

UNIVERZA V LJUBLJANI  
BIOTEHNIŠKA FAKULTETA  
ODDELEK ZA LESARSTVO

Marko PODMENIK

**PROUČEVANJE VPLIVA TEMPERATURE NA  
DIELEKTRIČNE LASTNOSTI  
TEKOČIH LEPIL**

DIPLOMSKO DELO

Visokošolski strokovni študij

Ljubljana, 2006

Popravki:

UNIVERZA V LJUBLJANI  
BIOTEHNIŠKA FAKULTETA  
ODDELEK ZA LESARSTVO

Marko PODMENIK

**PROUČEVANJE VPLIVA TEMPERATURE NA  
DIELEKTRIČNE LASTNOSTI  
TEKOČIH LEPIL**

DIPLOMSKO DELO  
Visokošolski strokovni študij

**TEMPERATURE IMPACT RESEARCH ON  
DIELECTRIC PROPERTIES OF  
LIQUID ADHESIVES**

GRADUATION THESIS  
Higher professional studies

Ljubljana, 2006

Diplomsko delo je zaključek Visokošolskega strokovnega študija lesarstva. Opravljeno je bilo, vključno z vsemi raziskavami, poizkusi in analizami, na Oddelku za lesarstvo Biotehniške fakultete, Univerze v Ljubljani.

Senat Oddelka za lesarstvo je za mentorja diplomske naloge imenoval doc. dr. Milana ŠERNEKA, za recezenta pa prof. dr. Jožeta RESNIKA.

Mentor: doc. dr. Milan ŠERNEK

Recenzent: prof. dr. Jože RESNIK

Komisija za oceno in zagovor:

Predsednik:

Član:

Član:

Datum zagovora:

Delo je rezultat lastnega raziskovalnega dela.

Marko Podmenik

### KLJUČNA DOKUMENTACIJSKA INFORMACIJA

|    |  |
|----|--|
| ŠD | Vs   |
| DK | UDK 630*824.875  |
| KG | dielektrične lastnosti/lepilo/temperatura  |
| AV | PODMENIK, Marko  |
| SA | ŠERNEK, Milan (mentor)/RESNIK, Jože (recenzent)  |
| KZ | SI-1000 Ljubljana; Rožna dolina, c. VIII/34  |
| ZA | Univerza v Ljubljani, Biotehniška fakulteta, Oddelek za lesarstvo  |
| LI | 2006   |
| IN | PROUČEVANJE VPLIVA TEMPERATURE NA DIELEKTRIČNE LASTNOSTI TEKOČIH LEPIL   |
| TD | Diplomsko delo ( visokošolski strokovni študij )   |
| OP | X, 60 str., 12 pregl., 30 sl., 11 pril., 8 vir.  |
| IJ | sl   |
| JI | sl/en  |
| AI | Raziskovali smo vpliv temperature na dielektrične lastnosti tekočih lepil pri 3 različnih frekvencah (100 kHz, 500 kHz in 1 MHz). Proučevali smo 2 polimerizacijski in 3 polikondenzacijska lepila. Pri segrevanju od 20 °C do 90 °C smo lepilom merili spremembe dielektrične vrednosti in izgubni kot. Meritve dielektričnih lastnosti smo opravili z napravo AGILENT 4285A precision LCR meter, medtem, ko smo temperaturo lepila merili z napravo AGILENT 34970A Data acquisition/switch unit. Ugotovili smo, da se dielektrična vrednost lepila ( $\epsilon$ ) povečuje z naraščajočo temperaturo segrevanja in da so dielektrične lastnosti lepila odvisne predvsem od vrste lepila, njegove sestave in viskoznosti. Dodatek katalizatorja je lepilu povečal dielektrično vrednost. Ugotovili smo, da je izgubni kot najvišji takrat, ko je lepilo najbolj tekoče oz. ima najnižjo viskoznost. Ugotovili smo tudi, da se pri povečevanju frekvence električnega polja zmanjšuje dielektričnost v lepilu. |

