

Utjecaj kemijske obrade drvene vune na zapaljivost drvo-cementnog kompozita

Bratanović, Ivan

Master's thesis / Diplomski rad

2017

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:149:306849>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2025-04-02**



Repository / Repozitorij:

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



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET KEMIJSKOG INŽENJERSTVA I TEHNOLOGIJE
SVEUČILIŠNI DIPLOMSKI STUDIJ

Ivan Bratanović

DIPLOMSKI RAD

Zagreb, rujan 2017.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET KEMIJSKOG INŽENJERSTVA I TEHNOLOGIJE
SVEUČILIŠNI DIPLOMSKI STUDIJ

Ivan Bratanović

**UTJECAJ KEMIJSKE OBRADE DRVENE VUNE NA ZAPALJIVOST DRVO-
CEMENTNOG KOMPOZITA**

DIPLOMSKI RAD

Voditelj rada: prof. dr. sc. Juraj Šipušić

Članovi ispitnog povjerenstva: prof. dr. sc. Juraj Šipušić
prof. dr. sc. Jasna Prlić Kardum
izv. prof. dr. sc. Nevenka Vrbos

Zagreb, rujan 2017.

Najviše zahvaljujem svom mentoru prof. dr.sc. Jurju Šipušiću, na pomoći, strpljenju, vodstvu i savjetima prilikom izrade rada te mudrosti i savjetima općenito.

Također, zahvala prijateljima na pomoći u nabavci materijala za izradu rada.

Najveća zahvala roditeljima, tetama, braći i ostaloj rodbini koji su mi, svojom ljubavlju, strpljenjem i razumijevanjem te materijalno potpomogli mojem studiranju.

UTJECAJ KEMIJSKE OBRADJE DRVENE VUNE NA ZAPALJIVOST DRVO- CEMENTNOG KOMPOZITA

SAŽETAK

U ovom radu ispitana su toplinska svojstva pripravljenog drvo-cementnog kompozita. Za izradu ispitnih uzoraka korištena je drvena vuna dobivena od crnogoričnog drveća te komercijalni portland cement, CEM II. Drvena vuna korištena za ispitivanje dobre je kvalitete i mehanička svojstva uzorka su zadovoljavajuća pri svakom ispitanom omjeru drvena vuna/cement. Povećanjem udjela cementa u uzorku bolja je prekrivenost drvene vune cementom, a toplinska svojstva se relativno manje mijenjaju. Rezultati dobiveni testom gorenja pokazuju da cementni kompozit, zbog manjeg udjela gorive tvari, oslobađa manje topline u odnosu na čistu drvenu vunu.

Cilj ovog rada je stjecanje teoretskog i praktičnog znanja o mjerenju toplinskih svojstava izolacijskih materijala, načinima mjerenja, normiranim metodama, te prednostima i nedostacima tih metoda. Toplinska svojstva su ispitana pomoću više aparatura vlastite izrade. Dobiveni rezultati ukazuju na odlična izolacijska svojstva dobivenog kompozitnog materijala gustoće 300-400 kg/m³, no neke metode je potrebno unaprijediti u daljnjim istraživanjima.

KLJUČNE RIJEČI: *drvena vuna, cement, cementni kompozit, toplinska svojstva*

INFLUENCE OF CHEMICAL TREATMENT OF WOOD WOOL ON WOOD-CEMENT COMPOSITE FLAMMABILITY

ABSTRACT

In this study thermal properties of wood-cement compound are tested. Wood wool made from pine tree is used to make samples blend with Portland cement, CEM II. Wood wool used in this paper is made from high quality tree so that her mechanical properties are satisfying in any given wood wool / cement ratio. With increase in ratio of cement in compound we can see better covering of surface of wool with cement, thermal properties aren't changed a lot. Results gotten with burning test show that cement compound, duo to less flammable material, releases less heat compared to wood wool without cement.

Priority of this work is to get some theoretical and experimental knowledge about measuring thermal properties of insulation materials, ways of measurement, standardized methods, and benefits and disadvantages of those methods. Thermal properties are tested by use of apparatus of our own making. Given results point to great insulation properties of compound material of 300-400 kg/m³ density, but some methods are needed to be improved by farther researches.

KEYWORDS: *wood wool, cement composite, thermal properties*

SADRŽAJ

1.	UVOD	1
2.	TEORIJSKI UVOD	3
2.1	IZOLACIJSKI MATERIJALI	3
2.1.1	<i>Hidroizolacija</i>	4
2.1.2	<i>Zvučna izolacija</i>	5
2.1.3	<i>Toplinska izolacija</i>	7
2.2	DRVO	9
2.2.1	<i>Tehnička svojstva drveta</i>	9
2.2.2	<i>Mehanička svojstva drveta</i>	9
2.2.3	<i>Osnovna fizička svojstva drveta</i>	10
2.2.4	<i>Akustična svojstva drveta</i>	12
2.2.5	<i>Termička svojstva drveta</i>	14
2.2.6	<i>Drvena vlakna</i>	15
2.3	CEMENT I CEMENTNI MATERIJALI	16
2.3.1	<i>Podjela cementa</i>	16
2.3.2	<i>Dobivanje cementa</i>	16
2.3.3	<i>Hidratacija portland-cementa</i>	17
2.3.4	<i>Parametri kakvoće cementnih materijala</i>	19
2.3.5	<i>Prednosti i nedostaci cementnih materijala</i>	20
2.4	KOMPOZITNI MATERIJALI	21
2.4.1	<i>Drvolit</i>	22
2.5	TOPLINSKA SVOJSTVA MATERIJALA	25
2.5.1	<i>Koeficijent toplinske vodljivosti</i>	27
2.5.2	<i>Toplinski kapacitet</i>	28
2.5.3	<i>Toplinska difuzivnost</i>	28
2.5.4	<i>Toplinska efuzivnost</i>	29
3.	EKSPERIMENTALNI DIO	29
3.1	MATERIJALI	29
3.1.1	<i>Materijali, uređaji i alati</i>	29
3.1.2	<i>Priprema uzorka</i>	30
3.2	METODA	32
3.2.1	<i>Aparatura 1</i>	35
3.2.2	<i>Aparatura 2</i>	36
3.2.3	<i>Aparatura 3</i>	37
3.2.4	<i>Ispitivanje gorenja</i>	39
3.3	REZULTATI I RASPRAVA	42
3.3.1	<i>Aparatura 1</i>	43

3.3.2	<i>Aparatura 2</i>	44
3.3.3	<i>Aparatura 3</i>	46
3.3.4	<i>Ispitivanje gorenja</i>	51
4.	ZAKLJUČAK.....	51
5.	LITERATURA	53
6.	SIMBOLI.....	55
7.	PRILOZI.....	56
	ŽIVOTOPIS.....	57

1. UVOD

Kako se vremena polagano mijenjaju, svijest o okolišu, o događanjima u prirodi i ljudskom utjecaju na njih, postaje izraženija i potreba za novim materijalima. Otkrivaju se novi izolacijski materijali, novi polimerni materijali čija svojstva su izvanredna, prelazi se na obnovljive izvore energije. Uočljivo je da je ekološka svijest na puno višoj razini u razvijenijim zemljama i možemo se nadati da će se gospodarska i ekonomska moć zemlje mjeriti u udjelu recikliranog otpada, a ne u potrošnji goriva ili drugih sirovina. Sa razvojem brojnih disciplina kao što su kemijsko inženjerstvo, medicina, građevina i mnogih drugih, razvijale su se i metode kontrole procesa i ispitivanja materijala te je tako došlo i do boljeg shvaćanja utjecaja raznih čimbenika na svojstva materijala. Došlo je do otkrića novih materijala pripremljenih uporabom dvaju ili više poznatih materijala (te materijale nazivamo kompozitni materijali). Sve se više proučavaju fizička svojstva tvari te prijenos energije i energetska učinkovitost, a mnogi su materijali već zamijenjeni boljima. Pri tome se javlja potreba za strožim mjerama kontrole novih materijala, primjerice da se ne bi ponovio slučaj sa azbestom. Jedni od najviše korištenih novih materijala su izolacijski materijali poput ekspaniranog polistirena poznatog kao stiropor, raznih spužvastih polimernih materijala, materijala kao kamena ili staklena vuna, gips ploče 'knauf' i drugi.

Uz otkriće svih odličnih novih neki će materijali ipak zauvijek ostati esencijalni, s primjenom u nizu djelatnosti. Jedan od takvih je i drvo i drvena građa, koji se primjenjuju od građevinske industrije, izrade namještaja, prijevoza, sporta, pa do izrade glazbenih instrumenata. Velike prednosti korištenja drva u te namjene su prirodnost materijala, pod kojom se podrazumijeva njegova sposobnost da „diše“, osigurava prikladnu vlažnost i toplinu te omogućava drvenim elementima konstrukcije u unutrašnjosti da održavaju temperaturu jednaku zraku koji ih okružuje.¹

Sa stajališta građevinske industrije, drvo spada među estetski najljepše materijale, a uz kvalitetnu ugradnju te zaštitu od štetočina može biti jako dugotrajno¹. Drvo ima malu masu u usporedbi s drugim građevnim materijalima, lako se obrađuje, jednostavno montira i transportira. Ipak, najveća je prednost drveta da dolazi iz obnovljivog izvora. Drvo ima i nedostatke, jer ako nije adekvatno zaštićeno podložno je napadima insekata i glodavaca te truljenju i gorenju. Osim toga, drvo u svojoj strukturi može imati razne greške i nepravilnosti, a pokazuje i svojstvo anizotropije no to može biti i estetski prihvatljivo, što više, traženo. Mehanička svojstva drvene građe uvelike

ovise o sadržaju vode u drvetu, a promjenom vlažnosti dolazi do skupljanja ili bubrenja što može predstavljati problem u praksi.

Cement kao zasebni građevinski materijal poznat i korišten vjekovima ima pozitivne i negativne strane. Neki od nedostataka su resursi koje je potrebno uložiti prilikom proizvodnje, a što se prvenstveno odnosi na velike količine vapnenca pri proizvodnji portland cementa, čak 1,5 tona na 1 tonu cementa.² Utrošak energije pri proizvodnji je ogroman. Ta se energija dobiva iz fosilnih izvora, a samim time uključuje i druge industrije koje u konačnici imaju veliki negativan globalni utjecaj na ekološki sustav. Prednost cementa i konstrukcija koje su izgrađene od betona, a u čijoj se proizvodnji cement koristi kao vezivo, jest svakako trajnost, stabilnost i čvrstoća što je vidljivo na arhitektonskim djelima prošlosti koja još uvijek stoje. Također, betonu se mogu dodavati razne primjese i ovisno o potrebama korištenja njegova svojstva se mogu modificirati dodatkom primjesa.

Jedan od novih kompozita je spoj cementa i drveta komercijalno nazvan 'drvolit'. Ono što izdvaja ovaj kompozit od drugih materijala svakako je njegova postojanost na atmosferske prilike, otpornost na gorenje te velika izdržljivost na djelovanje bioloških organizama, njegova toplinska i zvučna izolacija su izvanredne. Zbog toga pronalazi svoju primjenu u sve više građevinskih projekata.

2. TEORIJSKI UVOD

2.1 IZOLACIJSKI MATERIJALI

Izolacijski materijali su tvari svih agregatnih stanja koje ne vode el. Struju, toplinu, zvučne valove i dr. U elektrotehnici se upotrebljavaju za izoliranje dijelova el. Uređaja i vodova. Ovisno o namjeni moraju imati i neka mehanička svojstva (čvrstoća, otpornost na razne utjecaje i dr.). U građevinarstvu služe za razne vrste izolacija (hidroizolacija, toplinska, zvučna i dr.)

Izolacijski materijali igraju važnu ulogu u energetski učinkovitim objektima. Zahvaljujući njihovom efektu toplinske izolacije (slabe vodljivosti topline), utječu na utrošak energije potrebne za hlađenje ili grijanje te tako doprinose smanjenju emisije CO₂. Važnost izolacijskih materijala je porasla u zadnjem desetljeću. Europska unija je izdala norme energetske učinkovitosti za sve zemlje članice pa tako i za Hrvatsku, čije nepoštivanje, 'penale', redovito plaća. S porastom važnosti porastao je i broj izolacijskih materijala.

Mnoga pitanja su postavljena s razvojem novih materijala, kao što su; Koje standarde upotrebljavati? Ima li posebnih potrebi za udovoljiti pri ugradnji i korištenju takvih materijala? Koje sirove materijale sadrže? Kako si ti materijali proizvedeni i koja su im svojstva? Koje im je područje primjene? Što učiniti s njihovim otpadom i višcima?² Ta pitanja se postavljaju sve češće i neka je lakše odgovoriti od drugih.

Dobro poznavanje toplinskih svojstava građevinskih materijala jedan je od preduvjeta za projektiranje energetski učinkovitih zgrada. Toplinski gubici kroz građevni element ovise o sastavu elementa, orijentaciji i koeficijentu toplinske vodljivosti. Bolju toplinsku izolaciju postizemo ugradnjom materijala niske toplinske provodljivosti, odnosno visokog toplinskog otpora. Toplinski otpor materijala povećava se s obzirom na debljinu materijala.³ U ovom radu ćemo pokušati što bolje odgovoriti na pitanje svojstava tih materijala.

2.1.1 Hidroizolacija

Cilj izgradnje hidroizolacije je zaštita svih građevinskih objekata od štetnog djelovanja vlage. Postupak koji se naziva hidroizolacija je proces u kojem se vrši izrada strukture ili objekta koji je hidroizoliran ili vodootporan po principu da navedena struktura ili objekt ne mijenjaju oblik ukoliko dođe do prodiranja vode u nekim određenim uvjetima. Najčešće se koristi hidroizolacija krova¹. Sredine koje su jako vlažne ili objekti koji se nalaze pod vodom zahtijevaju izgradnju takvih struktura. Hidroizolacija se uvodi da bi sanirala moguću štetu nastalu prodiranjem vode koja je ili pod pritiskom ili u tekućem stanju.

S druge strane, vodo otpornost otkriva koliko su neki određeni objekti ili strukture otporni na vlagu. Nekad davno, u prošlosti, su se trupovi velikih i malih brodova premazivali katranom kako bi ostvarili hidroizolaciju i to je, zapravo, prvi način hidroizolacije premazom ikad zabilježen. U današnje vrijeme se većina modernih objekata ili struktura izoliraju na način da se koristi primjena brtvljenja fuga s brtvilom ili se primjenjuju razni vodootporni premazi. Mnogo većih građevina poput zgrada, kuća ili vila koriste i hidroizolaciju podruma.

Hidroizolacija se koristi i u svakodnevnom životu, i na poslu i u kući i na odmoru, te je vrlo popularna i kod slikarskog platna, električnih uređaja, skuterima na vodu, vodootpornoj odjeći i obući kao što su kabanice i čizme za kišu, a koristi se i u ambalažama određenih proizvoda kao što su tetrapaci za sokove i mlijeka.⁷



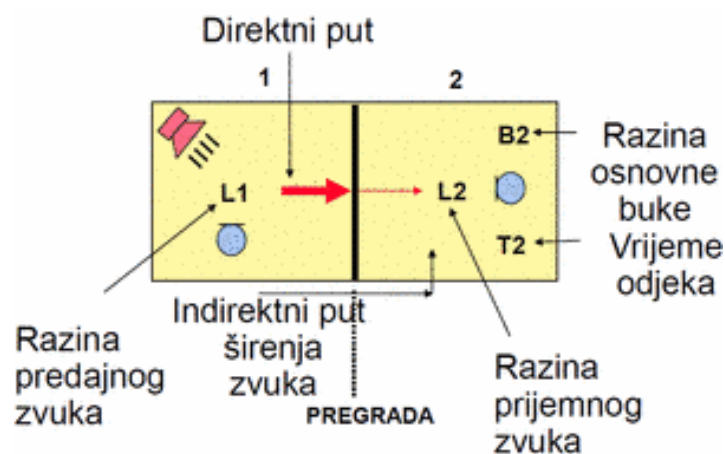
Slika 2.1.1 Primjer štetnog djelovanja vlage

2.1.2 Zvučna izolacija

Zvučna izolacija je je svojstvo građevinske konstrukcije da u što većoj mjeri spriječi prenošenje zvučne energije iz jednog prostora u drugi. Zvučna izolacija se dijeli na:

- zvučnu izolaciju od udarne buke (prenosi se konstrukcijom ili krutim medijem)
- zvučnu izolaciju od prostorne buke (prenosi se zrakom putem zračnih valova)

S obzirom na to da nije moguće izolirati sve izvore buke, a nije prirodno da se zaštitimo od primanja svih zvukova, moramo pronaći način da spriječimo dolazak samo neusklađenih i složenih zvučnih valova. Metoda koja se najčešće rabi za određivanje zvučne izolacije je zvučna izolacijska moć R_w , a brojčano se izražava u decibelima (dB). Pri tome je važno upamtiti da zvučna izolacijska moć R_w za neki materijal iskazan u dB ne pokazuje koliko buke taj materijal propušta, već iskazuje za koliko dB on smanjuje njezinu razinu. To znači da vanjsku ulaznu buku od 110 dB jednostruko staklo $d = 4 \text{ mm}$ ($R_w = 30 \text{ dB}$) smanjuje za 30 dB i u prostor nam ulazi buka od 80 dB.



Slika 2.1.2 Princip mjerenja zvučne izolacije

Temeljem hrvatskih zakona i pravilnika te hrvatskih i međunarodnih normi provodimo mjerenje i ocjenu zračne zvučne izolacije radi:

- Ispođenja minimalno tehničkih uvjeta za određene vrste gospodarskih djelatnosti,
- Dokazivanja ispunjenja mjera zaštite od buke po završetku izgradnje objekta,
- Puštanja u rad infrastrukturnih/gospodarskih objekata

Zračna zvučna izolacija proračunava se na temelju:

- razlike vremenski i prostorno usrednjenih razina zvučnih tlakova u predajnoj i prijemnoj prostoriji,
- koeficijenta apsorpcije u prijemnoj prostoriji,
- površine zajedničkog dijela ispitivane pregrade,
- vremena odjeka i
- volumena prijamne prostorije.

