

# Mjerenje i modeliranje promjena dimenzije drvocementnog kompozita tijekom sušenja i vlaženja

---

Krnić, Tena

Master's thesis / Diplomski rad

2023

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:149:729929>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2024-11-04**



Repository / Repozitorij:

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



**SVEUČILIŠTE U ZAGREBU**  
**FAKULTET KEMIJSKOG INŽENJERSTVA I TEHNOLOGIJE**  
**SVEUČILIŠNI DIPLOMSKI STUDIJ**

**Tena Krnić**

**DIPLOMSKI RAD**

*Zagreb, rujan 2023.*

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET KEMIJSKOG INŽENJERSTVA I TEHNOLOGIJE  
SVEUČILIŠNI DIPLOMSKI STUDIJ

Tena Krnić

MJERENJE I MODELIRANJE PROMJENA DIMENZIJE DRVOCEMETNOG  
KOMPOZITA TIJEKOM SUŠENJA I VLAŽENJA

DIPLOMSKI RAD

Voditelj rada: prof. dr. sc. Juraj Šipušić

Komentor: doc. dr. sc. Anamarija Rogina

Članovi ispitnog povjerenstva: doc. dr. sc. Anamarija Rogina

prof. dr. sc. Jelena Macan

dr. sc. Katarina Mužina

Zagreb, rujan 2023.

*Zahvaljujem se mentoru prof. dr. sc. Juraju Šipušiću na pomoći prilikom izrade ovoga  
diplomskog rada.*

# SADRŽAJ

## SAŽETAK/SUMMARY

<b>1. UVOD</b> .....	1
<b>2. TEORIJSKI DIO</b> .....	2
2.1. GRAĐEVNI MATERIJALI.....	2
2.1.1. KOMPOZITI.....	3
2.1.2. INTERAKCIJE CEMENTA I DRVENE VUNE.....	5
2.1.2.1. CEMENT.....	5
2.1.2.2. DRVENA VUNA.....	6
2.1.2.3. KOMPATIBILNOST.....	6
2.2. RAVNOTEŽNI SADRŽAJ VLAGE MATERIJALA .....	7
2.2.1. UTJECAJ VLAGE NA DRVO .....	8
2.2.2. UTJECAJ VLAGE NA CEMENTNU PASTU.....	10
2.3. SVOJSTVA VLAŽNOG ZRAKA .....	11
2.3.1. ROSIŠTE.....	13
2.3.2. RELATIVNA VLAŽNOST .....	14
2.4. METODE ODREĐIVANJA RELATIVNE VLAŽNOSTI .....	15
2.4.1. METODE ODREĐIVANJA VLAŽNOSTI U INDUSTRIJSKIM PROCESIMA .....	17
2.4.2. METODE ODREĐIVANJA VLAŽNOSTI U NEINDUSTRIJSKIM PROCESIMA.....	19
2.4.3. METODE ODREĐIVANJA TEMPERATURE ROSIŠTA.....	20
2.5. TERMOHIROMEHANIČKI MODELI (utjecaj na dimenzije materijala) .....	21
<b>3. EKSPERIMENTALNI DIO</b> .....	23
3.1. ODREĐIVANJE TEMPERATURE ROSIŠTA.....	23
3.1.1. SENZORI .....	25
3.2. PROMJENE DIMENIJE I MASE DRVOCEMENTNOG KOMPOZITA TIJEKOM SUŠENJA I VLAŽENJA .....	27
<b>4. REZULTATI I RASPRAVA</b> .....	30
4.1. ODREĐIVANJE TEMPERATURE ROSIŠTA.....	30
4.2. PROMJENE DIMENIJE I MASE DRVOCEMENTNOG KOMPOZITA TIJEKOM SUŠENJA I VLAŽENJA .....	37
<b>5. ZAKLJUČAK</b> .....	44
<b>6. LITERATURA</b> .....	52
<b>7. ŽIVOTOPIS</b> .....	54

## SAŽETAK

Promjena dimenzije drvocementnog kompozita koja se odvija pri sušenju i vlaženju istog, iznimno je bitna stavka zbog primjene drvocementnog kompozita. U ovom radu određivana je temperatura rosišta pri sobnim uvjetima da bi se utvrdila preciznost higrometra kod određivanja vlažnosti zraka, te je mjerena promjena dimenzije i mase drvocementnog kompozita prije i poslije vlaženja i sušenja. Mjerenja su provedena u laboratoriju koristeći otporničku metodu određivanja temperature rosišta, sušionik i mikrometar.

U eksperimentalnom dijelu ovoga rada konstruirana je aparatura za određivanje temperature rosišta na temelju otporničke metode određivanja temperature rosišta, tako što se preko optičkog senzora CNY70 pratila promjena otpora na detektoru senzora. Zatim su mjerene dimenzije i drvocementnog kompozita prilikom sušenja.

Eksperimentalni podaci za određivanje temperature rosišta potvrdili su ispravnost aparature zbog izrazitog poklapanja rezultata relativne vlažnosti,  $RH$  s očitanim vrijednostima na higrometru. Kod ispitivanja promjena mase i dimenzija kompozita, podaci za praćenje promjene mase utočnjeni su prema modelu jednofaznog eksponencijalnog opadanja:  $y = A_1 * e^{(-x/t)} + y_0$ , te je uočljiva poveznica početnih dimenzija kompozita sa promjenom mase i količinom apsorbirane vlage. Dimenzijske promjene ovisne su o debljini drvocementnog kompozita, što ima utjecaj na njegova svojstva.

**Ključne riječi:** drvocementni kompozit, vlažnost zraka, rosište.

## SUMMARY

The change in the dimensions of the wood-cement composite, which takes place during drying and wetting is an extremely important due to the application of the wood-cement composite. In this work, the dew point temperature was determined in order to establish the precision of the hygrometer in determining air humidity, and the change in the dimensions and mass of the wood-cement composite before and after drying and wetting process. The measurements were carried out in the laboratory using the resistance method for determining the dew point temperature, the dryer and a micrometer.

In the experimental part, an apparatus for determining the dew point temperature was constructed based on the resistive method of determining the dew point temperature, by monitoring the resistance change on the sensor detector via the CNY 70 optical sensor. Then the dimensions and mass of the wood-cement composite were measured during drying process.

Experimental data for determining the dew point temperature confirmed the precision of the apparatus due to the remarkable accuracy in results of relative humidity in comparison to the values detected by the hygrometer. When testing the changes in mass and dimensions of the composite, the data for monitoring the change in mass were modeled according to one-phase exponential decay model:  $y = A_I * e^{(-x/t_I)} + y_0$ , and there is a noticeable link between the initial dimensions of the composite and the change of mass and amount of absorbed moisture. Dimensional changes are depend on the thickness of the wood-cement composite, which has an impact on its properties.

**Key words:** wood-cement composite, air humidity, dew point.

## 1. UVOD

S današnjim vremenom cilj graditeljstva je održiva gradnja. Uzevši u obzir sve veću urbanizaciju i potražnju energije stvara se potreba za alternativnim građevnim materijalima koji koriste obnovljive izvore.

Korištenje drvocementnog kompozita, odnosno drvene vune kao obnovljive sirovine, povećalo je interes za uporabu istog u graditeljstvu. Upravo ta prirodna vlakna, koja sadrži kompozit, zanimljiva su zbog svoje ekonomičnosti i dobrih uporabnih svojstava kada se koriste u različitim kompozitima kao ojačavala.<sup>[1]</sup> Biljna vlakna imaju mnoge prednosti u odnosu na sintetska vlakna. Osim što su niske gustoće i niske cijene, imaju odličnu specifičnu čvrstoću i visoku specifičnu krutost, obnovljiva su i biorazgradiva, energetska su učinkovita, ekonomična i ekološka. Također drvo je higroskopno, te će apsorpcija i desorpcija vlage značajno utjecati na njegova svojstva i primjenu. Upravo zbog toga prati se utjecaj vlaženja i sušenja na dimenzije kompozita jer dimenzije utječu na brojna mehanička svojstva.<sup>[2]</sup>

Posljednjih godina koriste se drvo-cementne kompozitne ploče u raznim stambenim dijelovima. Komercijalno se primjenjuju kao tanke ploče za fasade, krovne pokrivače, lučne svodove i vanjske zidove. Njihova je prednost u tome što imaju iznimnu izdržljivost, dimenzijsku stabilnost, žilavost, nezapaljive su, dobar su akustični i toplinski izolator te su otporne na biološku razgradnju i omogućuju brzu proizvodnju s niskim troškovima.<sup>[3]</sup>

U ovom radu obradit će se utjecaj vlage na masu i dimenzije i samim time svojstva, drvo-cementnog kompozita. Ispitivanja su usmjerena na određivanje temperature rosišta i promjene dimenzija i mase kompozita s obzirom na sušenje i vlaženje.



## 2. TEORIJSKI DIO

### 2.1. GRAĐEVNI MATERIJALI

Građevni materijali obuhvaćaju razne materijale koji se koriste pri izgradnji građevinskih objekata. Zato je važno poznavati svojstva svakog od materijala u primjeni da bi svojstva uporabljenog materijala odgovarala njihovoj primjeni i zahtjevima investitora. Posebice interesantna svojstva su: fizička, tehnološka, kemijska i mehanička. Fizička svojstva obuhvaćaju gustoću, boju, poroznost i slično, te su takva nepromjenjiva sve dok se ne pojave kemijske promjene unutar materijala. Tehnološka svojstva odnose se na svojstva bitna prilikom prerade nekog materijala, odnosno ukazuju na to koliko je neki materijal obradiv postupcima kao što su kovanje, bušenje, sječenje itd. Kemijska svojstva posljedica su strukture i kemijskog sastava materijala, te se mijenjaju pod utjecajem promjena u okolini, primjerice temperature ili vlage. Mehanička svojstva opisuju sposobnost materijala da spriječi utjecaj vanjskih sila koje ga nastoje deformirati, a to su čvrstoća, tvrdoća i elastičnost.<sup>[3]</sup>

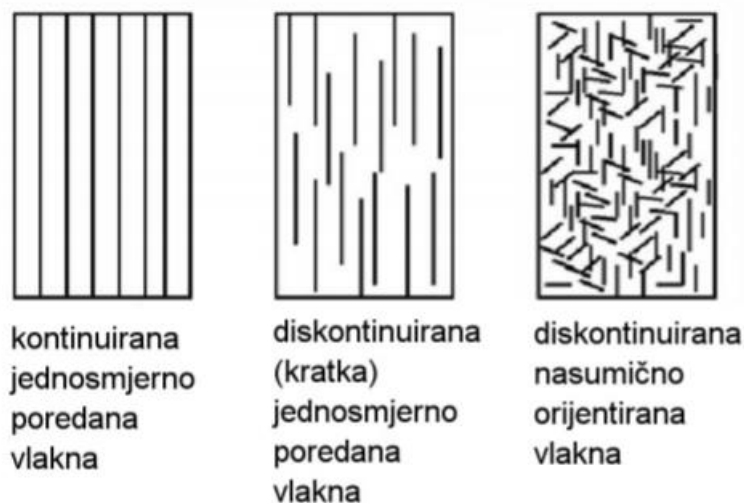
Građevne materijale dijelimo prema porijeklu i primjeni. Prema porijeklu mogu biti prirodni i umjetni/sintetski, a prema području primjene dijelimo ih na konstrukcijske, izolacijske, instalacijske i veziva.

Konstrukcijski materijali se koriste za izradu nosivih dijelova konstrukcije/objekta u niskogradnji i visokogradnji. U konstrukcijske materijale spadaju primjerice armirani beton, čelik, kamen, cigla i drvo, a imaju dobra mehanička i fizička svojstva. Veziva u kombinaciji s vodom rezultiraju nastajanjem kašaste mase koja očvrstne zbog fizikalnih i kemijskih procesa. Neka od veziva su: vapno, gips, glina i cement. Izolacijski materijali pružaju zaštitu objektu ili određenom dijelu objekta od štetnih utjecaja okoline. Tu spadaju: staklena vuna, bitumen, staklo, drvo-cementna kompozitna ploča i boje. Instalacijski materijali služe za ugradnju raznih instalacija u objektima, primjerice: vodovod, kanalizacija, centralno grijanje i električne instalacije.<sup>[2]</sup>

### 2.1.1. KOMPOZITI

Kompozitni materijal je materijal koji se proizvodi od dva ili više različitih materijala. Komponente kompozita imaju izrazito različita kemijska i fizička svojstva i spajaju se da bi se dobio materijal poboljšanih ili novih svojstava kakva pojedina komponenta ne posjeduje. Dodatne promjene svojstava mogu se postići dodavanjem raznih udjela punila, ojačavanjem vlaknima ili promjenom dimenzija faza. Tako na primjer matica ne mora imati većinski udio u kompozitu. U kompozitima ojačanim vlaknima, vlakna čine većinu volumena te doprinose dobrim mehaničkim svojstvima kompozita, a matica služi da bi se vlakna povezala, te da bi prenijela i rasporedila opterećenja.<sup>[4]</sup>

Takvi kompoziti su izrazito tehnološki važni. U njima matica služi kao poveznica, te za prijenos naprezanja među vlaknima, a vlakna su nosivi dio tog materijala jer nose 70-90% opterećenja. Vlaknima ojačani kompoziti imaju bolju čvrstoću, odnosno specifičnu čvrstoću zbog manje gustoće. Vlakna koja se koriste mogu biti prirodna ili sintetska, a to su: metalna, staklena, keramička, aramidna, ugljična ili biljna.<sup>[5]</sup>



**Slika 2.1.** Razdioba i vrsta vlakana u kompozitima ojačanim vlaknima<sup>[4]</sup>

Postupci proizvodnje takvih kompozita složeniji su upravo zbog potrebe za orijentacijom vlakana za vrijeme proizvodnje. Volumni udio, usmjerenost i orijentacija vlakana znatno utječu na svojstva kompozita. Vlakna mogu biti raspoređena jednosmjerno te biti kontinuirana ili diskontinuirana, ili biti nasumično orijentirana u matici (isključivo za kratka vlakna), što je prikazano na slici 2.1.<sup>[6]</sup> Osim orijentacije vlakana u kompozitu za proces proizvodnje

kompozitnog materijala važni su još i oblik punila, način slaganja čestica, dispergiranoost punila u matrici, granična površina te kvašenje, odnosno prodiranje matice oko punila.

Drvo-cementna, građevna, izolacijska kompozitna ploča je kompozitni materijal ojačan vlaknima drvene vune. Ploče drvene vune i cementa smatraju se ekološki prihvatljivim građevinskim i izolacijskim materijalom jer ne sadrže organska veziva. Takve u hrvatskoj proizvodi Fragmat H d.o.o. i zovu se Drvolit®.<sup>[7]</sup>

Ploča Drvolit® izrađena je od mineralizirane drvene vune, koja je s cementnim vezivom i dodacima povezana u kompaktnu cjelinu.<sup>[8]</sup> Mineralizacijom drvene vune postiže se veliko povećanje požarne otpornosti drvene vune. Zbog sveukupnog procesa proizvodnje vlakna drveta neće trunuti, pokazuju otpornost na insekte i nisu sklona upijanju vode. Drvocementni kompozit ima poroznu strukturu i reljefnu površinu.<sup>[9]</sup> Upravo zbog toga koristi se u sustavima za zaštitu od buke kao izolator. Svojstva koja karakteriziraju Drvolit® su: otpornost na kemijske utjecaje, dobra prionjivost s betonom, dobra podloga za žbuke, toplinska provodljivost, otpornost na plijesni, nametnike i na starenje, dobra apsorpcija zvuka i visoka paropropusnost i dobra mehanička svojstva.



**Slika 2.2.** Drvolit®

## 2.1.2. INTERAKCIJE CEMENTA I DRVENE VUNE

### 2.1.2.1. CEMENT

Cement je vezivno sredstvo koje se koristi u građevini. On stvrdnjava, ojačava i povezuje druge materijale. Rijetko se koristi samostalno. Cementi koji se koriste u gradnji najčešće su anorganski i često su na bazi vapna ili kalcijevog silikata. Veziva se dijele na zračna (nehidraulička) i hidraulička ovisno o tome da li se stvrdnu samo na zraku ili pod vodom te imaju zadovoljavajuća hidrolitička svojstva. Cement je skupni naziv za različite vrste hidrauličkih veziva. To je fino mljeveni anorganski materijal koji u kombinaciji s vodom daje cementno vezivo i procesom hidratacije veže i očvršćuje.<sup>[10]</sup> Hidraulički cement (primjerice Portland cement) se u prisutnosti vode stvrdnjava i postaje ljepljiv zbog kemijskih reakcija komponenata cementa sa vodom. Reakcijom vode i cementa nastaju mineralni hidrati koji su jako slabo topljivi u vodi što omogućuje stvrdnjavanje cementa pod vodom i otpornost na mokre uvjete i djelovanje vode. U manjoj mjeri koriste se: aluminatni cement, bijeli cement, metalurški i pucolanski cement.

