

UNIVERZA V LJUBLJANI
BIOTEHNIŠKA FAKULTETA
ODDELEK ZA LESARSTVO

Boris ŠKODA

**DIELEKTRIČNE LASTNOSTI UTRJENIH
LEPILNIH FILMOV**

DIPLOMSKO DELO

Visokošolski strokovni študij

Ljubljana, 2008

UNIVERZA V LJUBLJANI
BIOTEHNIŠKA FAKULTETA
ODDELEK ZA LESARSTVO

Boris ŠKODA

**DIELEKTRIČNE LASTNOSTI UTRJENIH LEPILNIH
FILMOV**

DIPLOMSKO DELO
Visokošolski strokovni študij

**DIELECTRIC PROPERTIES OF CURED ADHESIVES
FILMS**

GRADUATION THESIS
Higher professional studies

Ljubljana, 2008

Popravki:

Diplomsko delo je zaključek visokošolskega strokovnega študija lesarstva. Opravljeno je bilo na Katedri za žagarstvo in lesna tvoriva na Oddelku za lesarstvo Biotehniške fakultete Univerze v Ljubljani, kjer so bile opravljene vse meritve v laboratoriju za preizkušanje lesnih tvoriv.

Senat Oddelka za lesarstvo je za mentorja diplomskega dela imenoval prof. dr. Milana Šerneka, za recenzenta pa prof. dr. Jožeta Resnika.

Komisija za oceno in zagovor:

Predsednik:

Član:

Član:

Datum zagovora:

Naloga je rezultat lastnega raziskovalnega dela.

KLJUČNA DOKUMENTACIJSKA INFORMACIJA

- ŠD Vs
- DK UDK 630*824.875
- KG lepljenje/dielektrične lastnosti/utrjeni lepilni filmi/frekvenca
- AV ŠKODA, Boris
- SA ŠERNEK, Milan (mentor)/RESNIK, Jože (recenzent)
- KZ SI-1000 Ljubljana; Rožna dolina, cesta VIII/34
- ZA Univerza v Ljubljani, Biotehniška fakulteta, Oddelek za lesarstvo
- LI 2008
- IN DIELEKTRIČNE LASTNOSTI UTRJENIH LEPILNIH FILMOV
- TD Diplomsko delo (visokošolski strokovni študij)
- OP IX, 36 str., 6 pregl., 21 sl., 13 vir., 4 pril.
- IJ sl
- JI sl/en
- AI Proučevali smo dielektrične lastnosti utrjenih lepilnih filmov v električnih poljih različnih visokih frekvenc (0,079 do 25,119 MHz) in pri 2 različnih vlažnostih utrjenih lepilnih filmov. Meritve smo izvedli za 2 vrsti polimerizacijskih lepil, namenjenih za visokofrekvenčno lepljenje. Poleg tekočih lepil smo pripravili tudi utrjene lepilne filme, ki smo jim izmerili dielektrične lastnosti: dielektrično vrednost in tangens izgubnega kota. Meritve smo opravili z merilno napravo Agilent 4285A Precision LCR Meter s pripadajočo sondo. Ugotovili smo, da je dielektrična vrednost utrjenih lepilnih filmov nekajkrat nižja (okoli 57 do 45 krat) kot pri tekočih lepilih, in da dielektrična vrednost utrjenih lepilnih filmov, proučevanih takoj po odvzemu iz lepilnega sloja, z naraščanjem frekvence pada, medtem ko je ta pri absolutno suhih lepilnih filmih približno konstantna. Tangens izgubnega kota pri obeh vrstah lepilnih filmov počasi pada do frekvence 5,012 MHz, nato pa z naraščanjem frekvence raste.

KEY WORDS DOCUMENTATION

- DN Vs
- DC UDC 630*824.875
- CX gluing/dielectric properties/cured adhesive films/frequency
- AU ŠKODA, Boris
- AA ŠERNEK, Milan (supervisor), RESNIK, Jože (reviewer)
- PP SI-1000 Ljubljana; Rožna dolina, c. VIII/34
- PB University of Ljubljana, Biotechnical Faculty, Department of Wood Science and Technology
- PY 2008
- TI DIELECTRIC PROPERTIES OF CURED ADHESIVE FILMS
- DT Graduation Thesis (Higher professional studies)
- NO IX, 36 p., 6 tab., 21 fig., 13 ref., 4 ann.
- LA sl
- AL sl/en
- AB In electrical fields of various high frequencies (from 0.079 MHz to 25.119 MHz), dielectric properties of cured adhesive films with 2 different moisture contents were studied. 2 different types of polymer adhesives meant for high frequency gluing were measured. Dielectric properties, dielectric value and loss angle tangens, were measured on Agilent 4285a Precision LCR Meter apparatus with special probes. Results indicate that dielectric value of cured adhesive films is significantly lower (from 57 to 45 times) than that of the liquid adhesives. It was also noted that dielectric values for cured films taken directly from adhesive layers decrease in relation to increasing frequency, while the values for completely dried samples are more or less constant. Similarly, a decrease of loss angle tangens was observed for both types of adhesive films for frequencies up to 5.012 MHz. After that a rapid growth was observed.

KAZALO VSEBINE

KLJUČNA DOKUMENTACIJSKA INFORMACIJA	III
KEY WORDS DOCUMENTATION	IV
KAZALO VSEBINE	V
KAZALO SLIK	VII
KAZALO PREGLEDNIC	VIII
KAZALO PRILOG	IX
1 UVOD	1
1.1 OPREDELITEV PROBLEMA.....	2
1.2 DELOVNE HIPOTEZE.....	2
1.3 CILJ DIPLOMSKEGA DELA.....	2
2 PREGLED OBJAV	3
2.1 SPLOŠNO O SEGREVANJU LESA IN LEPILA.....	3
2.1.1 Toplotna prevodnost snovi.....	3
2.1.2 Specifična toplota.....	4
2.2 KAPACITIVNOST.....	4
2.3 ELEKTRIČNE LASTNOSTI SNOVI IN MATERIALOV.....	5
2.3.1 Dielektrična vrednost.....	5
2.3.2 Izgubni faktor v dielektriku.....	6
2.3.3 Faktor intenzivnosti segrevanja.....	7
2.4 SEGREVANJE LEPILNEGA SPOJA.....	7
2.4.1 Lepila za visokofrekvenčno lepljenje.....	9
2.4.2 Vrste lepil.....	9
2.4.2.1 Polimerizacijska lepila.....	10
2.4.2.3 Nastanek lepilnega spoja.....	11
2.5 PREGLED RELAVANTNE LITERATURE.....	13
3 MATERIAL IN METODE	15
3.1 ZASNOVA RAZISKAVE.....	15
3.2 MATERIAL.....	16
3.2.1 Lepilo.....	16
3.2.2 Les.....	17
3.3 METODE.....	17
3.3.1 Priprava utrjenih lepilnih filmov.....	17
3.4 IZVEDBA IN POTEK MERITEV.....	18
3.4.1 Merjenje utrjenih lepilnih filmov.....	18
3.4.2 Potek meritve.....	20
3.5 PRIPRAVA SONDE ZA MERJENJE DIELEKTRIČNIH LASTNOSTI TEKOČIN.....	21
3.5.1 Priprava načrta za izvedbo meritev.....	21
3.5.2 Merjenje dielektričnih lastnosti tekočih lepil.....	21
4 REZULTATI	23
4.1 REZULTATI MERITEV UTRJENIH LEPILNIH FILMOV.....	23
4.1.1 Rezultati meritev PVA lepila.....	23
4.2 REZULTATI MERITEV TEKOČIH LEPIL.....	27
4.2.1 Rezultati meritev PVA lepila.....	27

4.3 DELEŽ SUHE SNOVI	30
5 RAZPRAVA IN SKLEPI	30
5.1 DIELEKTRIČNE LASTNOSTI UTRJENIH LEPIL	31
5.1.1 Dielektrična vrednost	31
5.1.2 Izgubni kot	32
5.2 PRIMERJAVA TEKOČIH IN UTRJENIH LEPIL.....	32
5.2.1 Primerjava rezultatov	33
5.3 SKLEPI.....	33
6 POVZETEK	35
7 VIRI	36
ZAHVALA	
PRILOGE	

KAZALO SLIK

Slika 1: Shema ploščnega kondenzatorja

Slika 2: Toplotni profil skozi presek lesa pri klasičnem (levo) in VF (desno) segrevanju

Slika 3: Odvisnost časa utrjevanja urea-formaldehidnega lepila od vsebnosti suhe snovi

Slika 4: Linearno povezana molekula PVA lepila

Slika 5: Zgradba lepilnega spoja

Slika 6: CNC rezkar Rover B4

Slika 7: Lepljenec z utori za pripravo lepilnih filmov

Slika 8: Povezava merilne naprave Agilent 4285A Precision in LCR Meter in računalnika HP z računalniškim programom Agilent VEE Pro 7.0

Slika 9: Sonda Agilent 16451B Dielectric Test Fixture za merjenje dielektričnih lastnosti trdnih snovi

Slika 10: Dielektrična vrednost lepila D3 na izbranih frekvencah

Slika 11: Tangens izgubnega kota za lepilo D3 na izbranih frekvencah

Slika 12: Dielektrični faktor izgub za lepilo D3 na izbranih frekvencah

Slika 13: Dielektrična vrednost za lepilo EZ na izbranih frekvencah

Slika 14: Tangens izgubnega kota za lepilo EZ na izbranih frekvencah

Slika 15: Dielektrični faktor izgub za lepilo EZ na izbranih frekvencah

Slika 16: Dielektrična vrednost za lepili EZ in D3 na izbranih frekvencah

Slika 17: Tangens izgubnega kota za lepilo EZ in D3 pri izbranih frekvencah

Slika 18: Dielektrični faktor izgub za lepilo EZ in D3 pri izbranih frekvencah

Slika 19: Dielektrične vrednosti za utrjeni lepili EZ in D3 na izbranih frekvencah

Slika 20: Tangens izgubnega kota za utrjeni lepili EZ in D3 pri izbranih frekvencah

Slika 21: Dielektrične vrednosti za tekoči in utrjeni lepili D3 in EZ na izbrani frekvenci 6,310 MHz

KAZALO PREGLEDNIC

Preglednica 1: Dielektrične vrednosti nekaterih snovi

Preglednica 2: Povprečne vrednosti ϵ , $\tan \delta$ in ϵ'' za utrjeno lepilo D3

Preglednica 3: Povprečne vrednosti ϵ , $\tan \delta$ in ϵ'' za utrjeno lepilo EZ

Preglednica 4: Povprečne vrednosti ϵ , $\tan \delta$ za tekoči lepili D3 in EZ

Preglednica 5: Delež suhe snovi

Preglednica 6: Dielektrične vrednosti tekočih in utrjenih lepil na frekvenci 6,310 MHz

KAZALO PRILOG

Priloga A: Povprečne vrednosti dielektričnih lastnosti utrjenih lepilnih filmov D3V na izbranih frekvencah

Priloga B: Povprečne vrednosti dielektričnih lastnosti utrjenih lepilnih filmov EZV na izbranih frekvencah

Priloga C: Povprečne vrednosti dielektričnih lastnosti tekočih lepil D3 na izbranih frekvencah

Priloga D: Povprečne vrednosti dielektričnih lastnosti tekočih lepil EZ na izbranih frekvencah

1 UVOD

V tehnologiji obdelave in predelave lesa je potreba po segrevanju pogosta. S segrevanjem lesa se srečujemo že na začetku predelave lesa pri tehničnem sušenju, parjenju, krivljenju in lepljenju lesa. Pri lepljenju lesa želimo s segrevanjem pospešiti proces utrjevanja lepila, vendar lahko segrevanje na lepljenec vpliva negativno, ker povzroči temperaturni in vlažnostni gradient, kar se kasneje odraža v obliki različnih napetosti in napak v lepljenem proizvodu.

Hitrost prehoda toplote iz plošč stiskalnice na lepljenec je zelo pomemben tehnološko-ekonomski dejavnik. Tehnološki dejavnik zajema sam začetek poteka in konec lepljenja ter kakovost utrditve lepila. Ekonomski vidik pa zajema porabo energije za določeno delo, kapaciteto stiskalnice ter čas, ki je potreben za sam prehod toplote. Uporaba visoke frekvence za utrjevanje lepilnih filmov predstavlja prednost zaradi možnosti selektivnega segrevanja. Tekoče lepilo ima namreč mnogo boljše dielektrične lastnosti kot pa les, zato se v polju visoke frekvence hitreje segreva kot les. Visokofrekvenčni (VF) način lepljenja je primeren za lepljenje debelejših elementov ter lepljenje nepravilnih oblik, ki se težko lepijo na klasičen način.

V praksi se uporabljata dva načina VF segrevanja, in sicer induktivno ter kapacitivno segrevanje. Induktivno segrevanje deluje v območju nekaj 10.000 Hz in je primerno za električne prevodnike. Kapacitivno segrevanje pa deluje na območju nekaj MHz in je primerno za dielektrike, med katere spadata tudi les in lepilo. Frekvence, ki se uporabljajo za VF segrevanje, lahko razdelimo v tri skupine (Resnik in sod., 1995):

nizka frekvenca: 50 Hz (omrežna frekvenca),

srednja frekvenca: 500 Hz–20 KHz,

visoka frekvenca: 100 KHz–100 MHz.