Kod mjerenja zračne zvučne izolacije, obavlja se korekcija radi osnovne buke u prijamnoj prostoriji. Postupci mjerenja zračne zvučne izolacije su normirani.⁵ Zvučna izolacijska moć R_w je fizikalna veličina koja opisuje građevinsku konstrukciju (zid, međukatnu konstrukciju, vrata, prozor i sl.) u pogledu zvučne izolacije od prostorne buke. Zvučna izolacijska moć R_w određuje se u laboratorijskim uvjetima, a na uzorku kojem je površina 10-tak četvornih metara ili više. Određivanje R_w propisano je standardima. Zvučna izolacijska moć dana je jednadžbom:

$$R = L_1 - L_2 + 10 * \log \frac{S}{A}$$

gdje je L_1 razina zvučnog tlaka u predajnoj prostoriji, L_2 razina zvučnog tlaka u prijemnoj prostoriji, S površina kroz koju zvučna energija prolazi A ukupna apsorpcirana površina u prijemnoj prostoriji. Veličine L_1 , L_2 i A određuju se u tercnim opsezima.

Jednbrojna vrijednost R_w zove se zvučna izolacijska moć. Ova vrijednost se po pravilu daje u tehničkim uvjetima kojim se ostvaruje zvučna izolacija. Jednbrojna vrijednost dobiva se složenim postupkom pomicanja standardne krivulje tako da suma negativnih odstupanja izmjerenih vrijednosti od standardne krivulje ne bude veća od 32 dB. S tako pomjerene standardne krivulje očitava se vrijednost na 500 Hz koja predstavlja traženu jednbrojnu vrijednost. Iako je uobičajeno da se izolacijska moć izražava kao jednbrojna vrijednost, proračune i analize zaštite od buke moguće je napraviti jedino uzimajući u obzir frekvencijsku zavisnost

2.1.3 Toplinska izolacija

Prema definiciji toplinski izolacijski materijali su materijali koji imaju toplinsku vodljivost $<$ od 0.10 W/mK , većina izolacijski materijala ima vodljivost od 0.030 - 0.050 W/mK , i te vrijednosti se mogu uzeti kao dobre, malo veće vrijednosti su osrednje (0.060 W/mK) i sve više vrijednosti su relativno visoke.

Provodnost topline izolacijskih materijala uvelike ovisi o ovim čimbenici:²

- Gustoća izolacijskog materijala
- Priroda i mikro-struktura krutih komponenti
- Udio vlage i temperatura izolacijskog materijala
- Plinovi sadržani u struktura

Pri izboru materijala za toplinsku zaštitu treba osim toplinske vodljivosti uzeti u obzir i druge karakteristike materijala kao što su požarna otpornost, faktor otpora difuziji vodene pare, tlačna tvrdoća, skupljivost, trajnost, otpornost na vlagu i drugo.

Tablica 1. *Potrebna debljina materijala da bi se postigla tražena toplinska provodljivost*

TOPLINSKO IZOLACIJSKI MATERIJAL	TOPLINSKA PROVODLJIVOST (W/mK)	POTREBNA DEBLJINA (cm) ZA $U=0,35 \text{ W/m}^2\text{K}$
KAMENA VUNA	0,035 do 0,050	9 - 11
STIROPOR	0,035 do 0,040	9 - 10
EKSTRUDIRANA POLISTIRENSKA PJENA	0,030 do 0,040	8 - 10
TVRDA POLIURETANSKA PJENA	0,020 do 0,040	7 - 9
DRVENA VUNA	0,065 do 0,09	16 - 20
EKSPANDIRANI PERLIT	0,040 do 0,065	10 - 16
EKSPANIDIRANI PLUTO	0,045 do 0,055	11 - 14
OVČJA VUNA	0,040	10 - 11
SLAMA	0,090 do 0,130	20 - 35

Kamena vuna dobar je toplinski izolator s toplinskom provodljivošću između $0,035$ i $0,045 \text{ W/mK}$, što je uvrštava među najbolje toplinske izolatore. To je izolacijski materijal mineralnog porijekla za toplinsku, zvučnu i protupožarnu izolaciju u graditeljstvu, industriji i brodogradnji. Kamena vuna ima visoku otpornost na požar, paro-propusna je i djelomično vodootporna. Otporna je na starenje i raspadanje, te na

mikroorganizme i insekte. Koristi se u svim vanjskim konstrukcijama za toplinsku zaštitu, te u pregradnim zidovima za zvučnu zaštitu. Jedino mjesto gdje se ne preporuča je za izolaciju podrumskih zidova pod zemljom.

Osim kamene i staklene vune, na našem tržištu najviše se koristi polistiren ili komercijalno stiropor. Zbog dobrih izolacijskih svojstava, toplinske provodljivosti od 0,035-0,040 W/mK, te niske cijene i jednostavne ugradnje, danas je to jedan od najpopularnijih izolacijskih materijala. Koristi se najviše kao toplinska zaštita, u svim vanjskim konstrukcijama, te kao plivajući pod u podnim međukatnim konstrukcijama. Ima znatno slabija protupožarna svojstva od kamene vune, te nije otporan na temperature više od 80°C. Često se koristi za toplinsku zaštitu podrumskih zidova – ekstrudirani polistiren.

Poliuretanska pjena također se dosta koristi, naročito pri sanacijama krovova. Ima još bolja toplinsko izolacijska svojstva pa toplinska provodljivost iznosi između 0,020 i 0,035 W/mK. Ima dobra svojstva na vlagu i temperaturne promjene. Međutim, znatno je skuplja od prva dva navedena materijala, te zbog toga nije u široj primjeni.

Na tržištu se polako pojavljuju i drugi izolacijski materijali kao što su celuloza, glina, perlit, vermikulit, trstika, lan, slama, ovčja vuna drvilit i drugi. Imaju nešto slabija izolacijska svojstva, pa su potrebne veće debljine. Ovi se materijali u svijetu koriste lokalno, prema porijeklu i izvoru sirovine za proizvodnju. Za pravilan izbor materijala za toplinsku izolaciju potrebno je dobro poznavati njegova fizikalno kemijska svojstva, te prednosti i mane primjene. ⁴



Slika 2.1.3 Izolacijski materijali: a) kamena vuna, b) polistiren, c) poliuretanska pjena

U ovom radu će se dalje govoriti o drvo- cementom kompozitu, svojstvima njegovih komponenti i njegovim svojstvima.

2.2 DRVO

2.2.1 Tehnička svojstva drveta

Tehnička svojstva drveta mogu se podijeliti na estetska, osnovno fizička, mehanička i fizičko kemijska. Estetska se svojstva zapažaju osjetilima vida, njuha, opipa, na obrađenoj površini drveta to su boja, tekstura, sjaj, miris i finoća drveta. Osnovna se fizička svojstva ukazuju kad se drvo promatra kao tvar, na koju djeluju samo sile u prirodi, ta svojstva su; poroznost, sadržaj vode, akustičnosti, težina, promjenjivost volumena, termička i električna svojstva koja ćemo mi proučavati, te vodljivost svjetla. Mehanička svojstva pokazuje drvo svojim vladanjem prema vanjskim mehaničkim silama, a dijele se na: a) svojstva koja se ukazuju kad neka vanjska sila vrši promjenu oblika a da se pri tome ne naruši suvislost drvene tvari (elastičnost i žilavost) i b) svojstva koja se ukazuju kad neka vanjska sila vrši promjenu oblika i pri tome narušava suvislost drvene tvari (čvrstoća, tvrdoća otpornost protiv habanja). Fizičko-kemijska svojstva ukazuju se kad na drvo djeluju vanjske i unutrašnje sile, odnosno procesi u kojima se ne samo narušava anatomska građa već i mijenja sastav drveta (trajnost i snaga ogrijevanja).³

Na svojstva drveta kao mehanička tako i sva ostala utječe raspored, vrsta i oblik vlakana, da bi se to proučavalo mora se znati anatomski sastav drveta, koji opet ovisi o vrsti i podneblju pod kojim stablo raste, to može biti tema za neko drugo istraživanje, a mi ćemo ostati pri proučavanju samih mehaničkih svojstava te spomenuti samo osnovnu povezanost sa vlaknima.⁸

2.2.2 Mehanička svojstva drveta

Ta svojstva drva pojavljuju se kad na drvo djeluju neke vanjske mehaničke sile. Te sile nastoje promijeniti prirodni oblik i dimenzije drva. Promjene dimenzija i oblika nazivaju se deformacije. Deformacije mogu biti plastične i elastične. Otpor što ga drvo pruža djelovanju mehaničkih sila unutarne je naprezanje tijela. Postoje tri vrste unutarnjih naprezanja: to su vlačno, tlačno i smično naprezanje³. Svojstva drveta su jako anizotropna, a većinu opterećenja prenose upravo celulozni mikrofibrili.⁴ Vlačna čvrstoća u smjeru vlakana gotovo je dvostruka u odnosu na tlačnu čvrstoću jer vlakna pod tlačnim opterećenjem zbog izvijanja pucaju. Svojstva čvrstoće piljenog i sušenog

drveta u obliku drvene građe podijeljena su prema različitim razredima i stupnjevima. Općenito vrijedi da se čvrstoća smanjuje sa porastom udjela vlage, a važan je i smjer opterećenja. Naime, čvrstoća je najveća pri opterećenju koje se pruža u smjeru vlakana, dok su okomito na smjer pružanja vlakana vlačne čvrstoće najmanje.

Što se tiče smičnog naprezanja ono ima najviše vrijednosti u smjeru okomitom na pružanje vlakana. Kod istraživanja čvrstoće na cijepanje, rastavljanje drveta vrši se djelovanjem dviju ekscentričnih sila jednake vrijednosti protivnog smjera okomito na ravninu cijepanja, i došlo se je do zaključka da se radi o čvrstoći na vlak okomito na vlakanca s ekscentrično smještenim hvatištem žila. Tvrdoća je također praktički veoma važna. Za neke primjene traži se da drvo bude što tvrđe (jarmovi, kocke, nosive konstrukcije, za raznorazne sportove) ili da bude što mekše (rezbarstvo, stolarstvo itd.). Otpornost prema habanju je svojstvo drveta kojim se ono odupire narušavanju površinskih karakteristika pod djelovanjem vanjske sile, u tijesnom je odnosu sa tvrdoćom ali nisu identična.

Prilikom određivanja dopuštenih naprezanja drveta koje se koristi u konstrukcijske svrhe važno je primjenjivati visoke faktore sigurnosti. Obzirom da drvo nije homogeni materijal moguće su neujednačenosti u strukturi koje se onda odražavaju i na mehanička svojstva. Mehanička svojstva ovise o intenzitetu godišnjeg prirasta, odnosno o širini goda. Utjecaj širine goda na mehanička svojstva drveta znatno se razlikuje kod poroznih i neporoznih vrsta. Zbog povoljnog omjera čvrstoće u odnosu na gustoću drvo je često korišten konstrukcijski materijal u građevinarstvu (nosive krovne konstrukcije, grede, štokovi prozora i vrata, palete itd.).⁸

2.2.3 Osnovna fizička svojstva drveta

Prvo svojstvo prema kojem se drvo razlikuje od recimo metala je njegova poroznost. Jedinica volumena drveta nije u cijelosti ispunjena drvnim tvarima već se sastoji i od pora. Volumen tih pora vrlo je velik što je logično s obzirom na rast biljke, tj njegov život. Od korijena do krošnje postoji stalno kretanje mineralnih tvari prema gore i ugljikohidrata prema dolje, to kretanje je omogućeno prohodnim putevima u stabljici. Ukupni volumen drva se može ustvrditi prema jednadžbi:

$$P = 100 (1 - t_0/\gamma)$$

P- volumen pora u postocima, t_0 je volumna masa drva u standardnom suhom stanju i γ je volumna masa drvene tvari koja je po pretpostavki za sve vrste jednaka i iznosi u prosjeku $1,5 \text{ g/cm}^3$.

Volumen pora se može ustvrditi prema jednadžbi:

$$P = 100(1 - 0,67t_0) \text{ ili } P = 100 - 67t_0$$

To je volumen pora drveta u standardnom suhom stanju. Volumen drvnih stjenki (d) u standardnom suhom stanju može se utvrditi po jednadžbi:

$$d = 100 t_0/\gamma, \text{ odnosno } d = 67 t_0$$

Volumen pora stoji u obratnom razmjeru prema volumnoj masi drva. To jest, što je veća volumna masa drva, to je manji volumen pora i obratno. Volumen pora vlažnog drveta može se ustvrditi po jednadžbi:

$$P = 1 - t_n (1/\gamma + v_h/\rho_s + v_k/\rho)$$

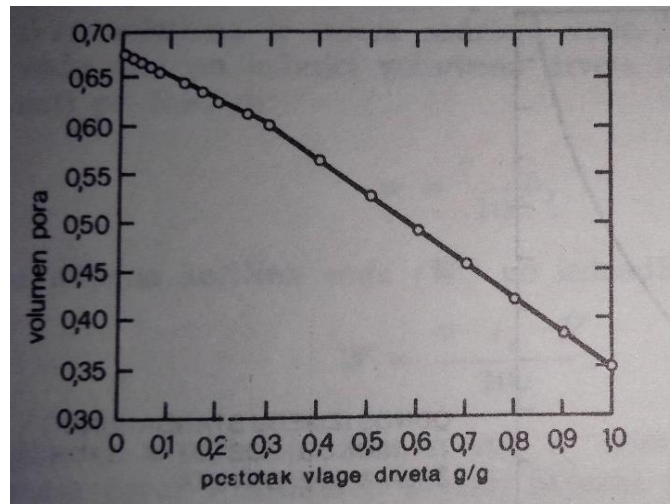
P je volumen pora vlažnog drveta, t_n je nominalna volumna masa drveta, γ volumna masa drvene tvari, ρ_s je gustoća apsorbirane i na unutrašnjoj površini komprimirane higroskopske vlage, v_h higroskopska voda, v_k kapilarna voda.³

Svojstva drveta povezana su velikim dijelom sa sadržajem vlage, a manje sa temperaturom i razinom opterećenja. Drugim riječima mehanička svojstva drveta ovisit će o udjelu vlage, a ono se izražava preko udjela suhe tvari. Prema sadržaju vlage drvo se dijeli na:

- sirovo (zeleno) drvo – bez ograničenja vlage
- polusuho drvo – s najviše 35% vlage
- presušeno drvo – s najviše 20% vlage
- suho drvo – s najviše 15% vlage

Općenito govoreći, tvrdoća i krutost povećavaju se kako opada sadržaj vlage, a svako nelinearno ponašanje prilikom naprezanja smanjuje se pomicanjem prema maksimumu naprezanja. Granični udio vlage u staničnim stjenkama drveta značajno utječe na deformaciju u funkciji vremena, prilikom čega dolazi do puzanja (u slučaju kontinuiranog naprezanja) i popuštanja (kod kontinuiranih deformacija).

Kada je drvo izloženo opterećenjima, a dolazi do promjena u udjelu vlage, može doći do mehaničko-sorpcijskog ponašanja.⁴ Ono je također karakterizirano deformacijama. Sušenje drveta (desorpcija) i močenje (adsorpcija ili sorpcija) tijekom opuštanja materijala (nakon puzanja ili naprezanja) može dovesti do ubrzavanja deformacije u usporedbi sa istim ponašanjem pri kontinuiranom udjelu vlage (proizvodnja bačvi za vinarstvo, savijanje prečica s vremenom pri konstantnom opterećenju i uronjenih u vodu).



Slika 2.2.1 Odnos između volumena pora i sadržaja vode kod drveta crnogorice⁸

2.2.4 Akustična svojstva drveta

Drvo je nezamjenjiv materijal za gradnju glazbenih instrumenata i za postizanje akustičnih efekata. U gradnji talijanskih violina drvo je doseglo najveći stupanj vrijednosti preradbe i oplemenjivanja. Drvena oplata koncertnih dvorana i drugih prostora osigurava dobra akustična svojstva takvih prostorija. Drvom i drvenim pločama postiže se dobra zvučna izolacija. Brzina rasprostiranja zvuka u drvetu može se odrediti po formuli:

$$v = \sqrt{\frac{E}{\rho}}$$

gdje je E modul elastičnosti, a ρ gustoća drva, definirana kao odnos između volumne mase drva (N/m^3) i normirane gravitacije izražena u jedinicama Ns^2/m^4 . Valovi zvuka u drvetu šire se 10 do 15 puta brže nego zraku i približno jednako brzo kao u metalu. Brzina zvuka ovisi o modulu elastičnosti i volumnoj masi drveta. Što je veći modul

elastičnosti to je veća brzina zvuka, a što je volumna masa veća to je manja brzina zvuka. Vlaga drveta smanjuje brzinu zvuka jer smanjuje modul elastičnosti a povećava volumnu masu drveta. Brzina zvuka ovisi o smjeru rasprostiranja, najveća je u smjeru vlakanca, znatno manja u radijalnom smjeru a najmanja u tangencijalnom smjeru.

Vrsta drveta	Srednja volumna masa g/cm ³	Brzina zvuka u smjeru vlakanca C _{//} u m/s	Odnos $\frac{C}{C_{//}}$
Bukovina	0,70	3412	1,34
Cedrovina	0,55	4400	—
Hrastovina	0,65	3381—4310	1,36
Jasenovina	0,65	3900	—
Trešnjevina	0,60	4400	—
Orahovina	0,55	4700	—
Jelovina	0,40	5256	2,2
Jelovina sa crljen drvom	0,45	4180	1,5
Željezo	7,85	5000	—
Bakar	8,90	3900	—
Olovo	11,34	1320	—
Staklo	2,5	5100—6000	—
Guma	1,15	1570	—
Pluto	0,25	430—530	—

Slika 2.2.2 Prikaz brzine širenja zvuka u drvetu i nekim drugim materijalima ⁸

Brzina zvuka ovisi o pravilnosti građe drveta. Što je pravilnost veća, brzina je veća. Budući da je drvo četinjača (smrekovine i crnogorice) pravilnije građe od listača (javorovine, brezovine, bukovine) glazbeni instrumenti se rade od četinjača, svaki instrument ima propisane točne specifikacije koje drvo mora imati.