### KEY WORDS DOCUMENTATION

|    |  |
|----|--|
| ND | Vs   |
| DC | UDC 630*824.875  |
| CX | dielectric properties/adhesive/temperature   |
| AU | PODMENIK, Marko  |
| AA | ŠERNEK, Milan (supervisor)/RESNIK Jože (co-advisor)  |
| PP | SI-1000 Ljubljana; Rožna dolina, c. VIII/34<br>University of Ljubljana, Biotechnical Faculty, Department of Wood Science<br>and Technology   |
| PY | 2006   |
| TI | TEMPERATURE IMPACT RESEARCH ON DIELECTRIC PROPERTIES<br>LIQUID ADHESIVES   |
| DT | Graduation Thesis (Higher professional studies)  |
| NO | X, 60 p., 12 tab., 30 fig., 11 ann., 8 ref.  |
| LA | sl   |
| AL | sl/en  |
| AB | Influence of temperature on dielectric properties of liquid adhesives was researched at 3 different frequencies (100 kHz, 500 kHz in 1 MHz). 2 types of polymerisation and 3 types of polycondensation adhesives were studied. At heating from 20 °C to 90 °C a dielectric properties and loss tangent were measured. Using AGILENT 4285A precision LCR meter dielectric properties were measured also, so as the adhesive temperature with AGILENT 34970A Data acquisition/switch unit. By increasing the heating temperature the dielectric properties increase; they ( $\epsilon$ ) enlarge by increasing the heating temperature, and depend primarily on adhesive type, its structure and viscosity. Catalyst added to the adhesive increases dielectric properties. The loss tangent is the highest when the adhesive is most liquid or when its viscosity is the lowest. By enlarging the electric field frequency the dielectricity of the adhesive reduces. |

## KAZALO VSEBINE

|  | str.     |
|--|----------|
| Ključna dokumentacijska informacija ( KDI ).....       | III      |
| Key words documentation ( KWD ).....                   | IV       |
| Kazalo vsebine .....                                   | V        |
| Kazalo slik .....                                      | VII      |
| Kazalo preglednic.....                                 | X        |
| Kazalo prilog .....                                    | XI       |
| <br>   |          |
| <b>1      UVOD .....</b>                               | <b>1</b> |
| 1.1    SPLOŠNO .....                                   | 1        |
| 1.2    POVOD ZA DELO.....                              | 2        |
| 1.3    HIPOTEZE .....                                  | 2        |
| 1.4    NAMEN DELA .....                                | 2        |
| <b>2      PREGLED OBJAV .....</b>                      | <b>3</b> |
| 2.1    ELEKTRIČNE LASTNOSTI SNOVI .....                | 4        |
| 2.1.1    Dielektrična vrednost snovi .....             | 4        |
| 2.1.2    Kapacitivnost .....                           | 5        |
| 2.1.3    Izgubni faktor dielektrika.....               | 6        |
| 2.1.4    Princip meritev kapacitete kondenzatorja..... | 7        |
| 2.1.5    Lepila za visokofrekvenčno lepljenje.....     | 7        |
| <b>3      MATERIALI IN METODE .....</b>                | <b>9</b> |
| 3.1    KARAKTERISTIKE POSAMEZNIH LEPIL.....            | 9        |
| 3.2    PRIPRAVA LEPILA .....                           | 10       |
| 3.2.1    Priprava UF lepila .....                      | 10       |
| 3.2.2    Priprava lepila PVA 1141 .....                | 10       |

|                |  |    |
|----------------|--|----|
| 3.3            | PRIPRAVA TERMOČLENA ZA MERJENJE TEMPERATURE .....                          | 11 |
| 3.4            | PRIPRAVA SONDE ZA MERJENJE DIELEKTRIČNIH LASTNOSTI TEKOČIN.....            | 12 |
| 3.5            | METODE .....   | 13 |
| 3.5.1          | Priprava načrta za izvedbo merjenj .....                                   | 13 |
| 3.5.2          | Postopek meritve .....   | 14 |
| 3.5.3          | Programska in strojna oprema .....   | 16 |
| 4              | REZULTATI IN RAZPRAVA.....   | 18 |
| 4.1            | REZULTATI MERITEV DIELEKTRIČNIH LASTNOSTI LEPIL .....                      | 18 |
| 4.1.1          | Naraščanje temperature v lepilu med segrevanjem v odvisnosti od časa ..... | 19 |
| 4.1.2          | Dielektrične lastnosti proučevanih lepil .....                             | 20 |
| 4.1.3          | Dielektrične vrednosti lepil ( $\epsilon$ ).....                           | 23 |
| 4.1.4          | Tangens izgubnega kota ( $\operatorname{tg}\delta$ ).....                  | 33 |
| 5              | SKLEPI .....   | 39 |
| 6              | POVZETEK .....   | 40 |
| 7              | VIRI .....   | 41 |
| <b>ZAHVALA</b> |  |    |
| <b>PRILOGE</b> |  |    |