Ko govorimo o VF segrevanju lesa, mislimo na dielektrično segrevanje, ki natančno definira segrevanje dielektrika, ko je ta v VF električnem kondenzatorskem polju.

1.1 OPREDELITEV PROBLEMA

Pri VF lepljenju lesa je nujno potrebno poznati dielektrične lastnosti lesa in lepila, na osnovi katerih lahko izračunamo intenzivnost segrevanja in potreben čas stiskanja. Dielektrične lastnosti lesa so dobro raziskane, medtem ko o dielektričnih lastnosti lepila vemo menj. Glede na to, da se dielektrične lastnosti lepila skozi proces utrjevanja spreminjajo, je z vidika uspešnega VF lepljenja potrebno poznati vsaj začetne in pa končne dielektrične vrednosti lepila. Dielektrično vrednost in tangens izgubnega kota je možno relativno enostavno izmeriti tekočemu lepilu. Težava pa nastane, ko je potrebno pripraviti utrjeni lepilni film, ki bi mu lahko izmerili dielektrične vrednosti. Lepilo namreč pri lepljenju lesa tvori lepilni spoj, ki ima drugačne lastnosti, kot če je lepilo utrjeno v obliki filma brez prisotnosti lesa.

1.2 DELOVNE HIPOTEZE

Različna lepila imajo različne dielektrične lastnosti, kar je odvisno predvsem od vrste osnovnega polimera v lepilu in deleža suhe snovi. Na dielektrične lastnosti vplivajo tudi različni dodatki in količine teh dodatkov. Predvidevamo, da je dielektrična vrednost utrjenega lepilnega filma nekajkrat manjša od dielektrične vrednosti tekočega lepila, saj se med utrjevanjem lepila izloči večina vode, ki ima visoko dielektrično vrednost. Prav tako se zaradi kemijske reakcije med utrjevanjem lepila zmanjšuje število dipolov, kar vpliva na zmanjšanje dielektrične vrednosti. Ker se dielektrične lastnosti lepila med utrjevanjem spreminjajo, lahko to bistveno vpliva na intenzivnost VF segrevanja v končni fazi lepljenja.

1.3 CILJ DIPLOMSKEGA DELA

Osnovni cilj diplomskega dela je proučiti dielektrične lastnosti dveh tekočih in utrjenih lepil za VF lepljenje. Poseben raziskovalni izziv v diplomskem delu je razviti postopek za pripravo utrjenih lepilnih filmov, ki bodo primerni za merjenje dielektričnih lastnosti. Nato bomo izmerili dielektrične lastnosti utrjenih lepil in jih primerjali z dielektričnimi lastnostmi tekočih lepil.

2 PREGLED OBJAV

2.1 SPLOŠNO O SEGREVANJU LESA IN LEPILA

Glede na to, da večina lepljenja v praksi poteka pri vročem lepljenju, to je pri temperaturah od 100 °C pa do 200 °C, bi bilo smiselno razmisliti o zmanjšanju porabe energije in nepotrebnem segrevanju lesa. Pri klasičnih stiskalnicah poteka prehod toplote najprej skozi les v lepilni spoj, kar je lahko za lepljenec slabo. Segrevanje celotnega lepljenca pomeni največkrat nepotrebno porabo energije in časa ter morebitno nezaželeno spremembo fizikalnih in mehanskih lastnosti lepljenca. Nekatere nezaželene učinke bi bilo možno zmanjšati z uporabo VF segrevanja, ki omogoča hitrejše selektivno segrevanje lepila v lepilnem spoju. Osnova pri VF segrevanju je kondenzator, ki ima dve elektrodi, med njima pa je dielektrik. V primeru lepljenja lesa je ta dielektrik sestavljen sistem les-lepilo-les, zato je dielektrična vrednost različna po prerezu lepljenca. Snov z višjo dielektrično vrednostjo se bo hitreje segrevala od snovi z manjšo dielektrično vrednostjo, kar je pri lepljenju zaželeno.

Kadar je dielektrik les in lepilo, govorimo o nehomogenem dielektriku. Že sam les je nehomogen dielektrik, na to vpliva smer orientacije lesnih vlaken, rani les, kasni les, gostotni profil, vlažnostni profil itd

2.1.1 Toplotna prevodnost snovi

Toplotna prevodnost (λ) je definirana kot toplotna energija (Q), ki poteče na časovno enoto (t) skozi debelino snovi (s) in površino (A) pri stalni temperaturni razliki ($T_2 - T_1$) med obema površinama (Resnik in sod., 1995).

$$\lambda = \frac{Q * s}{A * t * (T_2 - T_1)} [kJ / msK] \quad \dots(1)$$

Na toplotno prevodnost lesa vpliva več dejavnikov, kot so: gostota, vlažnost in temperatura lesa. Tako je vpliv gostote lesa linearno naraščajoč in prav tako vpliv vlažnosti, ki pa je odvisen od gostote lesa. Z naraščanjem temperature lesa narašča prevodnost za toploto.

2.1.2 Specifična toplota

Specifična toplota neke snovi ali materiala je razmerje med njegovo toplotno kapaciteto in toplotno kapaciteto vode pri 15 °C. Če je za segretje določene mase snovi (m) od nižje temperature (T_1) do višje temperature (T_2) potrebna določena količina toplote (Q), je specifična toplota (C) definirana z izrazom (Resnik in sod., 1995):

$$C = \frac{Q}{m * (T_2 - T_1)} [kJ / kgK] \quad \dots(2)$$

2.2 KAPACITIVNOST

Naprava, ki je primerna za shranjevanje električnega naboja oziroma električne energije, se imenuje kondenzator. Kondenzator je sestavljen iz dveh prevodnikov (večinoma v obliki plošč). En prevodnik nosi pozitivni naboj (+e), drugi prevodnik pa nosi enako velik negativni naboj (-e). Kondenzator nabijemo z električnim nabojem tako, da ga priključimo na vir napetosti. Naboj (e) na plošči kondenzatorja je tem večji, čim večja je napetost (U) med ploščama kondenzatorja:

$$C = \frac{\varepsilon_0 * \varepsilon * S}{d} [F] \quad \dots(3)$$

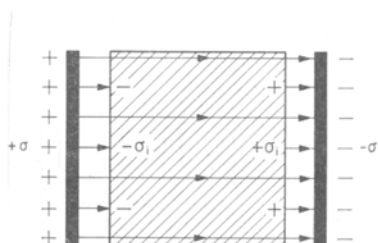
C – kapacitivnost kondenzatorja (F)

ε_0 – influenčna konstanta ($8,85 * 10^{-12} (As)^2 / Nm^2$)

ε – dielektrična vrednost snovi

S – površina plošč (m^2)

d – razdalja med ploščama, debelina snovi med ploščama (m)



Slika 1: Shema ploščnega kondenzatorja (Kladnik 1977)

Napetosti kondenzatorja ne moremo neomejeno povečevati. Površina plošč je namreč omejena, plošči pa tudi ne moremo poljubno približati drugo drugo, ker lahko nastane

električni preboj. Možnost preboja zmanjšamo, če med plošči kondenzatorja vstavimo tanko folijo iz izolacijske snovi. Lahko pa kapacitivnost kondenzatorja povečamo še na drug način, in sicer v polje med ploščama vstavimo dielektrik s čim višjo dielektričnostjo. Dielektrik mora biti dober izolator.

Sorazmerni faktor med nabojem in napetostjo kondenzatorja imenujemo kapacitivnost (C) kondenzatorja. Ta predstavlja naboj, ki ga kondenzator lahko sprejme pri napetosti 1 V. Enota kapacitivnosti je 1 Farad (F). Kondenzator ima kapacitivnost 1 F, če naboj 1 As ustvari napetost 1 V (Kladnik 1977).

2.3 ELEKTRIČNE LASTNOSTI SNOVI IN MATERIALOV

2.3.1 Dielektrična vrednost

Dielektričnost snovi je število, ki pove, kolikokrat je poljska jakost v snovi manjša, kot je bila poljska jakost na mestu, preden smo tja položili material. Dielektričnost prevodnika je neskončno visoka, saj je poljska jakost znotraj prevodnika nič. Visoko dielektričnost ima tudi voda, približno 80 pri sobni temperaturi, medtem ko je dielektričnost plinov praktično enaka vrednosti 1 (preglednica 1). Dielektričnost tekočin je močno odvisna od temperature, in sicer pada z naraščanjem temperature. Izredno veliko dielektričnost imajo tako imenovane feroelektrične snovi.

Električna sila med naboji se zaradi influence zmanjša za faktor ϵ , če v polje položimo dielektrično snov:

$$E = \frac{E_0}{\epsilon} [N / As] \quad \dots(4)$$

E – električna poljska jakost v snovi

E_0 – prvotna električna poljska jakost

ϵ – dielektričnost snovi

Preglednica 1: Dielektrične vrednosti nekaterih snovi (Kladnik 1977)

Snov	ϵ
Zrak (0 °C, 1 at)	1,00059
Papir	2
Petrolej	2,1
Benzol	2,3
Jantar	2,8
Led (0 °C)	2,8
Les	2 ~ 8
Trd gumi	2,8
Pleksi steklo	3 ~ 3,6
Celuloid	3 ~ 4
Olivno olje	3,1
Eter	4,1
Kremen	4,3
Bakelit	4 ~ 4,6
Sljuda	4 ~ 8
Elektro porcelan	6,5
Steklo	6 ~ 8
Amoniak	15
Etilni alkohol (20 °C)	21
Aceton (20 °C)	21,4
Metilni alkohol (20 °C)	33,1
Glicerin (20 °C)	56
Voda (0 °C)	88
(10 °C)	84,1
(20 °C)	80,4
(30 °C)	76,8
(40 °C)	73,3
(50 °C)	69,9
FEROELEKTRIKI	
Segnetova sol med - 20 °C in +25 °C	$\approx 10^4$
Kalijev dihidrofosfat - 190 °C in 130 °C	$\approx 10^5$
Barijev titanit nad 27 °C	8000

2.3.2 Izgubni faktor v dielektriku

Dielektrične lastnosti snovi opredeljuje poleg dielektrične vrednosti tudi faktor izgub ali izgubni faktor. Za faktor izgub se uporablja oznaka $\tan \delta$. To je mera za tisti del prejete energije, ki se spremeni v toploto. V primeru idealnega dielektrika ne prihaja do izgub energije, saj je napetost v fazi premaknjena za četrto nihaja v primerjavi s tokom (90°). V

praksi pa se srečujemo z nepopolnimi dielektriki, pri katerih prihaja do izgub. Fazni zamik napetosti glede na tok je manjši od 90° , razliko do 90° pa imenujemo kot izgub dielektrika.

Slabi dielektriki imajo kot izgub nekaj stopinj, dobri pa vsega nekaj minut. Te izgube so pri dielektričnem segrevanju koristen pojav, ker se energija pretvori v toploto. V praksi računamo s faktorjem izgub 0,05 za les in faktorjem izgub 0,5 za lepilo (Resnik in sod., 1995). Faktor izgub je definiran kot:

$$\tan \delta = \frac{I_R}{I_C} \quad \dots(5)$$

$\tan \delta$ – fazni zamik kota

I_R – obremenilni tok

I_C – prevodni tok

2.3.3 Faktor intenzivnosti segrevanja

V dielektriku z višjim faktorjem izgub se pretvori več energije v toploto, kar je v procesu segrevanja in v tehnologiji lepljenja zelo zaželeno. Faktor intenzivnosti segrevanja (ε'') je produkt obeh osnovnih dielektričnih lastnosti lesa, to je dielektrične vrednosti (ε') in faktorja izgub ($\tan \delta$):

$$\varepsilon'' = \varepsilon' * \tan \delta \quad \dots(6)$$

2.4 SEGREVANJE LEPILNEGA SPOJA

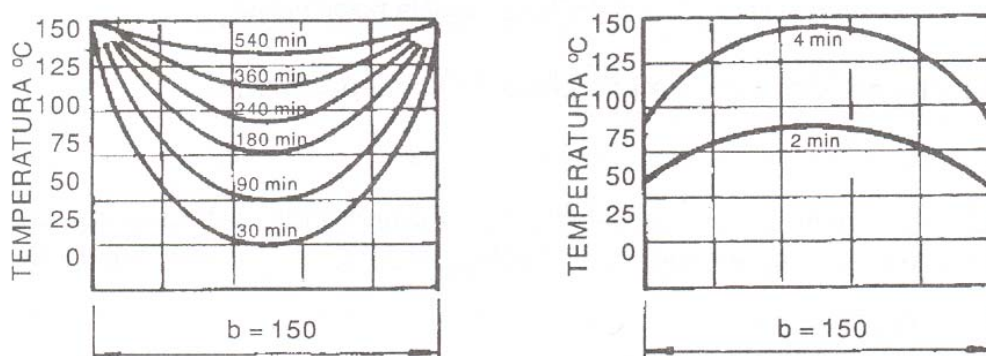
Pri lepljenju lahko lepilni spoj segrejemo na dva načina, posredno ali neposredno. Pri prvem načinu moramo toploto najprej pridobiti na primer z izgorevanjem odpadnih materialov, v lesni industriji so to predvsem lesni ostanki, sekanci, skoblanci in drobni ostanki od odesavanja od obdelovalnih strojev in naprav. Toploto lahko pridobimo še iz drugih virov, kot je na primer električna energija. Za vse postopke posrednega segrevanja je značilno, da se toplota prenaša iz grelnega medija na lepljenec s prevajanjem ali sevanjem toplote.