Otpor zvuka nekog elastičnog medija može se izračunati po formuli:

$$\omega = \rho * c,$$

gdje je ω otpor zvuka, ρ gustoća drveta i c brzina zvuka.

Dynamic stiffness and sound impedance per unit length
(dynamic stiffness to DIN EN 29052, sound impedance per unit length to DIN EN 29053)

Thermal insulating material	Dynamic stiffness s' [MN/m ³]	Sound impedance per unit length r [kPas/m ²]
Flax	no details	> 2
Hemp	no details	> 6
Wood fibres (WF)	4–8	9–100
Wood-wool boards (WW)	4–8	9–100
Melamine foam (MF)	no details	8–20
Mineral wool (MW)		
Glass wool	no details	> 5
Rock wool	7–35	6–43
Polystyrene, expanded (EPS)	10–40	k.A.
Cellulose fibres		
(boards)	3–7	43–76
(flakes)	no details	3,6–20

Slika 2.2.3. Dinamička gustoća i zvučna izolacija po jedinici duljine⁹

2.2.5 Termička svojstva drveta

Osnovni pojmovi termičkih osobina drveta tehnološki su važni, i to su dilatacija (toplinsko širenje), vodljivost topline i specifična toplina.

Dilatacija tj. promjene u dimenzijama tijela koje se zagrijava proporcionalne su s iskonskom dimenzijom i razlikom u temperaturi.:

$$\Delta D \approx D_0 * \Delta t$$

gdje je ΔD promjena dimenzije, D_0 početna dimenzija i Δt razlika u temperaturi, te koeficijent dilatacije iznosi:

$$\alpha = \frac{1}{L_0} * \frac{\Delta L}{\Delta t}$$

gdje je L linearna dimenzija. Koeficijent dilatacije varira u znatnim granicama što bi moglo utjecati na primjenska svojstva drveta u klimama gdje varira temperatura u velim rasponima.

Vodljivost topline je sposobnost neke tvari da provodi toplinu a izražava se koeficijentom vodljivosti topline, jedinice W/mK. W/mK je vodljivost homogenog tijela u kojem razlika termičke temperature od 1 kelvina među dvjema paralelnim ravninama površine 1 kvadratnog metra na međusobnom razmaku 1 metar stvara termički tok od 1 vat. Koeficijent vodljivosti topline drva ovisi o anatomskej građi, volumnoj masi, smjeru vlakanca, temperaturi i sadržaju vode u drvu.

Odnos između koeficijenta vodljivosti topline i volumne mase standardnog suhog drva može se izraziti jednadžbom:

$$\lambda = A * \rho_0 + B$$

gdje je λ koeficijent vodljivosti topline, ρ_0 volumna masa suhog drva, a A i B parametri ovisnosti o vrsti drveta, odnosno o koeficijentu vodljivosti topline zraka. On je veći u smjeru vlakanca nego okomito na vlakanca i to za sve vrste je veći u smjeru vlakana za 87 - 139% od onog okomitog na vlakanca. Koeficijent vodljivosti ovisi i o vlazi. Što je vlaga drva veća, to je koeficijent topline veći.⁸

2.2.6 Drvena vlakna

Drvena vlakna su često nusprodukt drven industrije, i građevine. Ona se najčešće povezuju lateksom ili emulzijom voska s aluminijskim sulfatom, no, u zadnje vrijeme i cementom kao povoljnijom sirovinom koja ostvaruje dobro vezanje, nije toliko estetski lijepo ali je povoljnije i odličnih svojstava.

Drvena vlakna pokrivaju manje od 1% tržišta izolacijskim materijalima, odnosno sirovinama, imaju odlična toplinska i zvučna svojstva i pri tome 'dišu' bolje od drugih materijala te tako pomažu u regulaciji vlage u prostoriji. Ona sporo upijaju vlagu brzo je oslobađajući te tako pomažu u očuvanju prostora pri dobroj vlažnosti iako se njihova dimenzija mijenja s udjelom vlage. Ploče od drvenih vlakana i drvolita su jednostavne za postavljanje, mogu se rezati na odgovarajuće dimenzije standardnim alatima za rezanje drva i raznih materijala. Ploče od drvenih vlakana ne predstavljaju nikakav rizik za zdravlje, pozitivne su i iz ekološkog pogleda iako se trenutno koristi više drva nego što naraste ali to je priča za neko drugo područje zanimanja. Drvena vlakna se lagano recikliraju u novi proizvod ili se mogu odlagati prema zakonskoj normi ili mogu biti spaljena bez otpuštanja štetnih tvari kao kod polimera ili drugih materijala. Za zaštitu takvih ploča od požara, na područjima u kojima je od velike važnosti to svojstvo, dodaje se više cementa ili vapnenca.⁹

2.3 CEMENT I CEMENTNI MATERIJALI

Cement je praškasti materijal koji pomiješan s vodom tvori cementnu pastu. Kemijskim reakcijama i pratećim fizikalnim procesima cementna pasta prelazi u očvrslu cementni kamen. Time razvija svoja kohezijska i adhezijska svojstva koja omogućavaju da poveže zrna stijena i minerala u kontinuiranu, čvrstu masu betona.

U procesu transformacije od osnovnih sirovina (gline i vapnenca) do cementne paste postoje dvije odvojene faze kemijskih promjena. U prvoj fazi, proizvodnji, sirovine se sinteriraju pri čemu spojevi cementa, a u drugoj fazi, hidrataciji, cement kao dio betonske mješavine hidratizira da bi tvorio očvrslu ili hidratiziranu cementnu pastu.

2.3.1 Podjela cementa

Prema kemijskom sastavu cementdijelimonadvijeskupine:

- Silikatni cementi dobivaju se pečenjem lapora i vapnenca. Najznačajniji iz skupine silikatnih cementa je portland cement, koji služi i kao baza za proizvodnju metalurških, pucolanskih i supersulfatnih cementa. Jedna od vrsta portland cementa je i bijeli portland cement koji se dobiva pečenjem kaolina i vapnenca.
- Aluminatni cementi dobivaju se pečenjem boksita i vapnenca, koriste se pri izradi vatrostalnih betona, kao i pri betoniranju na vrlo niskim temperaturama.

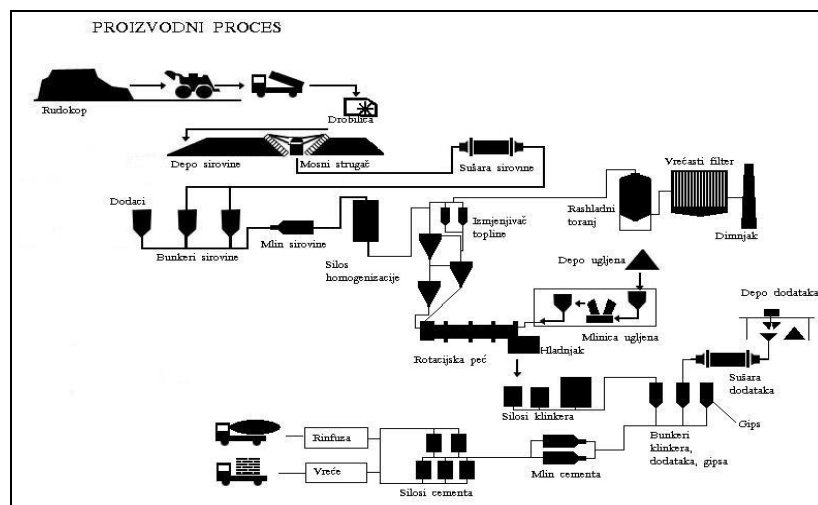
2.3.2 Dobivanje cementa

Najčešće korištena vrsta cementa je Portland- cement, CEM II, koji je korišten u ovom ispitivanju.

Osnovne sirovine za proizvodnju cementa su lapori s povećanim udjelom karbonata, te glinoviti pijesci pri čemu su minerali glina iz frakcije pijeska nositelji oksida Si, Al i Fe.

Proizvodnja portlandskog cementa osniva se na uspostavljanju i održavanju što je moguće više točnih odnosa između bazičnih i kiselih komponenti sirovine, njihovog

mljevenja, pažljivog miješanja i pečenja do sinteriranja na temperaturi od 1400 °C do 1450 °C. U mlinu cementa cementni klinker se melje u fini prah. Pri mljevenju se dodaje oko 5% prirodnog ili umjetnog gipsa koji služi za kontrolu brzine vezivanja, a od ostalih dodataka zgora, leteći pepeo, prirodni pucolan (tuf) i vapnenac. Potrebno je odmah istaknuti da željene karakteristike finalnog proizvoda (gotovog cementa) ponajprije zavise o vrsti i količini dodataka cementu, kao i o finoći obrade samog samljevenog cementa. Sa depoa dodataka dodaci se izuzimaju, miješaju, prema potrebi suše u sušari dodataka i transportiraju do bunkera mlinova cementa. U zadanom omjeru klinker i dodaci se preko vaga doziraju u mlinove cementa. Obično tri cijevna dvokomorna mlina sa kuglama melju komponente u cement. Cement odgovarajućeg sastava i finoće, transportira se i skladišti u odgovarajuće označene silose. Uskladišteni cement propisno se izuzima prilikom otpreme. Cement se otprema kamionima, u vrećama, na paletama u vrećama od 25 kg i 50 kg ili u rastresitom stanju.¹⁰



Slika 2.3.2. Shematski prikaz suhog postupka proizvodnje cementa¹⁰

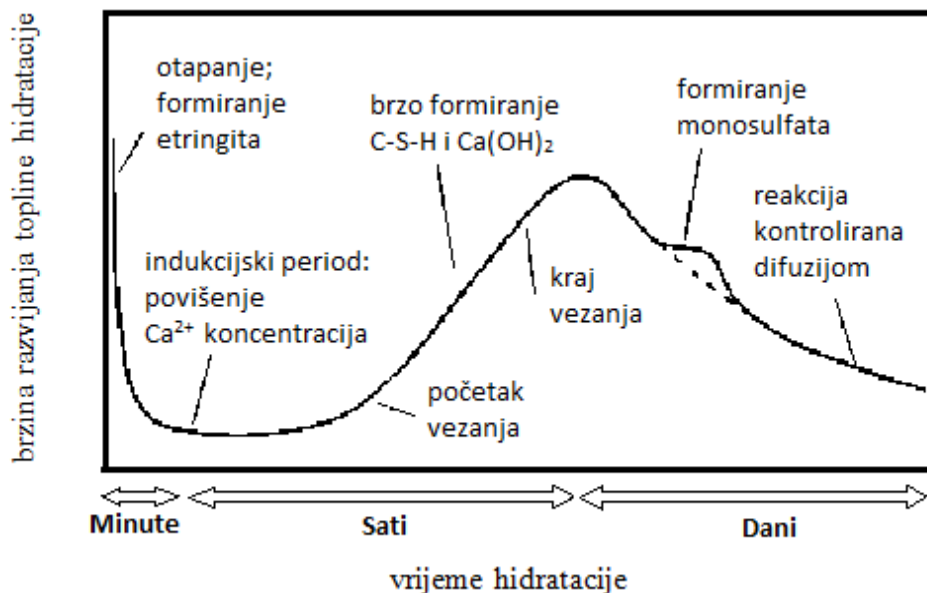
2.3.3 Hidratacija portland-cementa

Nakon zamješavanja cementnog praha i vode počinje se odvijati proces hidratacije. To je slijed kemijskih reakcija između minerala portland-cementnog klinkera, kalcijeva sulfata i vode, pri čemu molekule vode obavijaju ione čvrstih čestica cementa.¹² Procesom hidratacije silikati i aluminati formiraju hidrate, a plastična cementna pasta s vremenom prelazi u čvrsti, hidratizirani cementni kamen.

Reakcije hidratacije se odvijaju dok ne ponestane reaktanata, a očvršćivanjem se smanjuje poroznost i razvijaju se konačna mehanička svojstva. U prvih nekoliko sati od početka hidratacije dolazi do vezanja, tj. gubitka obradivosti, a zatim i do povećanja čvrstoće. Čvrstoća raste najizraženije u prvih mjesec dana od početka reakcije hidratacije, no nastavlja se i u narednim mjesecima. Tijekom očvršćivanja brzine hidratacije se razlikuju, a parametri koji utječu su:

- vrsta cementa
- omjer vode i cementa
- temperatura pri kojoj se reakcija odvija
- prisutnost minerala i kemijskih dodataka

Napredovanje reakcije hidratacije moguće je pratiti mjerenjem promjena kemijskog sastava, brzine prolaska ultrazvuka, entalpije, promjene volumena te promjene u konzistenciji i čvrstoći cementne paste. Još jedna od metoda jest praćenje krivulje razvijanja topline, koja je prikazana na slici 2-3. Na njoj je dana ovisnost razvoja topline po jedinici vremena dQ/dt , a predstavlja ukupni odziv kalorimetra na skup kemijskih reakcija (bez podataka o pojedinačnom procesu).



Slika 2.3.3 Shematski prikaz hidratacije portland- cementa

Iz grafičkog je prikaza vidljivo da neposredno nakon kontakta cementa s vodom dolazi do izmjene iona između čvrste i tekuće faze te se formiranjem početnih hidratacijskih produkata razvija vrlo velika količina topline. Nakon toga dolazi do naglog smanjenja brzine razvijanja topline, a već u indukcijskom periodu koncentracija Ca-iona u tekućoj fazi doseže prag zasićenja s obzirom na Ca(OH)_2 . Posljedično tome, započinje nukleacija i rast C-S-H produkata i Ca(OH)_2 . Ukoliko u cementu nije prisutno dovoljno sulfata u odnosu na aluminat dolazi do razvoja monosulfo-aluminat hidrata, kao posljedica reakcije nastalog etringita sa Al(OH)_4^- . U periodu usporavanja (post ubrzavajućem periodu) hidratacija je karakterizirana malom količinom razvijene topline i smanjenom ukupnom brzinom. Aluminati i sulfati mogu postati dio C-S-H produkta te, stoga, utječu na njegove strukturne karakteristike, dok se utjecaj alkalija očituje na brzinu razvijanja čvrstoće.

Svjetska potrošnja cementa dosegla je iznos od 450 kg po glavi stanovnika godišnje te se predviđa nastavak rasta u skladu sa ekonomskim rastom i razvojem.¹³ Ono što je specifično za industriju proizvodnje cementa je velika potrošnja energije, visok stupanj zagađenja zraka te potrošnja prirodnih resursa. Od ukupne emisije CO_2 na proizvodnju cementa otpada 5-8 % te, zahvaljujući rastućoj potražnji za cementom, nastavlja rasti. Kako bi se potaknuo razvoj održivih materijala, u cementnu su se smjesu počeli dodavati razni otpadni materijali iz procesa proizvodnje. To su: šljaka, kalcinirana glina, leteći pepeli, rižine ljuskice, fini silicij i slični materijali koji se ovakvom primjenom vraćaju u proizvodni proces, a čime se ujedno smanjuje i količina industrijskog otpada.

2.3.4 Parametri kakvoće cementnih materijala

Predviđeni su različiti zahtjevi koje mora posjedovati dobar građevni materijal, primjerice; čvrstoća, otpornost na habanje, otpornost na mraz, vodonepropusnost, gustoća, sabijenost, postojanost na koroziju i dr., kao glavni kriterij dugo se tražila čvrstoća na tlak.

Čvrstoća cementnih materijala je napon koji odgovara najvećoj sili potrebnoj da se tijelo razori. Postoji niz čimbenika koji djeluju na čvrstoću materijala pa se zbog mnogobrojnosti mogu podijeliti u tri skupine:

- udjeli i značajke materijala
- uvjeti rada

- parametri provjere

Udjeli i značajke materijala su skupina čimbenika čvrstoće materijala u koju spadaju vodocementni faktor, vrsta cementa i agregata i kakvoća vode potrebne za hidrataciju.

Uvjeti rada su definirani vlažnošću, temperaturom i vremenom hidratacije. Oni su važan parametar razvoja čvrstoće materijala.

Parametri provjere su propisani standardom, a imaju važan iznos na brojčani iznos čvrstoće.

Kada se djeluje silom na cementni materijal dolazi do popuštanja i konačnog loma materijala. Koliko će vanjske sile materijal primiti a da pri tome nema trajnog oštećenja ovisi o kakvoći materijala.¹¹

2.3.5 *Prednosti i nedostaci cementnih materijala*

Prednosti cementnih materijala u primjeni:

- **Nezapaljivost**- Beton je materijal otporan na djelovanje požara, na što osobito utječe vrsta uporabljenog agregata. Najbolje vrste agregata prema požaru su od bazalta, diabaza, vapnenca i dolomita a posebno od šamota i zgure iz visokih peći. Za vrijeme požara voda ispari iz betona, što znatno povećava njegovu termičku otpornost.
- **Trajnost** - trajnost armiranobetonskih konstrukcija osigurana je velikim dijelom time što beton štiti armaturu od korozije i što mu se čvrstoća u tijeku vremena povećava. To sve vrijedi uz uvjet da je konstrukcija načinjena od kompaktnog betona.
- **Relativno mali troškovi održavanja** - troškovi održavanja betonskih konstrukcija vrlo su mali, kao uostalom i za građevine od kamena, za razliku od troškova održavanja čeličnih i drvenih konstrukcija. U pogledu higijene betonske su konstrukcije u prednosti pred drvenim i čeličnim zbog svoje monolitnosti, u kojoj nema šupljina za leglo parazita i skupljanje prašine.