## KAZALO SLIK

|   |      |
|---|------|
|   | str. |
| Slika 1: Fazni zamik toka za kot $\delta$ .....   | 6    |
| Slika 2: Odvisnost časa utrjevanja urea-formaldehidnega lepila od vsebnosti suhe<br>snovi (Resnik, 1995).....                               | 8    |
| Slika 3: Elektronska tehnika in način merjenja mešanice lepila.....   | 11   |
| Slika 4 : Princip delovanja termočlena .....  | 12   |
| Slika 5: Prikaz razstavljene sonde na osnovne elemente: tesnila, distančnik in oba<br>dela sonde z elektrodama.....                         | 13   |
| Slika 6: Priključitev sonde merjenje dielektričnih lastnosti tekočin na natančen<br>LCR meter .....   | 13   |
| Slika 7: Natančni LCR meter Agilent 4285A za merjenje dielektričnih vrednosti<br>količin na frekvenčnem območju od 75 kHz do 30 MHz .....   | 16   |
| Slika 8: Data acquisition / switch unit (Agilent 34970A) za merjenje temperature.....   | 16   |
| Slika 9: Shematski prikaz povezave strojne opreme za merjenje dielektričnih<br>lastnosti in temperature lepila.....                         | 17   |
| Slika 10: Naraščanje temperature v lepilih med segrevanjem v odvisnosti od časa. ....   | 19   |
| Slika 11: Dielektrična vrednost fenol-formaldehidnega lepila v odvisnosti od<br>temperature segrevanja pri frekvenci 100 kHz frekvenci..... | 23   |
| Slika 12: Dielektrična vrednost PVA lepila v odvisnosti od temperature segrevanja<br>pri frekvenci 100 kHz.....                             | 24   |
| Slika 13: Dielektrična vrednost UF lepila v odvisnosti od temperature segrevanja pri<br>frekvenci 100 kHz .....                             | 25   |

|   |    |
|---|----|
| Slika 14: Dielektrična vrednost fenol-formaldehidnega lepila v odvisnosti od temperature segrevanja pri frekvenci 500 kHz ..... | 26 |
| Slika 15: Dielektrična vrednost PVA lepila v odvisnosti od temperature segrevanja pri frekvenci 500 kHz.....                    | 27 |
| Slika 16: Dielektrična vrednost UF lepila v odvisnosti od temperature segrevanja pri frekvenci 500 kHz .....                    | 28 |
| Slika 17: Dielektrična vrednost fenol-formaldehidnega lepila v odvisnosti od temperature segrevanja pri frekvenci 1 MHz .....   | 29 |
| Slika 18: Dielektrična vrednost PVA lepila v odvisnosti od temperature segrevanja pri frekvenci 1 MHz .....                     | 30 |
| Slika 19: Dielektrična vrednost UF lepila v odvisnosti od temperature segrevanja pri frekvenci 1 MHz.....                       | 31 |
| Slika 20: Dielektrična vrednost lepila v odvisnosti od frekvence pri temperaturi 65°C ...                                       | 32 |
| Slika 21: Tangens izgubnega kota fenol-formaldehidnega lepila v odvisnosti od temperature segrevanja pri frekvenci 100 kHz..... | 33 |
| Slika 22: Tangens izgubnega kota PVA lepila v odvisnosti od temperature segrevanja pri frekvenci 100 kHz.....                   | 34 |
| Slika 23: Tangens izgubnega kota UF lepila v odvisnosti od temperature segrevanja pri frekvenci 100 kHz.....                    | 34 |
| Slika 24: Tangens izgubnega kota fenol-formaldehidnega lepila v odvisnosti od temperature segrevanja pri frekvenci 500 kHz..... | 35 |
| Slika 25: Tangens izgubnega kota PVA lepila v odvisnosti od temperature segrevanja pri frekvenci 500 kHz.....                   | 35 |