U procesu nastajanja cementne paste, od gline i vapnenca odvijaju se dvije faze kemijskih promjena. Prva faza je proizvodnja i u toj fazi sinteriraju se sirovine te nastaju spojevi cementa. Druga faza je faza hidratacije tijekom koje cement hidratizira i tvori hidratiziranu ili očvrslu cementnu pastu.

Cement prema kemijskom sastavu možemo podijeliti na silikatni i aluminatni cement. Aluminatni cement dobiva se pečenjem boksita i vapnenca, dok se silikatni cement dobiva pečenjem lapora i vapnenca. Najznačajniji iz te skupine je upravo Portland cement, a koristi se u proizvodnji pucolanskih, supersulfatnih i metalurških cementa.<sup>[11]</sup>

Polazni materijal u proizvodnji Portland cementa mora sadržavati kalcijev oksid, silicijev dioksid, aluminij oksid i željezov oksid. Najvažniji je kalcijev oksid odnosno vapno, a dobiva se pečenjem vapnenca.

### 2.1.2.2. DRVENA VUNA

Drvena vuna je proizvod dobiven blanjanjem od izrezanih trupaca. Primjenjuje se kao materijal ispuna između konstrukcijskih materijala ili kao materijal vezan mineralnim vezivima i oblikovan u ploče raznih veličina i debljina. Koristi se prilikom pakiranja, u sustavima hlađenja, te kao sirovina za proizvodnju kompozita koji se koriste u izolaciji.

Vlakna drvene vune mogu se komprimirati, a po prestanku pritiska vraćaju se u početni položaj što ukazuje na njihova iznimna elastična svojstva. Širina vlakana obično varira između 1,5 i 20 mm, ovisno o procesu proizvodnje i zahtjevima.

Za proizvodnju drvene vune koristi se najčešće drvo četinjača domaćeg porijekla (jela i smreka), koje ima veliku dostupnost i povoljnu cijenu.<sup>[12]</sup>



**Slika 2.3.** Drvena vuna.

### 2.1.2.3. KOMPATIBILNOST

Kompatibilnost u kontekstu drvo-cementnih kompozita odnosi se na stupanj vezivanja cementa nakon miješanja s vodom i s danim drvetom u fragmentiranom obliku. Ako je kemijski postupak otvrdnjavanja cementa neometan ili ometan u maloj mjeri, u prisutnosti drva, kaže se da su cement i drvo kompatibilni. Ako prisutnost drva ometa u velikoj količini otvrdnjavanje cementa onda oni nisu kompatibilni. To se uočava kroz narušena fizička svojstva drvo-cementnog kompozita. Analitička metoda kojom se može odrediti ovakav učinak je mjerenje smanjenja razvoja topline tijekom egzotermnog kemijskog procesa hidratacije cementa ili mjerenjem vremena potrebnog za postizanje maksimalne temperature hidratacije.<sup>[13]</sup>

## 2.2. RAVNOTEŽNI SADRŽAJ VLAGE MATERIJALA

Ravnotežni sadržaj vlage materijala odnosi se na sadržaj vlage koji se postiže kada je isti u stanju ravnoteže s okolinom koja ga okružuje. To je točka u kojoj materijal niti dobiva niti gubi vlagu kada je izložen određenoj temperaturi i relativnoj vlažnosti.

Na ravnotežni sadržaj vlage materijala utječu njegova svojstva, uključujući njegovu poroznost, propusnost i afinitet prema vlazi. Različiti materijali imaju različite vrijednosti ravnotežnog sadržaja vlage jer različito stupaju u interakciju s vlagom. Na primjer, higroskopni materijali kao što su drvo i papir imaju veći afinitet prema vlazi i imaju tendenciju postizanja viših ravnotežnih sadržaja vlage u usporedbi s nehigroskopnim materijalima poput metala ili plastike.<sup>[13]</sup>

Ravnotežni sadržaj vlage obično se izražava kao postotak mase ili volumena materijala. Predstavlja sadržaj vlage pri kojem je materijal postigao ravnotežu između vlage koju apsorbira iz zraka i vlage koju otpušta. Ravnotežni sadržaj vlage je ključno uzeti u obzir u industrijama kao što su građevinarstvo, obrada drva i prerada hrane, gdje sadržaj vlage može utjecati na strukturni integritet materijala, stabilnost dimenzija i kvalitetu proizvoda.

Čimbenici kao što su temperatura i relativna vlažnost značajno utječu na ravnotežni sadržaj vlage. Više temperature i razine vlažnosti povećavaju ravnotežni sadržaj vlage materijala, dok niže temperature i razine vlažnosti smanjuju ravnotežni sadržaj vlage. Ovaj odnos nastaje zbog principa difuzije vodene pare, gdje se vodena para kreće iz područja visoke koncentracije (vlažnosti) u područja niske koncentracije (vlažnosti) do postizanja ravnoteže.<sup>[14]</sup>

Vrijedno je napomenuti da je ravnotežni sadržaj vlage specifičan za svaki materijal te se na njega može utjecati raznim faktorima stoga se za određivanje relativnog sadržaja vlage često koriste eksperimentalna ispitivanja i empirijski podaci. Te su vrijednosti važne za točnu kontrolu vlage, skladištenje i očuvanje materijala.<sup>[15]</sup>

Procjena ravnotežnog sadržaja vlage određuje se preko relativne vlažnosti:

$$RSV = \frac{FM}{1 - \frac{RH}{100}} - FM \quad 2.1.$$

Gdje je RSV ravnotežni sadržaj vlage, FM je točka zasićenja vlakana (sadržaj vlage pri kojem je materijal zasićen, ali ne sadrži slobodnu vodu), i RH je relativna vlažnost okoliša (izražena u postocima).

Ravnotežni sadržaj vlage proračunat pomoću tlaka pare:

$$RSV = \frac{PV}{1 - \frac{PV}{PVS}} \cdot 100 \quad 2.2.$$

Gdje je RSV ravnotežni sadržaj vlage, PV je parcijalni tlak vodene pare u okolnom zraku, a PVs je tlak zasićene pare na danoj temperaturi.

Ove formule daju približne procjene RSV na temelju empirijskih odnosa između sadržaja vlage, relativne vlažnosti i tlaka pare. Važno je da točnost ovih procjena može varirati ovisno o specifičnom materijalu i okolnim uvjetima.

Za preciznije računanje ravnotežnog sadržaja vlage često su potrebna ispitivanja i podaci specifični za materijal od interesa. Osim toga, postoje različiti standardi i empirijski modeli za specifične materijale, kao na primjer za drvo, kojem je ravnotežni sadržaj vlage izračunat na temelju vrste drva, gustoće i temperature.<sup>[13]</sup>

### 2.2.1. UTJECAJ VLAGE NA DRVO

Vlaga ima značajan utjecaj na drvo zbog njegove inherentne higroskopnosti. Vlaga će kod drva utjecati na: promjene dimenzija, sadržaj vlage, čvrstoću i mehanička svojstva, truljenje i biološko propadanje, najezdu insekata, završnu obradu i premazivanje, obradu i obradivost, toplinska svojstva te akustična svojstva.

Upijanje ili gubitak vlage dovodi do promjene dimenzija kod drva. Kad drvo apsorbira vlagu, ono bubri, a kad gubi vlagu, skuplja se, odnosno dimenzije mu se smanjuju. Takve promjene dimenzija mogu izazvati savijanje, uvijanje, cijepanje ili učvršćivanje proizvoda od drva.

Sadržaj vlage je količina vlage prisutna u drvu izražena kao postotak težine osušenog drva. Drvo postiže ravnotežni sadržaj vlage kada se stabilizira sa vlagom u okolini.

Sadržaj vlage značajno utječe na čvrstoću i mehanička svojstva drva. Kako se vlaga povećava čvrstoća se smanjuje. Mokro drvo je slabije i manje kruto od suhog drveta. Ovo je osobito

ključno u konstrukcijskim primjenama gdje je čvrstoća drva od kritične važnosti. Vлага je također i primarni čimbenik truljenja i biološkog propadanja drva. Visok sadržaj vlage stvara povoljno okruženje za rast gljivica i bakterija, što dovodi do truljenja i degradacije drva. Kontrola vlage pomaže u sprečavanju propadanja i produljuje životni vijek proizvoda od drva. Uz to, vlaga može privući i podržati najezdu insekata u drvu. Mnogi insekti koji buše drvo zahtijevaju određenu razinu vlage za svoj životni ciklus. Kontrola sadržaja vlage također pomaže smanjiti rizik od oštećenja od insekata. Sadržaj vlage utječe na primjenu i učinak završnih premaza na drvenim površinama. Visok sadržaj vlage može ometati prijanjanje i trajnost premaza, dok nizak sadržaj vlage može uzrokovati prekomjerno upijanje i loš izgled. Utjecaj na obradivost najviše se očituje kod procesa strojne obrade kao što su rezanje, blanjanje i oblikovanje. Visok sadržaj vlage može rezultirati povećanjem trošenja alata, dok nizak sadržaj vlage može uzrokovati pretjeranu lomljivost i pucanje. <sup>[16]</sup>

Vlaga utječe i na toplinska svojstva drva, uključujući njegovu toplinsku vodljivost i toplinski kapacitet. Vlažno drvo ima nižu toplinsku vodljivost i veći toplinski kapacitet od suhog drva, što utječe na njegova izolacijska svojstva.

Promjene u sadržaju vlage mogu utjecati i na rezonantnu frekvenciju, prigušenje i karakteristike prijenosa zvuka drva, što je važno u glazbenim instrumentima i arhitektonskoj akustici.

Kontrola vlage u drvu ključna je za njegovu stabilnost, trajnost i učinkovitost. Odgovarajuće tehnike sušenja, kondicioniranja i upravljanja vlagom bitne su za različite primjene drva, uključujući konstrukcije, namještaj, podove i druge namjene obrade drva.



### 2.2.2. UTJECAJ VLAGE NA CEMENTNU PASTU

Vlaga ima značajnu ulogu u ponašanju i svojstvima cementne paste, koja je mješavina cementa i vode.

Najviše od svega utječe na proces hidratacije. Kada se cementu doda voda, dolazi do kemijskih reakcija koje se nazivaju reakcije hidratacije, gdje čestice cementa reagiraju s molekulama vode i stvaraju hidratizirane spojeve. Ovaj proces odgovoran je za stvrdnjavanje i vezanje cementne paste. Dostupnost vlage ključna je za odvijanje procesa hidratacije.

Omjer vode i cementa ( $w/c$ ) temeljni je parametar koji određuje količinu vode u odnosu na količinu cementa u pasti. Značajno utječe na svojstva očvrslog betona. Veći sadržaj vode rezultira većom obradivošću, ali može dovesti do smanjene čvrstoće i trajnosti. Optimalni vodo-cementni omjer koriste se za postizanje ravnoteže između obradivosti i svojstava.

Sadržaj vlage utječe na obradivost cementne paste što se očituje kod jednostavnosti miješanja, postavljanja i završne obrade cementne paste. S povećanjem sadržaja vlage pasta postaje rjeđa te je lakša za obradu, a time se olakšavaju procesi poput pumpanja, izlivanja i izravnivanja. Suprotno tome, nedovoljna vlažnost prilikom obrade može rezultirati krutom ili suhom pastom što će otežati rukovanje.

Prisutnost vlage kod cementne paste utječe i na vrijeme stvrdnjavanja. Početno vrijeme stvrdnjavanja označava vrijeme koje je potrebno da bi pasta prešla iz tekućeg stanja u kruto stanje.

Sadržaj vlage utječe na razvoj čvrstoće cementne paste. Adekvatna vlažnost neophodna je za pravilnu hidrataciju, što doprinosi razvoju čvrstoće tijekom vremena. Nedovoljna vlažnost može spriječiti proces hidratacije i rezultirati smanjenom čvrstoćom, dok višak vlage može utjecati na segregaciju, što dovodi do smanjene čvrstoće i trajnosti.

Gubitak vlage iz cementne paste može dovesti do skupljanja i pucanja. Kako voda isparava, pasta se skuplja procesom sušenja, što može rezultirati smanjenjem volumena i razvojem pukotina. Odgovarajuće mjere stvrdnjavanja i kontrole vlage bitne su za smanjenje skupljanja i sprečavanje pucanja.

Također, sadržaj vlage u cementnoj pasti usko je povezan sa dugotrajnošću. Prekomjerna vlaga može pospješiti ispiranje kemijskih spojeva i povećati osjetljivost na okolišne čimbenike, a to su ciklusi smrzavanja i odmrzavanja, kao i nepovoljne kemijske reakcije.

### 2.3. SVOJSTVA VLAŽNOG ZRAKA

Vlažan zrak odnosi se na zrak koji sadrži određenu količinu vodene pare. Na svojstva vlažnog zraka utječe nekoliko čimbenika, uključujući temperaturu, tlak i količinu prisutne vodene pare. Neka od svojstava vlažnog zraka su: vlažnost, zasićenje, rosište, entalpija i specifični volumen.

Vlažnost je mjera količine vodene pare prisutne u zraku. Može se izraziti na razne načine, kao što je relativna vlažnost (RH), specifična vlažnost ili rosište. Relativna vlažnost je najčešće korištena mjera i predstavlja postotak vlage u zraku u usporedbi s maksimalnom količinom vlage koju zrak može zadržati pri određenoj temperaturi.<sup>[17]</sup>

Zasićenost se odnosi na stanje kada zrak zadržava maksimalni sadržaj vodene pare pri određenom tlaku i temperaturi. Kada je zrak zasićen, pri temperaturi rosišta njegova relativna vlažnost je 100%. Ako mu se doda više vlage, zrak postaje prezasićen, što može dovesti do stvaranja magle, oblaka ili padalina.

Kada se zrak ohladi ispod točke rosišta, vodena para iz zraka počinje kondenzirati. Rosište je važan parametar za razumijevanje mogućnosti kondenzacije i razine udobnosti u unutarnjim okruženjima.

Specifični volumen odnosi se na volumen koji zauzima jedinica mase vlažnog zraka. Na njega utječu temperatura, tlak i sadržaj vlage u zraku. Specifični volumen vlažnog zraka važan je u termodinamici i inženjerskim proračunima koji se odnose na rukovanje zrakom i ventilaciju.

Razumijevanje svojstava vlažnog zraka ključno je u raznim područjima kao što su meteorologija, projektiranje HVAC-a (heating, ventilation and air conditioning), znanost o okolišu i poljoprivreda, budući da utječe na vremenske obrasce, ljudsku udobnost i ponašanje zraka i vodene pare u različitim okruženjima.

Psihrometrijska karta grafički je prikaz termodinamičkih svojstava vlažnog zraka. To je vizualni alat za analizu i izračunavanje svojstava vlažnog zraka kao što su: relativna vlažnost, rosište, entalpija i specifični volumen; na temelju temperature i sadržaja vlage i prikazana je na slikama 2.4. i 2.5.



### 2.3.1. ROSIŠTE

Rosište je jedna od mjera atmosferske vlage ili vlažnosti. Definira se kao temperatura pri kojoj zrak postaje zasićen, što znači da više ne može zadržati vodenu paru, te počinje dolaziti do kondenzacije. Jednostavnije rečeno, rosište je temperatura pri kojoj nastaju rosa, magla ili oblaci.

S druge strane, vlažnost je mjera količine vodene pare prisutne u zraku, a više o njoj rečeno je u poglavlju 2.3.2.

Rosište i relativna vlažnost blisko su povezani. Kada temperatura zraka padne, relativna vlažnost raste, a ako se temperatura nastavi smanjivati, zrak na kraju dosegne točku zasićenja, odnosno rosište. Na ovoj temperaturi relativna vlažnost je 100%.

Rosište nije direktno povezano s apsolutnom vlažnošću, ali neizravno svakako na nju utječe. Kako temperatura zraka pada i približava se rosištu, zrak postaje bliži zasićenju, a apsolutna vlažnost ostaje relativno konstantna sve dok ne započne proces kondenzacije.

Poznavanje rosišta korisno je jer daje uvid u vjerojatnost kondenzacije, stvaranja magle ili rose.

Formula koja najčešće povezuje točku rosišta i relativnu vlažnost glasi:

$$T_{ros} = T - \frac{100 - RH}{5} \quad 2.3.$$

Gdje je  $T_{ros}$  temperatura pri kojoj dolazi do kondenzacije,  $T$  je temperatura zraka, a  $RH$  je relativna vlažnost, te je iz toga relativna vlažnost:

$$RH = 100 - 5(T - T_{ros}) \quad 2.4.$$

Ova formula daje približan izračun i obično se koristi u meteorologiji i srodnim područjima, a pretpostavlja standardne atmosferske uvjete i ne mora uzeti u obzir faktore kao što su nadmorska visina ili lokalne varijacije.