- Mogućnost izrade najraznovrsnijih oblika -prilagodljivost betona svim potrebnim oblicima dopušta projektantu da zadovolji najrazličitije zahtjeve konstrukcijske, izvođačke ili arhitektonske prirode

Mane cementnih materijala u primjeni:

- Znatna vlastita težina
- Velika provodljivost topline i zvuka
- Niska tlačna čvrstoća
- Teško naknadno provjeravanje armature
- Otežani radovi kod niskih i visokih temperatura
- Otežani naknadni radovi
- Korozija armature
- Osjetljivost na mraz
- Pojava pukotina koje ne narušavaju sigurnost i trajnost kada su ograničene širine ali narušavaju vanjski izgled¹⁴

Iako je lista mana betona veća od liste prednosti, prednosti su ipak veće pa je beton danas jedan od najraširenijih gradiva, te uz pomoć adekvatne zaštite njegove površine raznim izolacijskim materijalima to će i ostati.

2.4 KOMPOZITNI MATERIJALI

Prema definiciji, kompozitni materijali sastoje se od jedne kontinuirane faze, matice, koja obuhvaća jednu ili više diskontinuiranih faza, punila. Matica u većini polimera služi da bi prenosila opterećenje na punilo ili zaštitila punilo od vanjskih utjecaja, u našem sustavu punilo, drvena vlakna, koristimo da bi smanjili masu materijala, poboljšali mu izolacijska svojstva i pritom recikliramo otpadna drvena vlakna. Da bi materijal bio kompozitni, granica između kontinuirane i diskontinuirane faze mora biti jasno izražena, tj. vidljiva. Znači, materijali kod kojih nije vidljiva ta granica nisu kompozitni iako su sastavljeni od dvaju ili više materijala.

Kompozitni materijali, bez obzira na svoju strukturu i sastav, proizvode se da bi se poboljšala ili uskladila postojeća svojstva materijala, te da bi se postigla nova svojstva kakva pojedina sastavnica ne posjeduje. Tako dodatkom punila možemo povećati žilavost, čvrstoću ili otpornost na habanje materijala, ili smanjiti njenu propusnost za plinove ili kapljevine, smanjiti provodnost topline ili zvučnih valova, itd.

Kompoziti ojačani vlaknima su od tehnološke važnosti, matrica u njima uglavnom služi kao poveznica i za prenošenje napreznja u vlaknima, za takve potrebe se rabe razna vlakna, kao što su kevlar, ugljična vlakna, polietilenska, staklena itd. U ovom radu korištena su drvena vlakna koja modificiraju mehanička svojstva materijala i poboljšavaju njegova izolacijska svojstva, a dobiveni materijal nije nosivi, već izolacijski. Klasičan kompozit bi bio beton, cement uz dodatak šljunka / pijeska, vode, koji će mu povećati mehanička svojstva.¹⁵



Slika 2.4.1. *Primjer kompozitnog materijala blato (glinenica, voda) i biljna vlakna*^v

2.4.1 Drvolit

Ova vrsta kompozita sastavljena je od cementne paste, koja čini kontinuiranu fazu, i drvenih vlakana, koji predstavljaju diskontinuiranu fazu te su nasumično raspoređena unutar matrice. U procesu proizvodnje cementna pasta se dobiva miješanjem usitnjenog cementnog klinkera sa vodom u predviđenom omjeru. Po dobivanju cementne paste u nju se umješava drvena vuna. Ona je prethodno tretirana određenim kemijskim tvarima, a kako bi se poboljšala adhezija na površini dviju faza. Također, ovisno o stanju drveta, potrebno je vunu tretirati protiv štetnih mikroorganizama koji bi, u slučaju prisutnosti, mogli smanjiti kvalitetu gotovog proizvoda. Iz tako pripremljenih sastavnica miješanjem u točno definiranom omjeru dobiva se kompozit. Taj se kompozit ulijeva u kalupe predviđene debljine i dimenzija u kojima dolazi do procesa očvršćivanja i vezanja. Da bi cjelokupni proces bio ekonomski isplativ potrebno je optimizirati količinu upotrijebljenih kemikalija, vrijeme obrade sastavnica kompozita, kao i trajanje procesa kalupljenja. Jedan od glavnih faktora koji utječu na spomenute procese je kvaliteta drvenih vlakana.

Ukoliko je ona loša, pod djelovanjem cementa i vode može doći do otpuštanja ligno-celuloze i polisaharida prisutnih u celulozi. Tada prisutni kemijski spojevi ometaju proces adhezije sa površinom cementne paste te cijeli proces traje znatno duže. Osim toga, kvaliteta gotovog proizvoda u tom je slučaju upitna. Vrsta cementa koja se

koristi također je važna zbog vremena vezanja i količine oslobođene topline. Poželjno je da cement veže relativno brzo kako bi proizvodni kapacitet bio veći, ali da se pri tome na oslobađa prevelika količina topline kako se ne bi oštetila drvena vlakna. Što se tiče kemikalija korištenih u procesu važno je da su cjenovno i količinski lako dostupne, da nisu štetne po zdravlje i da nisu korozivne. Ta je stavka važna jer u doticaju sa vodom iz cementne paste može doći do otpuštanja kloridnih iona koji su onda odgovorni za koroziju i slabljenje kvalitete kompozita.

Kod ove je vrste kompozita važna kompatibilnost između cementa i drvenih vlakana. Za cement i drvo će se reći da su kompatibilni kada umješavanje drvenih vlakana u cementnu pastu ne utječe na proces očvršćivanja, odnosno kada dolazi do neznačajnog ometanja procesa. Ukoliko proces stvrdnjavanja kompozita rezultira lošijim fizikalnim svojstvima tada sastavnice nisu kompatibilne. Uzrok nekompatibilnosti leži u prisutnosti spojeva koji se ekstrahiraju iz drveta, kao i njihovoj vrsti. Spojevi ligno-celuloze koji su topivi u vodi ili alkalnom mediju, koji nastaje uslijed spajanja vode i cementa, značajno mogu produljiti ili čak i spriječiti vezanje i očvršćivanje cementa.¹⁵ Tako primjerice, srž kalifornijskog bora (*Pinus radiata*) ozbiljno usporava hidrataciju cementa, pri čemu dobivene ploče nisu strukturno stabilne, dok se ploče izrađene od bjeljike primjenjuju u industriji i komercijalizirane su. Ispitivanja provedena na četiri vrste tvrde drvene građe i pet vrsta mekog drveta Sjeverne Amerike pokazalo je da tvrda drvena građa u većoj mjeri negativno utječe na hidrataciju cementa nego što to čini meko drvo. Pri istim se ispitivanjima srž mekog drveta pokazala štetnijom za hidrataciju cementa u odnosu na drvenu bjeljiku. Pri ispitivanju građe sastavljene od osam umjerenih vrsta australskog eukaliptusa inhibirajući učinak spriječen je jednostavnim namakanjem u hladnoj vodi, no već dodatak od 0,6 % ekstrakta zapadnog lariša (*Larix occidientalis*), topljivog u toploj vodi, u potpunosti je spriječilo proces sušenja.

Osim vrste koja se ekstrahira iz drveta veliki utjecaj na hidrataciju imaju i kemijski sastav ekstrakta, pH vrijednost i puferski kapaciteti. Istraživanja su pokazala da celuloza, lignin, masne kiseline, smolna kiselina, sterol i terpene značajno ne smanjuju vlačnu čvrstoću cementa do udjela od 1,0 %. S druge strane, glukoza uzrokuje opadanje vlačne čvrstoće i za 40 %, a hemiceluloza, tanin i octena kiselina značajno manje opadanje vrijednosti tog fizikalnog svojstva.

Kiselost cementnih otopina pogoduje otapanju karbohidrata iz drveta, osobito kada cement ima visoki kiselinski puferski kapacitet, što uzrokuje da nastale ploče

kompozita imaju slabiju mehaničku čvrstoću. Također, cement može razgraditi celuloznu kašu koja se nanosi kao ojačavalo, a to sa starenjem ploče dovodi do povećanja količine topivih karbohidrata.

Prilikom izrade kompozita važan je i omjer cementa i drvenih vlakana. Istraživanja na pločama od složenog krupnog iverja pokazala su da povećanje omjera cement- drvo dovodi do povećanja modula elastičnosti, jakosti vezanja i povećanja volumena uslijed djelovanja vode.¹⁶ Jedino se vrijednosti za modul krutosti smanjuju povećanjem omjera, tj. sa većim udjelom drvene faze u kompozitu ploče postaju savitljivije. Veći udio drveta u ploči znači da su područja naprezanja podijeljena po većoj površini, a to znači manje naprezanja po jedinici površine. Da bi ploča imala odgovarajuća svojstva, osobito vrijednosti modula krutosti, potreban je omjer cement-drvo u omjeru manjem od 2/1. Neka istraživanja ukazuju i na omjer manji od 1.5. U usporedbi sa omjerom koji se primjenjuje u proizvodnji cementom vezane iverice ta je brojka značajno manja. Kod komercijalne iverice omjer iznosi od 2 i 3/4 do 3, a razlika u omjerima između ploča od iverice i složenog krupnog iverja pripisuje se geometriji drvene faze. Naime, duljina i debljina punila povezana su sa svojstvima koja su ključna za kompozitne ploče, a to su upravo moduli krutosti i elastičnosti te jakost vezanja i povećanje volumena prilikom djelovanja vlage. Ustanovljeno je da su ploče tvrđe, jače i dimenzijski stabilnije što su vlakna diskontinuirane faze duža i tanja.



Slika 2.4.2 Drvena vuna, vlaknasto punilo u drvolitu ^v

2.5 TOPLINSKA SVOJSTVA MATERIJALA

Mjerne jedinice za temperaturu. Sukladno zakonskoj obvezi u knjizi će se upotrebljavati zakonite jedinice utemeljene na Međunarodnom sustavu jedinica (SI). U tom sustavu mjerne jedinice za temperaturu su kelvin (K) i Celzijev stupanj ($^{\circ}\text{C}$). Kelvin je jedinica termodinamičke temperature i definirana je kao 273,16-ti dio termodinamičke temperature trojnog stanja vode (postiže se uz tlak $p = 610,6 \text{ Pa}$ i temperaturu $T = 273,16 \text{ K}$). Pri tome je ničtici termodinamičke temperature pridružena vrijednost 0 K . Pri toj temperaturi prestaje kinetičko gibanje molekula pa se temperatura takvoga stanja uzima kao ničtica apsolutne temperature, a ljestvica često naziva apsolutnom temperaturnom ljestvicom. Celzijev stupanj jednak je kelvinu ($^{\circ}\text{C} = \text{K}$). Zbog razlike ishodišta pripadajućih ljestvica, neko temperaturno stanje iskazano termodinamičkom temperaturom T i Celzijevom temperaturom $^{\circ}\text{C}$ razlikuje se za 273,16 prema jednadžbi:

$$t/^{\circ}\text{C} = T/\text{K} - 273,15 \quad (1)$$

Primjerice temperaturi $-5 \text{ }^{\circ}\text{C}$ odgovara u apsolutnoj ljestvici temperatura 268 K . U nekim zemljama engleskog govornog područja najčešća je jedinica Fahrenheitov stupanj (farenhajt, znak $^{\circ}\text{F}$). Veza između vrijednosti temperatura u Celzijevoj ljestvici i Fahrenheitovoj nešto je složenija jer jedinične razlike temperatura u jednoj i drugoj temperaturnoj ljestvici nisu jednake. Mjerne jedinice za toplinsku energiju i toplinsku snagu. Temeljna mjerna jedinica za sve vrste energije u sustavu SI je džul (joule), znak J . Energijski ekvivalent jednog džula je $\text{J} = \text{N m} = \text{W s}$. Na temelju navedenog slijedi da je 1 kWh energije ekvivalentan energiji od $3,6 \text{ MJ}$. U starijoj se literaturi kalorija (cal) redovito upotrebljavala kao jedinica za toplinsku energiju.

Vođenje topline u tvari. U najvećem se broju slučajeva vođenje topline promatra unutar krutih tvari. Medij koji vodi toplinu sastavljen je iz čestica koje uglavnom ne mijenjaju svoj položaj u prostoru, a energija se širi prijenosom kinetičkih energija vibracija molekula ili toka slobodnih elektrona u metalima. Prijenos toplinske energije nastaje djelovanjem temperaturnih razlika u tvari.

Konvektivni prijelaz topline. Ta se vrsta prijelaza topline po mehanizmu djelovanja bitno razlikuje od prethodnog, jer je za prijelaz topline pored temperaturne razlike bitan i prijenos tvari, odnosno kretanje fluida (najčešće se toplinska energija prenosi fluidima, iako bi u načelu konvektivni prijenos topline mogao uslijediti i zbog kretanja krutih tvari). U praksi se taj vid prijelaza topline razmatra pri analizi prijelaza topline između krutih tvari i fluida koji uz njih struje.

Toplinsko zračenje. Svako tijelo zrači u okoliš elektromagnetno zračenje male valne duljine (infracrvene zrake) čija energija i spektar ovise o temperaturi tijela. Toplinsko zračenje je važno za prijenos topline između tijela s velikom temperaturnom razlikom, a posebno za prijenos topline u svemirskim razmjerima (zračenje Sunca na Zemlju). U praktičkim primjerima često se događa da dvije ili sve tri navedene kategorije prijelaza topline djeluju istodobno. U većini slučajeva se to odnosi na paralelno odvijanje procesa vođenja topline i konvektivnog prijelaza topline.

Vođenje topline je proces kojim se toplina prenosi s čestice na česticu unutar tijela (pri tome obično mislimo na krute tvari). Uvjet za odvijanje tog procesa je postojanje temperaturnih razlika, dakle toplijih i hladnijih mjesta, unutar tijela (identično kao što je postojanje unutarnje razlike potencijala uvjet za strujanje elektrona unutar tijela, odnosno nastajanje električne struje). Može se zamisliti da neko kruto tijelo proizvoljnog oblika ima određenu raspodjelu temperaturu. Ta se raspodjela temperature obično zove temperaturno polje. Krivulja koja povezuje točke jednake temperature je izoterma. Kod mnogih problema vođenja topline raspodjela topline se javlja i kao funkcija vremena, tako da se u općenitom slučaju može pisati da je temperatura neke točke u prostoru $T = f(n, t)$, gdje je n vektor položaja te točke u odnosu na ishodište odabranog koordinatnog sustava, a t vrijeme. Pri uporabi pravokutnog koordinatnog sustava odgovarajuća relacija je $T = f(x, y, z, t)$. Problemi prijelaza topline kod kojih se računa s vremenski promjenjivom temperaturom zovu se problemi ne stacionarnog vođenja topline, a oni kod kojih ovisnost o vremenu ne postoji ili se može zanemariti problemi su stacionarnog vođenja topline.

2.5.1 Koeficijent toplinske vodljivosti

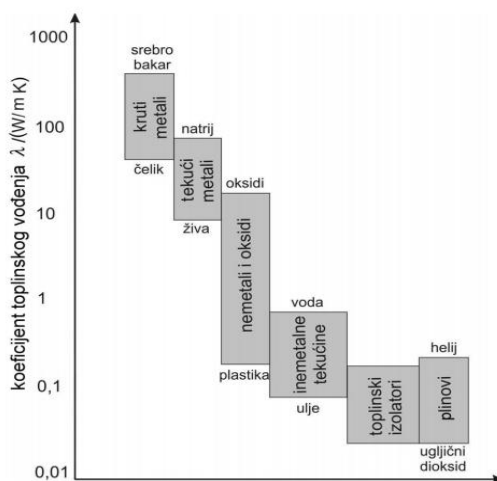
Prema Fourierovu zakonu prenesena je toplina proporcionalna negativnom gradijentu temperature. Faktor proporcionalnosti λ ovisi o materijalu kroz koji se toplina provodi. Što je taj faktor veći, to će se uz isti gradijent temperature prenijeti više topline. Fourierov zakon, poput većine temeljnih zakona fizike, nije moguće izvesti teorijski, ali ga je moguće potvrditi mjerenjima. Vrlo često se problemi vođenja topline razmatraju u pravokutnom koordinatnom sustavu, a u posebno jednostavnim slučajevima nas zanima vođenje topline samo u jednom smjeru. Za taj se slučaj Fourierov zakon glasi:

$$q_p = -\lambda \frac{dT}{dx} \quad (2)$$

Koeficijent λ , ovisi o vrsti materijala kroz koji se provodi toplina, ali ovisi i o temperaturi. Ta je veličina poznata kao koeficijent toplinske vodljivosti ili toplinska vodljivost. Jedinica za λ je $(\text{W}/\text{m}^2) \cdot \text{m}/\text{K} = \text{W}/(\text{m K})$.

Predmet našeg proučavanja su toplinska svojstva materijala; koeficijent toplinske vodljivosti λ , toplinski kapacitet C_p , difuzivnost γ i efuzivnost α .

Koeficijent toplinske vodljivosti λ , pokazatelj je stupnja propusnosti materijala za vođenje topline. Taj se koeficijent mijenja u širokom rasponu od materijala koji dobro vode toplinu do onih koji je vode veoma loše. Općenito vrijedi pravilo da su dobri vodiči električne struje ujedno i dobri vodiči topline.²¹



Slika 2.5 Koeficijent toplinske vodljivosti za razne kategorije materijala²¹

2.5.2 Toplinski kapacitet

Toplinski kapacitet, C_p , je količina topline koju tijelo treba primiti da bi mu se temperatura podigla za 1°. Tijela odnosno tvari s malim toplinskim kapacitetom brzo se zagriju već kod kratkotrajnog izlaganja izvoru topline, dok one s relativno velikim toplinskim kapacitetom moramo dugo izložiti djelovanju nekog toplinskog izvora da bi mu se temperatura tek malo promijenila.

2.5.3 Toplinska difuzivnost

Toplinska difuzivnost, α , Toplinska difuzivnost je mjera prijenosa topline s jedne strane materijala na drugu. To je omjer sposobnosti toplinske izolacije i sposobnosti očuvanja topline. Oznaka za toplinsku difuzivnost je α , a mjerna jedinica [m^2/s].