---

|  |    |
|--|----|
| Slika 26: Tangens izgubnega kota UF lepila v odvisnosti od temperature segrevanja pri frekvenci 500 kHz .....                  | 36 |
| Slika 27: Tangens izgubnega kota fenol-formaldehidnega lepila v odvisnosti od temperature segrevanja pri frekvenci 1 MHz ..... | 36 |
| Slika 28: Tangens izgubnega kota PVA lepila v odvisnosti od temperature segrevanja pri frekvenci 1 MHz .....                   | 37 |
| Slika 29: Tangens izgubnega kota UF lepila v odvisnosti od temperature segrevanja pri frekvenci 1 MHz .....                    | 37 |
| Slika 30: Tangens izgubnega kota v odvisnosti od frekvence pri temperaturi 65°C .....  | 38 |

## KAZALO PREGLEDNIC

str.

|  |    |
|--|----|
| Preglednica 1: Dielektrične vrednosti nekaterih snovi (Resnik in sod., 1995).....  | 5  |
| Preglednica 2 : Število meritev in temperatura segrevanja .....  | 14 |
| Preglednica 3: Del zapisa dielektričnih lastnosti tekočih lepil (prvih 15 meritev).....  | 15 |
| Preglednica 4: Delni prikaz izračunanih povprečnih vrednosti dielektričnih lastnostih za UF lepilo .....                                   | 18 |
| Preglednica 5: Dielektrična vrednost in tangens izgubnega kota za lepilo PF0 pri izbranih temperaturah .....                               | 20 |
| Preglednica 6: Dielektrična vrednost in tangens izgubnega kota za lepilo PF1 pri izbranih temperaturah .....                               | 20 |
| Preglednica 7: Dielektrična vrednost in tangens izgubnega kota za lepilo Mekol 1141 pri izbranih temperaturah.....                         | 21 |
| Preglednica 8: Dielektrična vrednost in tangens izgubnega kota za lepilo Mekol 1163 pri izbranih temperaturah.....                         | 21 |
| Preglednica 9: Dielektrična vrednost in tangens izgubnega kota za UF lepilno smolo pri izbranih temperaturah.....                          | 22 |
| Preglednica 10: Dielektrična vrednost in tangens izgubnega kota za UF lepilno mešanico (smola + utrjevalec pri izbranih temperaturah ..... | 22 |
| Preglednica 11: Dielektrične vrednosti lepil pri temperaturi 65 °C .....   | 31 |
| Preglednica 12: Tangens izgubnega kota lepil pri temperaturi 65 °C .....   | 38 |

## KAZALO PRILOG

- Priloga A: Vpliv termočlena na meritev
- Priloga B: Prikaz UF lepila smola + katalizator in sonde, ki je delno želiralo pri  $T = 67.7 \text{ } ^\circ\text{C}$ , ponekod ob straneh pa že delno utrdilo
- Priloga C: Prikaz lepila UF smola + katalizator, ki je utrdilo v sondi pri  $T = 70.91 \text{ } ^\circ\text{C}$ . Sondo smo odprli s pomočjo klešč, čiščenje je bilo zelo zamudno, lepilo se je prijelo na obe elektrodi
- Priloga D: Prikaz lepila PF0 in PF1 pri  $T = 90 \text{ } ^\circ\text{C}$ . Lepila sta po odprtju sonde bila še v tekočem stanju, čiščenje je potekalo brez problemov
- Priloga E: Prikaz lepila PF0 in PF1 pri  $T = 90 \text{ } ^\circ\text{C}$ , kjer je lepilo teklo iz sonde
- Priloga F: Prikaz lepila Mekol 1141, ki je pri našem eksperimentu naletel na nekaj težav. Lepilo je reagiralo s sondom in delno poškodovalo zgornjo plast elektrode. Na sliki se vidijo elektrode, ki so postale temne.
- Priloga G: Prikaz polnjenja sonde z inekcijo v kateri je PF0 lepilo
- Priloga H: Specifikacija lepila Mekol 1141
- Priloga I: Specifikacija lepila Mekol 1163