Drugi način pa je neposredno segrevanje, ki je hitrejše od posrednega segrevanja in segreva predvsem tisti del, ki ima višjo dielektrično vrednost, pri lepljenju lesa je to lepilo. Ta način je pri lepljenju zastopan z dielektričnim ali kapacitivnim segrevanjem lepilnega

spoja oziroma z lepljenjem v polju visoke frekvence. Pri tem načinu toplota nastaja v samem predmetu segrevanja in ni odvisna od debeline in toplotne prevodnosti lesa. Temperatura, ki pri tem nastane, je v območju lepilnega spoja višja kot pa na površju plošče. To je posledica izgube toplote, ki se izgubi v okolico, in prehoda toplote na plošče stiskalnice.

Na sliki 2 lahko vidimo razliko med posrednim in neposrednim segrevanjem ter hitrost prehoda toplote skozi 150 mm debel prerez lesa. Na levi strani imamo prikazano posredno segrevanje, na desni strani pa je prikazan neposredni način segrevanja.

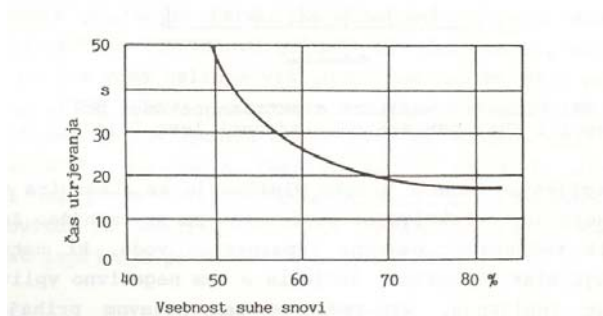
Leva slika prikazuje porazdelitev toplote skozi prerez lesa v odvisnosti od časa pri klasičnem načinu segrevanja. Desna slika pa prikazuje porazdelitev toplote skozi prerez lesa v odvisnosti od časa pri VF načinu segrevanja. Ugotovimo lahko, da je prehod toplote skozi prerez lepljenca pri klasičnem segrevanju bistveno počasnejši kot pri VF segrevanju. Porazdelitev toplote po prerezu je pri klasičnem segrevanju neenakomerna in poteka po konveksni krivulji. Zunanje plasti lesa imajo bistveno višjo temperaturo kot sredina. Lepljenec debeline 150 mm potrebuje 540 minut, da se tudi v sredini segreje do zelene temperature. Pri VF segrevanju pa je zadeva ravno obratna. Porazdelitev toplote poteka po konkavni krivulji. V sredini se les hitreje segreva kot na površini, saj se del toplote iz zunanjih plasti lepljenca izgublja s prevajanjem na plošče stiskalnice ali sevanjem v okolico. Tudi intenzivnost segrevanja je pri VF načinu bistveno hitrejša kot pri klasičnem načinu. Čas, ki je potreben, da dosežemo želeno temperaturo po celotnem preseku lepljenca, znaša 4 minute.



Slika 2: Toplotni profil skozi presek lesa pri klasičnem (levo) in VF (desno) segrevanju (Backović 1996)

2.4.1 Lepila za visokofrekvenčno lepljenje

Glede na dielektrične vrednosti nekaterih snovi lahko sklepamo, da imajo lepila z manjšo vsebnostjo suhe snovi višjo dielektrično vrednost in višji faktor izgub, ker je delež vode v tem primeru večji. Pri VF lepljenju je ta lastnost zaželena, vendar imajo lepila z višjo dielektrično vrednostjo nizko prebojno vrednost, pri segrevanju pa prihaja do povečanega izparevanja disperzijskega sredstva. V splošnem velja, da so za VF lepljenje najbolj primerna urea-formaldehidna lepila s 60% deležem suhe snovi (slika 3). Z večanjem deleža suhe snovi se krajša sam proces utrjevanja, ker je manj disperzijskega sredstva, ki ga moramo izpariti. Seveda pa za VF segrevanje uporabljamo tudi ostale vrste lepil, ki jih uporabljamo v lesarstvu.



Slika 3: Odvisnost časa utrjevanja urea-formaldehidnega lepila od vsebnosti suhe snovi (Resnik 1995)

Lepila utrjujejo različno hitro in na različne načine. Na hitrost utrjevanja lepila vpliva več dejavnikov, kot so vlažnost lesa in pogoji stiskanja. Nekatera lepila utrdijo v nekaj sekundah, druga pa utrjujejo več minut, ur, tednov ali celo mesecev. Hitrost utrjevanja je odvisna tudi od kemijske sestave lepila, od količine dodanega katalizatorja in od temperature lepljenja.

2.4.2 Vrste lepil

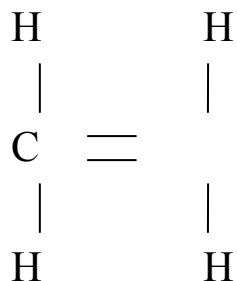
V praksi uporabljamo različna lepila za različne namene uporabe. Lepilo ima dve nalogi: najprej mora oblikovati lepilni sloj (tekoče stanje), nato pa utrditi in zagotoviti zadostno trdnost. Na oblikovanje lepilnega spoja vplivajo tekočinske lastnosti lepila, površinske napetosti in pH lepila. Za lepljenje se uporabljajo lepila, ki so sintetizirana na različne načine. Tako poznamo polimerizacijska lepila, polikondenzacijska lepila ter poliadiacijska lepila. Pri polimerizacijskih lepilih se iz lepila izloča voda in lepilo utrdi na fizikalen način, zato ta lepila imenujemo tudi fizikalno utrjujoča lepila. Pri polikondenzacijskih lepilih pa moramo dodati katalizator, ki pospeši kemijsko reakcijo, pri kateri se manjše molekule

povezujejo v makro molekule, pri tem pa se odcepi voda. Lepilo utrdi na kemijski način, temperatura pa to utrjevanje močno pospeši. Ta lepila imenujemo tudi kemijsko utrjujoča lepila. Pri poliadiacijskih lepilih pa se pri reakciji ne odcepi nobena snov in v lepilnem spoju ostane 100 % lepila.

2.4.2.1 Polimerizacijska lepila

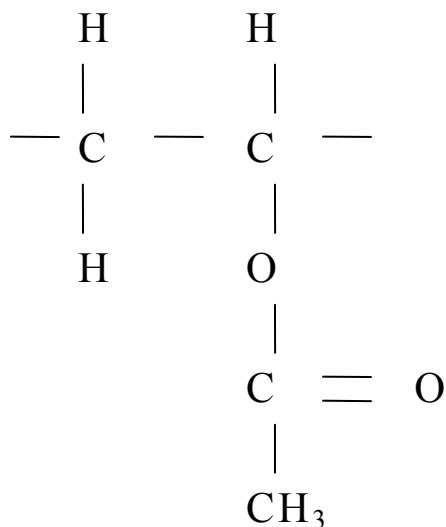
Polimerizacija je kemijska reakcija, pri kateri iz nenasičenih enostavnih molekul nastanejo večje makromolekule. Pri tem se ne izločijo druge (vzporedne) snovi, nastale makromolekule pa imajo enako odstotno sestavo kot izhodiščni monomer. Med polimerizacijska lepila uvrščamo: polivinil-acetatna lepila (PVA), poli-akrilatna lepila, polivinil-alkoholna lepila, polivinil-kloridna lepila in lepila iz sintetičnega kavčuka. V raziskavi smo uporabili dve različni vrsti PVA lepila. Za PVA lepila je značilno, da sodijo v skupino termoplastičnih sintetičnih lepil. Na trgu se pojavljajo kot čista in modificirana, kot homo ali kopolimeri ter različnih viskoznosti. Osnova za izdelavo acetilena in očetne kisline je etilen (Resnik 1989)

Kemijski znak za etilen

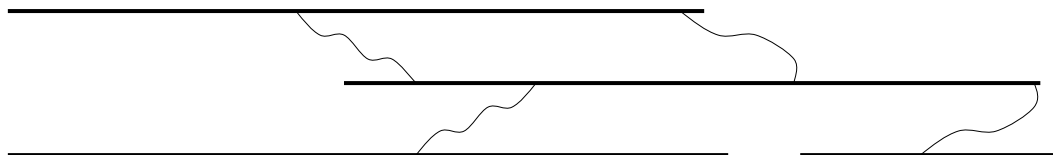


V eno verigo se poveže po 10.000 monomernih enot in so linearne. Če en vodik zamenjamo z acetatom, dobimo polivinil-acetat.

Kemijski znak za polivinil-acetat



To so vodne suspenzije, kot topilo je voda, verige so linearne, ker nimajo zamrežene strukture. Vsi linearni polimeri so termoplasti, pri višjih temperaturah se stalijo in niso odporni na vlago.



Slika 4: Linearno povezana molekula PVA lepila

Molekule so povezane prek fizikalnih vezi. Za ta lepila je značilno, da imajo kredno točko. To je temperatura, pri kateri lepilo elastično utrdi in je po utrditvi še prozorno. Ta lepila ne smejo zmrzniti. Taki lepilni spoji imajo eno tretjino trdnosti ali manj.

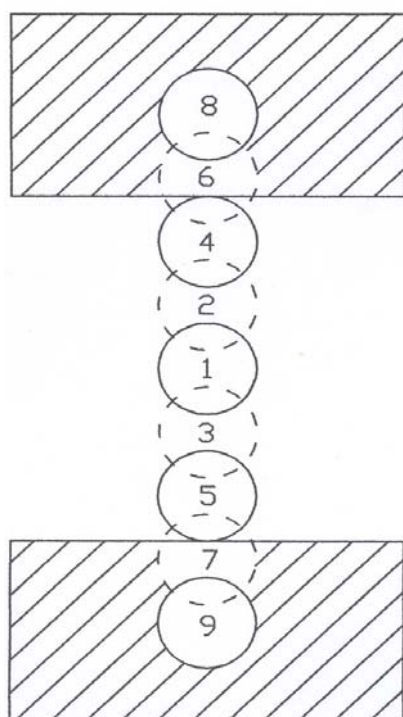
2.4.3 Nastanek lepilnega spoja

V osnovi lahko rečemo, da je lepilo tekoča snov, ki je sposobna omočiti površino in iz tekočega stanja preiti v gel stanje ter iz gel stanja v trdno stanje. V procesu lepljenja moramo zagotoviti, da je lepilo sposobno omočiti površino in penetrirati v notranjost lepljenca. Le tako se lahko molekule lepila dovolj približajo molekulam lesa. Če bi lahko lepljenca lesa zblížali na razdaljo 1 nm, kjer delujejo molekulske sile, ne bi za spojitev

potrebovali nobenega lepila. Vendar vemo, da lesne površine ne moremo približati na takšno razdaljo že zaradi anatomskih značilnosti lesa ter mehanske obdelave.

Zgradba lepilnega spoja

Zgradbo lepilnega spoja si lahko predstavljamo kot verigo iz devetih členov. Za vsak člen je značilna njegova specifična vloga na točno določenem mestu v spoju.



ČLEN 1 – lepilni film

ČLEN 2 in 3 – mejni sloj v lepilu

ČLEN 4 in 5 – stična površina
med lepilom in lesom

ČLEN 6 in 7 – površinski sloj

ČLEN 8 in 9 – lepljenec

Slika 5: Zgradba lepilnega spoja (Marra 1992)

Člen 1 predstavlja lastnosti čistega utrjenega filma. Ta film ima neko debelino, nek svoj volumen in značilne mehanske, fizikalne in kemijske lastnosti. Zavedati pa se moramo, da se lastnosti lepilnega filma, ki je na obeh straneh spojen z lesom, razlikujejo od lastnosti prosto oblikovanega filma lepila.

Člena 2 in 3 predstavljata mejni sloj lepilnega filma, ki je najbližje lesu. Ker sta člena 2 in 3 tako blizu lesa, lahko le-ta vpliva na to, kako bodo molekule lepila reagirale med sabo in posledično na oblikovanje kohezijskih sil v utrjenem lepilu.

Člena 4 in 5 predstavljata stično površino med lepilom in lepljencem, kjer nastane privlačnost med molekulami lesa in lepila, ki jo imenujemo adhezija. Največji delež privlačnih sil med lepilom in lesom pripisujemo fizikalni adheziji.

Člena 6 in 7 predstavljata sloj lesa tik pod površino. To so tista vlakna lesa, ki so bila poškodovana med mehansko obdelavo površin lepljencev. Lepilo mora biti sposobno penetrirati skozi ta vlakna in jih učvrstiti. Drugače je trdnost lepilnega spoja odvisna od trdnosti poškodovanega sloja.

Člena 8 in 9 predstavljata dva kosa lesa v vezi. Poroznost in vlaga lesa vplivata na penetracijo lepila. Debelina lepljencev pa vpliva na hitrost segrevanja, na absorpcijo toplote iz lepila v les.