### 2.3.2. RELATIVNA VLAŽNOST

Vlažnost se odnosi na količinu vlage odnosno vodene pare prisutne u zraku. To je važan aspekt vremena i klime i može imati značajan utjecaj na naš svakodnevni život. Izražava se kao postotak i može varirati ovisno o temperaturi i tlaku.

Apsolutna vlažnost je mjera stvarne količine vodene pare prisutne u određenom volumenu zraka, obično izražena u gramima po kubnom metru ( $\text{g}/\text{m}^3$ ).

Relativna vlažnost (*RH*) je najčešće korištena mjera vlažnosti. To je količina vlage u zraku koju zrak može zadržati na određenoj temperaturi u odnosu na maksimalnu količinu vlage u zraku. Relativna vlažnost izražava se kao postotak i izračunava se dijeljenjem stvarnog tlaka pare sa tlakom zasićene pare pri danoj temperaturi.

Vlažnost zraka mjeri se pomoću instrumenata koji se nazivaju higrometri ili vlagomjeri. Postoje različite vrste higrometara, uključujući psihrometre, kapacitivne higrometre i higrometre rosišta.

Vlažnost se može kontrolirati pomoću uređaja kao što su ovlaživači i odvlaživači zraka. Ovlaživači dodaju vlagu zraku u suhim uvjetima, a odvlaživači uklanjaju višak vlage u vlažnim uvjetima.



Električni higrometri koriste električna svojstva koja se mijenjaju s vlagom, poput kapaciteta ili otpora. Kapacitivni i rezistivni higrometri često su korišteni tipovi električnih higrometara.

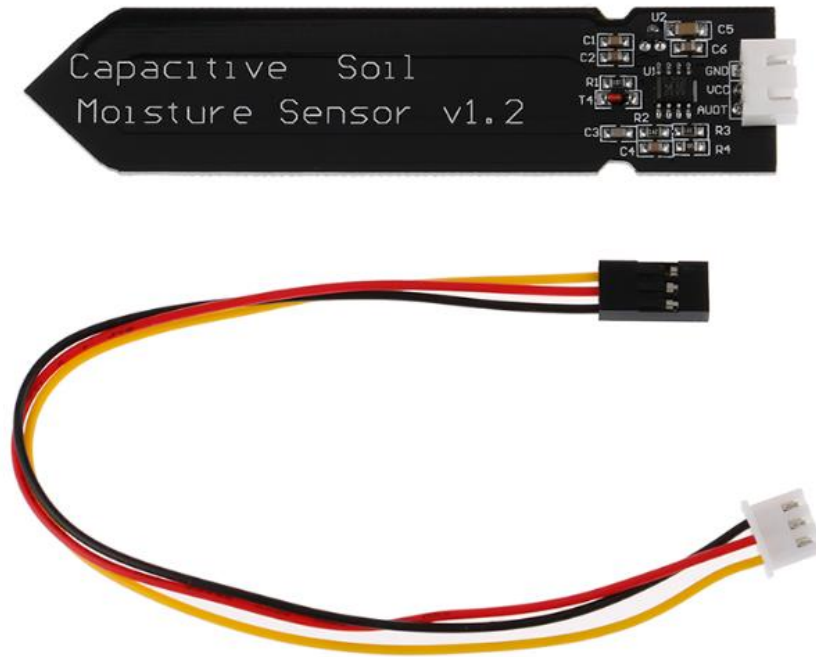
Higrometri točke rosišta mjere temperaturu pri kojoj se rosa stvara na površini te tu temperaturu (rosišta) koriste za izračunavanje relativne vlažnosti. Najčešći tip je higrometar s ohlađenim zrcalom, gdje se zrcalo hladi dok se na njemu ne stvori rosa, te se mjeri temperatura pri kojoj se stvara rosa.



**Slika 2.7.** Higrometar

Gravimetrijska metoda uključuje upotrebu higroskopne tvari, poput silika gela ili bezvodnog kalcijeveg klorida, za apsorpciju vlage iz poznatog volumena zraka. Zatim se mjeri povećanje higroskopnog materijala, što omogućuje izračun relativne vlažnosti.

Kapacitivni senzori vlage rade na principu da se električni kapacitet materijala mijenja s vlagom. Ovi senzori imaju tanki sloj materijala koji upija vlagu, umetnut između dvije elektrode. Mjeri se kapacitet, a na temelju promjene kapaciteta određuje se relativna vlažnost zraka.



**Slika 2.8.** Kapacitivni senzor vlage

Otpornički senzori vlage rade tako da mjere promjene električnog otpora higroskopskog materijala kao odgovor na vlagu. Kako se sadržaj vlage mijenja, mijenja se i otpor senzorskog materijala, što omogućuje određivanje relativne vlažnosti.

Različite metode imaju različite razine točnosti i prikladne su za različite primjene. Kalibracija i pravilno održavanje instrumenata ključni su za osiguranje točnih mjerenja vlažnosti.

#### 2.4.1. METODE ODREĐIVANJA VLAŽNOSTI U INDUSTRIJSKIM PROCESIMA

U industrijskim procesima, točno određivanje relativne vlažnosti bitno je za održavanje optimalnih uvjeta, osiguravanje kvalitete proizvoda i očuvanje učinkovitosti određenih procesa. Neke od metoda koje se koriste za mjerenje relativne vlažnosti u industrijskim procesima navedene su niže.

Industrijski higrometri su specijalizirani higrometri dizajnirani za industrijske primjene. Mogu se temeljiti na različitim principima, uključujući kapacitet, otpor ili toplinsku vodljivost. Industrijski higrometri često su robusni, izdržljivi i sposobni podnositi teške okolne uvjete.

Industrijski procesi koji uključuju hlađenje i sušenje često koriste mjerenje točke rosišta ili senzore za praćenje i kontrolu razine vlažnosti.



Vlažne komore su kontrolirana okruženja koja se koriste za testiranje ili simulaciju specifičnih uvjeta vlažnosti. Ove komore obično imaju ugrađene senzore za precizno praćenje i kontrolu relativne vlažnosti. Oni često koriste kombinaciju senzora, kao što su kapacitivni ili otpornički senzori, za precizna mjerenja vlažnosti.



**Slika 2.9.** Vlažna komora

U nekim industrijskim procesima, osobito u industrijama kao što su farmaceutska industrija, prerada hrane ili plastike, ključno je točno izmjeriti sadržaj vlage u materijalima. Analizatori vlage koriste različite tehnike, kao što je Karl Fischerova titracija, infracrveno sušenje ili metode gubitka pri sušenju, za određivanje sadržaja vlage, koji se zatim može koristiti za izračunavanje relativne vlažnosti.

Uređaji za bilježenje podataka opremljeni sensorima vlažnosti obično se koriste u industrijskim procesima. Ovi uređaji kontinuirano mjere i bilježe vrijednosti temperature i vlažnosti u određenim intervalima. Uređaji za snimanje podataka mogu pružiti vrijedne informacije o fluktuacijama vlažnosti tijekom vremena, pomažući u optimizaciji procesa i rješavanju problema.

U mnogim industrijskim procesima, kontrola vlažnosti je ključna za održavanje kvalitete proizvoda ili optimizaciju parametara procesa. Sustavi kontrole procesa često uključuju senzore

i instrumente kao što su higrometri, senzori rosišta ili sonde za vlažnost za praćenje i kontrolu razine vlažnosti u stvarnom vremenu.

#### 2.4.2. METODE ODREĐIVANJA VLAŽNOSTI U NEINDUSTRIJSKIM PROCESIMA

Određivanje relativne vlažnosti u neindustrijskim procesima važno je u različitim kontekstima, kao što je praćenje vremena, unutarnje okruženje, poljoprivredna okruženja i osobna udobnost. Neke od uobičajenih metoda koje se koriste za mjerenje relativne vlažnosti u neindustrijskim procesima navedene su niže.

Psihrometri i higrometri koji se koriste u neindustrijskim procesima rade po istom principu kao i ranije spomenuti psihrometri i higrometri, ali su dimenzijski manji.

Meteorološke stanice opremljene sensorima mogu mjeriti i bilježiti različite meteorološke parametre, uključujući relativnu vlažnost. Ove stanice često koriste kapacitivne senzore, koji su integrirani s drugim sensorima kao što su temperatura i barometarski tlak, kako bi pružili sveobuhvatne informacije o vremenu.

Unutarnja okruženja, kao što su domovi, uredi i muzeji, često zahtijevaju praćenje i kontrolu razine relativne vlažnosti radi udobnosti stanara ili očuvanja osjetljivih materijala. Unutarnji higrometri mogu varirati od jednostavnih, samostalnih uređaja do sofisticiranih sustava integriranih sa sustavima grijanja, ventilacije i klimatizacije (HVAC). Ovi higrometri mogu koristiti elektroničke senzore ili sadržavati napredniju tehnologiju poput bežičnog povezivanja ili mogućnosti bilježenja podataka.

Indikatori vlažnosti male su kartice ili trake koje mijenjaju boju i daju grubu procjenu relativne vlažnosti. Sadrže kemikalije koje reagiraju na vlagu, uzrokujući promjenu boje indikatora. Ovi se indikatori često koriste u pakiranju, skladišnim prostorima ili drugim postavkama gdje je dovoljna brza vizualna indikacija razine vlažnosti.

Uređaji za osobnu udobnost, kao što su nosivi monitori vlažnosti ili pametni kućni uređaji, postaju sve prisutniji. Ovi uređaji mogu mjeriti relativnu vlažnost u stvarnom vremenu i pružiti povratne informacije korisnicima za optimizaciju razine udobnosti u zatvorenom prostoru.

### 2.4.3. METODE ODREĐIVANJA TEMPERATURE ROSIŠTA

Točka rosišta i njena važnost opisane su u poglavlju 2.3.1. Određivanje točke rosišta bitno je za različite primjene, uključujući vremensku prognozu, HVAC sisteme i industrijske procese. Neke metode za određivanje točke rosišta navede su niže.

Također, temperatura rosišta može se određivati pomoću higrometra i psihrometra koji su u ranijem tekstu pomnije objašnjeni.

Elektronički senzori točke rosišta obično se koriste u raznim primjenama. Ovi senzori koriste kapacitivnost tankog filma ili otporni element za mjerenje temperature rosišta. Omogućuju brza i precizna mjerenja točke rosišta, a neki modeli nude dodatne značajke poput bilježenja podataka ili digitalnih zaslona.

Infracrveno (IR) mjerenje točke rosišta temelji se na principu da različiti plinovi imaju jedinstvene karakteristike infracrvene apsorpcije. Infracrveni senzori mogu otkriti prisutnost vodene pare u plinskoj smjesi i izmjeriti temperaturu na kojoj se počinje stvarati rosa. Ova metoda se obično koristi u industrijskim procesima i praćenju okoliša.

Metoda mokro-suhog termometra primarno se koristi za određivanje relativne vlažnosti, ali također može pružiti procjenu točke rosišta. Uključuje usporedbu temperatura mokrog i suhog termometra, nakon čega se odgovarajućim korekcijama i upotrebom psihometrijskih dijagrama može procijeniti točka rosišta.

## 2.5. TERMOHIGROMEHANIČKI MODELI

Termohigromehanički modeli (THM) matematički su modeli koji se koriste za simulaciju i analizu spregnutog ponašanja temperature, vlage i mehaničkog odgovora u materijalima i strukturama. Ovi se modeli obično koriste u raznim inženjerskim disciplinama, uključujući geotehniku, građevinarstvo i inženjerstvo materijala.

Glavni cilj termohigromehaničkog modeliranja je predvidjeti i razumjeti složene interakcije između temperature, sadržaja vlage i mehaničkog ponašanja u materijalima i strukturama. Ovi modeli uzimaju u obzir učinke promjena temperature i vlage na fizikalna svojstva materijala, kao što su toplinsko širenje, difuzija vlage i mehanička deformacija.

U području građevine, THM modeli nalaze primjenu u analizi betonskih konstrukcija podložnih varijacijama okoline. Ovi modeli pomažu u predviđanju razvoja toplinskih i vlagom izazvanih naprezanja, što može dovesti do pucanja, izobličenja ili propadanja betona. Razumijevanjem ovih procesa inženjeri mogu optimirati projektiranje i konstrukciju betonskih konstrukcija kako bi poboljšali njihovu trajnost i smanjili moguće probleme.

THM modeli također se mogu koristiti u proučavanju materijala s higroskopnim svojstvima, kao što su drvo ili kompozitni materijali. Ovi modeli razmatraju interakcije između sadržaja vlage, temperature i mehaničkog ponašanja kako bi se predvidjele dimenzionalne promjene i mehanički odziv materijala.

Vrijedno je spomenuti da se točnost i složenost THM modela razlikuju ovisno o specifičnoj primjeni i potrebnoj razini detalja. Neki modeli mogu uzeti u obzir pojednostavljene pretpostavke i empirijske odnose, dok drugi koriste naprednije numeričke metode i materijalne konstitutivne modele za hvatanje zamršenosti povezanih fenomena.

Kada su materijali podvrgnuti promjenama temperature, obično se šire ili skupljaju. Ovaj fenomen je poznat kao toplinska ekspanzija. Različiti materijali imaju različite koeficijente toplinskog širenja, koji opisuju kako se šire ili skupljaju za određenu promjenu temperature. Termohigromehanički modeli uzimaju u obzir te koeficijente i izračunavaju rezultirajuće dimenzionalne promjene u materijalu na temelju temperaturnih varijacija.

Termohigromehanički modeli uključuju parametre kao što su difuznost vlage i koeficijenti ekspanzije vlage za simulaciju dimenzijskih promjena materijala izazvanih vlagom.

U realnom svijetu, materijali su često izloženi istovremeno varijacijama temperature i vlage. Kombinirani učinci temperature i vlage mogu dovesti do složenih interakcija i složenih promjena dimenzija. Termohigromehanički modeli bilježe te spojne učinke uzimajući u obzir istodobne utjecaje temperature i vlage na ponašanje materijala. Na primjer, kako se temperatura povećava, materijal se može širiti, ali ako upija i vlagu, kombinirani učinci dovesti će do pojačanog promjena dimenzija.

### 3. EKSPERIMENTALNI DIO

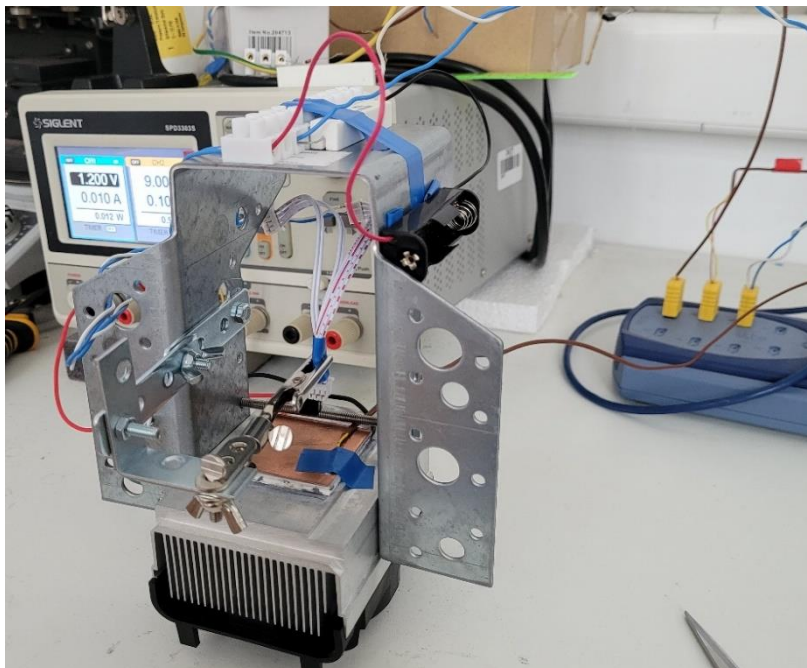
#### 3.1. ODREĐIVANJE TEMPERATURE ROSIŠTA

Određivanje temperature rosišta provedeno je da bi se pokazao princip rada higrometra, te kako bi se uvjerali u njegovu ispravnost usporedivši dobivenu RH preko temperature rosišta, s izmjerenom RH na električnom higrometru, prikazanom na slici 3.4.

