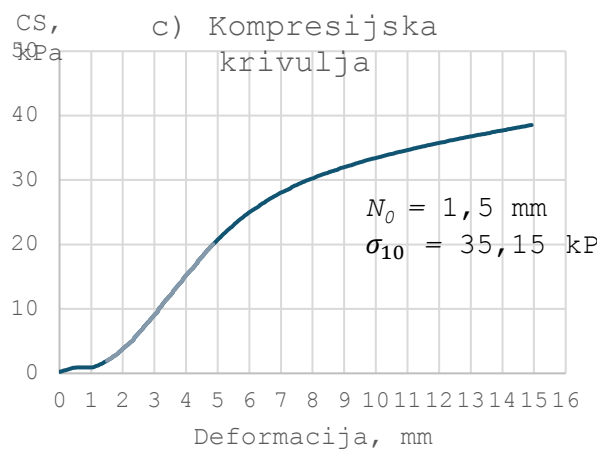
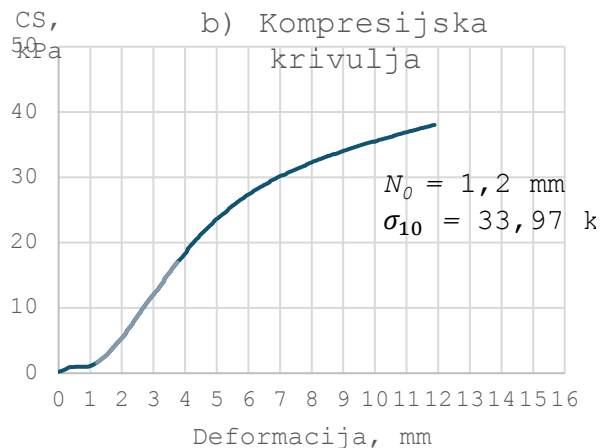
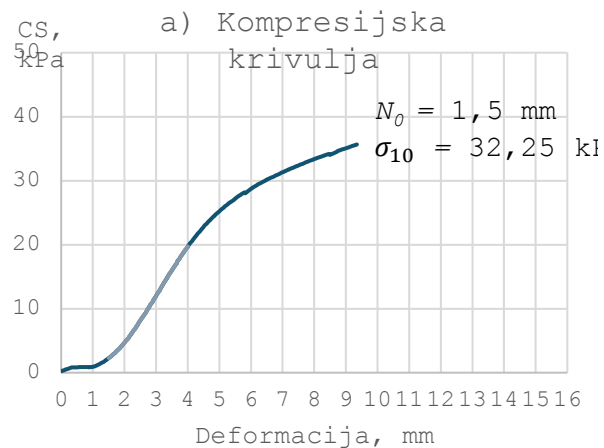
Slika 14. Kompresijska krivulja FME, 60 mm (a), 80 mm (b), 100 mm (c), 140 mm (d).

3.2.3. Frontrock Extra (FE)



Slika 15. Kompresijska krivulja FE, 60 mm (a), 80 mm (b), 100 mm (c), 140 mm (d).

3.2.4. Hardrock Energy Plus (HEP)



Slika 16. Kompresijska krivulja HEP, 60 mm (a), 80 mm (b), 100 mm (c), 140 mm (d).

3.3. Određivanje ponašanja pod točkastim opterećenjem – engl. *point load* – PL

Potrebno je odrediti ponašanje izolacijskih proizvoda pod točkastim opterećenjem pri 5 mm deformacije. Način ispitivanja određen je normom HRN EN 12430.

Potrebna aparatura:

-uređaj Bent-tram, povezan s vagom i računalom (Slika 17.),

-oprema za rezanje vune (pila).

U računalu se unose podaci o testiranom uzorku. Uzorak se važe i centrira na nepomičnu ploču, gornji pomični dio presjeka iznosi 50 cm^2 ($d = 79,8 \text{ mm}$) te se namjesti na udaljenost cca. 5 mm od vune i pokreće se test.

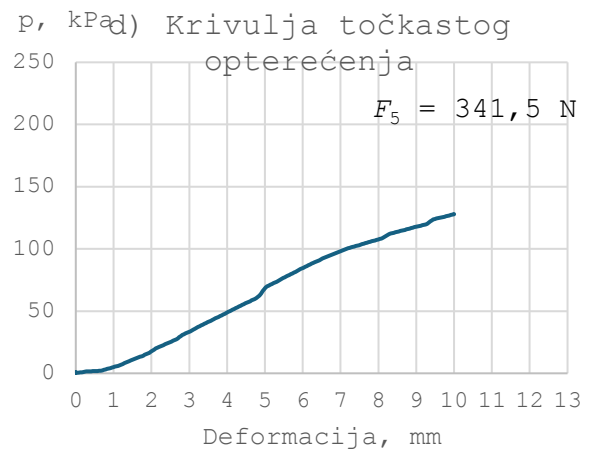
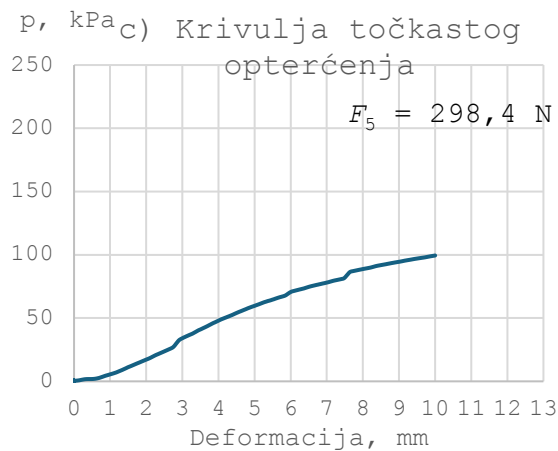
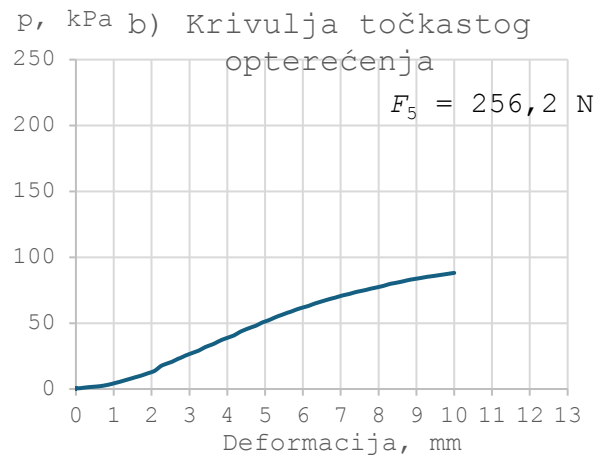
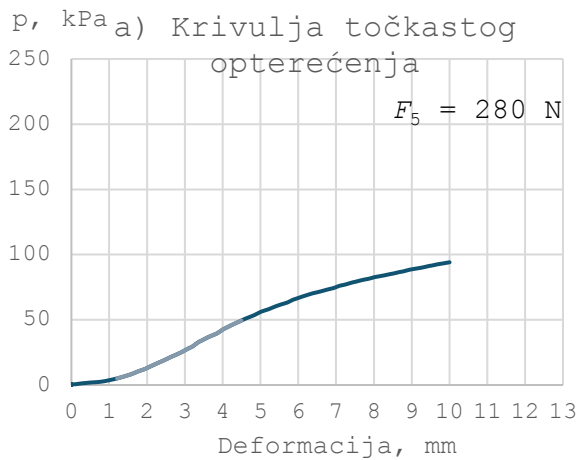
Uzorak se tlači pri stalnoj brzini od $50 \pm 5 \text{ mm/min}$ i bilježi se točkasto opterećenje, σ_p i tlačna sila pri deformaciji od 5 mm, F_5 . Test je završen kad se postigne kritična točka i/ili kad deformacija postigne 20 %.