Trdnost lepilnega spoja je odvisna od trdnosti najšibkejšega člena v verigi. Členi 2, 3, 6 in 7 so najmanj raziskani, zato predstavljajo kritična mesta v lepilnem spoju.

2.5 PREGLED RELAVANTNE LITERATURE

Dielektrične lastnosti so raziskovali številni raziskovalci. Narejenih je bilo tudi nekaj raziskav o dielektričnih lastnostih tekočega lepila. Na področju utrjenih lepilnih filmov pa še ni bilo narejenih veliko raziskav.

Šernek (2004) je opisal metode za spremljanje utrjevanja lepila. Navedel je, da obstajajo številne analitične metode, kot so: diferenčna dinamična kalorimetrija (differential scanning calorimetry - DSC), dinamična mehanska analiza (dynamic mechanical analysis - DMA), dinamična termična analiza (dynamic thermal analysis - DTA), dinamična mehanska termična analiza (dynamic thermal analysis - DMTA) in nuklearna magnetna resonanca (nuclear magnetic resonance - NMR), vendar so večinoma namenjene za analizo čistega lepila brez lesa in potekajo v laboratorijskih pogojih, razen DMA. Zato te metode niso uporabne za neposredno spremljanje utrjevanja lepila med procesom lepljenja. Obstaja pa nekaj metod, ki so primerne za spremljanje utrjevanja lepila v lepilnem spoju, kot sta infra rdeča spektroskopija in dielektrična spektroskopija oziroma analiza.

Kranjc (2006) je raziskoval vpliv dielektričnih lastnosti lepila in lesa na selektivnost VF segrevanja. V raziskavi je ugotovil, da sta dielektrična vrednost in izgubni faktor PVA lepila pri konstantni frekvenci naraščala linearno z naraščanjem temperature, po drugi strani pa sta pri konstantni temperaturi padala logaritemsko z naraščanjem frekvence.

Povezava med višino frekvence in dielektrično vrednostjo furnirja je bila pri konstantni temperaturi negativna, saj je le-ta padala logaritemsko. Povsem drugačna je bila povezava med frekvenco in izgubnim faktorjem furnirja, ki je na celotnem frekvenčnem intervalu naraščal skoraj linearno. PVA lepilo je imelo bistveno višje dielektrične vrednosti kot furnir.

Podmenik (2006) je raziskoval vpliv temperature na dielektrične lastnosti tekočih lepil. V raziskavi je ugotovil, da dielektrične lastnosti lepila naraščajo z naraščanjem temperature do točke, ko je lepilo še v tekočem stanju. Ko pa lepilo preide iz tekočega stanja v gel stanje, pa se število dipolov manjša in s tem tudi sama dielektrična vrednost.

3 MATERIAL IN METODE

3.1 ZASNOVA RAZISKAVE

V raziskavi smo se osredotočili na problem izdelave utrjenih lepilnih filmov, ki bi bili primerne kakovosti za nadaljnjo raziskavo dielektričnih lastnosti. Imeli smo več idej. Ena od idej je bila ta, da bi lepilo nanесли med dve stekleni plošči in ga nato utrdili. Druga možnost je bila ta, da bi dva lepljenca zleplili med sabo in nato z mikrotonom rezali tanke rezine ter tako pripravili lepilni film za nadaljnje meritve. Pri tretji možnosti, ki smo jo dejansko uporabili, pa v en lepljenec vrezkamo utore, jih oblepimo z lepilnim trakom, nato pa v utore nanesimo lepilo in jih pokrijemo z drugim lepljencem ter stisnemo v stiskalnici.

V mizarški delavnici smo najprej razžagali masivne bukove deske debeline 25 mm na širino 120 mm in dolžino 500 mm. Nato smo te letve poskobljali na štiri-stranskem skobeljnem stroju na širino 110 mm in debelino 20 mm. Po skobljanju je sledilo širinsko lepljenje, pri katerem smo zleplili po tri letve skupaj, tako da smo dobili lepljenec širine 330 mm. Po lepljenju je sledilo brušenje na širokotračnem brusilnem stroju ter obžaganje na formatnem krožnem žagalnem stroju. Ko smo imeli končno ploščo dimenzije 450 mm * 330 mm * 18 mm, je sledila operacija rezkanja utorov. Utoře smo rezkali na CNC stroju znamke Rover B4 (slika 6).



Slika 6: CNC rezkar Rover B4

V eno ploščo smo vrezkali po šest utorov širine 20 mm in globine 0,75 mm. Te utore smo nato oblepili z lepilnim trakom, da smo lepilu preprečili penetracijo v samo ploščo. Nato smo na oblepljene utore nanесли lepilo, ki smo ga pustili stati približno eno uro. V tem času se je lepilo lepo porazdelilo in na vrhu naredilo tanko skorjico. Ta skorjica pa je delno preprečila, da bi lepilo penetriralo v zgornjo ploščo, s katero smo pokrili spodnjo in tako formirali lepljenec. Ko smo plošči združili, je sledilo stiskanje v hidravlični stiskalnici. Po 90 min. smo vzeli ploščo iz stiskalnice in jo klimatizirali 48 ur, da je lepilo dokončno utrdilo. Potem smo to ploščo vzdolžno razžagali ob utorih, kjer se je nahajal utrjen lepilni film. Tako smo dobili letve približne širine 18 mm. Te letve pa smo potem razslojili in iz njih smo dobili utrjen lepilni film širine 18 mm in približne dolžine 300 mm.

Ko smo imeli utrjene lepilne filme, smo lahko pričeli z meritvami, ki smo jih opravili z napravami za merjenje dielektričnih lastnosti. Na vsakem lepilnem filmu smo po dolžini opravili po več meritev. Meritve smo opravili za dve vrsti lepila, ki se uporabljata za VF lepljenje.

3.2 MATERIAL

V raziskavi smo uporabili polivinil-acetatno lepilo za visokofrekvenčno lepljenje ter masivni les bukovine (*Fagus silvatica* L.) za pripravo utrjenih lepilnih filmov.

3.2.1 Lepilo

Lepila (PVA) se uporabljajo masovno, ker je delo z njimi enostavno in so poceni, po končanem delu pa orodje preprosto operemo z vodo. PVA lepila utrjujejo na fizikalni način, odstrani se voda in lepilo utrdi.

V raziskavi smo uporabili dve lepili. Eno lepilo je bilo od proizvajalca FRANKLIN INTERNATIONAL MULTIBOND EZ-1, v nadaljevanju EZ. Drugo lepilo je bilo od proizvajalca MITOL SEŽANA, lepilo MEKOL 1130, v nadaljevanju D3.

V raziskavi smo izračunali tudi delež suhe snovi za obe lepili. To smo naredili tako, da smo petrijevko, na katero smo nanесли lepilo, stehali, nato pa smo na to petrijevko nanесли 1g lepila in ga za 60 min dali v laboratorijski sušilnik na 103 °C in ga nato zopet stehali. To smo ponavljali toliko časa, da se masa ni več spreminjala. Delež suhe snovi pa smo izračunali po naslednji enačbi:

$$VL = \frac{m_3 - m_1}{m_2 - m_1} * 100[\%] \quad \dots(7)$$

VL – delež suhe snovi

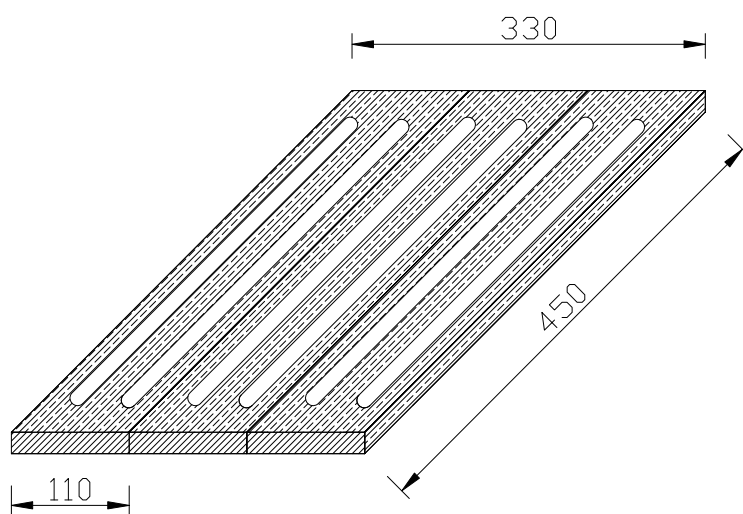
m_3 – masa absolutno suhega lepila in stekla

m_2 – masa svežega lepila in stekla

m_1 – masa praznega stekla

3.2.2 Les

V raziskavi smo za pripravo lepilnih filmov uporabili bukov lepljenec. Lepljenec smo izdelali tako, da smo po širini zlepli tri bukove letve dimenzije 500 mm * 110 mm * 20 mm. Ko je lepilo utrnilo, smo ga obžagali in zbrusili. Tak lepljenec je bil primerne velikosti za nadaljnje poskuse. V ta lepljenec smo v smeri rasti iz-rezkali po šest utorov širine 20 mm in globine 0,75 mm (slika 7). Pri tej globini so se lepilni filmi izkazali za najbolj kakovostne. Te uture smo nato oblepili z lepilnim trakom, da ne bi lepilo po nanosu penetriralo v les.



Slika 7: Lepljenec z utori za pripravo lepilnih filmov

3.3 METODE

3.3.1 Priprava utrjenih lepilnih filmov

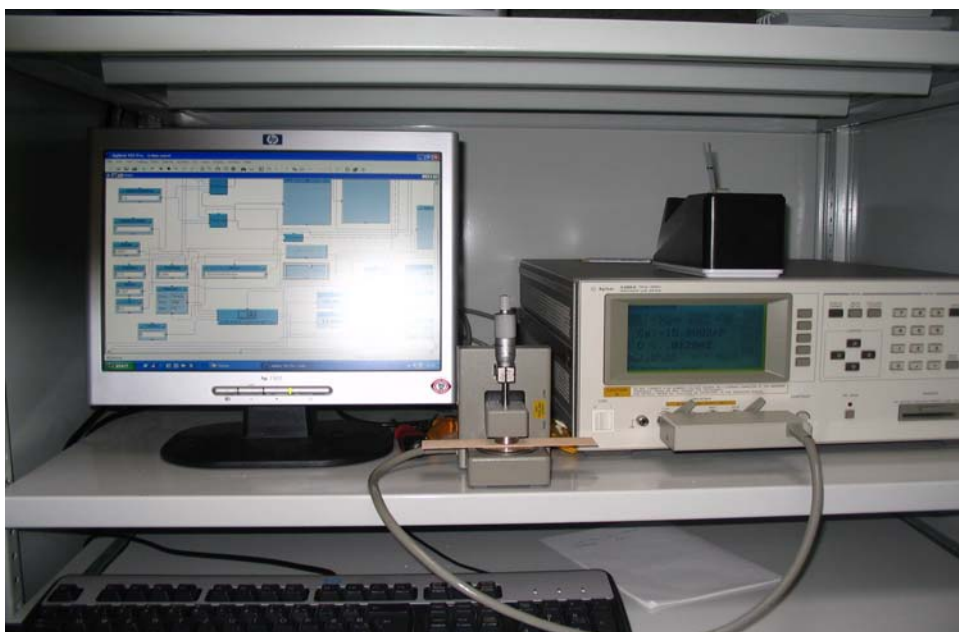
Lepilne filme smo pripravili tako, da smo v uture, ki so bili vrezkani v širinsko lepljeno bukovo ploščo in nato oblepljeni z lepilnim trakom, nanесли lepilo. Pri nanosu lepila je pomembno, da lepilo naneseemo po enem mestu in če se le da v enkratnem nanosu. S tem

smo preprečili, da bi v lepilno mešanico vnesli dodatno količino zraka, ki se v lepilno mešanico ujame, ko se dva nanosa lepila združujeta med sabo. Takšni lepilni filmi niso primerni za nadaljnje proučevanje dielektričnih lastnosti utrjenega lepila, ker je v utrjenem lepilnem filmu ujeta velika količina zraka. Ko smo nanесли lepilo v enkratnem nanosu v za to pripravljen utor, smo pustili lepilo približno eno uro na zraku, da je po vrhu naredilo tanko skorjico. S tem smo preprečili, da bi lepilo penetriralo v zgornjo bukovo ploščo, s katero smo pokrili spodnjo in tako formirali lepljenec. Tak lepljenec smo nato položili v hladno stiskalnico in ga stisnili s tlakom 50 barov, kar je predstavljalo 10 barov specifičnega tlaka. Lepljenec smo stiskali 90 min, nato smo stiskalnico odprli in lepljenec klimatizirali 48 ur pri laboratorijskih pogojih. Zračna vlažnost prostora je bila 52%, temperatura pa 21 °C. Po dveh dneh smo lepljenec razžagali vzdolžno ob utorih v ozke trakove, ki smo jih nato previdno razslojili in iz utora vzeli utrjen lepilni film, ki je bil primeren za nadaljnjo analizo.