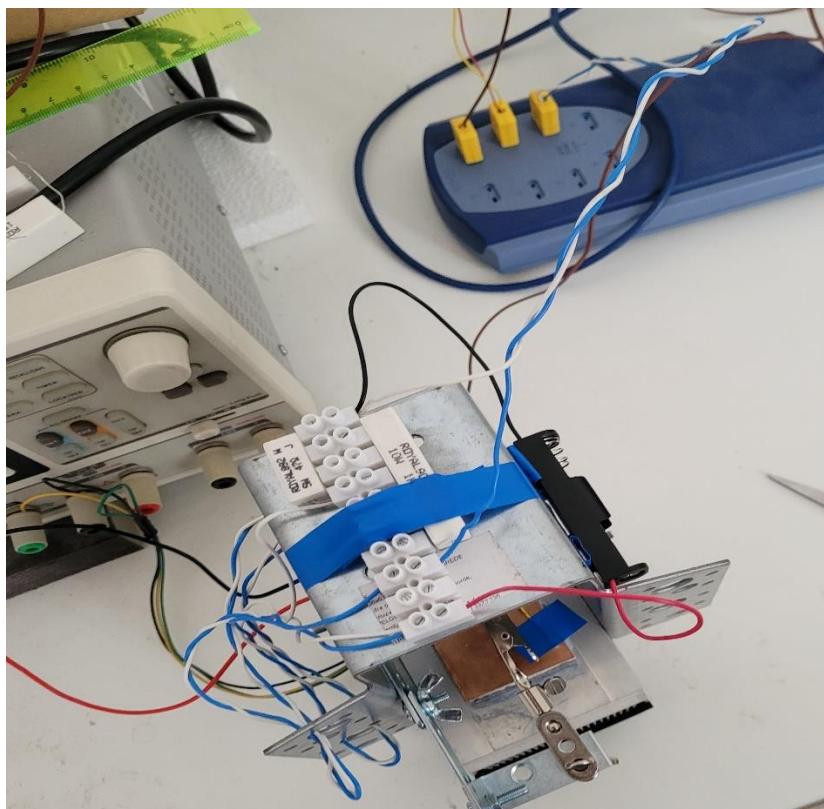
Temperatura rosišta određivana je u laboratoriju koristeći aparaturu čije su glavne sastavnice: Peltierova pločica, senzor CNY70 objašnjen u poglavlju 3.1.1., laboratorijski izvor napona, otpornici, računalo, te temperaturni uređaj za pohranu podataka PICO TC-08; spojeni putem dva strujna kruga, kako je prikazano na slikama 3.1. i 3.2.

Jedan strujni krug spojen je na emiter senzora CNY 70. Njega čini baterija (2V), otpornik od  $47\Omega$  kako bi se smanjio napon iz baterije prema emitterskom dijelu senzora, i senzor.

Drugi strujni krug spojen je na detektorsku komponentnu senzora CNY70. Od baterije spojen je otpornik od  $1000\Omega$  kako bi se omogućilo očitavanje izlaznog signala s detektora na PICO TC-08 uređaju, nakon kojeg je u seriju vezana detektorska komponenta senzora CNY 70 koja se vraća na bateriju.

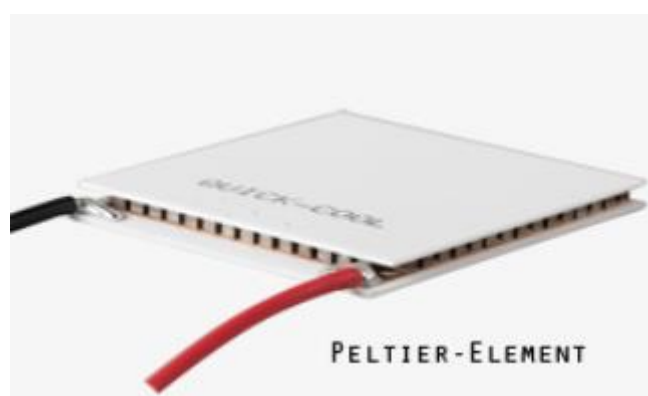


**Slika 3.1.** Aparatura za određivanje temperature rosišta



**Slika 3.2.** Aparatura za određivanje temperature rosišta

Na gornju površinu Peltierove pločice, prikazane na slici 3.3., postavljena je bakrena pločica, s pretpostavkom relativno glatke površine, te kako bi se bolje priljepio termopar za praćenje temperature pločice. Peltierova pločica, kada se priključi na laboratorijski izvor napona sa slike 3.4., se na gornjoj površini hladi, a na donjoj grije, te je termopar postavljen na gornju površinu (koja se hladi) kako bi se pratila temperatura prilikom hlađenja, što je važno za određivanje temperature rosišta.



**Slika 3.3.** Peltierova pločica

Princip mjerenja temeljen je na smanjenom broju reflektiranih IR zraka koje detektira senzor, kada nastupi temperatura rosišta. Pad u količini reflektiranih zraka očituje se kao pad napona. Dok ne nastupi temperatura rosišta, prilikom hlađenja Peltierove pločice, napon je konstantan. Ona temperatura pri kojoj napon započne svoj pad, smatra se temperaturom rosišta, jer nastala rosa utječe na refleksiju zraka te ih odbija pod različitim kutevima, stoga će se puno manja količina zraka vratiti u smjeru senora, točnije na detektor.

Preko određene temperature rosišta, putem jednadžbe 2.4., izračunata je relativna vlažnost zraka, te je ista uspoređena s izmjerenom relativnom vlažnosti zraka na higrometru UNI-T UT331 prikazanom na slici 3.4.



Slika 3.4. Higrometar UNI-T UT331

### 3.1.1. SENZORI

Optoelektrični odašiljači i prijamnici koriste se često u parovima i međusobno su optički povezani. Dostupni su za širok raspon primjena kao komponente spremne za korištenje poznatije kao spojnice, prijenosni senzori, refleksne spojnice i refleksni senzori. Povećana



automatizacija u industriji posebno je povećala potražnju za ovim komponentama i potaknula razvoj novih tipova.

Opći princip rada refleksnih senzora slični su onima transmitterskih. Dakle, svjetlo koje se emitira od odašiljača nailazi na utjecaj objekta ili medija na putu do detektora te se tako uočava promjena u intenzitetu svjetla na detektoru, a prikazuje se u obliku promjene električnog signala. Jedan od takvih senzora je CNY70 orikazan na slici 3.4.



**Slika 3.4.** Senzor CNY 70

Izvor IR svjetla na senzoru priključen je na laboratorijski izvor napona, SIGLENT SPD3303s, vidljiv na slici 3.5.



**Slika 3.5.** Laboratorijski izvor napona, SIGLENT SPD3303s

Laboratorijski izvor napona namješten je da pušta 2 V ili 10 mA, koju god vrijednost od te dvije prije postigne.

### 3.2. PROMJENE DIMENZIJE I MASE DRVOCEMENTNOG KOMPOZITA TIJEKOM SUŠENJA I VLAŽENJA

U ovom procesu od aparature koristili su se: precizna laboratorijska vaga miktrometar, sušionik i eksikator. Mjerenja su provedena na tri uzorka drvocementnog kompozita različitih dimenzija.

Prvi uzorak kompozita sastavljen je od portland cementa i drvenih vlakana, te mu nominalno početne dimenzije iznose 85x80x25 mm. Drugi kompozitni uzorak sastavljen je od bijelog portland cementa i drvenih vlakana, što znači da ne sadrži željezne faze, te mu početne dimenzije iznose 60x15x60 mm. Treći uzorak ponovo je kompozit od portland cementa i drvenih vlakana početnih dimenzija 55x8x55 mm.

Dimenzije i masa uzoraka mjerene su na početku procesa, odnosno one se odnose na one dimenzije i mase koje uzorak ima pri uvjetima u kojima je skladišten, te nakon vlaženja, nakon otpuštanja mehaničke vode i nakon sušenja.

Uzorci su vlaženi 24 h, kako je prikazano na slici 3.6.



**Slika 3.6.** Vlaženja drvocemetnog kompozita - potopljen u vodi

Nakon 24 h vlaženja uslijedio je proces otpuštanja mehanički vezane vode. Proces je provoden na sva tri uzorka. Proveden je na način da su uzoci stavljeni u eksikator na čijem dnu se nalazi voda kako bi se u sustavu održala ravnoteža te da ne bi došlo do otpuštanja adsorbirane vlage u uzorcima. Proces je za sva tri uzorka trajao onoliko dugo dok se masa očitana na vagi više nije mijenjala. Taj period bio je različit s obzirom na razliku u početnim dimenzijama kompozita.



**Slika 3.7.** Proces otpuštanja mehaničke vode - kompozit u eksikatoru

Kada se uzorcima u eksikatoru masa više nije mijenjala smatra se da je proces otpuštanja mehaničke vode završen. Uzorci se važu i određuju im se dimenzije koristeći mikrometar prikazan na slici 3.8.



**Slika 3.8.** Mikrometar

Nakon što su uzorci otpustili mehaničku vodu stavljeni su u sušionik na 60°C na 72 h, a dimenzije i masa su se istima mjerile periodično kako je vidljivo u tablici 4.2.

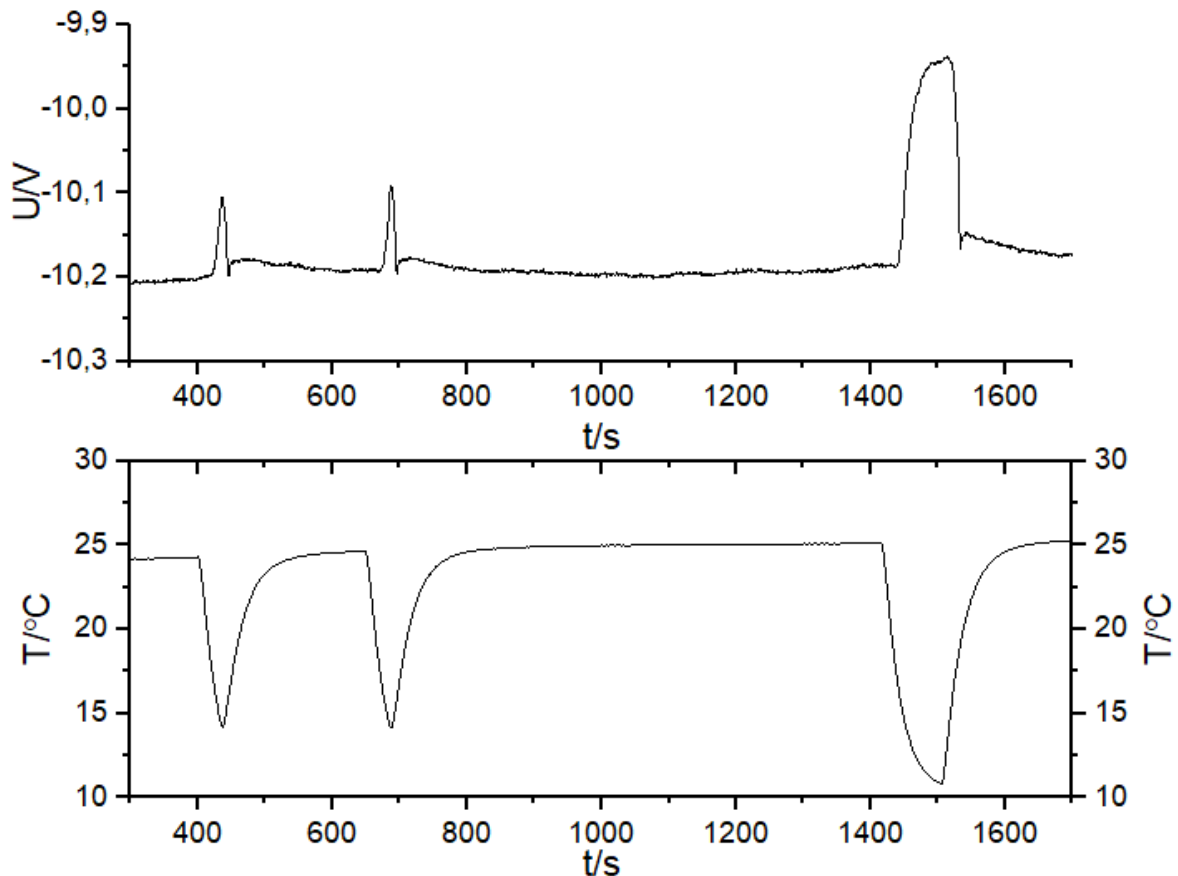
Mjerenja su rađena kako bi se usporedile promjene dimenzije tri uzorka međusobno, te kako bi se uvidio utjecaj vlage i sušenja na svim uzorcima.

## 4. REZULTATI I RASPRAVA

### 4.1. ODREĐIVANJE TEMPERATURE ROSIŠTA

Rezultati određivanja temperature rosišta određeni su iz krivulje ovisnosti napona u vremenu i temperature u vremenu.

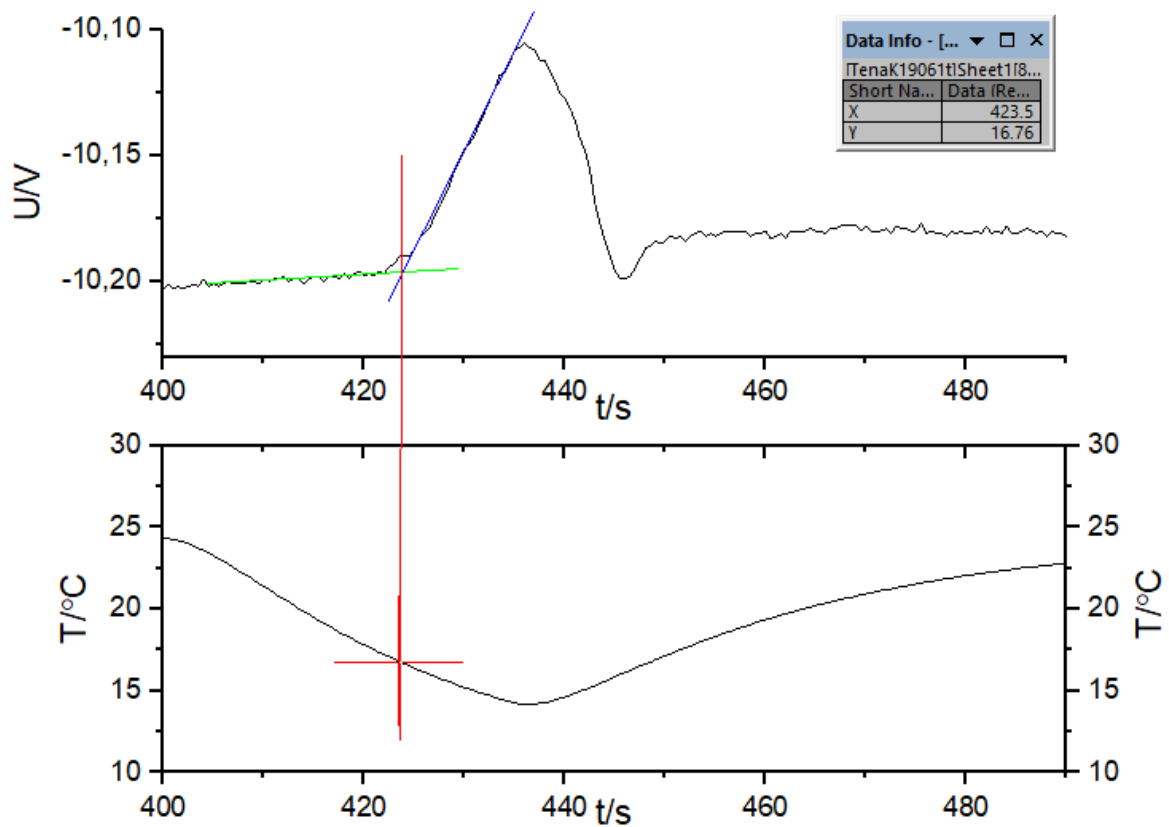
Rezultat prvog mjerenja prikazan je na slici 4.1.



**Slika 4.1.** Grafički prikaz ovisnosti napona i temperature o vremenu

Osim što je iz grafa vidljivo da su temperatura i napon u vremenu konstantni kada nije prisutno hlađenje Peltierove pločice u sustavu, također je vidljivo da s uključivanjem hlađenja (putem laboratorijskog izvora napona), uz pad temperature napon raste. Međutim s obzirom na princip djelovanja senzora CNY 70 opisanog u poglavlju 3.1.1. možemo zaključiti da je došlo do pogreške u spajanju strujnog kruga, odnosno da su se negdje u strujnom krugu zamijenili plus i minus pol. Bez obzira na pogrešku prilikom spajanja aparature, odnosno ne obazirući se na negativan predznak napona, detektor ipak registrira početak orošavanja Cu površine s toga je

moгуće iz ovih ovisnosti odrediti temperaturu rosišta, te samim time i relativnu vlažnost zraka. Iz prikazanog grafa odvojeno su prikazani parovi pikova na slikama 4.2.-4.4.