Slika 17. Uređaj Bent Tram, mjerenje točkastog opterećenja.

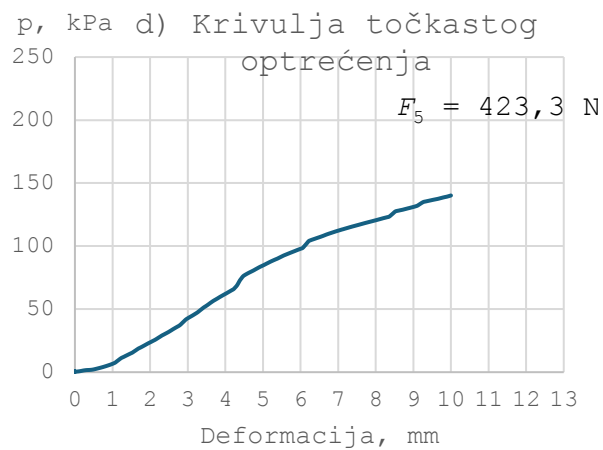
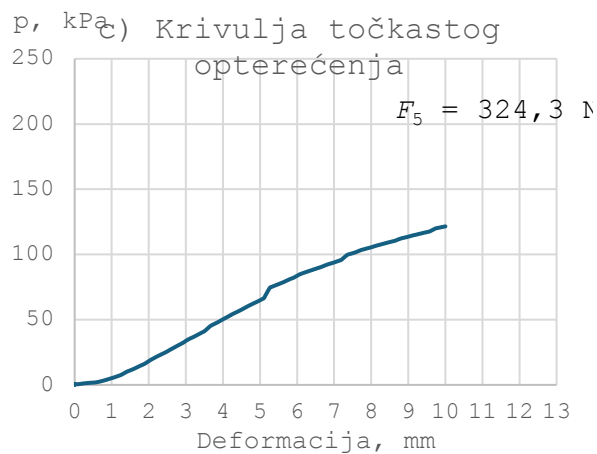
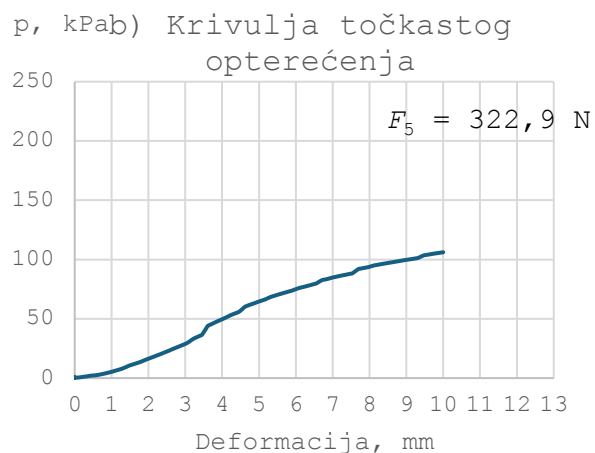
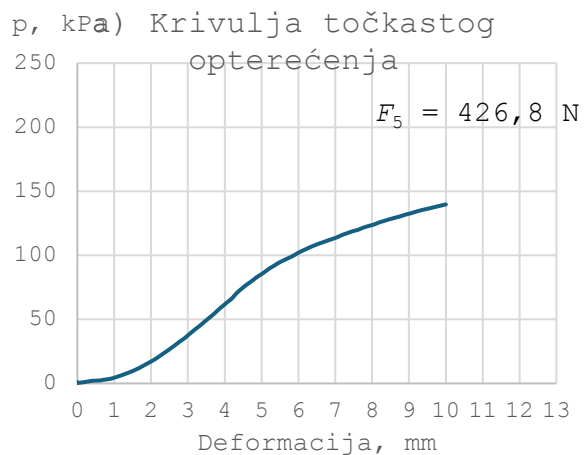
Na računaru se dobiva krivulja točkastog naprezanja. Na x-osi krivulje nalazi se deformacija u milimetrima, a na y-osi točkasto opterećenje σ_p u kilopaskalima. S grafa se očitava točkasto opterećenje pri deformaciji od 5 mm, a rezultat odnosno sila pri deformaciji od 5 mm, F_5 dobiva se iz izraza: $F_5 = \sigma_p \times A$, gdje je A površina pomičnog dijela presjeka Bent Trama i iznosi 50 cm^2 ($0,005 \text{ m}^2$).