3.4 IZVEDBA IN POTEK MERITEV

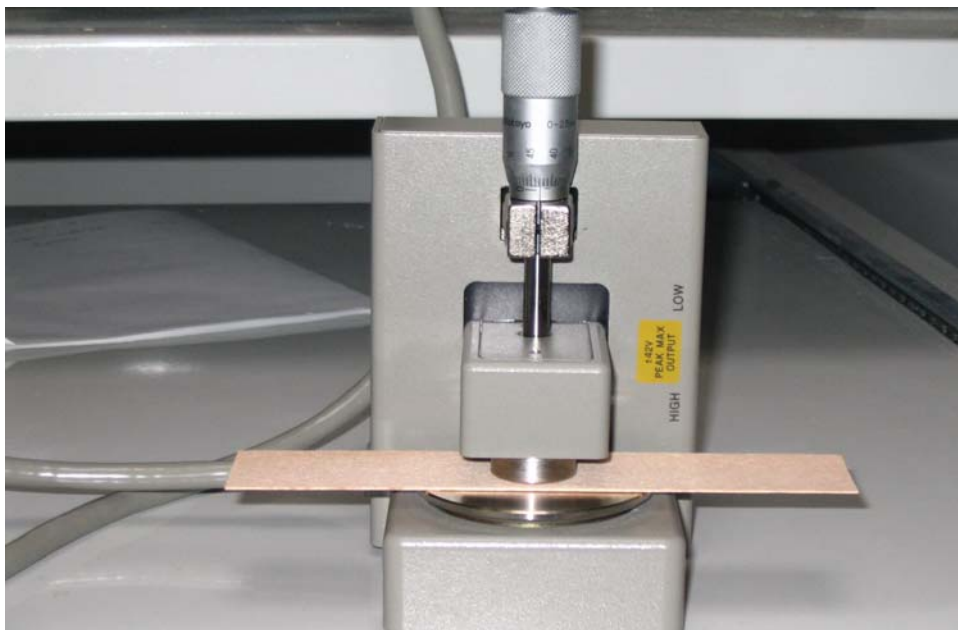
3.4.1 Merjenje utrjenih lepilnih filmov

Meritve dielektričnih lastnosti smo opravili na napravi Agilent 4285A Precision LCR Meter in sondo Agilent 16451B Dielectric Test Fixture (slika 8). Vse skupaj pa je bilo povezano z računalniškim programom Agilent VEE Pro 7.0.



Slika 8: Povezava merilne naprave Agilent 4285A Precision in LCR Meter in računalnika HP z računalniškim programom Agilent VEE Pro 7.0

Sonda Agilent 16451 B Dielectric Test Fixture, ki je prikazana na sliki 9, se uporablja za merjenje dielektričnih lastnosti trdnih snovi. Sonda omogoča merjenje po kontaktni ali nekontaktni metodi. Pri tem se lahko merjenje s kontaktno metodo opravi s trdnimi kovinskimi elektrodami ali preko tankega filma. Glede na tip in dimenzije preizkušanca lahko izbiramo med štirimi različnimi elektrodami (Kranjc, 2006).



Slika 9: Sonda Agilent 16451B Dielectric Test Fixture za merjenje dielektričnih lastnosti trdnih snovi

Ko smo naprave povezali med seboj, smo opravili eno meritev brez preizkušanca (prazen kondenzator) in izničili vse dejavnike, ki bi lahko vplivali na samo meritev. Nato smo preverili veljavnost meritev tako, da smo vzeli kos bukovega lesa premera 40 mm in debeline 4 mm ter ga vstavili v napravo ter izvedli meritev. Meritev je bila opravljena na 26-ih različnih frekvencah, v frekvenčnem območju od 75 kHz pa do 25 MHz. Pri enakih frekvencah smo kasneje izmerili dielektrične lastnosti lepila. Dobljene rezultate merjenja dielektričnih lastnosti bukovine smo nato primerjali z meritvami, ki so bile priložene za bukov les. Ko smo ugotovili, da se podatki ujemajo, smo začeli z meritvami dielektričnih lastnosti utrjenih lepil.

Merjenje dielektričnih lastnosti utrjenih lepilnih filmov smo opravili po nekontaktni metodi. Za to metodo je značilno, da preizkušavec v nobenem trenutku ni v stiku z zgornjo elektrodo. Razdaljo med elektrodama moramo pri obeh meritvah ohraniti konstantno, to je, ko merimo v prazno in ko imamo med elektrodama preizkušavec. Ta metoda je zelo primerna za filmotvorne materiale.

Prednosti nekontaktne metode so, da zračna reža med elektrodo in preizkušancem ne povzroča napak pri meritvah. Enačbe za izračun dielektrične vrednosti po tej metodi so bolj zapletene kot pri uporabi kontaktne metode.

Dielektrično vrednost in izgubni faktor smo izračunali po naslednjih enačbah:

$$\varepsilon = \frac{1}{1 - \left(1 - \frac{C_{S1}}{C_{S2}}\right) * \frac{t_g}{t_d}} \quad \dots(8)$$

$$Dt = D_2 + \varepsilon_R * (D_2 - D_1) * \left(\frac{t_g}{t_d}\right) - 1 \quad \dots(9)$$

C_{S1} – kapacitivnost brez preizkušanca (F)

C_{S2} – kapacitivnost s preizkušancem (F)

t_g – razdalja med elektrodama (m)

t_d – povprečna debelina (m)

D_2 – izgubni faktor s preizkušancem

D_1 – izgubni faktor brez preizkušanca

3.4.2 Potek meritve

Po pripravi utrjenih lepilnih filmov smo le-te najprej označili, jim z mikrometrom izmerili debelino in stehali na tri decimalke natančno. V program VEE Pro 7.0 smo vnesli oznako, maso in debelino utrjenih lepilnih filmov ter razdaljo med elektrodama sonde, ki je bila za 10 % večja od izmerjene debeline utrjenega lepilnega filma. Nato smo opravili eno meritev v prazno, po končani meritvi pa smo vstavili utrjeni lepilni film v sondo in sprožili meritev. Meritve smo izvajali pri sobni temperaturi 21 °C in relativni zračni vlažnosti 52%. Da bi lahko ugotovili vlažnost preizkušancev ob meritvi, smo jih po meritvi dali v sušilnik za 24 ur. Po sušenju je sledilo hlajenje preizkušancev v eksikatorju, tehtanje in ugotavljanje vlažnosti. Meritve dielektričnih lastnosti utrjenih lepilnih filmov smo opravili na 26-ih različnih frekvencah. Začetna frekvenca je bila 75 kHz, končna pa 25 MHz.

3.5 PRIPRAVA SONDE ZA MERJENJE DIELEKTRIČNIH LASTNOSTI TEKOČIN

Na začetku meritve sondo razstavimo na dva dela in na elemente (tesnila, vijaki) ter jo temeljito očistimo z destilirano vodo. Nato sondo in vse pripadajoče elemente sonde obrišemo do suhega s papirnato brisačo. Zelo pomembno je, da je sonda temeljito očiščena, ker le na ta način zagotovimo, da je meritev natančna in točna. Pri sestavi sonde vstavimo tesnilo in 1 mm debel distančnik med plošči kondenzatorja. Sondo stisnemo skupaj s štirimi vijaki in jo vstavimo v stojalo. Sondo priključimo s štirimi vodniki, ki so povezani z natančnim LCR metrom (Agilent 4285A) (Podmenik 2006).

3.5.1 Priprava načrta za izvedbo meritev

Meritev smo zastavili tako, da smo merili dielektrične lastnosti tekočih lepil na 26-ih različnih frekvencah (od 75 kHz do 25 MHz). Pri vsaki vrsti lepila smo opravili po pet ponovljenih meritev.

3.5.2 Merjenje dielektričnih lastnosti tekočih lepil

Meritve so potekale po postopku, ki ga predpisuje podjetje Agilent Technologies in vsebuje naslednje zaporedne aktivnosti (Podmenik 2006):

1. sestavimo sondo in jo priključimo s povezovalnimi vodniki na natančen LCR meter (Agilent 4285A),
2. nastavimo računalniški program,
3. izmerimo kapacitivnost in upornost prazne sonde pri sobni temperaturi,
4. z injekcijo vbrizgavamo lepilo v sondo toliko časa, da pride na vrhu sonde ven,
5. počakamo dve do tri minute, da se temperaturi lepila in sonde izenačita,
6. izmerimo kapacitivnost in upornost polne sonde pri sobni temperaturi,
7. izračunamo dielektrično vrednost (ϵ),
8. izračunamo izgubni kot ($\tan \delta$),
9. izračunamo dielektrični faktor izgub (ϵ''),
10. odklopimo sondo, jo očistimo z destilirano vodo in zberemo do suhega.

Dielektrične lastnosti tekočega lepila izračunamo po naslednjih enačbah:

$$\varepsilon = \frac{C_p}{C_0} \quad \dots(10)$$

ε – dielektrična vrednost

C_p – kapacitivnost sonde napolnjene z lepilom

C_0 – kapacitivnost prazne sonde

$$\tan \delta = \frac{1}{(2 * \pi * \omega) * C_p * R_p} \quad \dots(11)$$

$\tan \delta$ – izgubni kot

ω – frekvenca

C_p – kapacitivnost polnega kondenzatorja

R_p – upornost polnega kondenzatorja

$$\varepsilon'' = \frac{1}{(2 * \pi * \omega) * C_0 * R_p} \quad \dots(12)$$

ε'' – dielektrični faktor izgub

4 REZULTATI

Rezultate meritev smo s pomočjo računalniškega programa Microsoft Excel obdelali in jih ponazorili z grafi.

4.1 REZULTATI MERITEV UTRJENIH LEPILNIH FILMOV

4.1.1 Rezultati meritev PVA lepila

V preglednicah 2 in 3 so podane povprečne vrednosti ϵ , $\tan \delta$ in ϵ'' za lepila D3 in EZ. Meritve so bile opravljene na frekvenčnem območju od 0,079 MHz pa do 25,119 MHz. Dielektrične lastnosti utrjenega lepilnega filma smo izmerili pri relativni vlažnosti lepila in pri absolutno suhih lepilnih filmih. Lepilni filmi z oznako D3V in EZV so vlažni lepilni filmi. Vlažnost lepilnih filmov D3V je bila povprečno 4,9%, EZV pa je bila povprečno 4,0%. Lepilni filmi z oznako D3A in EZA pa so absolutno suhi lepilni filmi, ki smo jih sušili v laboratorijskem sušilniku.

Preglednica 2: Povprečne vrednosti ϵ , $\tan \delta$ in ϵ'' za utrjeno lepilo D3 v odvisnosti od frekvence f

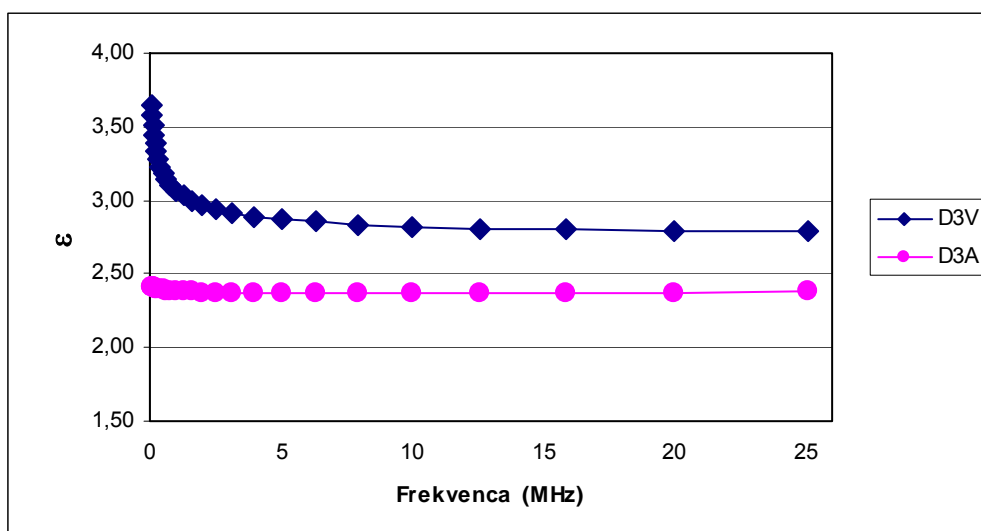
oznaka f	ϵ		$\tan \delta$		ϵ''	
	D3A	D3V	D3A	D3V	D3A	D3V
0,079	2,41	3,65	0,103	0,145	0,249	0,540
0,010	2,41	3,57	0,099	0,138	0,239	0,501
0,126	2,40	3,51	0,097	0,130	0,233	0,465
0,159	2,40	3,44	0,094	0,123	0,226	0,431
0,199	2,40	3,39	0,092	0,116	0,222	0,401
0,251	2,40	3,33	0,091	0,110	0,219	0,372
0,316	2,40	3,28	0,090	0,104	0,216	0,345
0,398	2,39	3,23	0,089	0,098	0,214	0,322
0,501	2,39	3,19	0,089	0,093	0,213	0,300
0,631	2,39	3,14	0,088	0,088	0,211	0,279
0,794	2,39	3,10	0,087	0,083	0,209	0,260
1,000	2,38	3,07	0,087	0,079	0,208	0,242
1,259	2,38	3,03	0,086	0,075	0,206	0,228
1,585	2,38	3,00	0,085	0,071	0,204	0,213
1,995	2,37	2,97	0,084	0,067	0,201	0,200
2,512	2,37	2,94	0,083	0,064	0,198	0,187
3,162	2,37	2,92	0,081	0,060	0,193	0,175
3,981	2,37	2,89	0,073	0,057	0,174	0,163
5,012	2,37	2,87	0,033	0,080	0,078	0,229
6,310	2,37	2,85	0,040	0,084	0,095	0,240
7,943	2,37	2,84	0,050	0,091	0,118	0,259