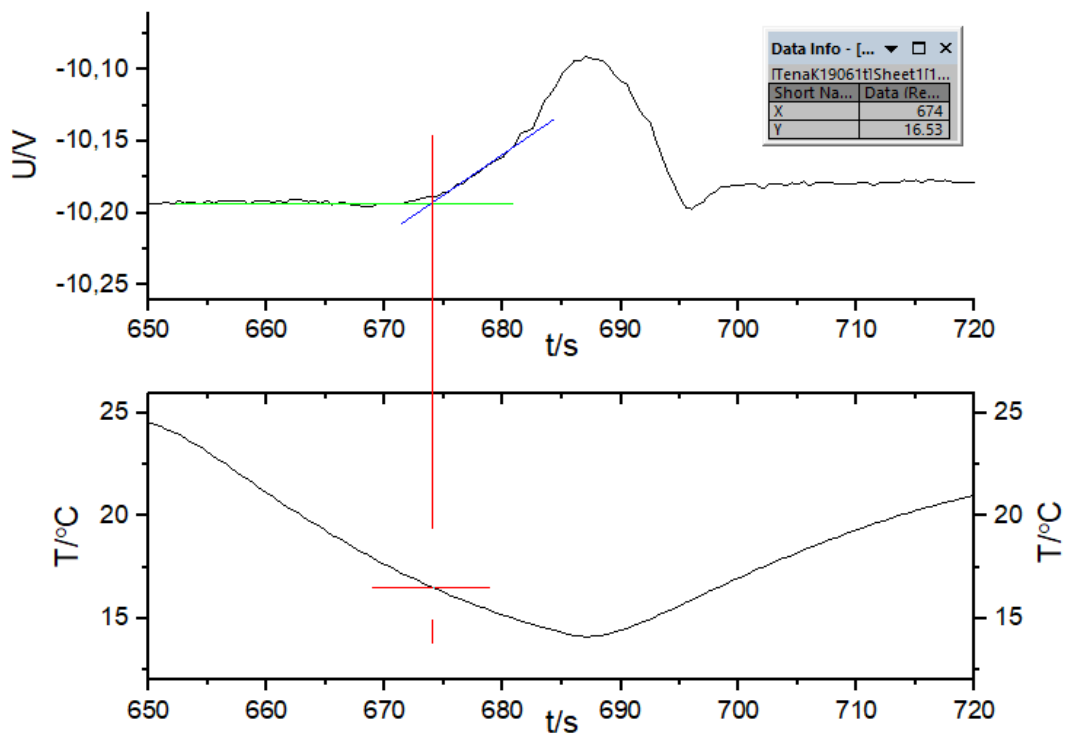


**Slika 4.2.** Uvećani prikaz prvog para pikova sa slike 4.1.- grafičko određivanje temperature rosišta

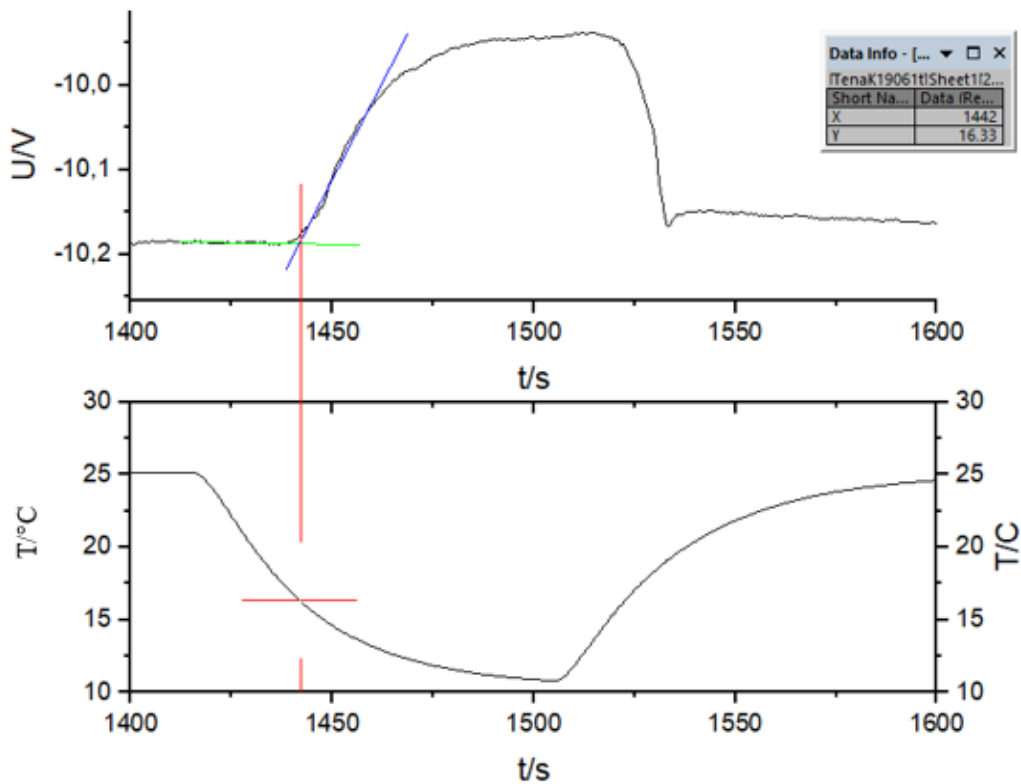
Pomoću grafičkog prikaza na slici 4.2. grafički je određena temperatura rosišta, odnosno ona temperatura u kojoj započinje promjena napona na detektoru, a vrijednost  $T_{ros}$  iznosi:

$$T_{ros} = 16,76 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Isti postupak proveden je i na preostalim pikovima grafa sa slike 4.1. te su rezultati temperature rosišta upisani u tablicu 4.1.

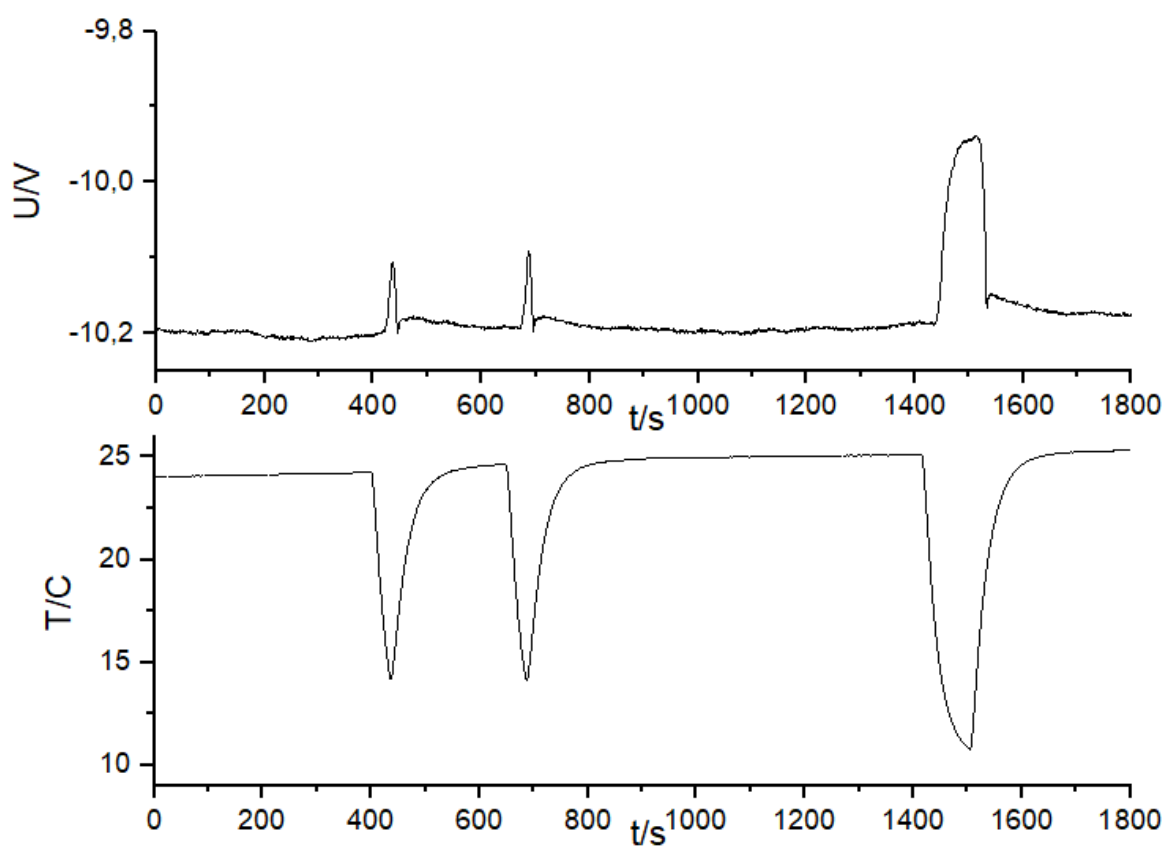


**Slika 4.3.** Uvećani prikaz drugog para pikova sa slike 4.1.-grafičko određivanje temperature rosišta



**Slika 4.4.** Uvećani prikaz trećeg para pikova sa slike 4.1.-grafičko određivanje temperature rosišta

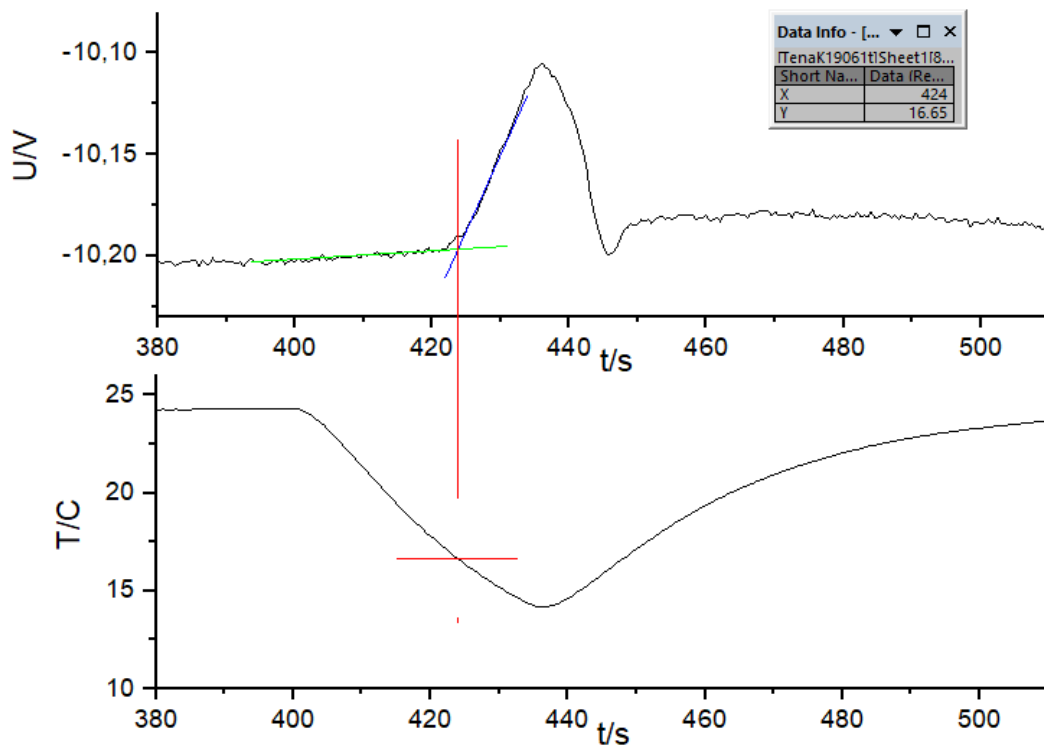
Dobiveni grafički prikaz drugog mjerenja prikazan je na slici 4.5.



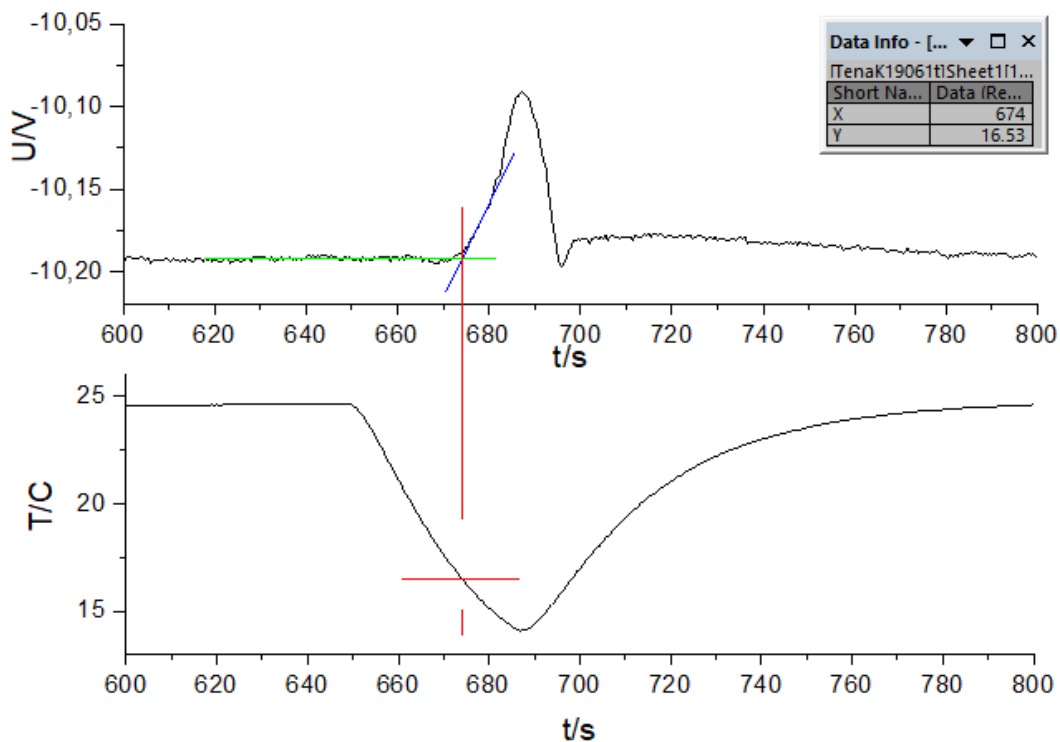
**Slika 4.5.** Grafički prikaz ovisnosti napona i temperature o vremenu

Također je uslijedio postupak grafičkog određivanja temperature rosišta iz tri para pikova prikazanih na slikama 4.6.-4.8. Rezultati se nalaze u tablici 4.1.

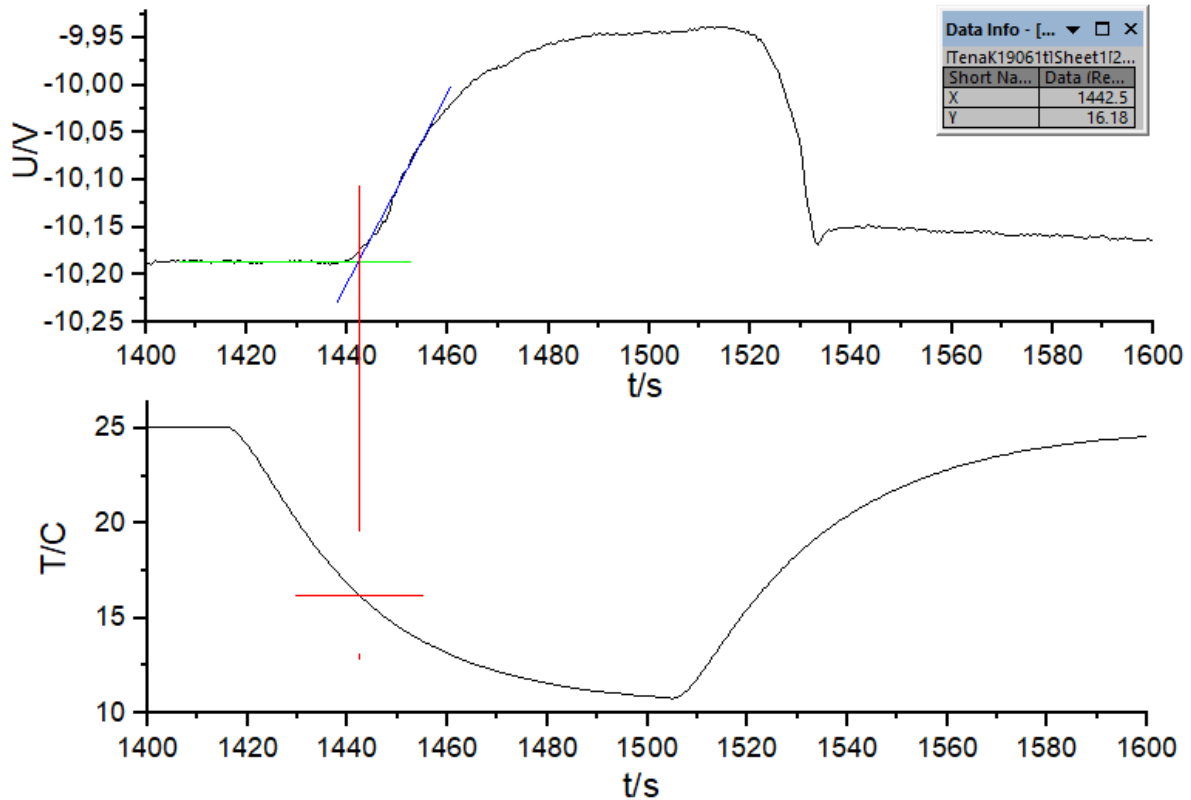




**Slika 4.6.** Uvećani prikaz prvog para pikova sa slike 4.5.-grafičko određivanje temperature rosišta



**Slika 4.7.** Uvećani prikaz drugog para pikova sa slike 4.5.-grafičko određivanje temperature rosišta



**Slika 4.8.** Uvećani prikaz trećeg para pikova sa slike 4.5.-grafičko određivanje temperature rosišta

Iz temperature rosišta izračunata je relativna vlažnost pomoću jednadžbe 2.4. Temperatura zraka pri kojoj su provođena mjerenja izosila je 25°C, a za primjer izračuna uzeta je temperatura rosišta određena prvim pikom prvog mjerenja:

$$RH = 100 - 5(T - T_{ros})$$

$$RH = 100 - 5(25^{\circ}\text{C} - 16,76^{\circ}\text{C})$$

$$RH = 58,8$$

Svi rezultati prikazani su u tablici 4.1.