3.3.1. Frontrock Max Plus (FMP)



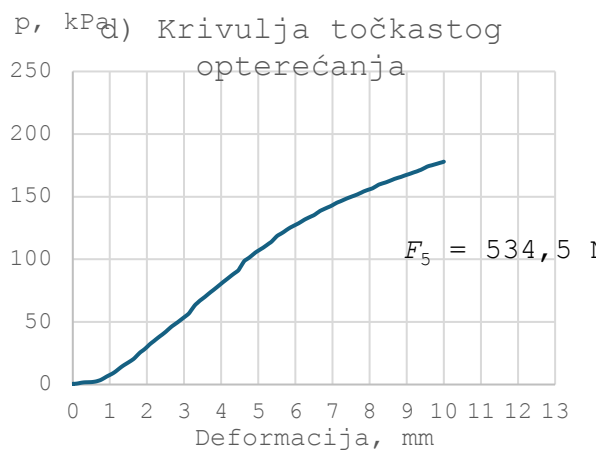
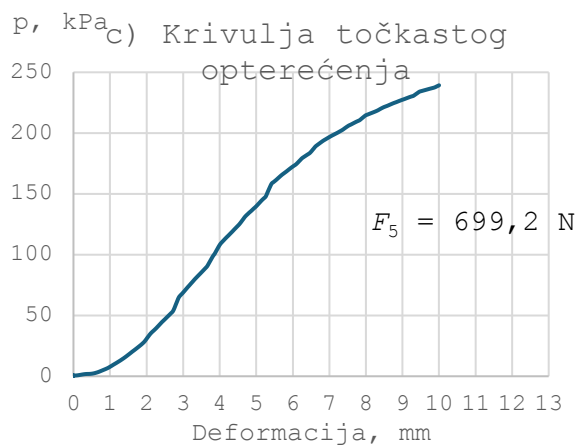
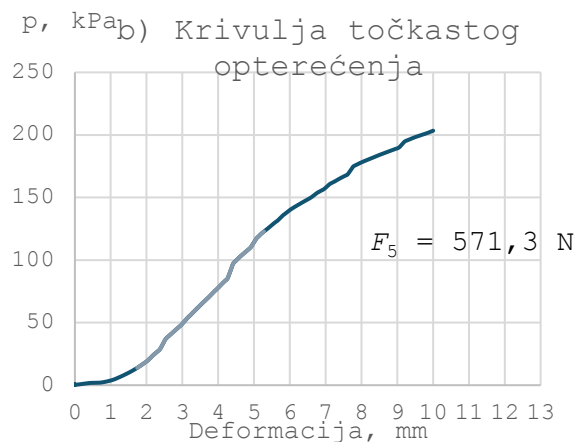
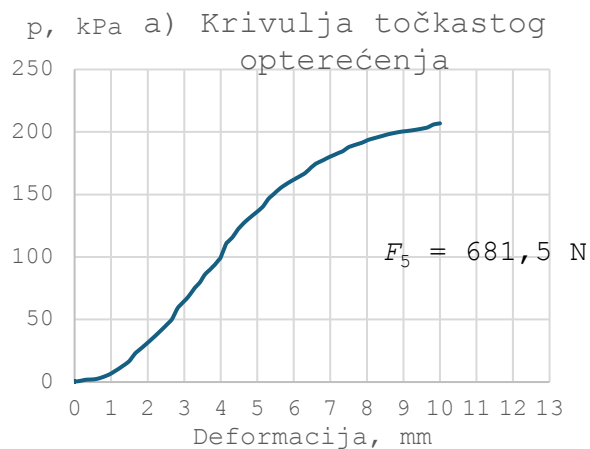
Slika 18. Krivulja točkastog opterećenja FMP, 60 mm (a), 80 mm (b), 100 mm (c), 140 mm (d)