se nadaljuje

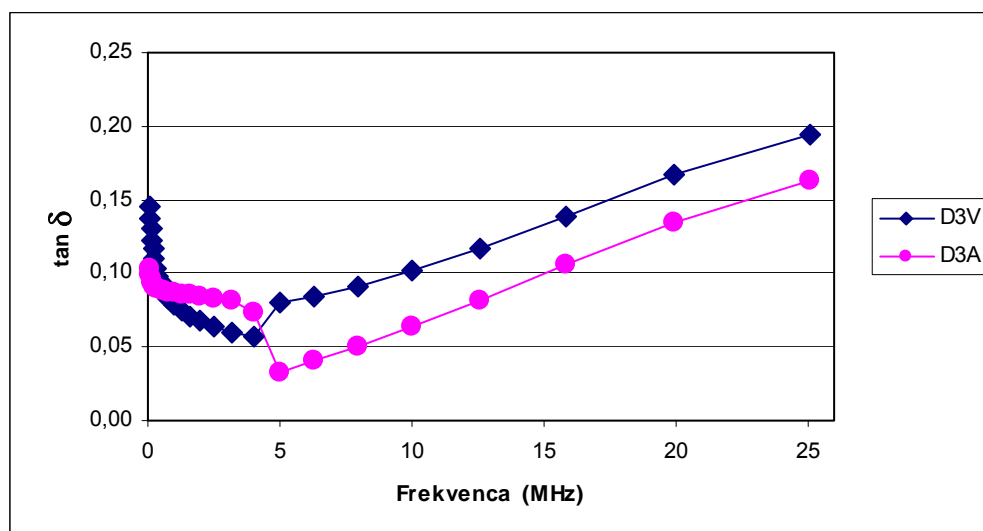
10,000	2,36	2,82	0,063	0,101	0,150	0,287
12,589	2,36	2,81	0,081	0,117	0,192	0,330
15,849	2,37	2,80	0,106	0,139	0,250	0,393
19,953	2,37	2,79	0,135	0,167	0,320	0,473
25,119	2,38	2,80	0,164	0,194	0,389	0,550

nadaljevanje

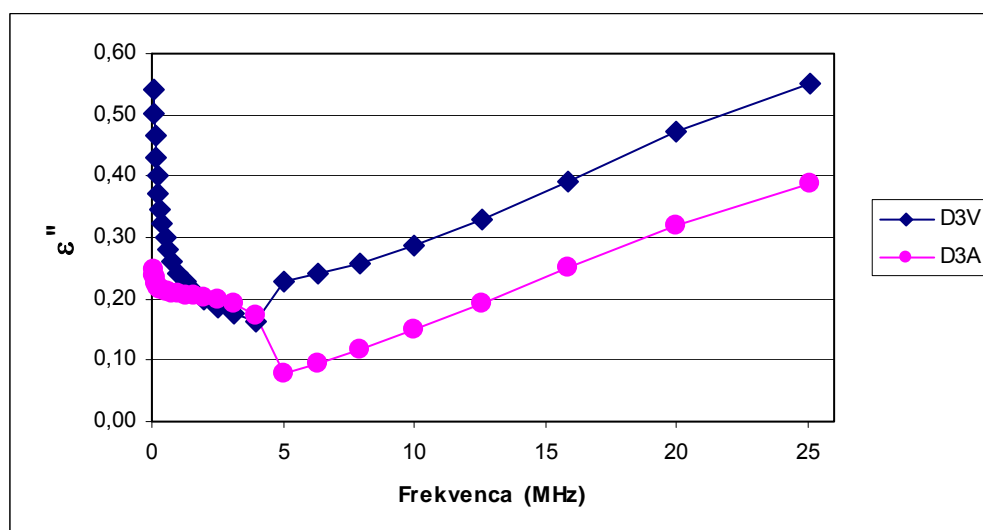
Slike 10, 11 in 12 prikazujejo povprečne vrednosti za PVA lepilo z oznako D3. Lepilni filmi z oznako D3V so vlažna lepila, to so lepilni filmi, ki smo jih dobili iz lepljenca in smo jim nato izmerili dielektrične vrednosti. Po končanih meritvah pa smo te lepilne filme dali v laboratorijski sušilnik, kjer smo jih posušili do absolutno suhega stanja. Sušenje smo opravili po navodilih, ki jih navaja standard za sušenje lepil. Tako smo dobili absolutno suhe lepilne filme z oznako D3A. Vse meritve so bile opravljene pri sobni temperaturi 21 °C in 52% relativni zračni vlažnosti.



Slika 10: Dielektrična vrednost lepila D3 v odvisnosti od frekvence



Slika 11: Tangens izgubnega kota za lepilo D3 v odvisnosti od frekvence



Slika 12: Dielektrični faktor izgub za lepilo D3 v odvisnosti od frekvence

Preglednica 3: Povprečne vrednosti ϵ , $\tan \delta$ in ϵ'' za utrjeno lepilo EZ v odvisnosti od frekvence f

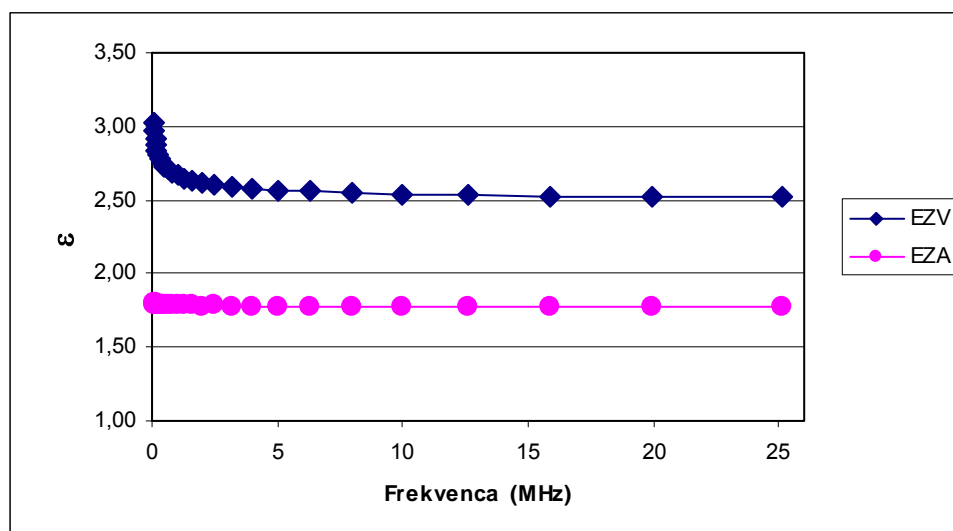
oznaka f	ϵ		$\tan \delta$		ϵ''	
	EZA	EZV	EZA	EZV	EZA	EZV
0,079	1,80	3,02	0,075	0,137	0,136	0,414
0,010	1,79	2,97	0,068	0,126	0,122	0,375
0,126	1,80	2,92	0,064	0,117	0,116	0,340
0,159	1,79	2,88	0,061	0,107	0,110	0,307
0,199	1,79	2,84	0,060	0,098	0,107	0,278
0,251	1,79	2,81	0,058	0,090	0,104	0,252
0,316	1,79	2,78	0,057	0,083	0,102	0,231
0,398	1,79	2,75	0,056	0,077	0,100	0,210
0,501	1,79	2,73	0,055	0,071	0,098	0,193

se nadaljuje

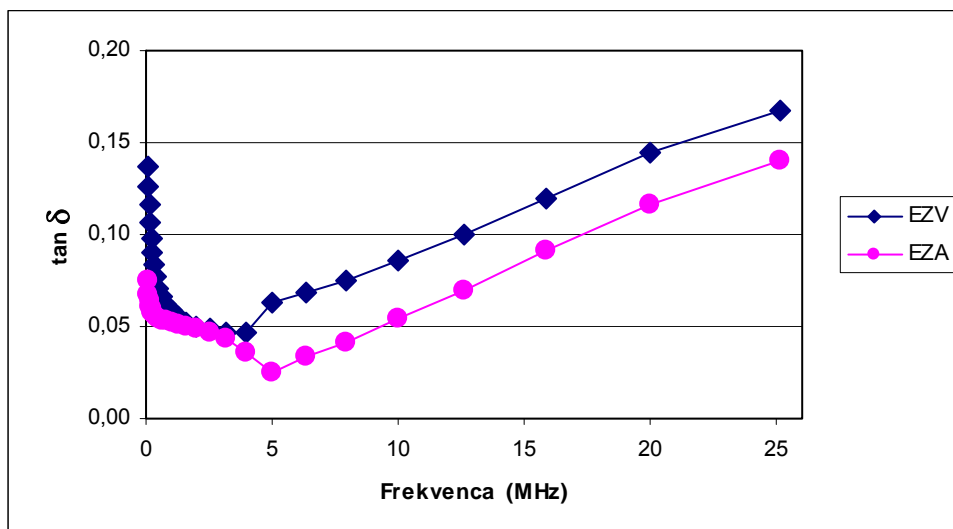
0,631	1,79	2,71	0,054	0,066	0,096	0,179
0,794	1,79	2,69	0,053	0,062	0,095	0,166
1,000	1,78	2,67	0,052	0,058	0,093	0,155
1,259	1,78	2,65	0,051	0,055	0,092	0,146
1,585	1,78	2,63	0,050	0,053	0,090	0,138
1,995	1,78	2,62	0,048	0,050	0,087	0,131
2,512	1,78	2,60	0,047	0,049	0,083	0,127
3,162	1,78	2,59	0,043	0,047	0,077	0,121
3,981	1,78	2,58	0,036	0,046	0,064	0,119
5,012	1,78	2,57	0,025	0,063	0,044	0,161
6,310	1,78	2,56	0,033	0,068	0,059	0,174
7,943	1,78	2,55	0,042	0,075	0,075	0,192
10,000	1,78	2,54	0,054	0,086	0,096	0,218
12,589	1,78	2,53	0,070	0,100	0,124	0,253
15,849	1,78	2,52	0,091	0,120	0,164	0,303
19,953	1,78	2,52	0,117	0,144	0,209	0,364
25,119	1,78	2,53	0,140	0,168	0,250	0,424

nadaljevanje

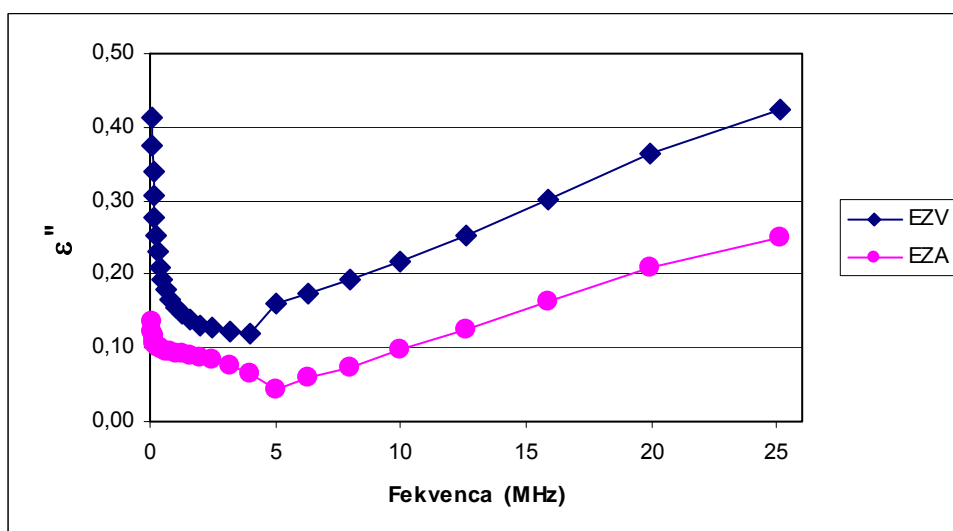
Slike 13, 14 in 15 prikazujejo povprečne vrednosti za PVA lepilo z oznako EZ. Lepilni film z oznako EZV je vlažno lepilo, lepilni film z oznako EZA pa je absolutno suho lepilo. Vse meritve so bile opravljene pri sobni temperaturi 21 °C in 52% relativni zračni vlažnosti.