Iz manjih vrijednosti za α slijedi sporije širenje topline u nekom materijalu. Za vremensko zadržavanje jednog takvog temperaturnog prolaza pogodni su materijali s nižom toplinskom difuzivnošću, ali s istovremeno većom gustoćom.

Tablica 2.5 Vrijednosti toplinske difuzivnosti za razne vrste građevnih materijala

Građevni materijal	Toplinska difuzivnost α [$10^6 \text{ m}^2/\text{s}$]
<i>Beton</i>	1
<i>Staklo</i>	0,9
<i>Drvo</i>	0,15
<i>Izolacijske ploče od drvenih vlakana</i>	0,2
<i>Opeka</i>	0,6
<i>Mineralna vuna (staklena vuna, kamena vuna)</i>	0,8
<i>EPS, XPS</i>	1,2
<i>Beton s porama</i>	0,4
<i>Čelik</i>	14
<i>Puna cigla</i>	0,4
<i>Celulozna vlakna</i>	0,5

2.5.4 Toplinska efuzivnost

Toplinska efuzivnost je svojstvo prodiranja topline u materijal i prijenosa topline prisutno u svim materijalima kao i u svim oblicima (krutine, tekućine, paste, prahovi i plinovi). Kao i koeficijent toplinske difuzivnosti α , tako i efuzivnost služi za ocjenu toplinsko tehničkog ponašanja materijala pod ne stacionarnim temperaturnim graničnim uvjetima. Oznaka za efuzivnost je e , a mjerna jedinica [$\text{W}\sqrt{\text{s}}/\text{m}^2\text{K}$]. Određuje se prema izrazu:

$$e = \sqrt{\lambda \rho C_p} \quad (3)$$

Gdje je λ [W/mK] toplinska provodljivost materijala, ρ [kg/m^3] gustoća materijala, i C_p [J/kgK] specifični toplinski kapacitet.

Ukoliko je veća efuzivnost nekog materijala onda se toplina može brže preuzeti s površine i odvoditi u materijal. To je važno za spremanje topline unutar materijala. Materijali s velikom efuzivnosti su hladni pri dodiru, dok se oni s malom efuzivnosti mogu(i pri materijalno tehničkim prednostima) koristiti kao dobar podni površinski materijal pri čemu se površina zbog slabog toplinskog provođenja brzo zagrije.²²

3. EKSPERIMENTALNI DIO

3.1 MATERIJALI

3.1.1 Materijali, uređaji i alati

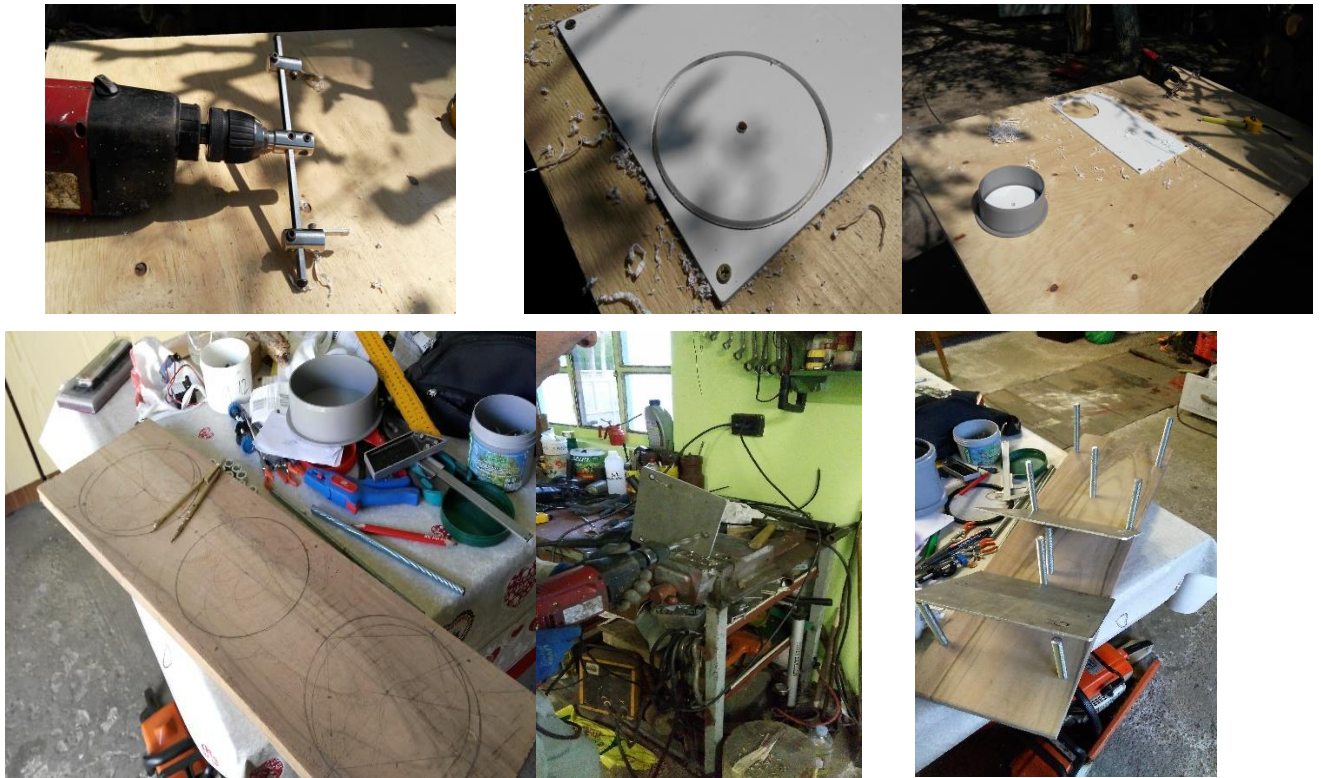
Koristio sam uređaje; termostat STC 1000 proizvođača „Elitech“ te uređaj za prikupljanje podataka Pico TC08, proizvođača „Pico Technology“, na koji su spajani termo parovi K-tipa; Mali komercijalni mikroskop

Materijali potrebni za izradu su cement, drvena vuna, ventilator poznate jačine, čelične šipke 6x, kanalizacijska cijev, čepove za kanalizacijsku cijev 3x, pretvarač napona, blokovi stiropora, drvena ploča, matice 9x, komercijalni grijač poznate jačine, aluminijsku traku;

Od alata, koristio sam ključeve raznih veličina, lonac, poklopac, ispitivač napona, bušilicu, skalpel, lemilicu, stolarske stege, libelu, metar.

3.1.2 Priprema uzorka

Za izradu ispitivanih uzoraka korišten je komercijalni portland cement, voda te drvena vuna crnogorice. Određen je izgled uzorka; oblik diska, promjera 150 mm i debljine 20 mm. Nabavljen je potreban materijal te sam sastavio prešu za dobivanje uzoraka traženih dimenzija (slika 3.1). Prešu sam morao koristiti jer je drvena vuna dosta elastična (nakon prestanka djelovanja opterećenja vraća se u početni oblik).



Slika 3.1 *Proizvodnja kalupa za izradu uzoraka.* ^v

Pripremio sam deset uzoraka različitih sastava. Masa vrećice u kojoj sam vagao i miješao sve sastojke je uvijek ista (tara je 7,65 g) pa je zanemarena u proračunu. Uzorci su različitog udjela cementa, a jedan uzorak sadrži kuglice stiropora.

Tablica 3.1 Priprema uzoraka

Broj uzorka	m(H ₂ O)/g	m(d.v)/g	m(cem.)/g	m(stiropor)	m(ukupna)
1	34,68	30,07	63,31	-	128,06
2	42,02	30,00	80,00	-	152,02
3	55,49	30,01	100,00	-	185,50
4	55,50	30,01	110,00	-	195,51
5	50,00	30,10	110,00	-	190,10
6	61,00	30,00	110,00	-	201,00
7	55,05	30,00	110,00	-	195,05
8	54,05	30,00	110,00	-	194,05
9	55,05	30,00	110,00	3,00	198,05
10	40,00	30,00	80,00	-	150,00



Slika 3.1.1 Miješanje svih komponenata^v



Slika 3.1.2 Uzorak^v

Vidljivo je da prilikom miješanja dolazi do ostatka, cementa nevezanog na drvenu vunu.

Mjerenja toplinskih svojstava su provedena na aparaturnama vlastite izvedbe, izvedene su tako da zadovoljavaju promatranje svih parametara definiranih u prijašnjim znanstvenim radovima na temu mjerenja topline vodljivosti materijala, radovi će biti navedeni u usporedbenom dijelu ovog.

3.2 METODA

Temeljem fizičkih načela prijenosa topline sastavljene su aparature pomoću kojih je vidljiv prijenos topline kroz uzorak i usporedno, bez uzorka. Svaka aparatura se sastoji od izvora topline, uzorka, izolacije, termo parova i računala za zapis podataka i vremena u kojem je oslobođena određena količina topline.

Toplinska vodljivost prema jednadžbi 3.1, građevnog materijala, betona, debelog 20 centimetra, ukoliko je razlika u vanjskoj i unutarnjoj temperaturi 17° C (vanjska je 38°C dok je unutarnja 21°C), njegov koeficijent toplinske vodljivosti je 1,7 W/mK, je:

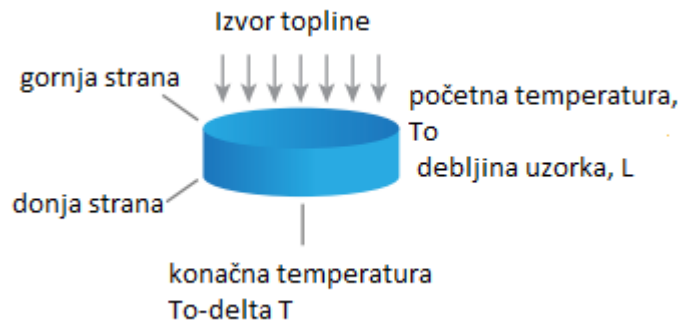
$$\begin{aligned} \frac{q}{A} &= -k * \left(\frac{T_2 - T_1}{x_2 - x_1} \right) \\ &= -1,7 \frac{W}{mK} * \frac{(21 - 38)K}{(0,2)m} = 144,5W / m^2 \end{aligned} \quad (3.1)$$

Izolacijski materijal, recimo drvo ima koeficijent toplinske vodljivosti 0,4 i manji, znači u sloju od 4,5 centimetra ima otprilike istu toplinsku vodljivost kao betonski zid od 20 centimetara. Kad bi uzeli drvo debljine 20 centimetara, proporcionalno betonskom zidu, dobili bi toplinsku vodljivost od samo 34W/m². Zato kombinacijom ta dva materijala se dobiju odlična svojstva, što porast mehaničkih svojstava drveta, što porast izolacijskih svojstava betona.

Uzmimo u obzir da postoji još boljih izolacijskih materijala no što je drvo, recimo stiropor koji ima koeficijent toplinske vodljivosti od 0,035 W/mK, oni se kao takvi i primjenjuju za izgradnju termo fasada na zgradama, kao izolacijske posude za očuvanje topline, u laboratorijima i tako dalje. No ti materijali su puno skuplji od drva, njihova proizvodnja poprilično košta dok drvo raste u prirodi koristeći prirodne izvore za rast.

Na koliko proizvoda smo vidjeli deklariranu toplinsku vodljivost ?!
Izračunavanje toplinske vodljivosti izolacijskih materijala je poprilično složen proces,

za razliku od istog proračuna za homogene ili poprilično homogene materijale, što će se obrazložiti u daljnjem tekstu.



Slika 3.2.1 Osnovni princip mjerenja toplinskih svojstava našeg materijala ^v

Tablica 3.2 Konvencionalne metode mjerenja toplinskih svojstava uzorka

Method	Temperature range	Uncertainty	Materials	Merit	Demerit
Guarded hot plate	80–800 K	2%	Insulation materials, plastics, glasses	High accuracy	Long measurement time, large specimen size, low conductivity materials
Cylinder	4–1000 K	2%	Metals	Temperature range, simultaneous determination of electrical conductivity and Seebeck-coefficient possible	Long measurement time
Heat flow meter	–100–200 °C	3–10%	Insulation materials, plastics, glasses, ceramics	Simple construction and operation	Measurement uncertainty, relative measurement
Comparative	20–1300 °C	10–20%	Metals, ceramics, plastics, plastics	Simple construction and operation	Measurement uncertainty, relative measurement
Direct heating (Kohlrusch)	400–3000 K	2–10%	Metals	Simple and fast measurements, simultaneous determination of electrical conductivity	only electrically conducting materials
Pipe method	20–2500 °C	3–20%	Solids	Temperature range	Specimen preparation, long measurement time
Hot wire, hot strip	20–2000 °C	1–10%	Liquids, gases, low conductivity solids	Temperature range, fast, accuracy	Limited to low conductivity materials
Laser flash	–100–3000 °C	3–5%	Solids, liquids	Temperature range, most solids, liquids and powders, small specimen, fast, accuracy at high temperatures	Expensive, not for insulation materials

Kod konvencionalnih metoda možemo vidjeti mjernu nesigurnost od 2-20% kao pogledamo u krupnom mjerilu to je poprilično velik broj.

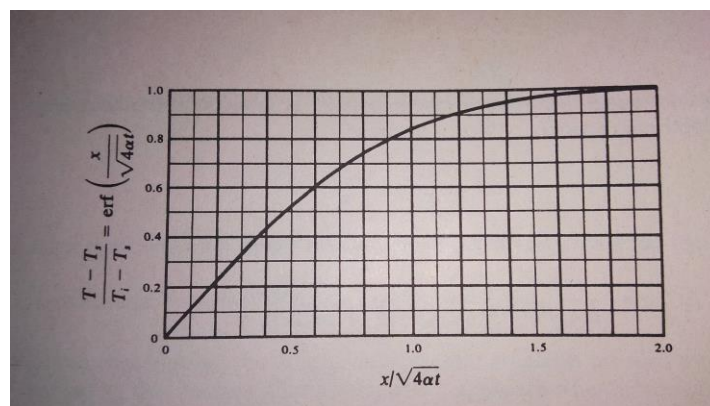
Iz bilance toplinske energije slijedi:

$$\rho C_p \frac{dT}{dt} = \lambda \left(\frac{\delta^2 T}{\delta x^2} + \frac{\delta^2 T}{\delta y^2} + \frac{\delta^2 T}{\delta z^2} \right) \quad (3.2)$$

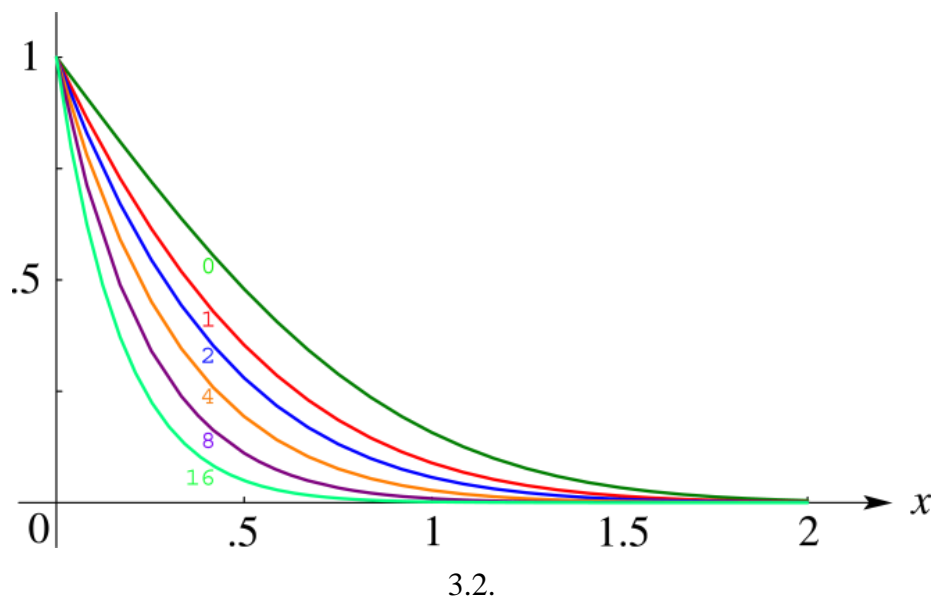
$\rho C_p = C / \text{Jm}^{-3}$, $\lambda / \text{Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$, efuzivnost je $e = \sqrt{\lambda \rho C_p}$, a α je $\alpha = \lambda / \rho C_p$

U principu, nakon određene pobude (ili u stacionarnom stanju) za određenu geometriju moguće je izmjeriti posljedice, raspored temperature, toplinski top itd. Kod pobude uzorka izolacijskog materijala naše geometrije, potrebno je neko vrijeme da toplina prođe kroz njega. Za trajanje pobude uzorka određene geometrije postoje analitička rješenja pomoću kojih možemo proračunati neke parametre.

Na primjer, skokomička pobuda zida ili homogenog materijala temperature T_0 uz preduvjet da je grijanje iz početne temperature i na površini uzorka (slika 3.2).



Slika 3.2 a) Na slici je prikazana promjena temperature u dubini materijala pomoću error funkcije



Slika 3.2.b) Slika prikazuje integriranu error funkciju koja opisuje prijelaz topline kroz uzorak, na x osi je dubina a na y osi temperatura dok je svaka krivulja za svoje vrijeme

Neki od problema prijenosa topline kondukcijom se mogu tretirati uzimajući u obzir da je tijelo na stalnoj temperaturi i da se iznenada ta temperatura promjeni i bude zadržavana na novoj vrijednosti različitoj od početne.