3.3.2. Frontrock Max E (FME)



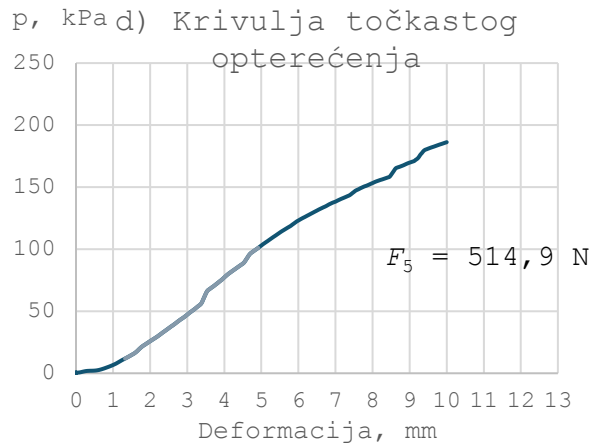
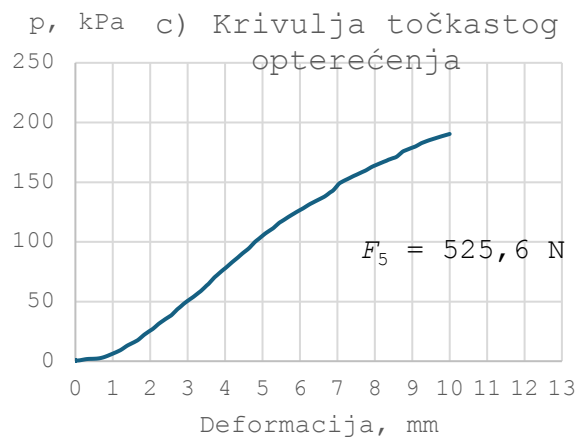
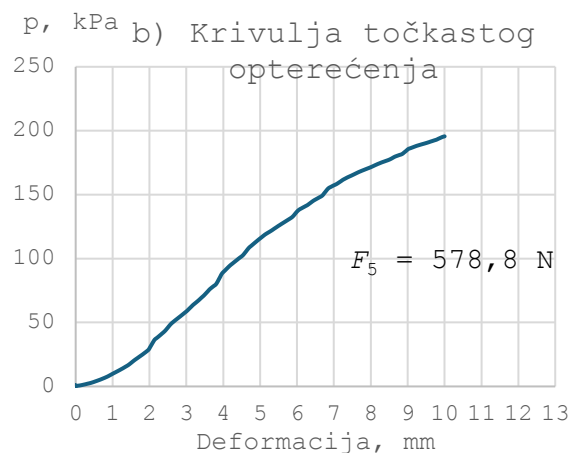
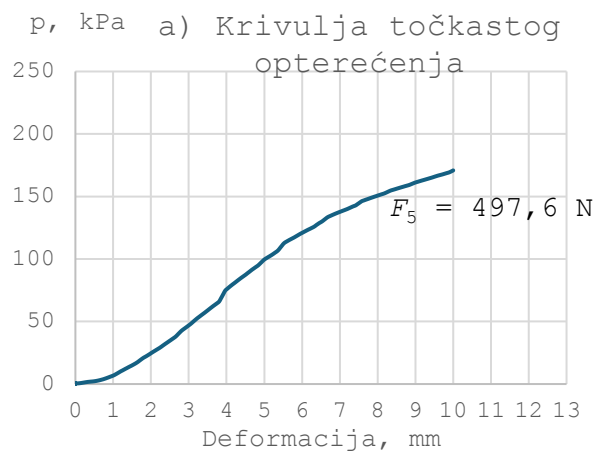
Slika 19. Krivulja točkastog opterećenja FME, 60 mm (a), 80 mm (b), 100 mm (c), 140 mm (d)

3.3.3. Frontrock Extra (FE)



Slika 20. Krivulja točkastog opterećenja FE, 60 mm (a), 80 mm (b), 100 mm (c), 140 mm (d).

3.3.4. Hardrock Energy Plus (HEP)



Slika 21. Krivulja točkastog opterećenja HEP, 60 mm (a), 80 mm (b), 100 mm (c), 140 mm (d).

3.4. Delaminacijska čvrstoća

Potrebno je odrediti vlačnu čvrstoću okomitu na izolacijske proizvode tj. delaminaciju. Delaminacija se definira kao maksimalna vlačna čvrstoća koja odgovara unutarnjoj koheziji ispitivanih uzoraka tijekom povlačenja okomito na uzorak. Ispitivanje je određeno normama HRN EN 1607 i HRN EN 13162.

Ploče se urone u kadu s tekućim voskom otopljenim na 100 °C. Uzorak dimenzije 300 ± 2 mm \times 300 ± 2 mm nalijepi se na ploče. Nakon što je uzorak zalijepljen, pričekava se 20 minuta da se vosak ohladi. Uređaj pomiče pomičnu ploču odgovarajućom konstantnom brzinom od 2 ± 1 mm/min.

U računalo se upišu podaci o debljini i težini proizvoda dok se ostali podaci o proizvodu automatski povlače iz sistema. Pokreće se test na računalo koje bilježi delaminaciju u kilopaskalima (kPa). Nakon završetka ispitivanja, ploče se skinu s aparata i smještaju u kadu za skidanje voska.

Potrebna aparatura:

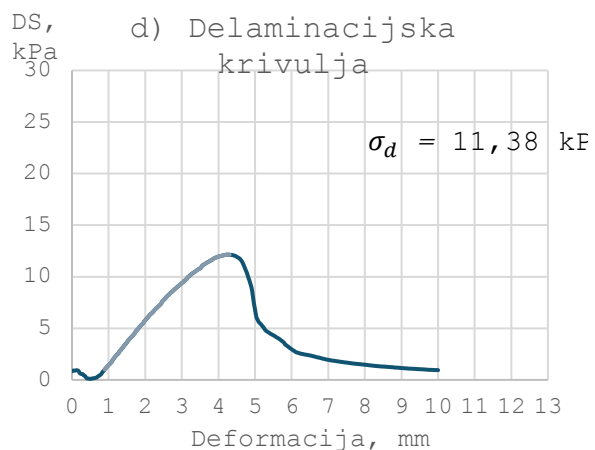
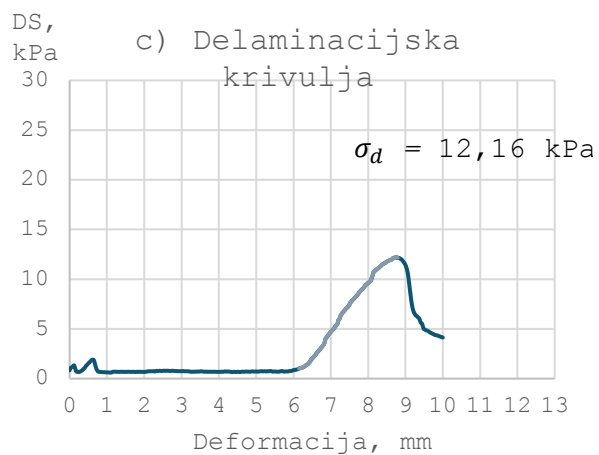
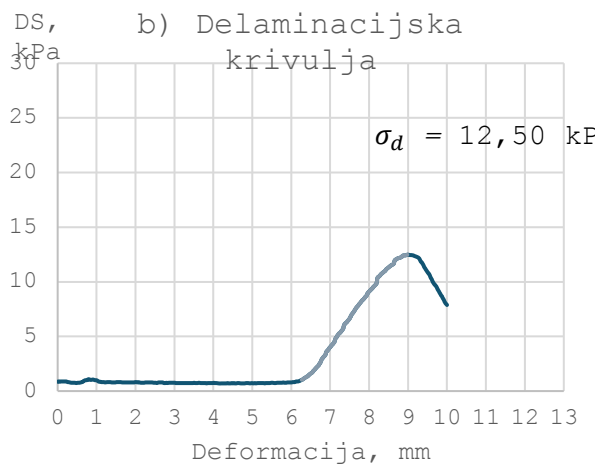
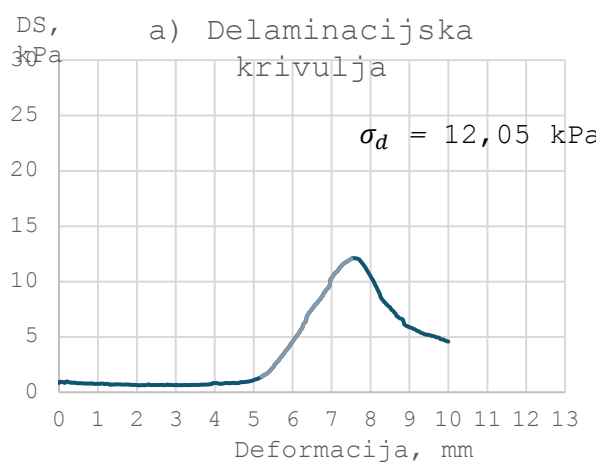
- kada za taljenje voska,
- kada za čišćenje korištenih ploča,
- uređaj Bent Tram (Slika 22.).