## 1 UVOD

### 1.1 SPLOŠNO

Segrevanje lesa in z njim povezano utrjevanje lepila je pri lepljenju v lesni industriji zelo pogosto uporabljen postopek. Za segrevanje in lepljenje lesa se v praksi poleg klasičnega segrevanja uporablja tudi neposredno segrevanje v električnem polju visoke frekvence (VF), ki ga imenujemo visokofrekvenčno ali dielektrično segrevanje. Tak način segrevanja je hiter in primeren za večje prereze (debeline) ter nepravilne oblike lepljencev. Pomanjkljivost visokofrekvenčnega segrevanja pa je predvsem relativno slaba stopnja izkoristka električne energije in visoka investicija za opremo.

O dielektričnem segrevanju govorimo takrat, ko med dve kovinski plošči (elektrodi), določene površine ( $S$ ), postavimo lepilo ali kos lesa (dielektrik) z dielektrično vrednostjo ( $\epsilon$ ), oziroma relativno dielektrično vrednost ( $\epsilon_r$ ), s faktorjem izgubnega kota ( $\tan \delta$ ) in debelino ( $d$ ). Ko elektrodi priključimo na visokofrekvenčno električno napetost, lahko sistem elektrod in lepila ali lesa obravnavamo kot kondenzator. Tak kondenzator je sposoben akumulirati del energije, ko med ploščama obstaja razlika v napetosti in jo oddati, ko ta napetost izgine. Lastnost kondenzatorja je, da v določenih razmerah akumulira določeno količino energije, čemur pravimo kapacitivnost (Resnik, 1995).

Lepila za dielektrično lepljenje, ki so manj viskozna, z manjšo vsebnostjo suhe snovi, imajo višjo dielektrično vrednost in večji faktor izgub. V procesu visokofrekvenčnega lepljenja je ta lastnost pozitivna, vendar pa imajo takšna lepila nizko prebojno vrednost. Pri segrevanju pride do močnega izparevanja disperzijskega sredstva, kar povzroči večjo porabo energije in daljši čas segrevanja za njihovo utrjevanje.

Z molekularnega vidika predstavlja proces utrjevanja lepila spreminjanje malih molekul v večje molekule. Med procesom segrevanja lepila se tvorijo daljše verige, ki se vežejo, prepletajo ter združujejo v tridimenzionalno mrežo in dobivajo končno trdno obliko. Med samim procesom segrevanja potekajo v lepilu določene fizikalne spremembe snovi. Ena izmed zelo pomembnih sprememb je spreminjanje dielektričnih lastnosti lepila, ki vključujejo dielektrično vrednost ( $\epsilon$ ) in tangens izgubnega kota ( $\tan \delta$ ).

## 1.2 POVOD ZA DELO

Intenzivnost segrevanja lepila in lesa v VF polju je neposredno odvisna od faktorja intenzivnosti segrevanja, ki predstavlja zmnožek med  $\epsilon$  in  $\operatorname{tg}\delta$ . Z vidika porabe energije pri VF lepljenju je smiselno segrevati predvsem lepilni spoj, medtem ko naj bi bilo segrevanje lesa manj intenzivno (selektivno segrevanje). Zato je zaželeno, da ima lepilo čim višji  $\epsilon$  in  $\operatorname{tg}\delta$ . Za optimalno nastavitev VF generatorja moramo poleg tehnoloških parametrov poznati začetne vrednosti dielektričnih lastnosti lepila in njihovo spremembo med segrevanjem. S pridobitvijo nove opreme za merjenje dielektričnih lastnosti tekočin lahko tudi neutrjenim (tekočim) lepilom izmerimo  $\epsilon$  in  $\operatorname{tg}\delta$ . Smiselno je raziskati dielektrične lastnosti tekočega lepila, da lahko s pridobljenimi podatki čim bolj izboljšamo postopek VF lepljenja.

## 1.3 HIPOTEZE

Predpostavljam, da hitrost utrjevanja polikondenzacijskih in polimerizacijskih lepil narašča v odvisnosti od temperature segrevanja lepila. Predvidevamo, da ta odvisnost ni popolnoma linearна. Predvidevamo, da lahko to odvisnost ugotovimo na osnovi merjenja sprememb dielektričnih lastnosti tekočega lepila. Predpostavljam, da so dielektrične lastnosti tekočega lepila bistveno drugačne od utrjenega lepila. Pričakujemo, da bo hitrost utrjevanja odvisna od vrste in sestave lepila.