Kad se uzme u obzir trodimenzionalno tijelo koje zauzima samo pola prostora (porozno npr.). Tijelo je inicijalno na stalnoj temperaturi T_i uključujući i njegovu površinu $x = 0$. Zatim se temperatura na površini promjeni i drži na temperaturi T_s . Rješenje takvog slučaja je jednadžba 3.2.1:

$$\frac{T(x,t) - T_s}{T_i - T_s} = \operatorname{erf}\left(\frac{x}{\sqrt{4\alpha t}}\right) \quad (3.2.1)$$

Gaussijanska error funkcija je definirana jednadžbom 3.2.2:

$$\operatorname{erfu} = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^u e^{-\eta^2} d\eta \quad (3.2.2)$$

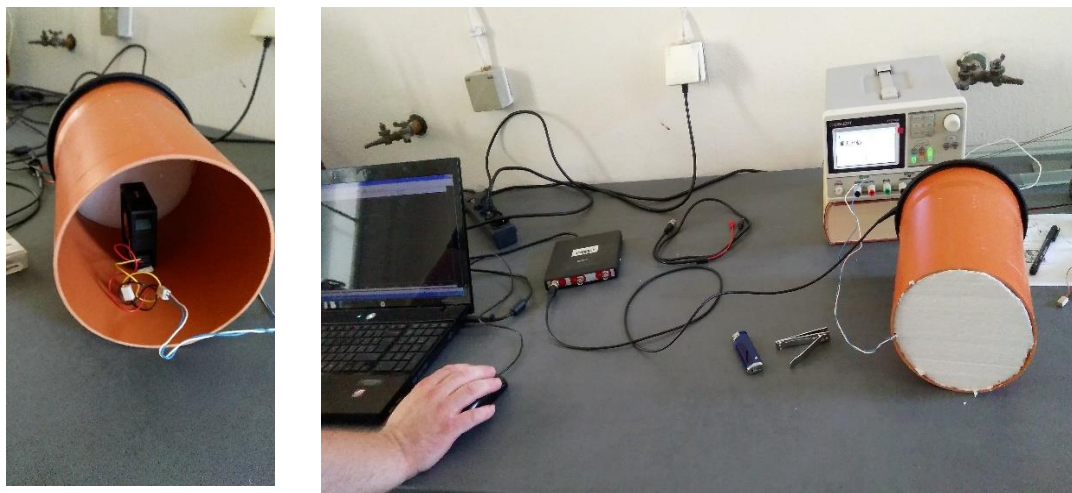
Odgovarajuće vrijednosti za error funkciju možemo pronaći u tablicama ili iz grafičkog prikaza (slika 3.2. a)) koji je sasvim dovoljan za slučaj s prijenosom topline zbog samih pogrešaka mjerenja i složenosti problema.²³

Glavna motivacija ovog rada je činjenica da se temperatura u materijalu u danom trenutku na određenoj dubini u materijalu prenese uz zaostatak u vremenu te tako stvara predodžbu prijenosa topline tj. percepciju koeficijenta difuzije.

3.2.1 Aparatura 1

Prva sastavljena aparatura se sastoji od cijevi, ventilatora određene snage kao izvora topline, termo parova unutar sustava, za praćenje kretanja temperatura u sustavu. Ovakav sustav je jednostavan i paralelno s time da se pretpostaviti da imam brojne nedostatke.

Za izolacijski materija je korišten stiropor u jednom smjeru dok je sustav bio unutar plastične cijevi koji baš i nije toliko dobar izolacijski materijal, dok bi trebala biti od bolje izolacijskog materijala no uzorak.



Slika 3.2.1 Aparatura 1 ^v

Ideja kod određivanja toplinskih svojstava materijala ovom metodom je da imamo stalan i poznat izvor topline (ventilator od 4 vata) koji svu toplinu daje našem sustavu i temperatura s jedne strane uzorka raste što očitavamo pomoću termo para i pratimo vrijeme potrebno da se promjene dogode na drugoj strani uzorka.

3.2.2 Aparatura 2

Kao drugu izvedbu aparature imamo za izvor topline spremnik tople vode, uzorak je izoliran tako da dolazi do oslobađanja topline u samo jednom smjeru i termo parovima se detektiraju promjene temperature koje se bilježe u računalo. Pri ispitivanju s ovom aparaturom pokušao sam između uzorka i izvora topline staviti spužvice kako bi se ostvario bolji prijenos topline.



Slika 3.2.2 Aparatura 2 ^v

U ovom slučaju uporabio sam spremnik tople vode kao izvor topline, uz pretpostavku da ću tako ostvariti bolju izmjenu topline i moći proračunati toplinu prenesenu uzoku.

3.2.3 Aparatura 3

U trećoj aparaturi koristimo kao grijač aluminijsku traku priljubljenu uz gumu, čijim uređivanjem dolazimo do traženog otpora.



Slika 3.2.3. Aluminijska traka kao grijač u više izvedbi ^v

Da bi dobio bolje rezultate cijelu aparaturu sam stavio u zatvoreni sustav 1., no u njemu je bilo previše prostora za nepoželjan konvekcijski prijenos topline pa sam napravio bolji izolirani sustav 2.



Slika 3.2.4 Aparatura u spremniku od stiropora 1. ^v

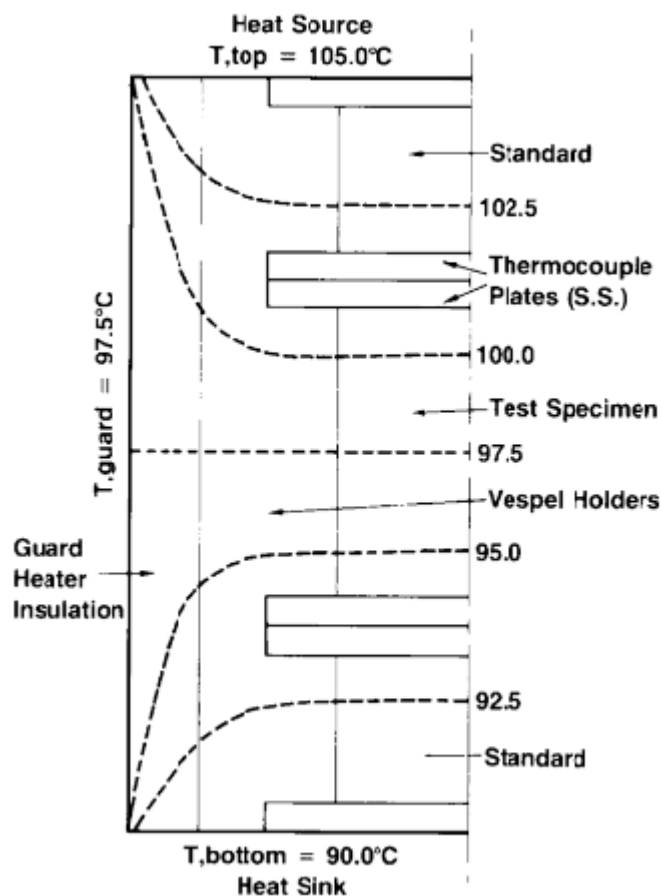


Slika 3.2.4 Izrada izolacijskog spremnika za aparaturu ^v

Uz isti princip sam koristio i komercijalni grijač zbog njegovog pouzdanog izvora topline i male promjene otpora s porastom temperature.



Slika 3.2.5 Komercijalni grijač ^v



Slika 3.2.6 Mjerenje toplinskog kapaciteta po Somertonu¹⁹

3.2.4 Ispitivanje gorenja

Ispitivanjem gorenja dobiva se uvid u toplinsku (kalorijsku) vrijednost (ogrjevnog) materijala, a provodi se kalorimetrom, u atmosferi kisika pod visokim tlakom.¹⁶Efektivna toplinska vrijednost određuje se obzirom na referentni uzorak (u ovom slučaju benzojeva kiselina), a stvarni temperaturni porast se izvodi iz mjerenja temperature prije, tijekom i nakon samo procesa sagorijevanja. U ćeliju kalorimetra, prethodno zapaljenju, uvodi se voda u obliku zasićene parne faze, što omogućava da sva voda nastala procesom gorenja (bilo spajanjem sa vodikom ili od vlage u uzorku) bude u tekućem obliku. Ukupna toplinska vrijednost se izračunava iz realnog temperaturnog porasta i efektivne toplinske vrijednosti kalorimetra, pri čemu je potrebno uzeti u obzir

utjecaj energije zapaljenja, izgaranja osigurača i toplinskih efekata od prisutnih sporednih reakcija (poput nastajanja dušične kiseline).

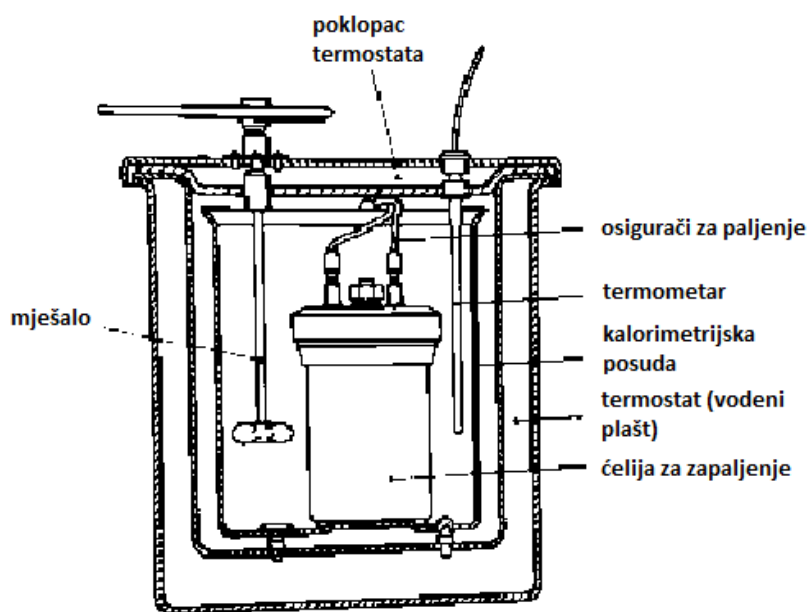
Neto toplinske vrijednosti pri konstantnom volumenu, kao i konstantnom tlaku, dobivaju se izračunom iz ukupne toplinske vrijednosti pri konstantnom volumenu određenom na mjernom uzorku. Izračun neto toplinske vrijednosti pri konstantnom volumenu zahtjeva poznavanje udjela vlage i vodika u mjernom uzorku, dok je za neto toplinsku vrijednost pri konstantnom tlaku potrebno znati udio kisika i dušika u uzorku.

Prilikom mjerenja dobivaju se dvije vrijednosti, donja i gornja ogrjevna vrijednost materijala.²⁰ Donja ogrjevna vrijednost označava razliku specifične entalpije zraka, gorivog materijala i produkata izgaranja, u kojima se vlaga, nakon njihova hlađenja, pojavljuje u stanju pare. Gornja ogrjevna vrijednost predstavlja razliku specifične entalpija zraka, goriva i produkata izgaranja, u kojima vlaga, nakon hlađenja, egzistira u kapljevitom agregatnom stanju.

Ispitivanje gorenja provedeno je u uređaju IKA[®] Calorimeter System C 7000 sa hladilom Cooler C 7002, proizvođača „IKA[®] Werke“, prikazanim na slici 3.2.6.. Unutrašnjost kalorimetra, kako je vidljivo sa slike 3.2.7., sastoji se od pomične ćelije za zapaljenje, kalorimetrijskog kućišta sa ili bez poklopca, miješala, vodenog plašta, temperaturnog senzora i osjetila unutar kućišta, koja služe za zapaljenje uzorka ili su dio temperaturnog mjerila, tj. kontrolnog kruga.



Slika 3.2.6. Uređaj IKA[®] Calorimeter System C 7000 sa hladilom Cooler C 7002.



Slika 3.2.7 Unutrašnjost kalorimetra.

Slika 3.2.8. prikazuje a) već izvagan uzorak umetnut u čeliju za zapaljenje, te b) zatvorenu kalorimetrijsku posudu, sa čelijom i uzorkom, u koju se uvodi kisik pod tlakom od 3 bara.

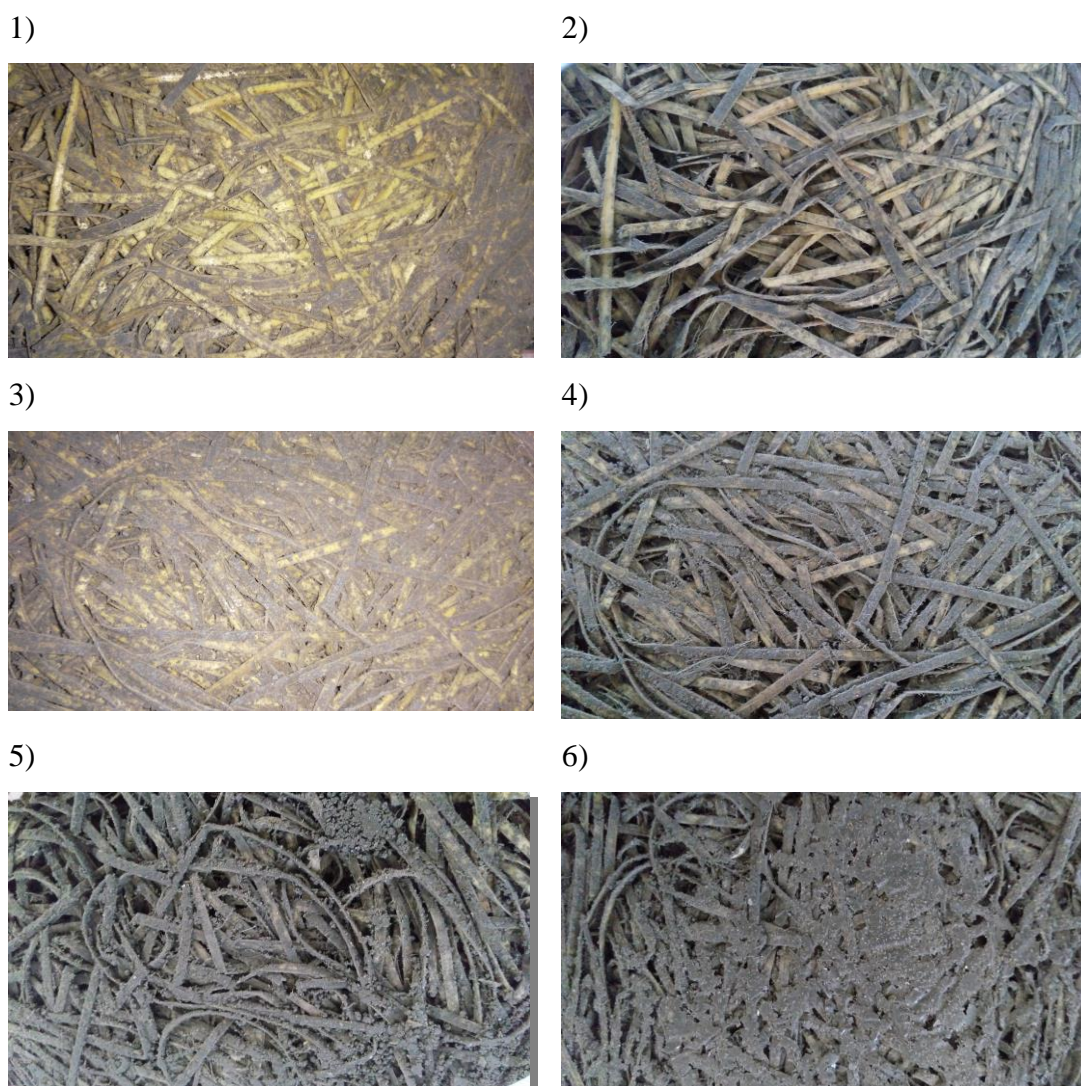


Slika 3.2.8 a) odvaga uzorka u čeliji za zapaljenje, b) kalorimetrijska posuda u postupku punjenja kisikom pod tlakom od 3 bara.

3.3 REZULTATI I RASPRAVA

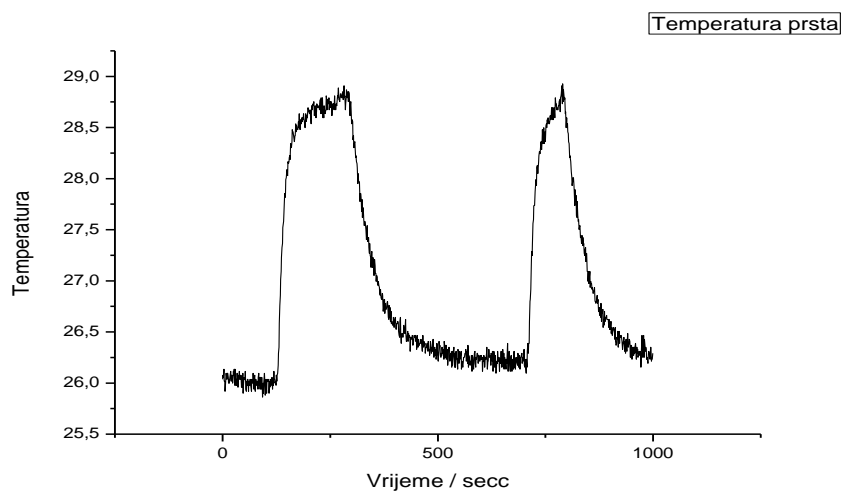
Prilikom mjerenja javljaju se eksperimentalne poteškoće, prvenstveno su se javile prilikom određivanja temperature, teško je bilo točno odrediti mjesto određivanja temperature, tj. mjesto postavljanja termo para, termo par je malih dimenzija te ga je problem staviti na mjesto u uzorku koje bi bilo idealno, zbog poroznosti materijala te smo zbog tog razloga i isprobali raditi s aparaturom 1.

Materijal osim izolacijskih svojstva ima i dobra mehanička svojstva, na slikama 4.0.1 je prikazana okom vidljiva razlika u morfologiji u ovisnosti o udjelu cementa, vidjet ćemo poboljšanje u otpornosti materijala na požar s povećanjem udjela cementa. Većina rezultata će biti posvećena toplinskom kapacitetu i vodljivosti materijala te efuzivnosti i difuzivnosti.