Slika 22. Uređaj Bent Tram, mjerenje delaminacijske čvrstoće.

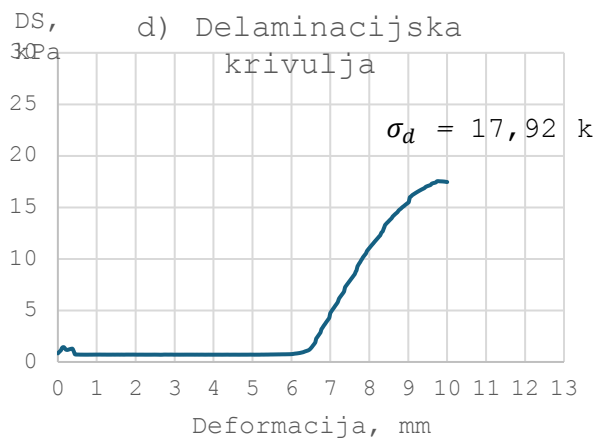
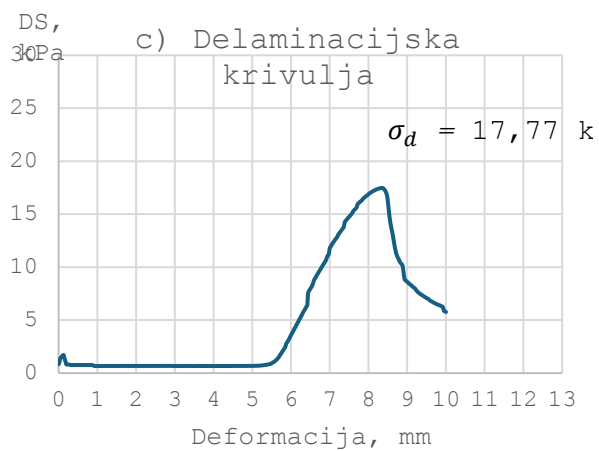
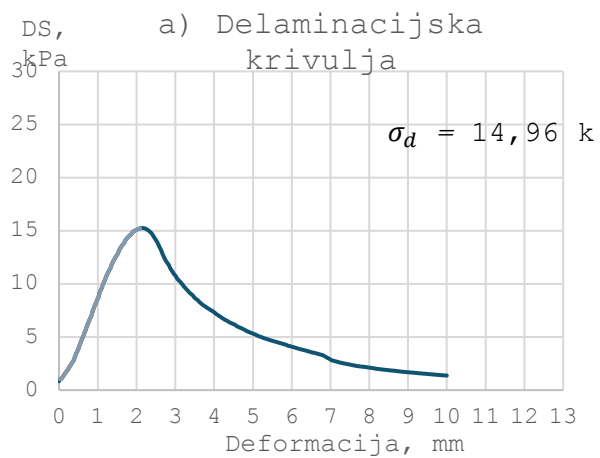
Rezultati testiranja generiraju se na računalu u obliku delaminacijske krivulje koja daje uvid u ponašanje materijala. Na x-osi krivulje prikazana je deformacija izražena u milimetrima, dok je na y-osi prikazana vlačna čvrstoća materijala (σ_d), na grafu označena kao DS. Kako se primjenjuje sila na materijal, on se počinje deformirati. Kada se struktura materijala počne odvajati, krivulja će biti na vrhuncu čime se postigla maksimalna rastezljivost.