**Tablica 4.1.** Tablični prikaz rezultata određivane temperature rosišta i relativne vlažnosti:

	$T_{ros}/^{\circ}C$	$RH$
1.pik	16,76	58,8
2.pik	16,53	57,65
3.pik	16,33	56,65
4.pik	16,65	58,25
5.pik	16,53	57,65
6.pik	16,18	55,9

Trend opadanja temperature rosišta, te RH, u oba mjerenja javlja se zbog utjecaja grijanja donje površine Peltierove pločice. To je vidljivo najviše iz grafova na slikama 4.4. i 4.8. jer temperatura na početku hlađenja naglo pada, a zatim je pad sve blaži jer se sustav istovremeno i grije.

Iz tablice 4.1. izračunata je srednja vrijednost relativne vlažnosti koja iznosi 57,48.

Relativna vlažnost izmjerena pomoću higrometra iznosi 57,4 kao što je vidljivo na slici 4.9.



**Slika 4.9.** Vrijednost relativne vlažnosti izmjerene higrometrom

Usporedbom izračunate srednje vrijednosti RH i one očitane na higrometru jasno je da je aparatura valjana i da je pomoću nje, uz više mjerenja moguće precizno odrediti trenutnu vlažnost zraka.

#### 4.2. PROMJENE DIMENZIJE I MASE DRVOCEMENTNOG KOMPOZITA TIJEKOM SUŠENJA I VLAŽENJA

U tablici 4.2. prikazane su početne dimenzije i mase uzoraka korištenih u mjerenjima.

**Tablica 4.2.** Početne dimenzije i mase uzoraka:

	<i>m/g</i>	<i>a/mm</i>	<i>b/mm</i>	<i>c/mm</i>
1.uzorak	59,00	84,80	24,08	81,58
2.uzorak	25,35	58,60	14,00	61,64
3.uzorak	17,83	55,60	8,40	55,70

U tablici 4.3. prikazane su dimenzije i mase uzoraka nakon potapanja u vodu na 24 h.

**Tablica 4.3.** Dimenzije i mase uzoraka nakon vlaženja:

	<i>m/g</i>	<i>a/mm</i>	<i>b/mm</i>	<i>c/mm</i>
1.uzorak	93,41	84,81	24,50	81,40
2.uzorak	34,18	58,82	14,30	61,60
3.uzorak	27,15	55,84	8,76	55,72

U tablici 4.4. prikazane su dimenzije i mase uzoraka nakon otpuštanja mehaničke vode na 72 h.

**Tablica 4.4.** Dimenzije i mase uzoraka nakon otpuštanja mehaničke vode:

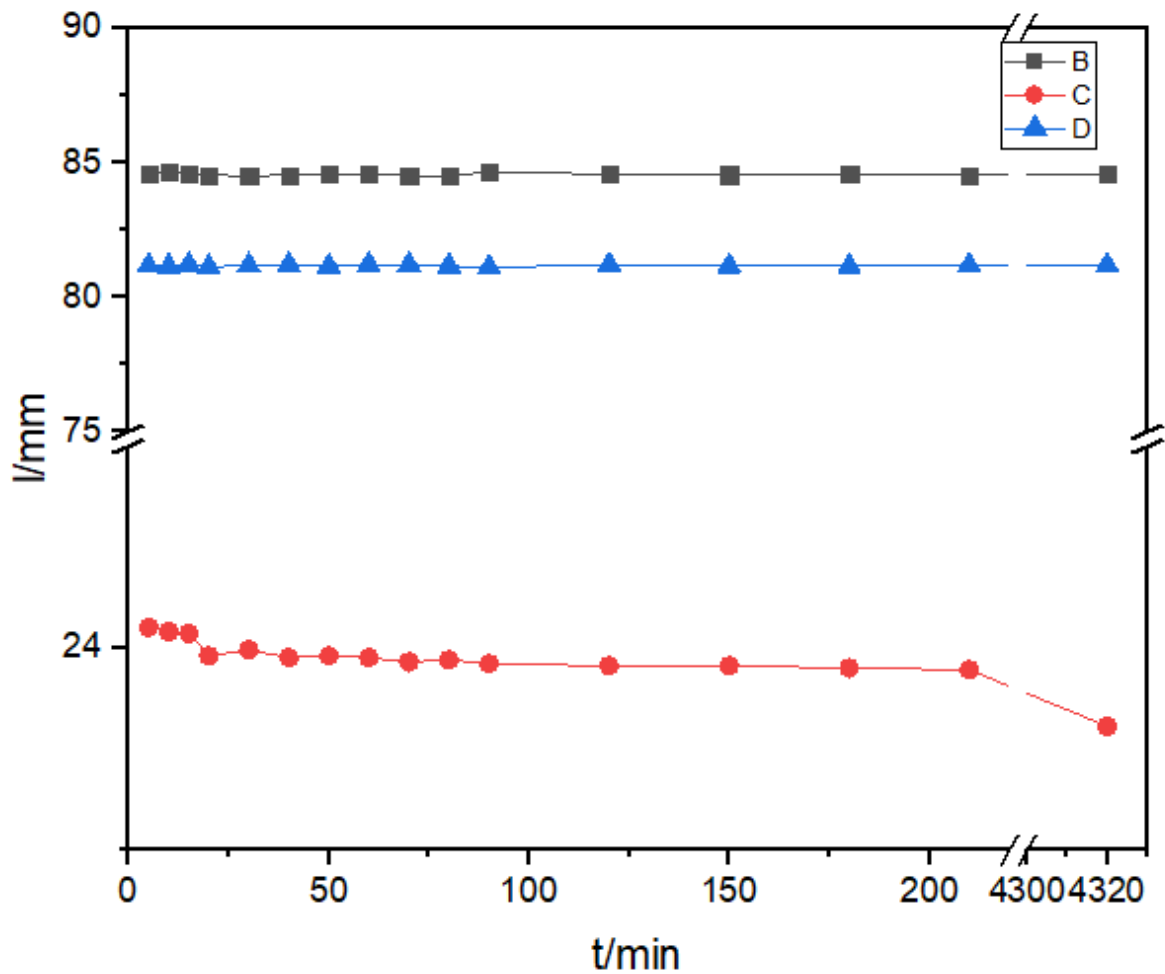
	<i>m/g</i>	<i>a/mm</i>	<i>b/mm</i>	<i>c/mm</i>
1.uzorak	87,51	84,66	24,34	81,28
2.uzorak	32,69	58,66	14,21	61,57
3.uzorak	26,84	55,78	8,72	55,74

U tablici 4.4. prikazane su dimenzije i mase za uzorak 1 za vrijeme i na kraju perioda sušenja u sušioniku na 60 °C.

**Tablica 4.4.** Dimenzije i mase za uzorak 1 za vrijeme sušenja:

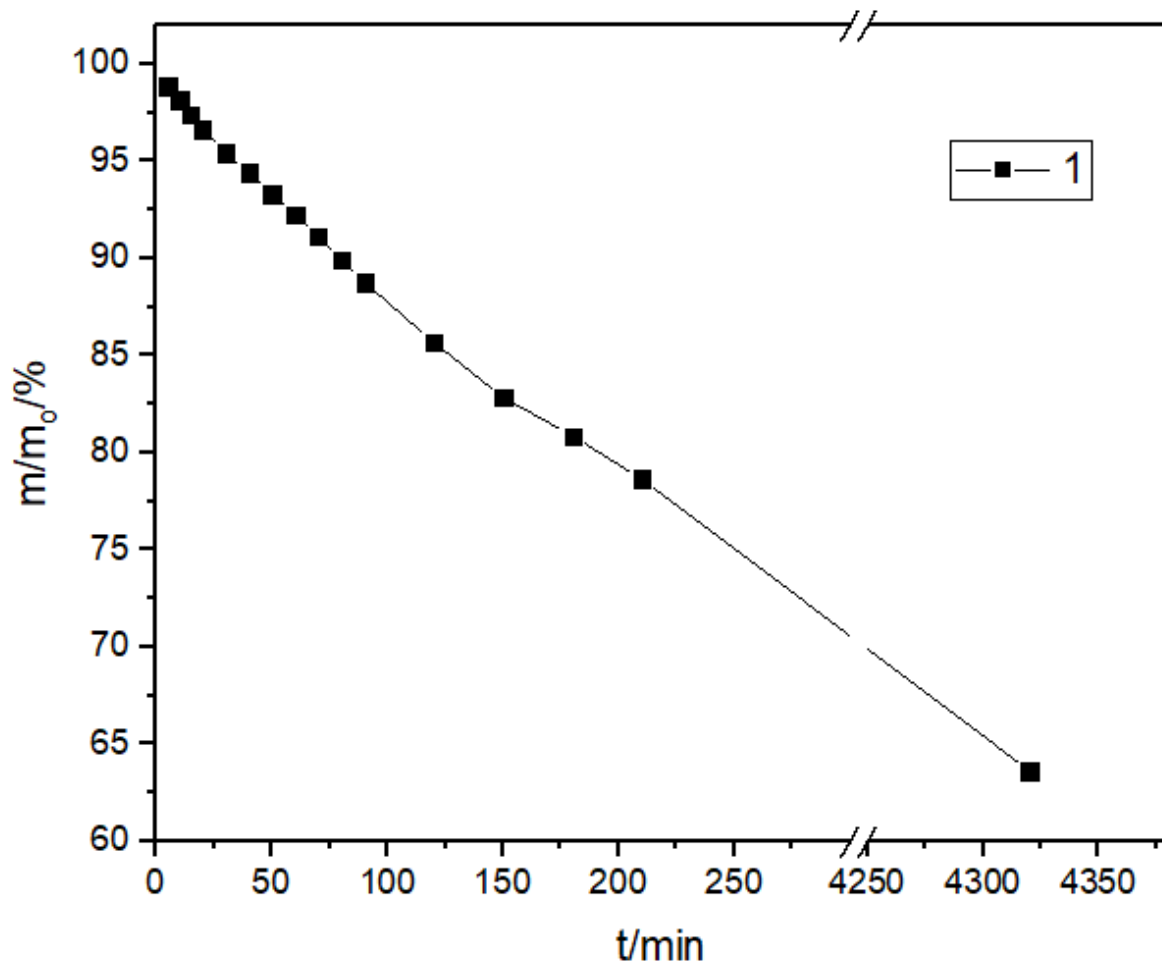
<i>t/min</i>	<i>m/g</i>	<i>a/mm</i>	<i>b/mm</i>	<i>c/mm</i>
5	86,52	84,59	24,10	81,18
10	85,91	84,68	24,08	81,16
15	85,26	84,58	24,07	81,22
20	84,59	84,55	23,96	81,14
30	83,51	84,53	23,99	81,20
40	82,63	84,55	23,95	81,22
50	81,67	84,59	23,96	81,16
60	80,72	84,61	23,95	81,23
70	79,78	84,55	23,93	81,22
80	78,73	84,51	23,94	81,17
90	77,70	84,69	23,92	81,12
120	74,98	84,58	23,91	81,22
150	72,51	84,56	23,91	81,17
180	70,76	84,60	23,90	81,16
210	68,82	84,55	23,89	81,20
4320	55,68	84,61	23,61	81,20
	52,41		23,44	

Pomoću tablice 4.4. izrađeni su grafički prikazi promjene dimenzija za uzorak 1, te promjene mase u periodu sušenja uzorka.



**Slika 4.10.** Grafički prikaz ovisnosti dimenzija o vremenu sušenja za uzorak 1

Iz grafičkog prikaza na slici 4.10. vidljivo je da je najveća promjena prilikom sušenja kod debljine uzorka, dok se dužina i širina neznatno mijenjaju. Jednako tako, uspoređujući tablice 4.2. – 4.4. vidi se da najveće promjene prilikom vlaženja i otpuštanju mehaničke vode nastaju upravo kod veće debljine uzorka.



**Slika 4.11.** Promjena mase uzorka 1 za vrijeme sušenja

Iz slike 4.11. vidimo da se masa u odnosu na početnu eksponencijalno smanjuje.

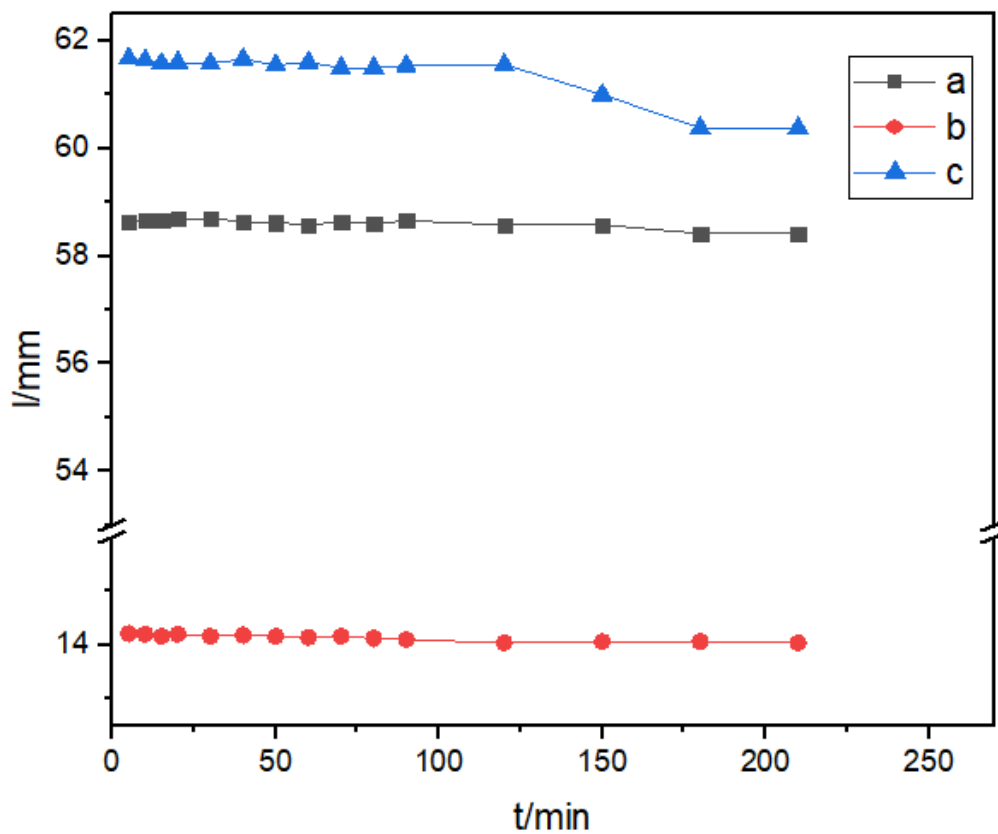
U tablici 4.5. prikazane su dimenzije i mase za uzorak 2 za vrijeme i na kraju perioda sušenja u sušioniku na 60 °C.