Slika 4.0.1 Vidljiva promjena u reologiju s porastom udjela cementa u kompozitu od uzorka 1) s najmanjim udjelom do 6) s najvećim udjelom

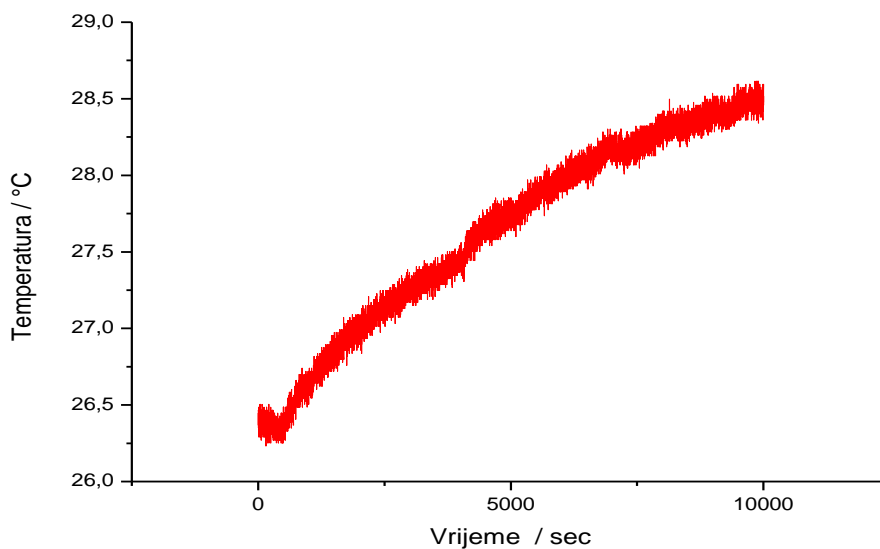
Isprobao sam funkcionalnost aparature dotaknuvši prstom termo par. Rezultate možemo vidjeti na slici 4.0.2.



Slika 4.0.2. Ispitivanje rada sustava s termo parom

3.3.1 Aparatura 1

Grijanje pomoću 4 vata ventilatora



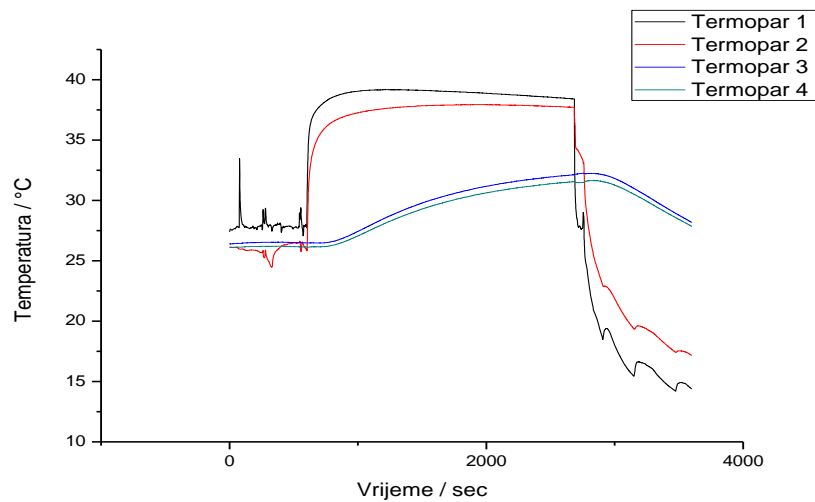
Slika 4.1.1 Grafički prikaz ovisnosti temperature s vremenom grijanja

Aparaturu 1 nije zadovoljila naša očekivanja, iz slike 4.1 možemo vidjeti pre sporu promjenu temperature te ne linearnost pri zagrijavanju, ventilator je miješanjem zraka u

ne dovoljno izoliranom sustavu slabo utjecao na porast temperature te na taj način nismo uspjeli zanemariti utjecaj postavljanja termo para na mjerene rezultate.

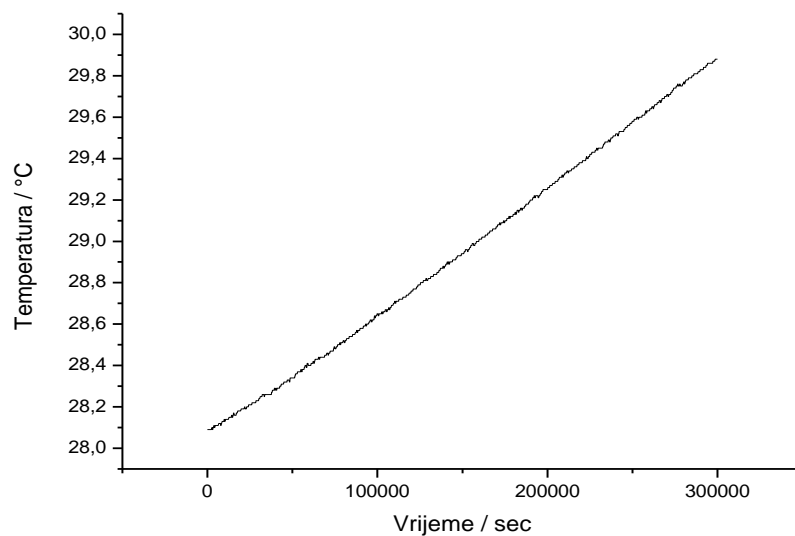
3.3.2 Aparatura 2

Grijanje pomoću spremnika tople vode

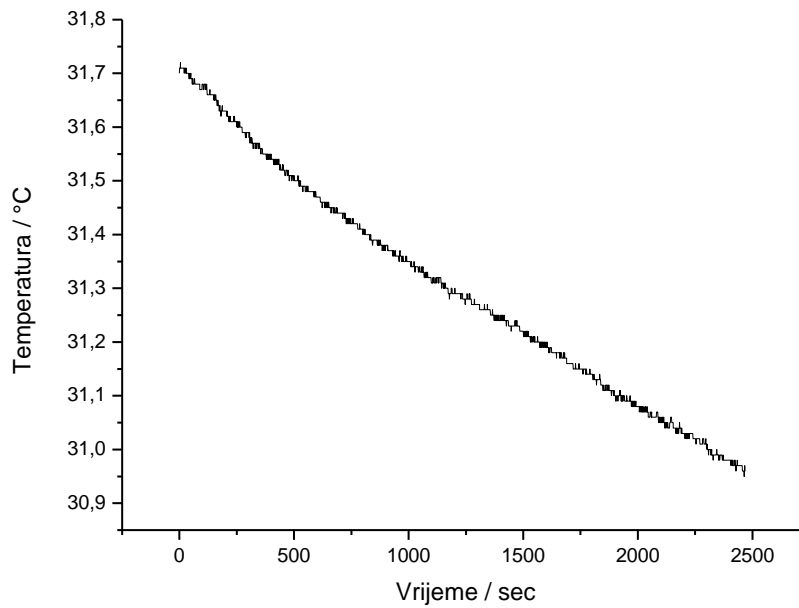


Slika 4.2.1 Grafički prikaz grijanja i hlađenja spremnikom tople vode

Na slici 4.2.1 grafičkog prikaza možemo vidjeti grijanje uzorka loncem i prijenos topline kroz uzorak, termo par 1 je smješten između lonca i spužve, termo par 2 između spužve i uzorka, termo par 3 između uzorka i spužve s druge strane uzorka, termo par 4 ispod spužvice i iznad donje izolacije.



Slika 4.2.2 Grafički prikaz linearnosti termo para grijanog loncem



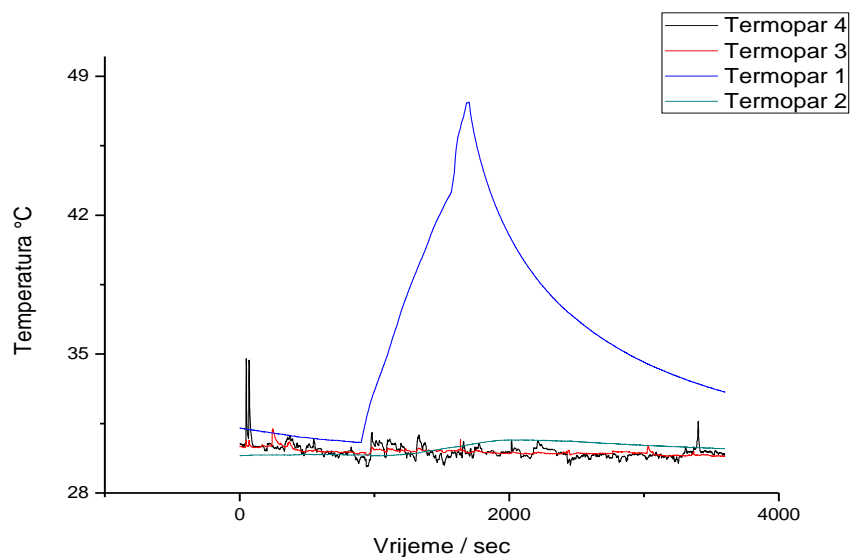
Slika 4.2.3 Grafički prikaz linearnosti hlađenja nakon grijanja loncem

Na primjerima prikazanim slikama 4.2.2 i 4.2.3 termo par je smješten odmah ispod lonca.

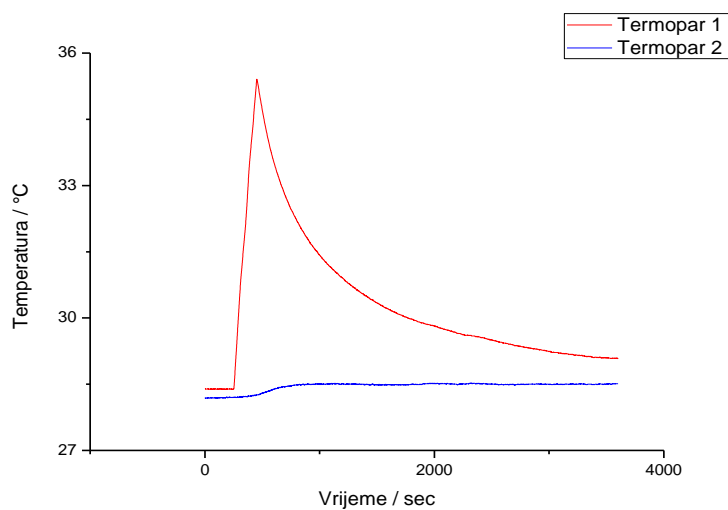
Kod aparature s spremnikom imamo poprilično veliku izmjenu topline, linearnost se malo gubi na samom hlađenju lonca te na konvekcijskom miješanju vode u spremniku koje je sporo i neujednačeno. Na grafu je vidljiva točka prekida grijanja i početka konvekcijskog hlađenja na zraku. Ova aparatura je dosta robusna ali puno pouzdanija i brža od Aparature 1. Nedostatci aparature su njena robusnost te potreba za stalnom promjenom vode u spremniku i neujednačena temperature vode od mjerenja do mjerenja.

3.3.3 Aparatura 3

Grijanje pomoću aluminijske trake i komercijalnog grijača



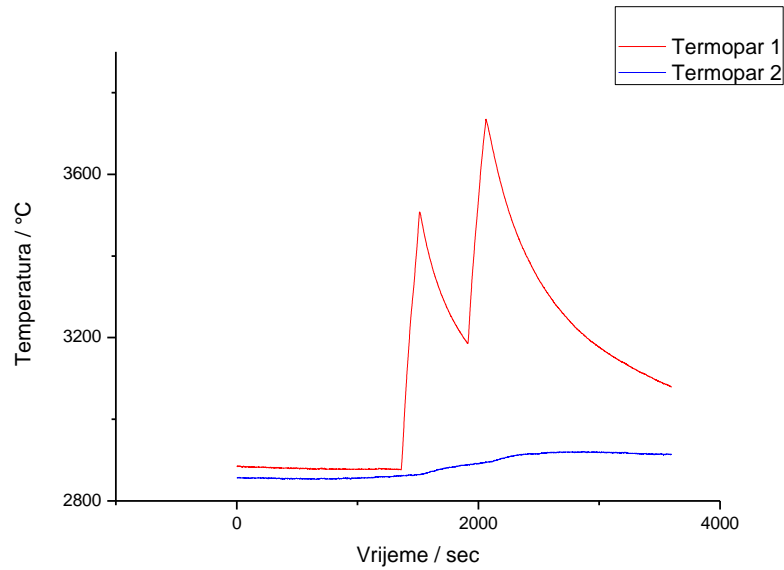
Slika 4.3.1 Grafički prikaz grijanja pomoću aluminijske trake



Slika 4.3.2 Grafički prikaz brzine odziva i intenziteta provedene topline

Na slici 4.3.1. termo par 1 je smješten između aluminijske trake i uzorka, termo par 2 je smješten ispod uzorka, termo par 3 je smješten unutar izolacijskog spremnika dok je termo par 4 smješten vani na zraku.

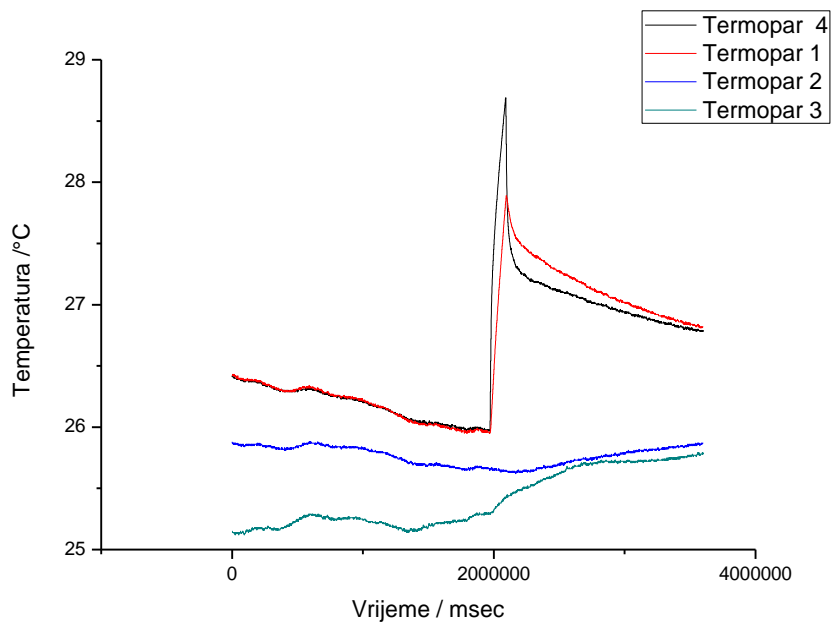
Na slici 4.3.2 termo par 1 je smješten na grijaču, a termo par 2 ispod uzorka.



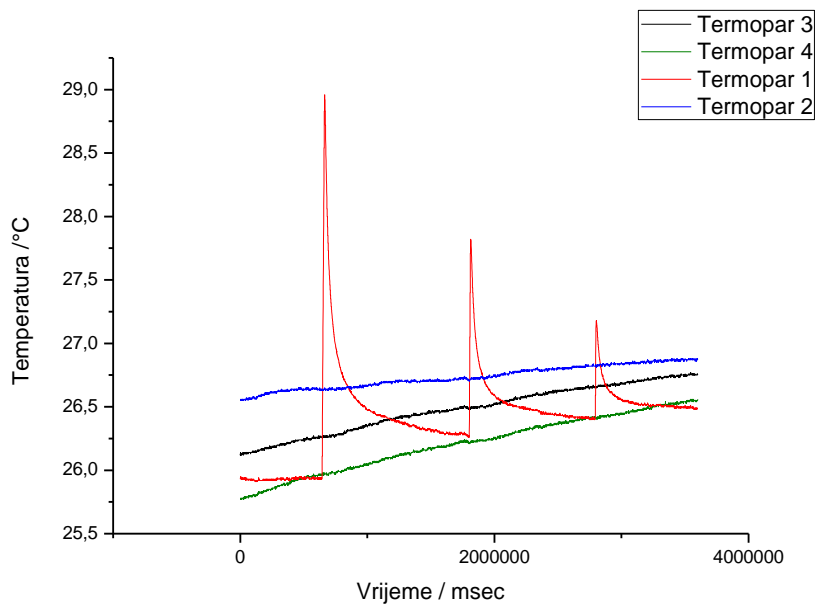
Slika 4.3.3 Grafički prikaz dva uzastopna grijanja s periodom hlađenja između

Aluminijska traka se pokazala kao vrlo nelinearan grijač, javljaju se prevelike promjene otpora s promjenom temperature grijača i javlja se nelinearnost u grijanju, tj. grijač se grije sve više i više kako mu raste otpor i nije ujednačena količina topline otpuštena iz njega. Iako je funkcionalan na nižim temperaturama i poprilično linearan. Prednosti ove aparature su mala masa grijača, praktičnost, brzina mjerenja i najveće prednost je što grijač prati reologiju uzorka te nema gubitaka na nepotpuni prijenos kao kod drugih aparatura.

Daljnja mjerenja sam izveo uz najkompleksniju aparaturu (slika 4.3.4 i 4.3.5), sastava; stiropor, termo par, grijač, termo par, uzorak, termo par, stiropor. Komercijalni grijač poznate jačine i svojstava.