Slika 13: Dielektrična vrednost za lepilo EZ v odvisnosti od frekvence



Slika 14: Tangens izgubnega kota za lepilo EZ v odvisnosti od frekvence



Slika 15: Dielektrični faktor izgub za lepilo EZ v odvisnosti od frekvence

4.2 REZULTATI MERITEV TEKOČIH LEPIL

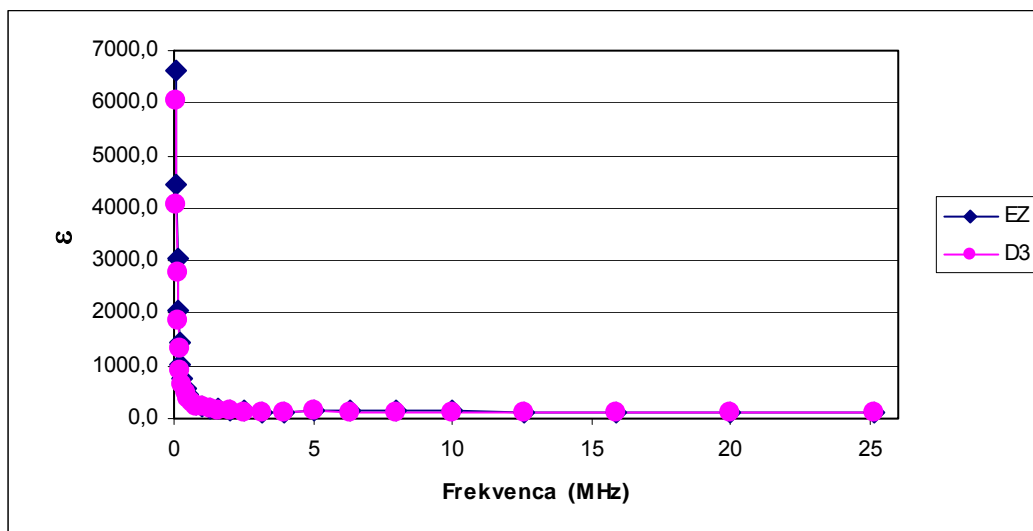
4.2.1 Rezultati meritev PVA lepila

V preglednici 4 so podane povprečne vrednosti ϵ , $\tan \delta$ in ϵ'' za tekoči lepili D3 in EZ na frekvenčnem območju od 0,079 MHz pa do 25,119 MHz. Temperatura lepila ob meritvi je bila 21 °C, relativna zračna vlažnost pa 52%.

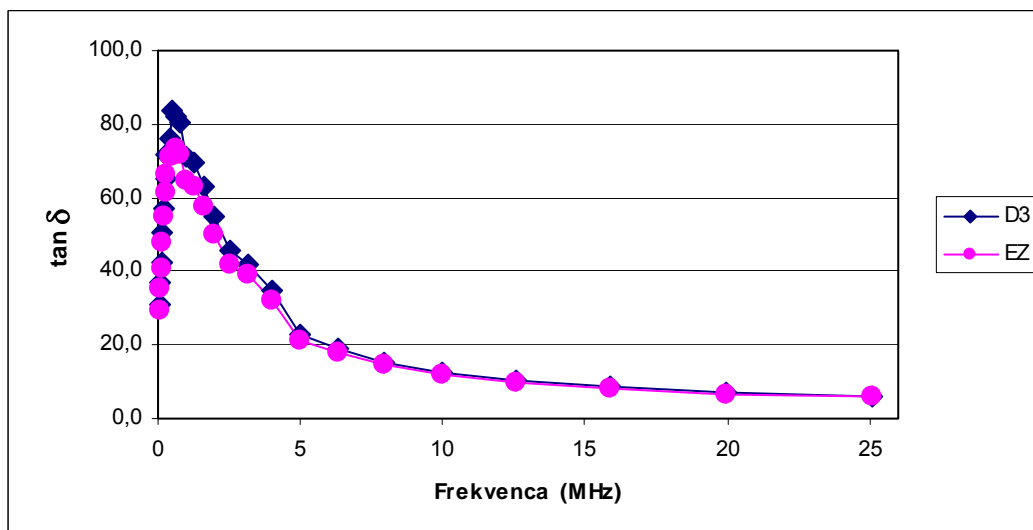
Preglednica 4: Povprečne vrednosti ϵ , $\tan \delta$ za tekoči lepili D3 in EZ v odvisnosti od frekvence f

f	ϵ		$\tan \delta$		ϵ''	
	D3	EZ	D3	EZ	D3	EZ
0,079	6054,7	6634,3	30,8	29,6	186291,6	194260,2
0,010	4059,7	4459,8	36,7	35,1	148653,2	154902,1
0,126	2788,1	3059,8	42,6	40,7	118475,9	123474,5
0,159	1879,1	2066,4	50,4	48,1	94453,4	98383,1
0,199	1325,6	1447,1	56,9	54,7	75208,72	78530,19
0,251	921,7	1026,4	65,2	61,5	59999,69	62463,13
0,316	665,5	756,3	71,9	66,2	47817,26	49750,63
0,398	500,5	559,8	76,2	71,2	38095,39	39609,23
0,501	365,8	447,1	83,7	71,0	30444,29	31682,74
0,631	294,9	342,4	82,1	73,6	24190,4	25093,4
0,794	239,8	279,3	80,2	71,9	19226,6	19978,0
1,000	213,5	246,9	71,4	64,5	15229,9	15886,3
1,259	174,8	201,3	69,4	63,1	12125,2	12654,6
1,585	151,8	174,8	63,3	57,7	9603,2	10071,9
1,995	139,8	160,4	54,7	50,0	7645,4	8017,7
2,512	132,5	152,3	45,7	41,9	6054,5	6380,3
3,162	115,6	130,0	41,7	39,1	4816,4	5079,7
3,981	111,4	125,2	34,6	32,3	3850,1	4047,6
5,012	135,6	150,3	22,6	21,4	3068,4	3215,0
6,310	129,0	141,9	18,9	18,0	2434,9	2560,1
7,943	125,6	138,1	15,5	14,7	1943,8	2038,0
10,000	122,5	133,4	12,6	12,2	1546,5	1623,6
12,589	119,6	129,7	10,4	10,0	1241,2	1294,3
15,849	116,8	126,2	8,4	8,2	984,0	1030,0
19,953	113,2	121,9	7,0	6,7	786,7	820,8
25,119	106,4	114,3	5,9	5,7	627,2	654,0

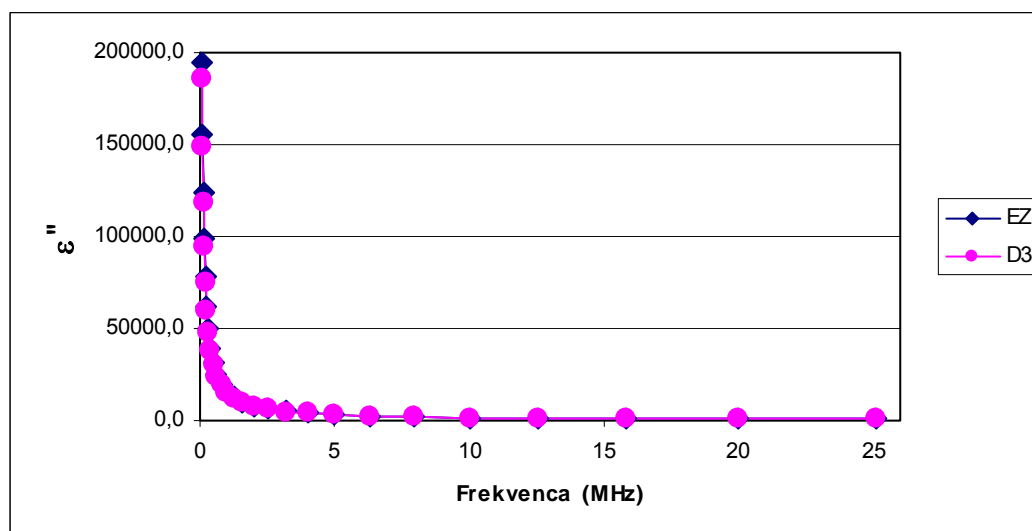
Slika 16 prikazuje povprečne dielektrične vrednosti za PVA lepili. Lepilo z oznako EZ je tekoče lepilo EZ, lepilo z oznako D3 pa je tekoče lepilo D3, kateremu smo izmerili dielektrične vrednosti. Slika 17 prikazuje povprečne vrednosti za tangens izgubnega kota za dve lepili, katerima smo izmerili dielektrične vrednosti. Slika 18 prikazuje povprečne vrednosti za dielektrični faktor izgub za dve lepili, katerima smo izmerili dielektrične vrednosti.



Slika 16: Dielektrična vrednost za lepili EZ in D3 v odvisnosti od frekvence



Slika 17: Tangens izgubnega kota za lepilo EZ in D3 v odvisnosti od frekvence



Slika 18: Dielektrični faktor izgub za lepilo EZ in D3 v odvisnosti od frekvence

4.3 DELEŽ SUHE SNOVI

Lepiloma D3 in EZ smo izmerili tudi delež suhe snovi. Meritve smo opravili tako, kot navaja standard. Rezultati meritev pa so prikazani v preglednici 5 in so podani v odstotkih. Povprečna vrednost deleža suhe snovi za lepilo D3 je znašala 52,30%, za lepilo EZ pa je bila ta vrednost nekoliko nižja in je znašala 49,23%.

5 RAZPRAVA IN SKLEPI

Cilj raziskave je bil proučiti dielektrične lastnosti dveh lepil za VF lepljenje v tekočem in utrjenem stanju. Poseben izziv pa je bil razviti postopek za pripravo utrjenih lepilnih filmov, ki bodo primerni za merjenje dielektričnih lastnosti. Ena od možnosti je bila ta, da bi lepilne filme pridobili s pomočjo dveh steklenih plošč, med kateri bi nanесли tekoče lepilo. Druga možnost je bila, da bi lepilo nanесли na površino lepljenca, ki bi jo nato zlepili, in po utrditvi z mikrotonom narezali na tanke rezine in tako prišli do samega lepilnega filma. Na koncu smo v raziskavi uporabili tretji način, pri katerem smo v masivni lepljenec naredili utore določene globine, v katere smo nanесли lepilo. Utoře smo predhodno oblepili z lepilnim trakom, da ne bi lepilo ob nanosu penetriralo v sam lepljenec. Pri nanosu lepila je zelo pomembno, da lepilo nanesimo v enkratnem nanosu, s tem preprečimo, da bi v lepilni film vnesli dodatne količine ujetega zraka. Po nanosu lepila smo počakali približno 60 min, da se je lepilo po utoru razlezlo in na vrhu naredilo

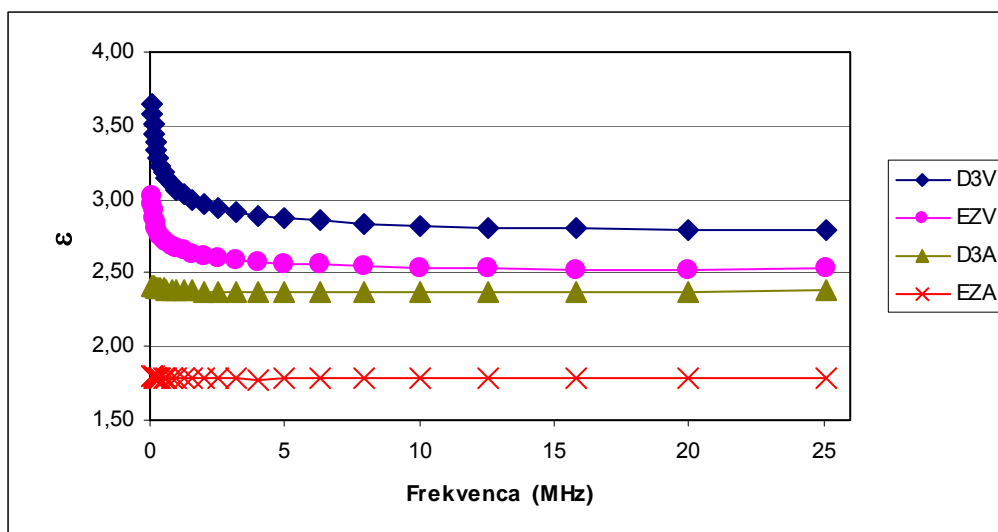
»skorico«, ki je v nadaljevanju preprečevala, da bi lepilo preveč penetriralo v zgornji lepljenec. Nato smo formirali dvoslojni lepljenec in ga stisnili za 60 min v hidravlični stiskalnici. Po stiskanju smo lepljenec 48 ur kondicionirali in ga nato vzdolžno razžagali ob utoru, v katerem je bil lepilni film. Odžagan kos smo razslojili in iz njega vzeli utrjeni lepilni film, ki smo ga uporabili za nadaljnje raziskave.

5.1 DIELEKTRIČNE LASTNOSTI UTRJENIH LEPIL

5.1.1 Dielektrična vrednost

Z merjenjem dielektrične vrednosti (ϵ) utrjenih lepilnih filmov smo ugotovili, da imajo utrjeni lepilni filmi bistveno nižjo dielektrično vrednost kot pa tekoča lepila. To je bilo seveda pričakovano, ker tekoče lepilo vsebuje še topila in razredčila, ki vplivajo na višjo dielektričnost. Dielektričnost pa je bila različna tudi med utrjenimi lepilnimi filmi. Ta razlika je odvisna od same sestave lepila, deleža suhe snovi in vlažnosti utrjenega lepilnega filma. Višja kot je vlažnost lepilnega filma, višja je dielektrična vrednost.