3.4.1. Frontrock Max Plus (FMP)



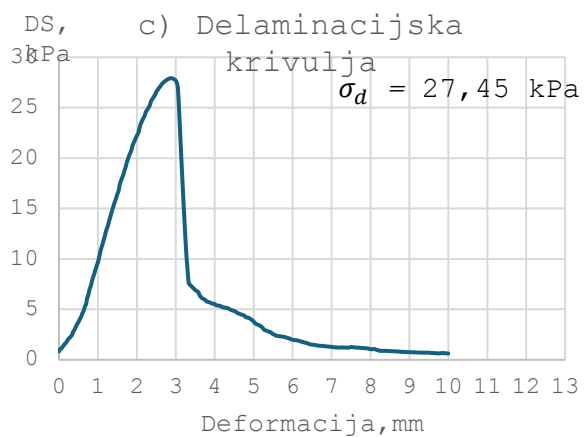
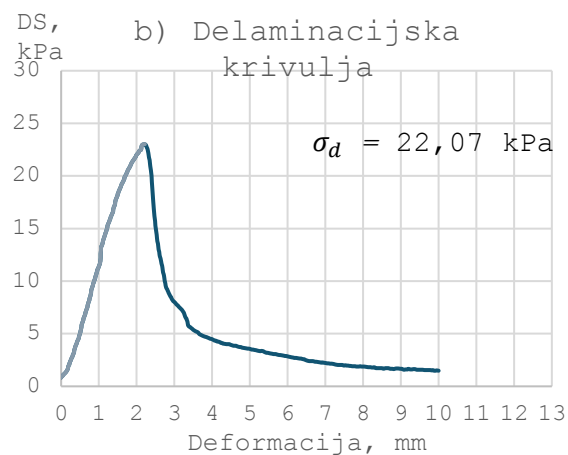
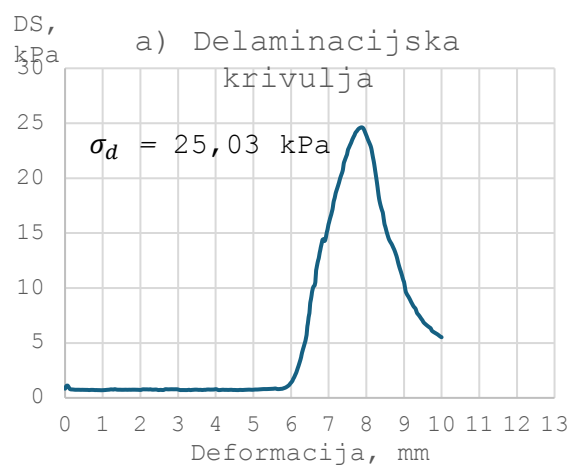
Slika 23. Delaminacijska krivulja, FMP, 60 mm (a), 80 mm (b), 100 mm (c), 140 mm (d).

3.4.2. Frontrock Max E (FME)



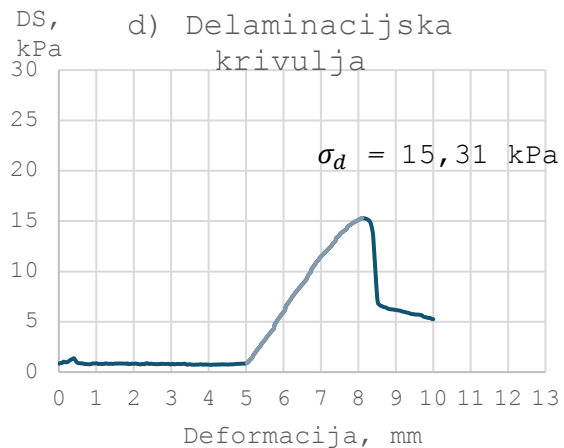
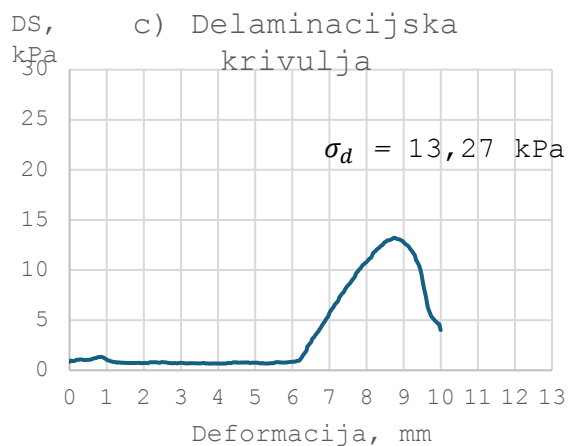
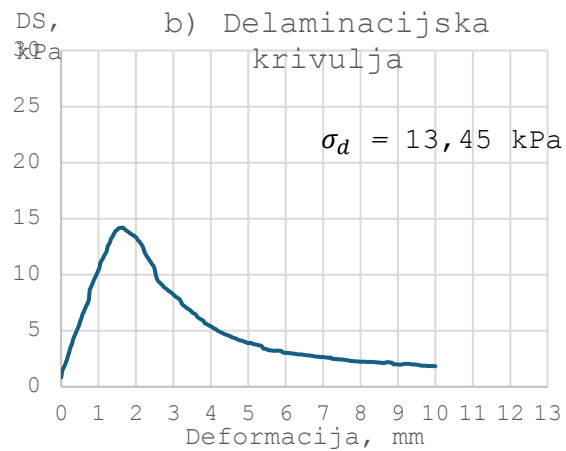
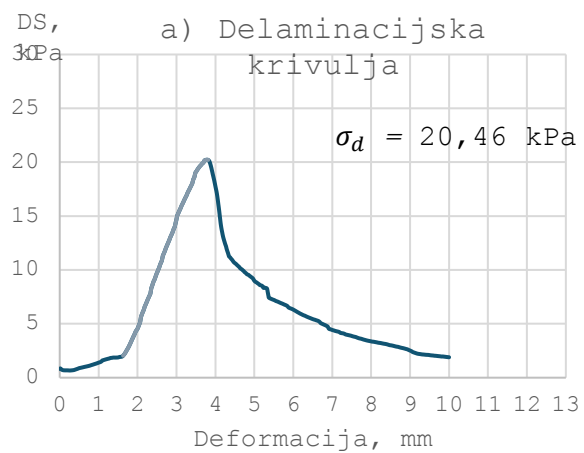
Slika 24. Delaminacijska krivulja, FME, 60 mm (a), 80 mm (b), 100 mm (c), 140 mm (d).

3.4.3. Frontrock Extra (FE)



Slika 25. Delaminacijska krivulja, FE, 60 mm (a), 80 mm (b), 100 mm (c), 140 mm (d).

3.4.4. Hardrock Energy Plus (HEP)



Slika 26. Delaminacijska krivulja, HEP, 60 mm (a), 80 mm (b), 100 mm (c), 140 mm (d).