## 1.4 NAMEN DELA

Osnovni cilj naloge bo spremljati in ugotoviti dielektrične vrednosti za pet različnih vrst lepil, pri treh različnih frekvencah (100 kHz, 500 kHz, 1 MHz). Proučili in primerjali bomo dielektrične lastnosti polimerizacijskih in polikondenzacijskih lepil. Ugotovili bomo, kaj se z dielektričnimi lastnostmi dogaja v procesu segrevanja in ugotavljali vpliv katalizatorja na dielektrične lastnosti lepilne mešanice.

## 2 PREGLED OBJAV

Hitrost utrjevanja lepila je odvisna od temperature lepljenja, saj je kinetika kemijske reakcije odvisna predvsem od višine temperature. Utrjevanje polikondenzacijskih lepil pri temperaturi 100 °C je hitro, čas lepljenja pa se bistveno skrajša. Spremembe dielektričnih lastnosti so povezane s spremjanjem viskoznosti in utrjenosti lepila. Na začetku lepljenja je lepilo tekoče in ima visoko dielektrično vrednost. Ko lepilo utrujuje, se število dipolov manjša zaradi nastajanja makromolekul in difuzije vode iz lepila v les. Manj kot je dipolov v lepilu, nižja je njegova dielektrična vrednost (Šernek, 2004).

Če v homogeno električno polje vstavimo kakršnokoli snov, električno polje prodre v snov, na atome pa deluje električna sila. V snovi se influirajo naboji. Influenca je seveda bolj izrazita pri elektroprevodnih snoveh, njen pojav povzroči spremembo električnega polja, saj influirani naboji v snovi oslabijo električno poljsko jakost znotraj snovi za faktor  $\epsilon$ , ki se imenuje dielektričnost (Resnik in sod 1995).

Pri kapacitivnem segrevanju oz. dielektrični prevodnosti lepila je pomemben dejavnik napetost električnega polja med kondenzatorjem, kapaciteta in dodana energija. Pomembno vlogo ima dielektrična konstanta oziroma vrednost, ki je pri lesu odvisna od njegove gostote, vlažnosti in temperature, pri lepilu pa od vrste smole, deleža suhe snovi in temperature. Dielektrična konstanta je pri lepilu večja kot pri lesu (Resnik, 1995).

Vpliv segrevanja na spremembo lastnosti lepila je mogoče ugotovljati tudi s termomehanično analizo (TMA). Kinij T. in sod (2000) so sintetizirali fenol-formaldehidno (FF) smolo in jo uporabili za lepljenje furnirjev rdečega merantija (*Shorea spp*) debeline 1.7 in vlažnosti 4%. Furnirje so med seboj zlepili v slojnat furnirni les (LVL). Nato so ugotovljali, kako temperatura vpliva na hitrost utrjevanje lepila. Pri temperaturi 135°C je lepilo utrjevalo 45 sekund. Z zvišanjem temperature s 135°C na 145°C se je skrajšal čas utrjevanja za 15 sekund. Prišli so do sklepa, da je TMA analiza zelo primerna za proučevanje in razumevanje pogojev pri vročem stiskanju LVL.

Šernek in sod. (2000) so proučevali dielektrične lastnosti lepilnega spoja med utrjevanjem urea-formaldehidnih (UF) lepil. Namen raziskave je bil raziskati vpliv temperature lepljenja na stopnjo utrjevanja pri različnih temperaturah lepljenja (80, 95, 100, 125 in 140 °C) in času lepljenja 10 min. Rezultate meritev so predstavili z modificirano Arrheniusovo enačbo:

$$\frac{dF}{dt} = A * e^{-\frac{E}{R*T}} * (1 - F)^n \quad \dots(1)$$

Ugotovljeno je bilo, da ima temperatura lepljenja velik vpliv na dielektrični faktor izgub in stopnjo utrjenosti UF lepil. Na začetku utrjevanja dielektrični faktor izgub narašča z naraščanjem temperature in doseže največjo vrednost. Pri konstantni temperaturi je dielektrični faktor izgub odvisen samo od polikondenzacije UF lepila in adsorbcije vode iz lepilnega spoja lesa. Ko je polikondenzacija končana, je dielektrični faktor izgub konstanten. Z višanjem temperature se je čas utrjevanja krajšal.