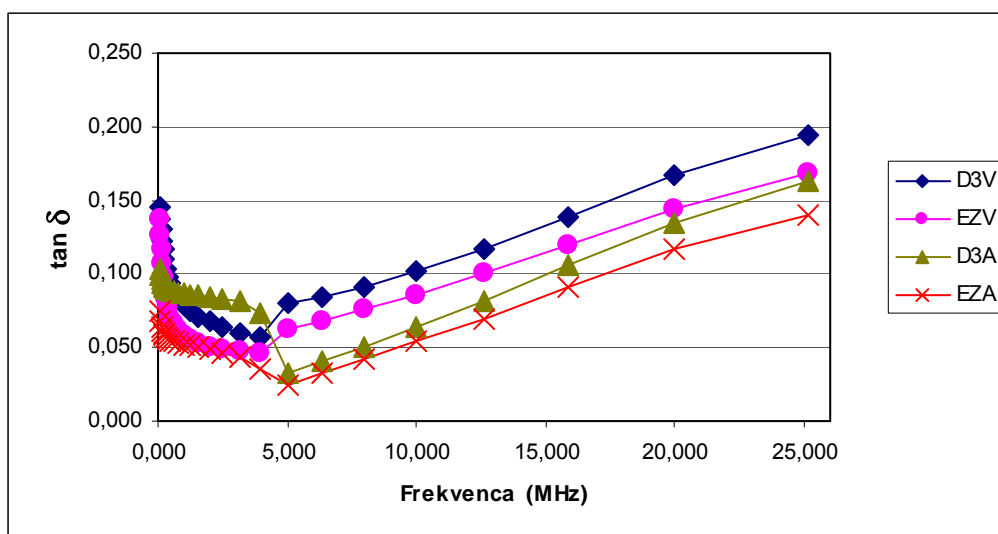
Razlike v dielektrični vrednosti so ponazorjene na sliki 19. Dielektrična vrednost se je za lepilne filme, ki so bili merjeni takoj (vlažni), v povprečju gibala od 2,56 za lepilo EZV in 3,09 za lepilo D3V. Pri absolutno suhih lepilnih filmih pa je bila ta vrednost nekoliko nižja in je znašala od 1,78 za lepilo EZA in 2,37 za lepilo D3A.



Slika 19: Dielektrične vrednosti za utrjeni lepili EZ in D3 v odvisnosti od frekvence

5.1.2 Izgubni kot

Pri meritvah izgubnega kota ($\tan \delta$) smo izmerili vrednosti, ki so prikazane na sliki 20. Ugotovili smo, da izgubni kot utrjenih lepilnih filmov najprej z naraščajočo frekvenco pada, nato pa od frekvence 6,310 MHz naprej narašča. Povprečne vrednosti izgubnega kota utrjenih lepil takoj po odvzemu iz lepljenca so bile za lepilo EZV 0,085, za lepilo D3V pa 0,103. Pri absolutno suhih lepilnih filmih pa so bile izmerjene povprečne vrednosti nekoliko nižje in so znašale od 0,87 za lepilo D3A in 0,60 za lepilo EZA.

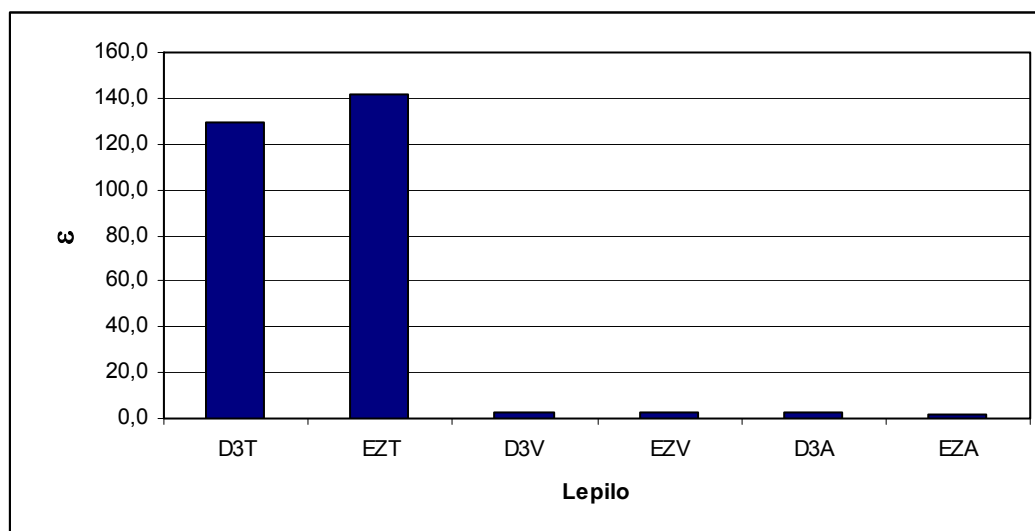


Slika 20: Tangens izgubnega kota za utrjeni lepili EZ in D3 v odvisnosti od frekvence

5.2 PRIMERJAVA TEKOČIH IN UTRJENIH LEPIL

Preglednica 5: Dielektrične vrednosti tekočih in utrjenih lepil na frekvenci 6,310 MHz

f v MHz	Tekoče lepilo		Utrjeno lepilo			
	ϵ		ϵ			
	D3T	EZT	D3V	D3A	EZV	EZA
6,310	129,0	141,9	2,85	2,37	2,56	1,78



Slika 21: Dielektrične vrednosti za tekoči in utrjeni lepili D3 in EZ pri frekvenci 6,310 MHz

Na sliki 21 je nazorno prikazana primerjava dielektričnih vrednosti dve lepil na frekvenci 6,310 MHz. Iz diagrama lahko razberemo razlike dielektričnih vrednosti za posamezno vrsto lepila. Prvi in drugi stolpec v diagramu prikazujeta dielektrično vrednost za tekoče lepilo, drugi štirje stolpci pa prikazujejo dielektrično vrednost za utrjena lepila, in sicer tretji in četrti stolpec prikazujeta vrednost za vlažen lepilni film, ki je imel vlažnost okrog 4,45%, ter zadnja dva stolpca, ki prikazujeta dielektrično vrednost absolutno suhega lepilnega filma. Razlike med tekočim in utrjenim lepilom so velike, tekoče lepilo ima približno 57-krat višjo dielektrično vrednost kot utrjeno lepilo.

5.2.1 Primerjava rezultatov

Pri primerjavi rezultatov smo ugotovili, da so naše meritve podobne meritvam, ki so predstavljene v relevantni literaturi. Pri tekočih lepilih EZ smo ugotovili povprečno dielektrično vrednost 6634,3 na začetni frekvenci 79 kHz, na končni frekvenci pa je bila ta vrednost 114,3. Kranjc (2006) pa je za lepilo EZ na začetni frekvenci 79 kHz ugotovil, da znaša dielektrična vrednost 6171,9, na končni frekvenci 25,119 MHz pa je bila ta vrednost 99,5. Za utrjeno lepilo smo ugotovili mnogo nižje vrednosti kot pri tekočih lepilih, kar smo tudi pričakovali. Povprečno dielektrično vrednost 3,02 smo izmerili za lepilo EZ na začetni frekvenci 79 kHz, za lepilo D3 pa je bila ta vrednost 3,65. Na končni frekvenci 25,119 MHz pa je bila dielektrična vrednost 2,53 za lepilo EZ in 2,8 za lepilo D3.

5.3 SKLEPI

Na osnovi raziskave smo ugotovili:

- Dielektrične lastnosti lepila so odvisne predvsem od vrste lepila in deleža suhe snovi.
- Lepilo D3 je imelo višjo dielektrično vrednost kot lepilo EZ. Povprečna dielektrična vrednost lepila D3 je znašala 3,09, medtem ko je imelo lepilo EZ povprečno dielektrično vrednost 2,68.
- Tekoče lepilo ima bistveno višjo dielektrično vrednost kot utrjeno lepilo. Dielektrična vrednost za utrjeno lepilo D3 je pri frekvenci 6,310 MHz znašala 2,85, za tekoče lepilo D3 pa je bila ta vrednost nekajkrat višja in je znašala 129. Dielektrična vrednost za utrjeno lepilo EZ je pri frekvenci 6,310 MHz znašala 2,56, za tekoče lepilo EZ pa je bila ta vrednost 141,9.
- Dielektrična vrednost utrjenih lepilnih filmov je odvisna tudi od njihove vlažnosti. Absolutno suh utrjeni film lepila ima nižjo dielektrično vrednost kot vlažen utrjeni film lepila.
- Dielektrična vrednost na frekvenčnem območju od 75 kHz pa do 25 MHz pada s frekvenco tako pri utrjenih lepilih, kakor tudi pri tekočih lepilih.

6 POVZETEK

Raziskovali smo dielektrične lastnosti tekočih PVA lepil in utrjenih lepilnih filmov na različnih frekvencah od 75 kHz do 25 MHz. Predpostavili smo, da dielektrične lastnosti lepila padajo z naraščanjem frekvence in da so dielektrične lastnosti tekočega lepila bistveno višje od utrjenih lepil.

Za merjenje dielektričnih lastnosti utrjenih lepilnih filmov smo morali najprej pridobiti kakovostne lepilne filme, ki so bili primerni za nadaljnje proučevanje. Te lepilne filme smo dobili tako, da smo v masivni lepljenec naredili utore določene globine, v katere smo nanесли lepilo. Utoře smo predhodno oblepili z lepilnim trakom, da ne bi lepilo ob nanosu penetriralo v sam lepljenec. Nato smo formirali dvoslojni lepljenec in ga stisnili za 60 min v hidravlični stiskalnici. Po stiskanju smo lepljenec 48 ur kondicionirali in ga nato vzdolžno razžagali ob utoru, v katerem je bil lepilni film. Odžagan kos smo razslojili in iz njega vzeli utrjeni lepilni film, ki smo ga uporabili za nadaljnje raziskave.

Meritve dielektrične vrednosti in izgubnega kota smo opravili na napravi Agilent 4285A Precision LCR Meter in sondo Agilent 16451B Dielectric Test Fixture. Vse skupaj pa je bilo povezano z računalniškim programom Agilent VEE Pro 7.0.

V raziskavi smo ugotovili, da je dielektrična vrednost utrjenih lepilnih filmov nekajkrat nižja, kot je pri tekočih lepilih. Izmerjena dielektrična vrednost pri frekvenci 6,310 MHz je bila za utrjene lepilne filme D3V 2,85 in za EZV 2,56. Pri tekočih lepilih pa je bila ta vrednost bistveno višja in je znašala za lepilo D3T 129,0 in za EZT 141,9 pri enaki frekvenci. Ugotovili smo tudi, da je dielektrična vrednost utrjenih lepilnih filmov odvisna tudi od njihove vlažnosti. Absolutno suh utrjeni film lepila ima nižjo dielektrično vrednost kot vlažen utrjeni film lepila. Dielektrična vrednost utrjenih lepilnih filmov z manjšim deležem vlage je od začetne frekvence 0,079 MHz pa vse do zadnje frekvence 25,119 MHz počasi padala, in sicer pri obeh vrstah lepila. Pri absolutno suhih lepilih pa smo izmerili približno konstantno dielektrično vrednost na vseh izbranih frekvencah. Pri tangensu izgubnega kota ($\tan \delta$) pa smo izmerili vrednost, ki je od začetne frekvence 0,079 MHz pa do frekvence 5,012 skoraj linearno padala, nato pa do konca linearno naraščala.

7 VIRI

- Backović M. 1996. Lijepljenje u tehnologijama prerade drveta. Sarajevo, Bosna public: 396 str.
- Kranjc M. 2006. Vpliv dielektričnih lastnosti lepila in lesa na selektivnost VF segrevanja. Diplomsko delo, Ljubljana, Biotehniška fakulteta, Oddelek za lesarstvo: 55 str.
- Kladnik R. 1977. Osnove fizike (drugi del). Ljubljana, Državna založba Slovenije: 342 str.
- Mlakar J. 1985. Dendrologija. Drevesa in grmi Slovenije. Ljubljana, Tehniška založba Slovenije: 164 str.
- Podmenik M. 2006. Proučevanje vpliva temperature na dielektrične lastnosti tekočih lepil. Diplomsko delo, Ljubljana, Biotehniška fakulteta, Oddelek za lesarstvo: 41 str.
- Resnik J. 1989. Lepila in lepljen les. Ljubljana, Biotehniška fakulteta, Oddelek za lesarstvo: 103 str.
- Resnik J., Berčič S., Cikač B. 1995. Visokofrekvenčno segrevanje in lepljenje lesa. Ljubljana, Biotehniška fakulteta, Oddelek za lesarstvo: 109 str.
- Šega B. 2003. Osnove lepljenja lesa. Ljubljana, Biotehniška fakulteta, Oddelek za lesarstvo: 62 str.
- Šernek M. 2004. Spremljanje utrjevanja lepila z dielektrično analizo. Les, 56, 12: 404–408
- Agilent 16451B Dielectric Test Fixture. Operation and Service Manual. 2000. 3rd edition. Kobe navodila za uporabo.
- Agilent 16452A Liquid Test Fixture. Operation and Service Manual. 2000. Kobe navodila za uporabo.
- Varnostni list Multibond EZ-1. 2003: 4 str.
- Tehnični list Mekol 1130. 2005: 2 str.