4. REZULTATI I RASPRAVA

Nakon izvršenih svih ispitivanja, dobiveni su sljedeći rezultati prikazani u tablicama:

Tablica 3. Izmjerene vrijednosti toplinske provodljivosti:

Proizvod	FMP	FME	FE	HEP
Nominalna vrijednost λ_{10}, mW/mK	35	36	36	35
λ_{10},mW/mK 60 mm	34,23	35,21	35,51	34,82
λ_{10},mW/mK 80 mm	34,58	35,85	35,44	34,88
λ_{10},mW/mK 100 mm	34,93	35,43	35,59	34,85
λ_{10},mW/mK 140 mm	34,57	35,33	35,88	34,61

U drugom redu Tablice 3., navedene su nominalne vrijednosti toplinske provodljivosti četiri ispitivana izolacijska materijala pri prosječnoj temperaturi 10 °C (λ_{10} , mW/mK). Obzirom na to da se radi o toplinskoj provodljivosti, cilj je da je ona što niža vrijednost jer se želi spriječiti gubitak topline. Dakle, nominalne vrijednosti su maksimalne dopuštene vrijednosti, jer što je toplinska provodljivost niža, materijal je učinkovitiji izolator. Vidljivo je da su svi uzorci izolacijskih materijala zadovoljili standarde toplinske provodljivosti.

Tablica 4. Izmjerene vrijednosti tlačnog opterećenja:

Proizvod	FMP	FME	FE	HEP
Nominalna vrijednost CS, kPa	15	20	30	30
CS, kPa 60 mm	15,72	48,59	47,51	32,25
CS, kPa 80 mm	17,91	32,65	39,67	33,97
CS, kPa 100 mm	15,67	34,79	40,15	35,15
CS, kPa 140 mm	22,42	31,61	37,99	37,19

U Tablici 4. navedene su izmjerene vrijednosti tlačnog opterećenja za četiri izolacijska proizvoda. Nominalna vrijednost za tlačnu čvrstoću može se objasniti kao minimalna vrijednost koju materijal mora zadovoljiti kako bi bio siguran za upotrebu. Vidljivo je da su svi uzorci izolacijskih materijala zadovoljili propisani standard.

Tablica 5. Izmjerene vrijednosti točkastog opterećenja:

Proizvod	FMP	FME	FE	HEP
Nominalna vrijednost PL, N	200	250	500	450
PL, N 60 mm	280	426,8	681,5	497,6
PL, N 80 mm	256,2	322,9	571,3	578,8
PL, N 100 mm	298,4	324,3	699,2	525,6
PL, N 140 mm	341,5	423,3	534,5	514,9

U Tablici 5. navedene su izmjerene vrijednosti točkastog opterećenja. Zbog svoje izdržljivosti, poželjno je da materijal ima što veću vrijednost točkastog opterećenja kojeg može podnijeti dok je nominalna vrijednost minimalna granica koju materijal mora ispuniti da bi bio stabilan i pouzdan. Vidljivo je da su svi uzorci izolacijskih materijala zadovoljili propisani standard.

Tablica 6. Izmjerene vrijednosti delaminacijske čvrstoće:

Proizvod	FMP	FME	FE	HEP
Nominalna vrijednost DS, kPa	7,5	7,5	10	10
DS, kPa 60 mm	12,05	14,96	25,03	20,46
DS, kPa 80 mm	12,50	16,35	22,07	13,45
CS, kPa 100 mm	12,16	17,77	27,45	13,27
DS, kPa 140 mm	11,38	17,92	22,07	15,31

U Tablici 6. navedene su izmjerene vrijednosti delaminacijske čvrstoće. Visoka vrijednost delaminacijske čvrstoće poželjna je kako bi se osigurala trajnost i kvaliteta proizvoda. I u ovom slučaju, nominalna vrijednost predstavlja minimalnu vrijednost koju materijal mora zadovoljiti kako bi bio prihvatljiv za upotrebu. Vidljivo je da su svi uzorci izolacijskih materijala zadovoljili propisani standard.

Iz tablica je vidljivo da su prema rezultatima mjerenja tlačne čvrstoće, točkastog opterećenja, delaminacijske čvrstoće i toplinske provodljivosti, svi ispitani proizvodi kamene vune izolacije u skladu sa svojim deklariranim vrijednostima.

Važno je napomenuti da distributeri prije stavljanja proizvoda na tržište, još jednom obavljaju ispitivanja na sva svojstva te da svojstva koja su se opisivala i analizirala u ovom radu nisu jedina svojstva koja se mjere. Osim toplinske vodljivosti, točkastog opterećenja, tlačnog opterećenja i delaminacijske čvrstoće mjere se i kratkotrajna odnosno dugotrajna vodoupojnost, paropropusnost, reakcija na požar te otpor strujanja zraka za proizvode za zvučnu izolaciju.

5. ZAKLJUČAK

U ovom radu istražene su karakteristike kamene vune kao materijala za izolaciju građevina. Kamena vuna je popularna zbog svojih izvrsnih toplinsko-izolacijskih i akustičnih svojstava, otpornosti na vatru i trajnosti. Kako bi se provjerilo jesu li stvarne vrijednosti u skladu s deklariranim vrijednostima proizvoda, izvršena su testiranja na toplinsku provodljivost, tlačnu čvrstoću, točkasto opterećenje i delaminacijsku čvrstoću.

Prema rezultatima iz Tablice 3. najbolju toplinsku izolaciju pruža proizvod *Frontrrock Max Plus*. Vrijednost toplinske provodljivosti ovisi o kvaliteti, dimenzijama i raspodijeli vlakana unutar proizvoda. Iako *Frontrrock Extra* i *Hardrock Energy Plus* imaju jednaku deklariranu nominalnu vrijednost za tlačnu čvrstoću, u prosjeku *Frontrrock Extra* ipak pokazuje veće izmjerene vrijednosti, a time i bolju otpornost na tlačenje (Tablica 4.) Osim tlačne čvrstoće, *Frontrrock Extra* ima i najbolje rezultate za svojstva točkastog opterećenja i delaminacijske čvrstoće (Tablica 5. i 6.). Nakon *Frontrrock Extra*, proizvod koji može podnijeti najveće točkasto opterećenje i ima najveću delaminacijsku čvrstoću je *Hardrock Energy Plus*. Mehanička svojstva proizvoda ovise najprije o recepturi odnosno o omjeru sirovina, ali i o raspodijeli vlakana, o vezivu i o njegovoj polimerizaciji.