**Tablica 4.5.** Dimenzije i mase za uzorak 2 za vrijeme sušenja:

$t/\text{min}$	$m/\text{g}$	$a/\text{mm}$	$b/\text{mm}$	$c/\text{mm}$
5	32,07	58,64	14,21	61,68
10	31,69	58,66	14,20	61,64
15	31,31	58,66	14,16	61,58
20	31,02	58,70	14,20	61,60
30	30,56	58,70	14,16	61,58
40	30,01	58,64	14,18	61,66
50	29,58	58,62	14,16	61,55

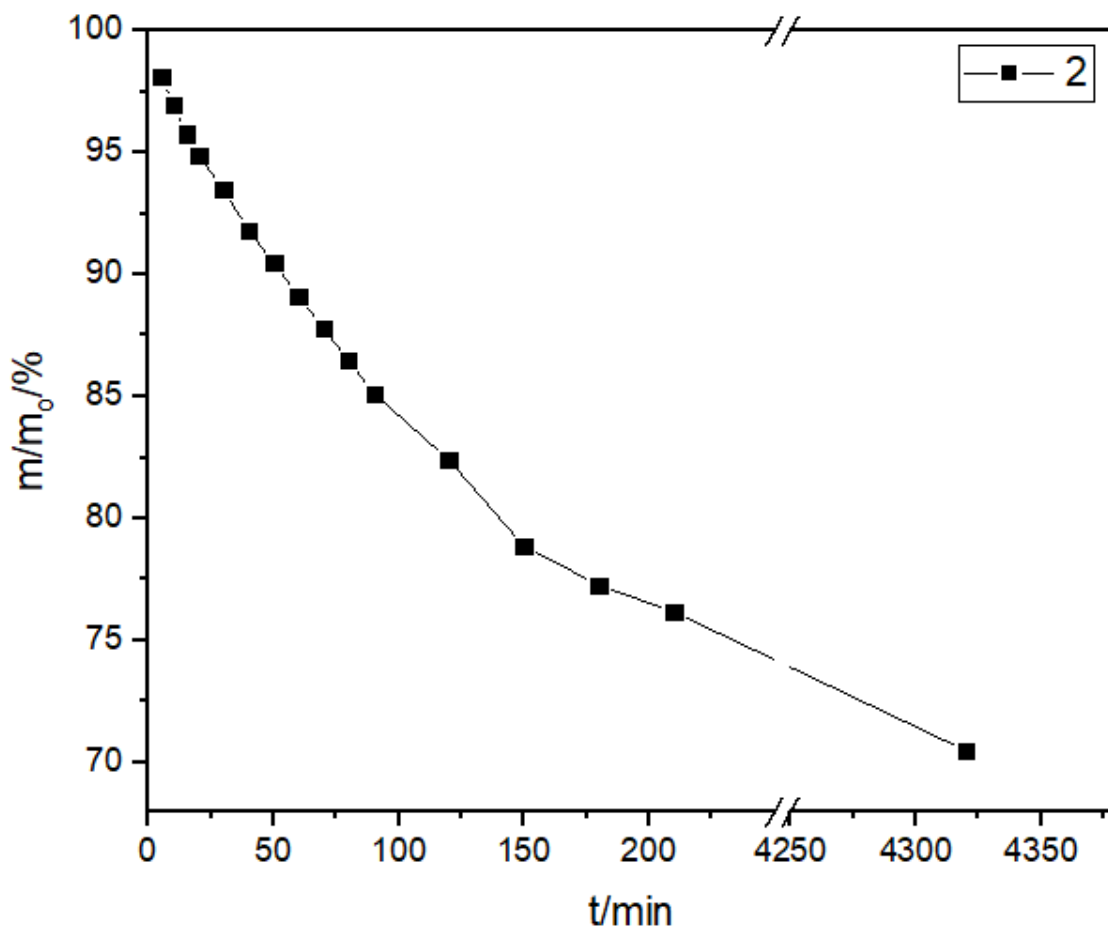
60	29,13	58,58	14,14	61,60
70	28,70	58,64	14,16	61,50
80	28,27	58,60	14,12	61,50
90	27,83	58,66	14,10	61,54
120	26,94	58,58	14,04	61,56
150	25,78	58,58	14,06	61,00
180	25,26	58,42	14,06	60,38
210	24,90	58,42	14,04	60,38
	23,04		13,68	

Prema tablici 4.5. napravljni su grafički prikazi kojima je iskazana promjena mase i dimenzija u periodu sušenja.



Slika 4.12. Grafički prikaz ovisnosti dimenzija o vremenu sušenja za uzorak 2





**Slika 4.13.** Promjena mase uzorka 2 za vrijeme sušenja

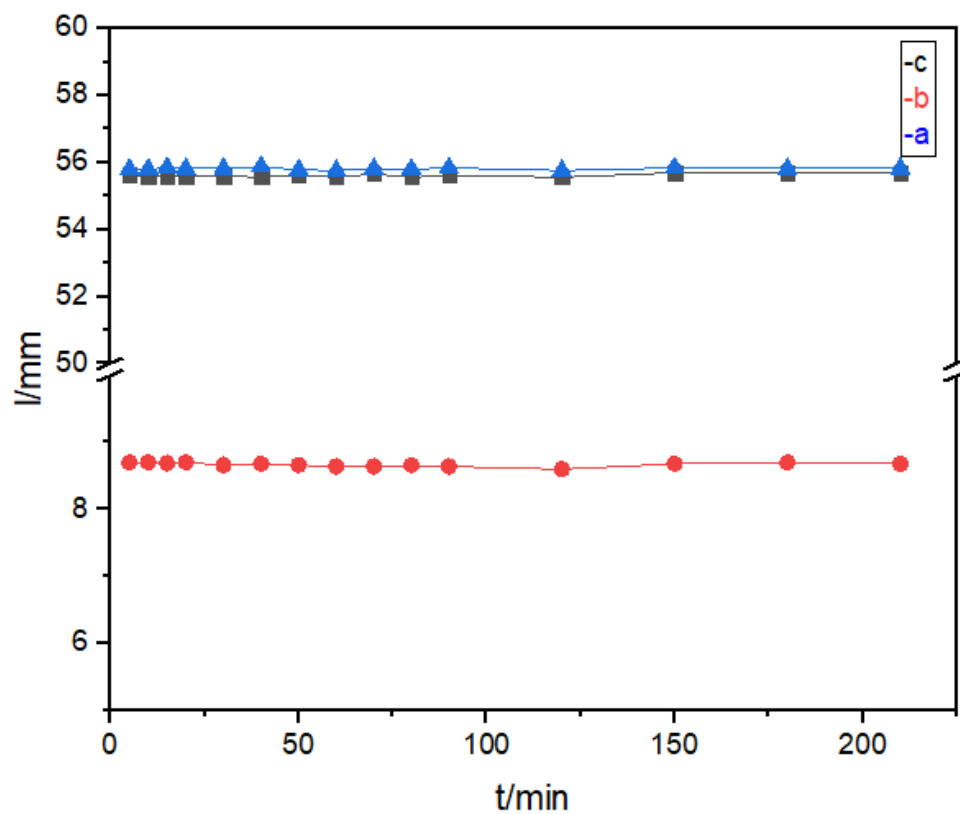
U tablici 4.6. prikazane su dimenzije i mase za uzorak 3 za vrijeme i na kraju perioda sušenja u sušioniku na 60 °C.

**Tablica 4.6.** Dimenzije i mase za uzorak 3 za vrijeme sušenja:

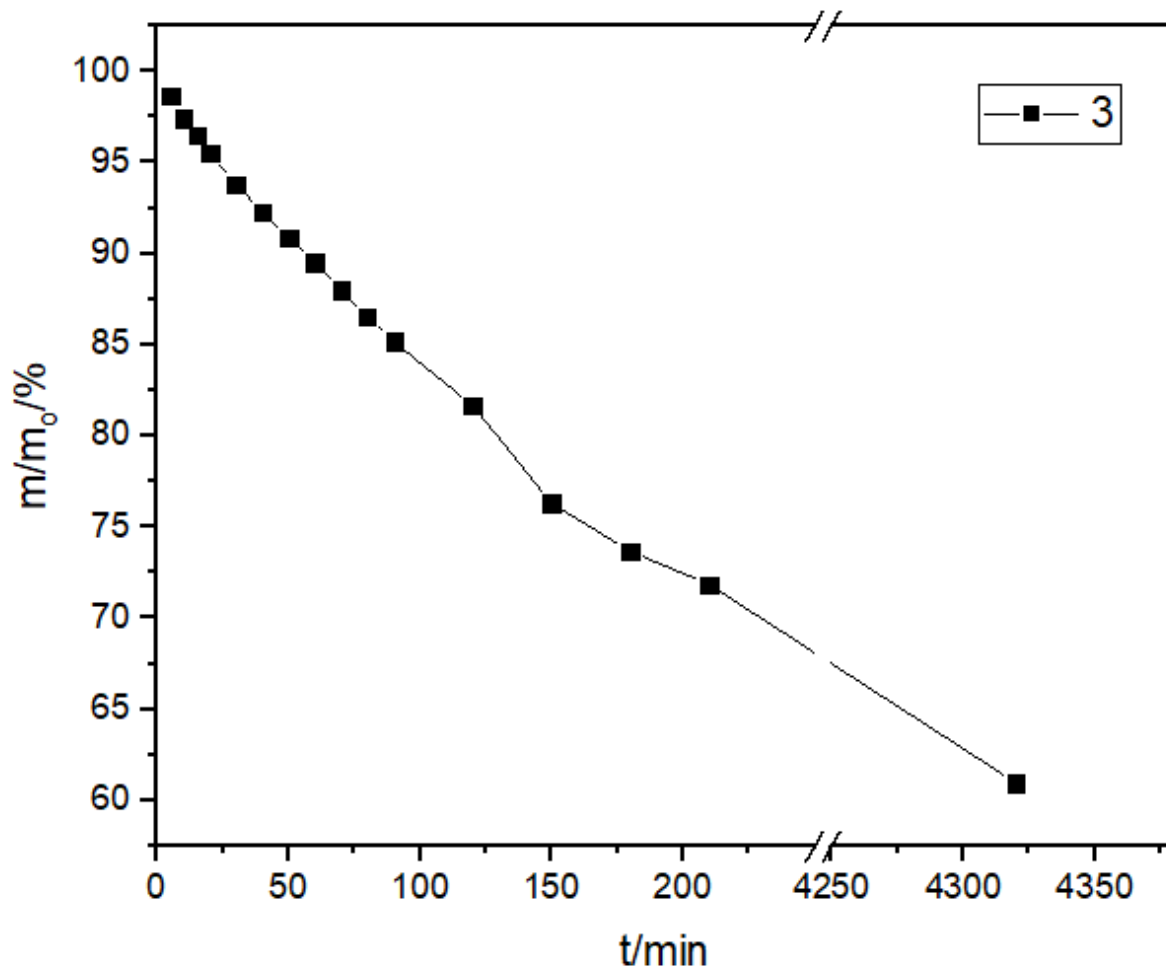
<i>t/min</i>	<i>m/g</i>	<i>a/mm</i>	<i>b/mm</i>	<i>c/mm</i>
5	26,48	55,80	8,70	55,64
10	26,15	55,80	8,70	55,58
15	25,89	55,84	8,69	55,60
20	25,63	55,82	8,70	55,58
30	25,18	55,82	8,66	55,60
40	24,77	55,88	8,68	55,56
50	24,39	55,78	8,66	55,62

60	24,02	55,76	8,64	55,56
70	23,62	55,82	8,64	55,66
80	23,22	55,80	8,66	55,56
90	22,86	55,84	8,64	55,62
120	21,92	55,76	8,60	55,56
150	20,48	55,84	8,68	55,70
180	19,77	55,82	8,70	55,70
210	19,28	55,82	8,68	55,70
4320	16,36		8,16	

Prema tablici 4.6. napravljeni su grafički prikazi kojima je iskazana promjena mase i dimenzija u periodu sušenja od 72 h.

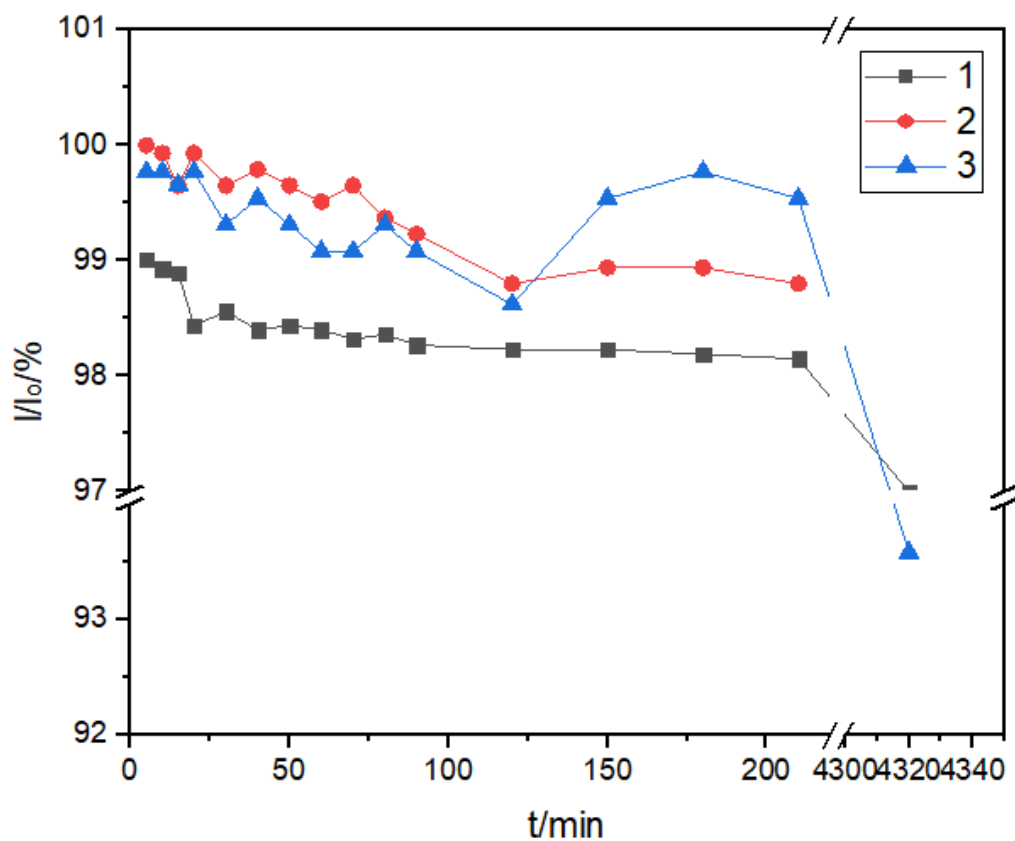


**Slika 4.14.** Grafički prikaz ovisnosti dimenzija o vremenu sušenja za uzorak 3



30	98,56	99,65	99,31
40	98,40	99,79	99,54
50	98,44	99,65	99,31
60	98,40	99,51	99,08
70	98,32	99,65	99,08
80	98,36	99,37	99,31
90	98,27	99,23	99,08
120	98,23	98,80	98,62
150	98,23	98,94	99,54
180	98,19	98,94	99,77
210	98,15	98,80	99,54
4320	97,00	96,27	93,58

Pomoću vrijednosti promjene debljine za sva tri uzorka prikazanih u tablici 4.7. grafički je prikazana usporedba promjene debljine za sva tri korištena uzorka.



Slika 4.16. Promjena debljine za tri uzorka

Prema grafičkom prikazu na slici 4.16. najveća promjena, odnosno smanjenje debljine odvija se kod kompozitnog uzorka 3.

U tablici 4.8. prikazane su razlike početnih i konačnih dimenzija za tri uzorka, kako bi se usporedili sa mjerenjima tvrtke Fragmat H d.o.o.

**Tablica 4.8.** Dimenzijska stabilnost kompozitnih uzoraka

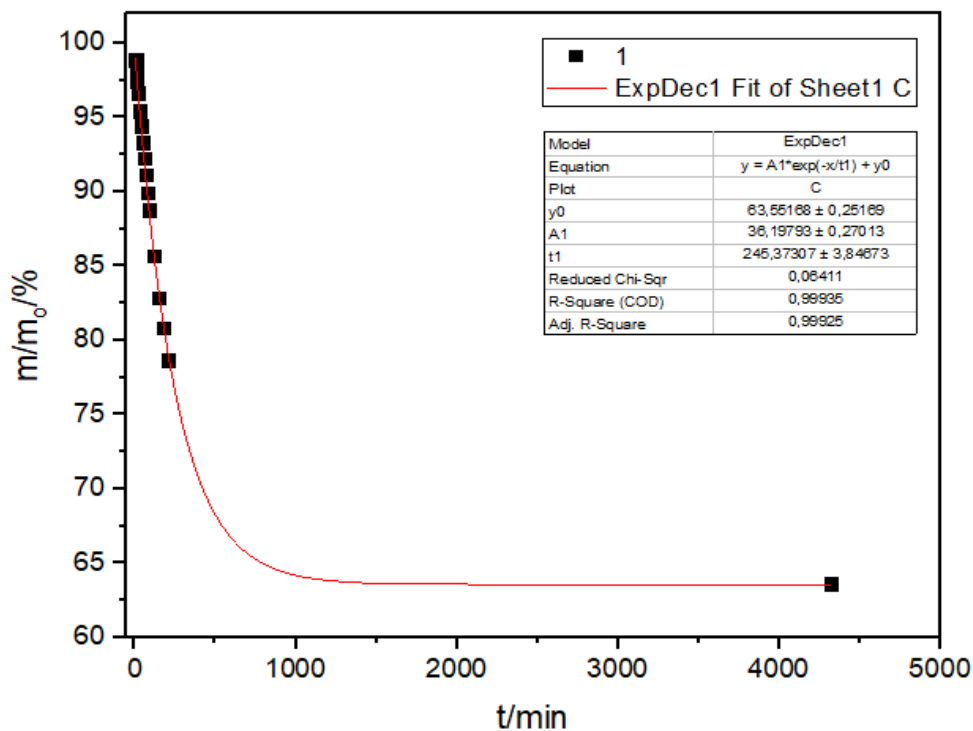
		Početne vrijednosti/mm	Konačne vrijednosti/mm	Razlika/%
Uzorak 1	<i>a</i>	84,66	84,61	0,06
	<i>b</i>	24,34	23,44	3,25
	<i>c</i>	81,28	81,20	0,10
Uzorak 2	<i>a</i>	58,66	58,42	0,41
	<i>b</i>	14,21	13,68	3,73
	<i>c</i>	61,57	60,38	1,93
Uzorak 3	<i>a</i>	55,78	55,82	-0,07
	<i>b</i>	8,72	8,16	6,42
	<i>c</i>	55,74	55,70	0,07

Ukoliko rezultate postotka smanjenja dimenzija u odnosu na početne za sve kompozite usporedimo sa mjerenjima provedenima u tvrtki Fragmat H d.o.o., čiji je primjer prikazan na slici 4.17., vidljivo je da je trend smanjenja dimenzija isti, odnosno da se u postotku najviše, u odnosu na početnu vrijednost, smanji najviše debljina uzoraka.