Slika 4.3.4 Grafički prikaz mjerenja s komercijalnim grijačem

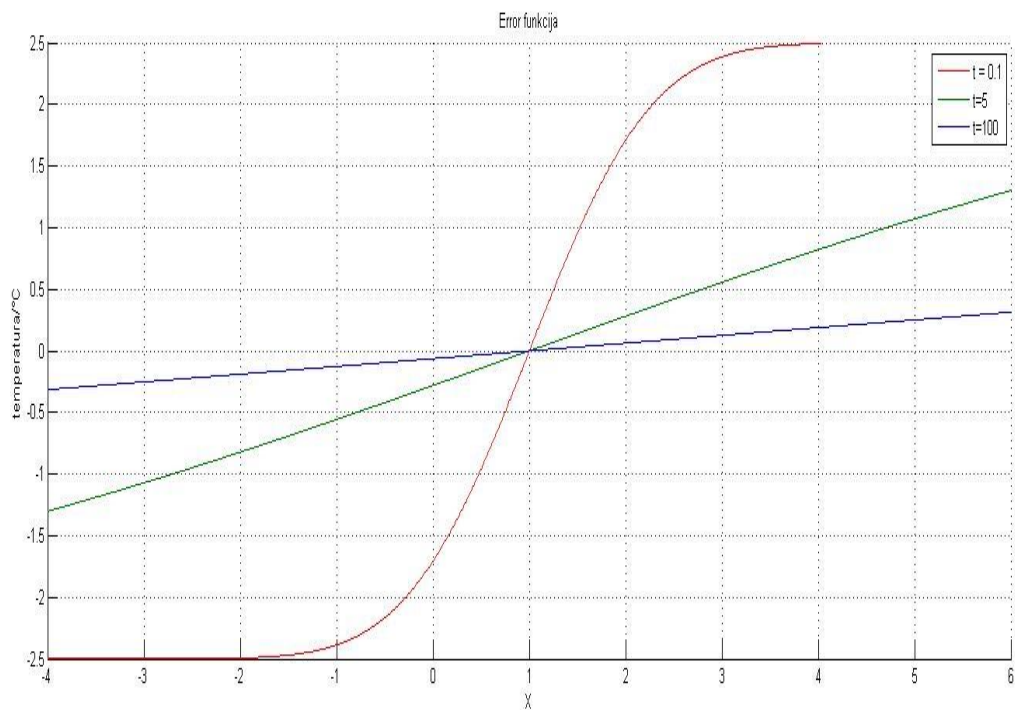


Slika 4.3.5. Grafički prikaz brzine prolaza topline kroz uzorak

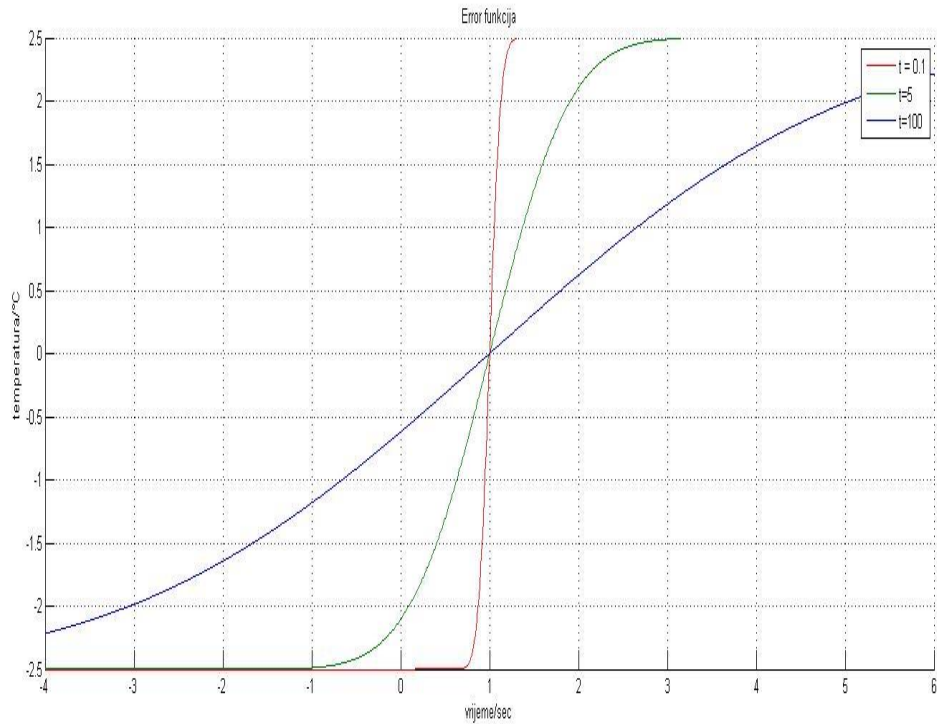
Najkompleksnija aparatura je dala najbolja mjerenja, odziv poprilično brz i linearnost veće od prethodnih aparatura, pritisak na uzorak poboljšava uvijete prijenosa topline no grijač ne prati reologiju uzorka što sam se nadao nadoknadić dobrom izolacijom sustava.

Toplinsku vodljivost i efuzivnost materijala određivao sam prema Jannot-u ¹⁸. On je opisao ponašanje uzorka uz grijanje vrućom trakom koja istovremeno služi za detektiranje temperature uzorka (intervala njene promjene) dok sam ja koristio komercijalni grijač i veći broj termo parova da pokušam što preciznije odrediti tražene temperature.

Pomoću error funkcije opisuje ponašanje sustava, koja poprilično dobro prati te promjene. Promjenom koeficijenta toplinske vodljivosti materijala mijenja se nagib funkcije, odnosno početnom promjenom možemo odrediti efuzivnost, dok najvećom promjenom možemo odrediti koeficijent toplinske vodljivosti.

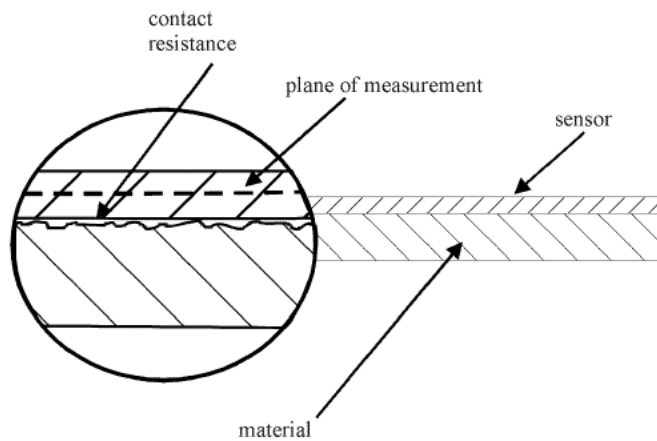


Slika 4.4.4 Grafički prikaz error funkcije s koeficijentom 5



Slika 4.4.5 Grafički prikaz error funkcije s koeficijentom 0.04

Iz slika 4.4.4 i 4.4.5 možemo vidjeti promjenu ponašanja error funkcije s promjenom koeficijenta.



Slika 4.4.6 Problem neravne površine uzorka

3.3.4 Ispitivanje gorenja

Gornja kalorijska vrijednost kompozitne drvo-cementne ploče određena je spaljivanjem u kisiku pod tlakom (uređaj IKA[®] Calorimeter System C 7000 sa hladilom Cooler C 7002) te iznosi 3 MJ/kg, dok gornja toplinska vrijednost drvene vune, određena na isti način, iznosi 15.4 MJ/kg. Manja specifična toplinska vrijednost, a kako je vidljivo iz tablice 4.1., posljedica je manjeg udjela gorivih tvari (drveta) u drvo-cementnoj ploči. Daljnje smanjenje toplinske vrijednosti moguće je postići smanjenjem udjela drveta u kompozitnoj ploči, no pri tome dolazi do povećanja gustoće materijala, smanjenja poroznosti, povećanja toplinske vodljivosti, te narušavanja estetskog izgleda gotovog materijala.

Tablica 4.4. Gornja i donja toplinska vrijednost drvene vune i drvolit[®] ploče¹⁷

UZORAK	Gornja toplinska vrijednost / Jg⁻¹	Donja toplinska vrijednost / Jg⁻¹
drvena vuna	15279	12598
	15826	14098
drvolit[®]	3072	2611
	3048	2615

4. ZAKLJUČAK

U ovom radu ispitivana su toplinska svojstva pripremljenog izolacijskog materijala. Opsežnost teme i raspoloživa aparatura je utjecala na izbor ispitivanja, ovaj rad je nastavak na rad kolegice koja je određivala kalorimetrijsku vrijednost uzorka te određivanje rendgenskom difrakcijom. Moja ispitivanja su se temeljila na određivanju toplinskih svojstava materijala pomoću aparatura vlastite proizvodnje te je rad u neku ruku bio istraživačke prirode, zahtijevao je velik broj raznih ispitivanja s raznim aparaturama i promjenom raznih dijelova kod svake da se dobije naj idealniji sustav.

Svaka ispitivanja su nailazila na prepreke i probleme što zbog ne idealnog prijanjanja grijača na uzorak, što zbog nepouzdanosti snage grijača odnosno njegove raspodjele topline i gubitaka što konvekcijom, što zračenjem i kondukcijom zbog

dugog trajanja ispitivanja uslijed sporog prijenosa topline zbog prirode uzorka, heterogenosti.

Dobiveni izolacijski materijal je imao prespor prijenos topline te je to utjecalo na gubitke topline u okolinu i drugim načinima (kondukcijom i zračenjem).

Što se tiče mjerenja toplinskih svojstava uzoraka s obzirom na uvijete rada i na utrošena sredstva problematika je prevelika da bih se riješila, da su uložena veća sredstva i da je ispitivanje provedeno u većem vremenskom roku i uz više proučavanja fenomena rezultati bi bili konkretniji i vjerodostojniji. Vidimo da svaki uzorak ima odziv od više od tri minute, povećanjem njegove debljine sa 20 na 40 milimetara taj broj se povećava na 12 minuta i tako za uzorak debljine 200mm on iznosi 300 minuta što nam govori da je naš uzorak dobar kao građevinski jer će tokom dana apsorbirati toplinu i otpuštati ju po noći i obratno hladiti tokom većine dana.

Spaljivanjem u kisiku pod tlakom određena je gornja toplinska vrijednost drvo-cementnih ploča od oko 3 MJkg^{-1} , dok drvena vuna prilikom gorenja oslobađa oko 15.4 MJkg^{-1} . Manja specifična toplinska vrijednost posljedica je manjeg udjela gorivih tvari (drveta) u drvo-cementnoj ploči. Daljnje smanjenje toplinske vrijednosti moguće je postići smanjenjem udjela drveta u kompozitnoj ploči, no pri tome dolazi do povećanja gustoće materijala, smanjenja poroznosti, povećanja toplinske vodljivosti, te narušavanja estetskog izgleda gotovog materijala.

5. LITERATURA

- 1) J. Užar, *Drvo – materijal u suglasnosti s prirodom*, Tehnički glasnik 7, 3 (2013).
- 2) J. M. Illston, P.L.J. Domone, *Construction Materials – Their nature and behaviour*, 3rd Ed., SPON Press, Taylor and Francis Group, 2001.
- 3) M. Grđan, *Obična, niskoenergetska i pasivna kuća*, Energo Consult, www.energo-consult.hr, (2011).
- 4) <http://www.enu.fzoeu.hr/ee-savjeti/toplinska-zastita-objekta> (pristup 14.8.2017)
- 5) <http://www.zzjiz.hr/index.php?id=144> , Zavod za javno zdravstvo RH, (pristup 14.8.2017)
- 6) A. Petošić, *Vježbe iz elektroakustike- Mjerenje zvučne izolacije*, Fakultet elektrotehnike i računarstva, Zagreb, 2005.
- 7) http://hidroizo.hr/hr_HR/hidroizolacijske-usluge/sanacija-ravnog-krova (pristupio 15.8.2017)
- 8) Šumarski fakultet sveučilišta u Zagrebu, Katedra za tehnologiju drva, *Osnove nauke o drvu i izrada proizvoda iz masivnog i usitnjenog drva*, Zagreb, (1985).
- 9) M. Pfundstein, R. Gellert, M. H. Spitzner, A. Rudolphi, *Insulating Materials – Principles, Materials, Applicatis*, Birkhäuser Edition Detail, (2007), Institut für internationale Architektur-Dokumentation GmbH
- 10) T. Matusinović, *Inženjerstvo mineralnih veziva*, interna skripta, Sveučilište u Zagrebu, Fakultet kemijskog inženjerstva i tehnologije, Zagreb, 2009.
- 11) N. Vrbos, *Dodatci za cementne kompozite*, Sveučilište u Zagrebu, Fakultet kemijskog inženjerstva i tehnologije, Zagreb, 2016.
- 12) A. Đureković, *Cement, cementni kompozit i dodaci za beton*, Školska Knjiga, Zagreb, 1996.
- 13) V. Shah, A.M. Joseph, S. Bishnoi, Durability Characteristics of Sustainable Low Clinker Cements: A Review, u *Calcined Clays for Sustainable Concrete*, RILEM Book series 10, DOI 10.1007/978-94-017-9939-3_65
- 14) I. Gukov, *Betonske konstrukcije I*, Sveučilište u Zagrebu, Građevinski fakultet, Zagreb, 2010.
- 15) J. Macan, *Kompozitni materijali – Interna skripta za studente*, Sveučilište u Zagrebu, Fakultet kemijskog inženjerstva i tehnologije

- 16) International standard ISO 1928:2009 (E), „*Solid mineral fuels- Determination of gross calorific value by the bomb calorimetric method and calculation of net calorific value*“, 3rd Ed., 2009.
 - 17) Nikolina Leona Serdarević., "*Utjecaj kemijske obrade drvene vune na zapaljivost drvo – cementnog kompozita*", Sveučilište u Zagrebu, Fakultet kemijskog inženjerstva i tehnologije, diplomski rad, Zagreb, rujan 2016.
 - 18) Y. Jannot, P. Meukam, Simplified estimation method for the determination of the thermal effusivity and thermal conductivity using a lowcost hot strip, *Measurement Science and Technology*, 15 (2004) 1932-1938.
 - 19) W.H. Somerton, Thermal properties and temperature-related behaviour of rock / fluid systems, ISBN 0-444-89001-7, University of California, California (1992)
 - 20) <http://www.tainstruments.com/wp-content/uploads/BROCH-ThermalConductivityDiffusivity-2014-EN.pdf> (pristupio 17.9.2017)
 - 21) https://www.fer.unizg.hr/_download/repository/ferpogl11a%5B2%5D.pdf (pristupio 19.9.2017)
 - 22) M. Jaković, I. Slaviček., "*Analiza toplinskih svojstava građevnih materijala primjenom metode vrućeg diska*", Sveučilište u Zagrebu, Građevinski fakultet, Rad za rektorovu nagradu, Zagreb 2010.
 - 23) D.R. Pitts, L.E. Sissom, Theory and problems of heat transfer, 2nd Ed. Schaum's Outline Series, McGraw Hill, SAD 1998.
- v) Vlastiti izvor (kamera, 13MP)

6. SIMBOLI

CEM II – komercijalni Portland cement, Našice cement d.d., Hrvatska

c / ms^{-1} – brzina zvuka

R_w / dB – zvučno izolacijska moć

$L_1, L_2 / \text{Pa}$ – razina zvučnog tlaka

S / m^2 – površina prolaska zvučne energije

A / m^2 – ukupna apsorpcijska površina u prijemnoj prostoriji

$P / \%$ – volumen pora

t_0 / gcm^{-3} – volumna masa drva u standardnom suhom stanju

γ / gcm^{-3} – volumna masa drvene tvari koja je po pretpostavki za sve vrste jednaka i iznosi u prosjeku $1,5 \text{ g/cm}^3$

t_n / gcm^{-3} – nominalna volumna masa drveta

$v_h / \%$ – higroskopska voda

$v_k / \%$ – kapilarna voda

ρ / gcm^{-3} – gustoće kapilarne vode

E / GPa – modul elastičnosti

v / ms^{-1} – brzina rasprostiranja zvuka

$\omega / \text{kPa m}^{-2}$ – otpor zvuka

$\Delta D / \text{mm}$ – promjena dimenzije

D_0 / mm – početna dimenzija

Δt – razlika u temperaturi

L – linearna dimenzija

$\lambda / \text{Wm}^{-1} \text{K}^{-1}$ – toplinska vodljivost

A, B – parametri ovisnosti o vrsti drveta

$q/A / \text{Wm}^{-2}$ – toplinski tok u materijalu

x / m – debljina

$T / ^\circ\text{C}$ – temperatura

$k / \text{Wm}^{-1} \text{K}^{-1}$ – koeficijent toplinske vodljivosti

$\alpha / \text{m}^2 \text{s}^{-1}$ – toplinska difuzivnost

$C_p / \text{Jkg}^{-1} \text{K}^{-1}$ – toplinski kapacitet

7. PRILOZI

Kod u Matlabu za crtanje slika a) 4.4.4 i b) 4.4.5

```
x =-4:0.01:6;
t=[0.1 5 100];
k=5;
a=5;
b=1;
figure(1)
hold on
for i =1:3
u(i,:)=(a/2)*(erf((x-b)/sqrt(4*k*t(i))));
plot(x,u(i,:))
end
grid on
xlabel('vrijeme/sec')
ylabel('temperatura/°C')
legend('t = 0.1','t=5','t=100')
title( 'Error funkcija')
```

a)

```
x =-4:0.01:6;
t=[0.1 5 100];
k=0.04;
a=5;
b=1;
figure(1)
hold on
for i =1:3
u(i,:)=(a/2)*(erf((x-b)/sqrt(4*k*t(i))));
plot(x,u(i,:))
end
grid on
xlabel('vrijeme/sec')
ylabel('temperatura/°C')
legend('t = 0.1','t=5','t=100')
title( 'Error funkcija')
```

b)

ŽIVOTOPIS

Moje ime je Ivan Bratanović, █████ █████ █████ █ █████ █████
Školovanje sam započeo 1999. godine u Podravskim Sesvetama u Osnovnoj školi Kloštar Podravski, područna škola Podravske Sesvete. Po završetku osnovne škole upisao sam srednju školu Vladimira Preloga u Zagrebu, te stekao zvanje kemijski tehničar. Nakon srednje škole upisao sam preddiplomski studij Kemija i inženjerstvo materijala na Fakultetu kemijskog inženjerstva i tehnologije i završio ga 2015. godine, obranivši završni rad pod mentorstvom izv. prof. dr.sc Jurja Šipušića stekavši znanje Prvostupnik kemijskog inženjerstva, univ.bacc.ing.cheming. 2015. godine upisao sam diplomski studij kemijskog inženjerstva i materijala na Fakultetu kemijskog inženjerstva i tehnologija.