Rezultati pokazuju da su sva izmjerena svojstva proizvoda bila u skladu s deklariranim vrijednostima za svaki proizvod tj. da se proizvodi u skladu sa standardima. Važno je naglasiti da pravilna instalacija i održavanje mogu biti ključni za dugotrajnost i učinkovitost kamene vune kao izolacijskog materijala.

6. POPIS SIMBOLA I KRATICA

F_5 , N – tlačna sila pri 5 mm deformacije,

N_0 , mm – početna deformacija,

T_k , °C - temperatura gornjeg dijela materijala u lambda uređaju,

T_v , °C – temperatura donjeg dijela materijala u lambda uređaju,

ρ , kg/m³ - gustoća uzorka,

λ , W/mK – toplinska provodljivost,

σ_{10} , kPa - tlačna čvrstoća pri deformaciji od 10 %,

σ_d , kPa - vlačna čvrstoća.

CS - tlačna čvrstoća, engl. *compression strength*,

DS - delaminacijska čvrstoća engl. *delamination strength*,

FE - Frontrock Extra,

FME - Frontrock Max E,

FMP - Frontrock Max Plus,

HEP - Hardrock Energy Plus,

PL - točkasto opterećenje, engl. *point load*.

7. LITERATURA

1. Rockwool.com: Priča o kamenu, <https://www.rockwool.com/hr/o-nama/povijest/> (Pristupljeno: 15. 3. 2023.)
2. B. Širok, B. Blagojevic and P. Bullen: Mineral Wool Production and properties, Cambridge International Science Publishing Limited, Cambridge, 2008., str. 123., 163 - 178.
3. M. D. Lund, Y. Yue , D. Lybye: Impact of the oxidation state of iron on the tensile strength of stone wool fibre, *Glass Technol.* **51** (2010) 97 – 102.
4. Geology.com, <https://geology.com/rocks/basalt.shtml> (Pristupljeno: 30. 3. 2023.)
5. Radlovac.hr, <https://radlovac.hr/> (Pristupljeno: 1. 4. 2023)
6. The British Museum, slag,
https://www.britishmuseum.org/collection/object/Y_EA23990 (Pristupljeno: 15. 4. 2023.)
7. Britannica,coke, <https://www.britannica.com/technology/coke> (Pristupljeno: 2. 4. 2023.)
8. Yue, Y., M. Solvang: Stone and Glass Wool. *Encyclopedia of Glass Science, Technology, History, and Culture*, The American Ceramic Society, Columbus, 2021., str. 1103 – 1112.
9. Trdič, F., Širok, B., Bullen, P. R., Philpott, D. R.: Monitoring mineral wool production using real-time machine vision. *Real-Time Imaging*, **5** (1999), 125 – 140.
10. Enetex: Collection Drum and Spinning Machine,
<https://enetextechnology.eu/web/en/produkty/rock-wool-plants/mineral-wool-production-lines/collection-drum-and-spinning-machine/> (Pristupljeno: 2. 5. 2024.)
11. R. Seferović, A. Mahmutović, D. Mujagić, D. Kasapović: Properties of stone wool primary fiber layers produced with different contents of blast furnace slag, *Int. J. Adv. Res.* **7** (2019) 605 - 611.

8. ŽIVOTOPIS

████████████████████ Djetinjstvo sam provela u gradu Vodnjanu gdje sam i upisala osnovnu školu. Nakon završenog osnovnoškolskog obrazovanja, nagrađena sam gradskom stipendijom za izvrsnost. Srednju školu, opću gimnaziju, završila sam u Puli. Nakon gimnazije, 2017. upisala sam svoj prvi izbor na popisu fakulteta – Fakultet kemijskog inženjerstva i tehnologije Sveučilišta u Zagrebu, smjer Ekoinženjerstvo. Na preddiplomskom studiju obavila sam stručnu praksu u tvrtki *Contrada d.o.o.* Svoj završni rad izradila sam pod mentorstvom izv. prof. dr. sc. Vladimira Dananića s temom: Usporedba utjecaja na okoliš električnih vozila i vozila na hibridni pogon. Tijekom studentskih dana bila sam aktivna članica Studentske sekcije Hrvatskog društva kemijskih inženjera i tehnologa (SSHDKI) te sam imala priliku sudjelovati u organizaciji tri kongresa: Kongres o HIV-u, Kongres o karcinomu te Kongres o zelenoj kemiji i inženjerstvu. Osim kongresa, organizirala sam i sudjelovala u raznim projektima s ciljem popularizacije znanosti kao što su: Festival znanosti 2021., Znanstveni dan (Bunker Samobor) te Prva konferencija europskog prijelaza na čistu energiju za čiju sam organizaciju 2019. nagrađena Rektorovom nagradom za društveno koristan rad u akademskoj i široj zajednici. Dvije godine bila sam urednica znanstveno-popularnog časopisa *Reaktora ideja*, službenog glasila SSHDKI-ja, dok sam na zadnjoj godini diplomskog studija preuzela ulogu glavne i odgovorne urednice. U prosincu 2022. postala sam stipendist tvrtke *Rockwool Adriatic d.o.o.* čime sam dobila priliku provesti dva mjeseca u navedenoj tvrtki na stručnoj praksi. Dva ljeta, 2022. i 2023. sudjelovala sam na kulturološkoj razmjeni studenata, *Work and Travel USA* programu.