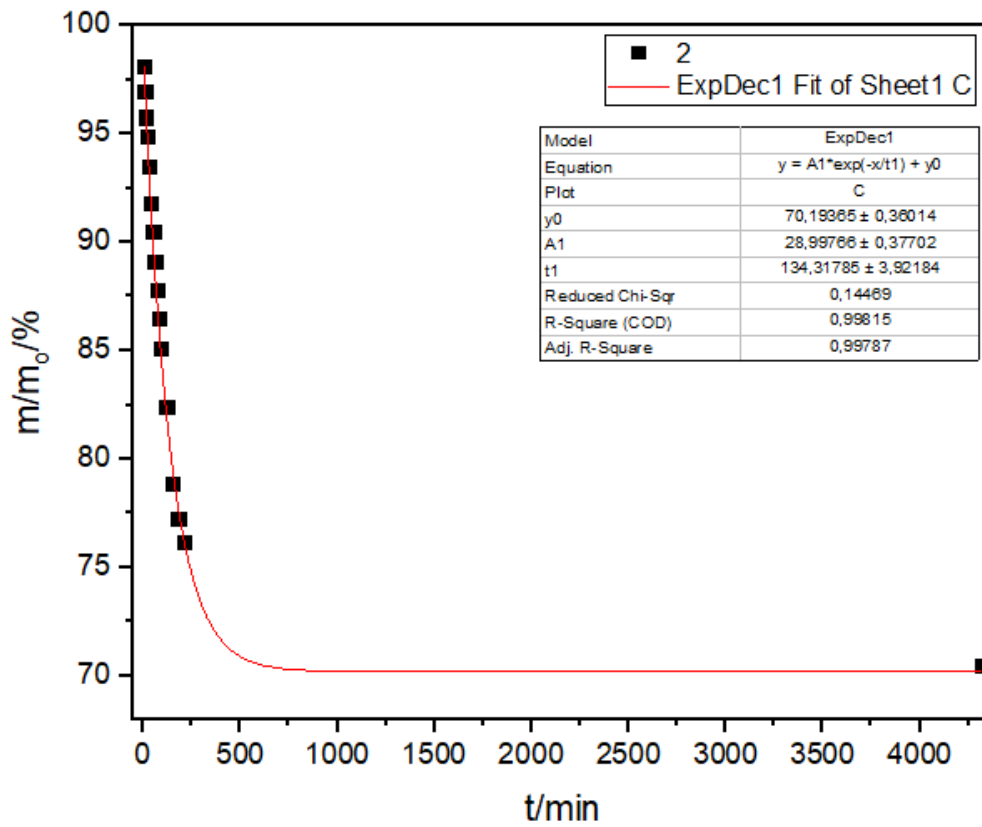
		A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R
1	FRAGMAT																		
2																			
3																			
4	Sveti Križ Začretje, Donja Pačetina 1a																		
5			<b>DIMENZIJSKA STABILNOST</b>																
6			HRN EN:1604:2013, (700C za 48 sati)																
8			DUŽINA				ŠIRINA				DEBLJINA								
9	Podaci o uzorku		Broj	Početna	Konačna	Razlika	DS(70,-)	Broj	Početna	Konačna	Razlika	DS(70,-)	Broj	Početna	Konačna	Razlika	DS(70,-)		
10				l0	lt	lt - l0	Δεl		b0	bt	bt - b0	Δεb		d0	dt	dt - d0	Δεd		
11				mm	mm	mm	%		mm	mm	mm	%		mm	mm	mm	%		
12			1.	201.00	200.00	-1.00	-0.498	1.	201.00	201.00	0.00	0.000	1.	26.10	25.90	-0.20	-0.766		
13				200.00	200.00	0.00	0.000		201.00	200.00	-1.00	-0.498		25.10	25.00	-0.10	-0.398		
14				201.00	200.00	-1.00	-0.498		201.00	200.00	-1.00	-0.498		26.30	26.10	-0.20	-0.760		
15				201.00	200.00	-1.00	-0.498		200.00	200.00	0.00	0.000	1.	26.15	25.95	-0.20	-0.765		
16	Naziv proizvođača	DRVOLIT AKUSTIK DA A2 E.R.1.1	2.	201.00	200.00	-1.00	-0.498	2.	200.00	200.00	0.00	0.000		25.90	25.65	-0.25	-0.965		
17	Naziv debljina	25mm		201.00	200.00	-1.00	-0.498		201.00	200.00	-1.00	-0.498		25.60	25.55	-0.05	-0.195		
18	Širina	f		201.00	200.00	-1.00	-0.498		201.00	200.00	-1.00	-0.498		26.10	26.05	-0.05	-0.192		
19	Datum izrade	15.07.2022.	3.	201.00	200.00	-1.00	-0.498	3.	201.00	200.00	-1.00	-0.498	2.	26.00	26.00	0.00	0.000		
20	Datum mjerenja	03.08.2022.		201.00	200.00	-1.00	-0.498		200.00	200.00	0.00	0.000		26.10	25.85	-0.25	-0.958		
21	Kontrolor	Zubić Helena												26.20	26.15	-0.05	-0.191		
22														25.10	25.05	-0.05	-0.199		
23														25.05	25.00	-0.05	-0.200		
24														26.00	25.95	-0.05	-0.192		
25														25.55	25.30	-0.25	-0.978		
26														25.85	25.65	-0.20	-0.774		
27		Srednja vrijednost				88888888	-0.442				55555555	-0.276					-0.13	-0.502	

Slika 4.17. Dimenzijska stabilnost drvocementnog kompozita provedena u tvrtki Fragmat H d.o.o.®

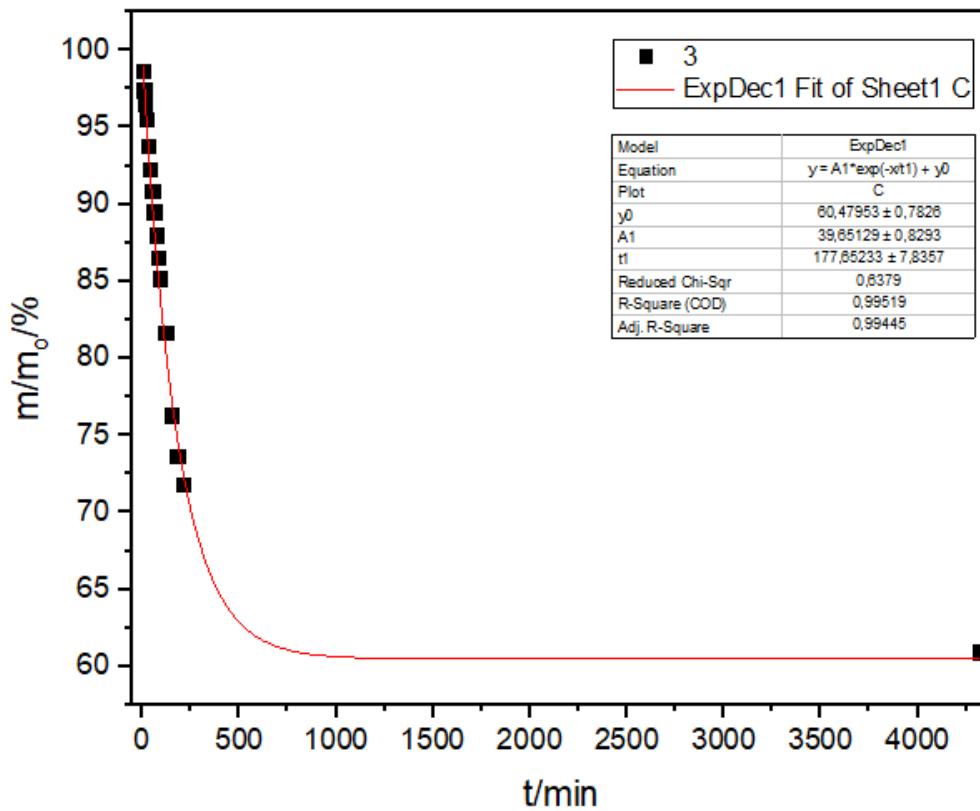
Zatim su rađeni modeli promjene mase za sva tri uzorka prikazani na slikama 4.18 – 4.20.



Slika 4.18. Model smanjenja mase za uzorak 1



Slika 4.19. Model smanjenja mase za uzorak 2



Slika 4.20. Model smanjenja mase za uzorak 3

Promjena mase odvija se prema modelu ExpDec1 čija jednadžba glasi:

$$y = A_1 * e^{(-x/t_1)} + y_0 \quad 4.1.$$

Gdje  $y$  predstavlja masu uzorka u vremenu,  $A_1$  je konstanta koja je različita za sva tri uzorka.  $y_0$  je vrijednost mase uzorka nakon otpuštanja mehaničke vode, a  $t_1$ , odnosno  $\tau$  je vremenska konstanta koja je također različita za sva tri uzorka, a predstavlja vrijeme koje je potrebno da bi uzorak postigao 63,2% svoje konačne (asimptotske) vrijednosti.

Sama jednadžba vrijedi za promjene mase sva tri uzorka kompozita. Dok vrijednosti  $\tau$  prikazane u tablici 4.9. zajedno sa dimenzijama uzorka kako bi se ustanovila povezanost vrijednosti vremenske konstante.

**Tablica 4.9.** Tablični prikaz vremenskih konstanti i početnih debljina kompozitnih uzoraka.

	$\tau$	$b/mm$
Uzorak 1	245,37	24,34
Uzorak 2	134,32	14,21
Uzorak 3	177,65	8,72

Vidimo da je kod uzorka 1 vremenska konstanta najveća, a razlog tome je što je zbog veće početne debljine uzorka potrebno više vremena kako bi se vodena para iz uzorka oslobodila. Kod uzorka 3 vidi se da je vremenska konstanta manja u odnosu na uzorka 1, a razlog tome je što vodena para mora proći manji put kroz uzorak (manja početna debljina) kako bi se otpustila iz uzorka. Za uzorak 2 vremenska konstanta je očekivano manja od uzorka 1, ali je manja i od uzorka 3, što može biti rezultat različitog kemijskog sastava kompozita, upravo zato što se u ovom kompozitnom uzorku koristi bijeli portland cement.

Konačno u tablici 4.10. uspoređene su vrijednosti količine apsorbirane vode za sva tri uzorka.

**Tablica 4.10.** Količine apsorbirane vode uzorka:

	$m$ (vlaženog uzorka)/g	$m$ (potpuno suhog uzorka)/g	apsorbirana vlaga/%
Uzorak 1	93,41	52,41	43,89
Uzorak 2	34,18	23,04	32,59
Uzorak 3	27,15	16,36	39,74



Iz ove tablice očitava se da s većom masom (većih početnim dimenzijama kompozita) kompozit može apsorbirati veću količinu vode. Kod uzorka 2 pretpostavlja se da je postotak moguće apsorbirane vode manji zbog razlika u kemijskom sastavu kompozita s obzirom da je riječ o bijelom portland cementu.

## 5. ZAKLJUČAK

Određivanjem temperature rosišta dobiveno je slaganje među eksperimentalno dobivenim vrijednostima  $RH$  i onih očitanih higrometrom. Da se zaključiti da je aparatura prikazana na slikama 3.1. i 3.2. pravilno konstruirana te da je pomoću nje moguće valjano odrediti relativnu vlažnost zraka. Dobiveni rezultat relativne vlažnosti iznosi 57,48%, dok je očitani na higrometru 57,4%. Apsolutna pogreška mjerenja je 0,08, dok je relativna pogreška 0,14% što potvrđuje veliku točnost mjerenja.

Na osnovi rezultata mjerenja promjena dimenzija i mase drvocementnog kompozita mogu se izvući sljedeći zaključci:

Najveća promjena dimenzije za svaki uzorak očituje se kod debljine drvocementnog kompozita prema tablici 4.8. i grafičkih prikazima na slikama 4.10., 4.12. i 4.14. što se slaže sa mjerenjima tvrtke Fragmat H d.o.o. Sama debljina najvažnija je dimenzija u drvocementnom kompozitu iz razloga što čak i najmanja promjena debljine direktno utječe na mnoga svojstva drvocementnog kompozita, a najveći utjecaj ima na mehanička svojstva gdje čak i mikrometarsko povećanje debljine kompozita smanjuje modul elastičnosti kompozita za vrijednost  $b^3$  prema ASTM standardu<sup>[18]</sup>.

Usporedbom promjene debljine za tri uzorka najveća je promjena debljine kod uzorka 3, kako je vidljivo na grafičkom prikazu na slici 4.16.

Smanjenje mase uzoraka najsporije je kod najvećeg uzorka, odnosno uzorka 1, što je vidljivo iz tablice 4.9., s obzirom da je uzorku 1 potrebno 245,37 minuta kako bi postigao 63,2% konačne vrijednosti mase sušenja.

## 6. LITERATURA

1. F.C. Jorge, C. Pereira, J.M.F. Ferreira, Wood-cement composites: A review, *Holz Roh Werkst*, 62 (2004) 370-377.
2. S.N. Dolomatov, P.G. Kolesnikov, Wood-Cement Composite and its Reinforcement with Wooden Bars, *Key Engineering Materials*, 910 (2022) 982-987.
3. Šipušić J., Uvod u građevne materijale, Nastavni materijali, Fakultet kemijskog inženjerstva i tehnologije, Zagreb.
4. Macan J., Kompozitni materijali, Interna skripta, Fakultet kemijskog inženjerstva i tehnologije, (2020) Zagreb.
5. Y. Shao, S. Moras, N. Ulkem, G. Kubes, Wood fibre – cement composites by extrusion, *Canadian Journal of Civil Engineering*, 27 (2011) 543-552.
6. Rukavina V., Drvna vlakna u cementnom kompozitu, Završni rad, Fakultet kemijskog inženjerstva, (2016) Zagreb.
7. URL: <https://www.fragmat.hr/gradzevni-program/proizvodi/kombi-ploce/ploce/446-drvolit> (pristup 25. lipnja 2023.)
8. Serdarević N.L., Utjecaj kemijske obrade drvene vune na zapaljivost cementnog kompozita, diplomski rad, Fakultet kemijskog inženjerstva i tehnologije, (2016) Zagreb.
9. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1359836815005090> (pristup: 15. rujna 2023)
10. Y.M. Wei, Y.G. Zhou, B. Tomita, Study of hydration behavior of wood cement-based composite II: effect of chemical additives on the hydration characteristics and strenghts of wood-cement composites, 46 (2000) 444–451.
11. Vrbos N., Nastavni materijali, Fakultet kemijskog inženjerstva i tehnologije, (2021) Zagreb.
12. URL: <https://natural-resources.canada.ca/our-natural-resources/forests/industry-and-trade/forest-products-applications/taxonomy-wood-products/wood-cement-composites/15857> (pristup: 2. rujna 2023)
13. M. Akram, Atmospheric Humidity and Precipitation, Uttarakhand Open University, Haldwani (Nainital) Uttarakhand, India.
14. URL: <http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/Kinetic/relhum.html> (pristup: 15. rujna 2023)

15. A. Amengual, V. Homar, R. Romero, H.E. Brooks, C. Ramis, M. Gordaliza, S. Alonso, Projections of heat waves with high impact on human health in Europe, *Global and Planetary Change*, 119 (2014) 71-84.
16. E.M. Yahia, Postharvest biology and technology of tropical and subtropical fruits, *Mangosteen to sapote*, 4 (2011).
17. URL: <https://www.weather.gov/lmk/humidity> (pristup: 20. rujna 2023.)
18. ASTM C 1259, Standard Test Method for Dynamic Young's Modulus, Shear Modulus, and Poisson's Ratio for Advanced Ceramics by Impulse Excitation of Vibration.