## 2.1 ELEKTRIČNE LASTNOSTI SNOVI

### 2.1.1 Dielektrična vrednost snovi

Električno polje ( $E$ ) v snovi je polje, ki z električno silo vpliva na električne delce v njej in na snov, kamor se influira naboj. Influensa je manj izrazita pri neprevodnih snoveh, v katerih se težišče pozitivnega in negativnega naboja atoma pod vplivom zunanjega polja težko razmakineta. Te snovi imenujemo dielektriki. Pojav influence povzroči spremembo električnega polja. Električna poljska jakost se spremeni za faktor  $\epsilon$ , ki se imenuje dielektričnost (Kladnik, 1977):

$$E = \frac{E_0}{\epsilon} \Rightarrow \epsilon = \frac{E_0}{E} \quad \dots(2)$$

|            |  |
|------------|--|
| $E$        | električna poljska jakost v snovi [N/As] |
| $E_0$      | prvotna električna poljska jakost [N/As] |
| $\epsilon$ | dielektričnost snovi                     |

Tako lahko zapišemo dielektrično vrednost snovi, kot razmerje med prvotno električno poljsko jakostjo in električno poljsko jakostjo v snovi.

Dielektričnost, oz. dielektrično vrednost snovi ( $\epsilon$ ) lahko definiramo kot število, za katero se poveča kapaciteta nekega kondenzatorja, če vakuum med njegovima elektrodama nadomestimo z omenjeno snovjo. Dielektrična vrednost je tudi mera za električno energijo, ki se absorbira in shrani v obliki električne polarizacije v neki snovi, ko je le-ta v električnem polju.

V preglednici 1 so podane vrednosti dielektričnosti nekaterih snovi. Veliko dielektričnost ima voda (88.0 pri 0°C), medtem ko je dielektričnost plinov 1. Dielektričnost vode je močno odvisna od temperature, saj upada z naraščajočo temperaturo.

Preglednica 1: Dielektrične vrednosti nekaterih snovi (Resnik in sod., 1995).

| SNOV                  | DIELEKTRIČNA VREDNOST |
|-----------------------|-----------------------|
| Zrak (0 °C, 1 bar )   | 1,00059               |
| Papir                 | 2                     |
| Petrolej              | 2,1                   |
| Benzol                | 2,3                   |
| Led (0°C )            | 2,8                   |
| Les                   | 2 - 8                 |
| Trda guma             | 2,8                   |
| Pleksi steklo         | 3 - 3,6               |
| Celuloid              | 3 - 4                 |
| Eter                  | 4,1                   |
| Kremen                | 4,3                   |
| Bakelite              | 4 - 4,6               |
| Sljuda                | 4 - 8                 |
| Elektroporcelan       | 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             | 88,0                  |
| 10 °C                 | 84,4                  |
| 20 °C                 | 80,4                  |
| 30 °C                 | 76,8                  |
| 40 °C                 | 73,3                  |
| 50 °C                 | 69,9                  |

### 2.1.2 Kapacitivnost

Kapacitivnost kondenzatorja ( $C$ ) pove, kolikšen naboje lahko kondenzator sprejme pri napetosti enega volta. Kapacitivnost raste s površino plošče, pada pa z razmikom med ploščama. Če hočemo povečati kapacitivnost kondenzatorja moramo vstaviti med plošči kondenzatorja dielektrik s čim večjo dielektrično vrednostjo ( $\epsilon$ ). Zapišemo lahko naslednjo enačbo:

$$C = \frac{\epsilon_0 \times \epsilon \times S}{d} \quad \dots(3)$$

- $C$  kapacitivnost kondenzatorja [F]  
 $\epsilon_0$  influenčna konstanta ( $8,85 \times 10^{-12} (\text{As})^2 / \text{Nm}^2$ )  
 $\epsilon$  dielektrična vrednost snovi  
 $S$  površina plošč ( $\text{m}^2$ )  
 $d$  razdalja med ploščama debelina snovi med ploščama (m)

Iz enačbe (3) je razvidno, da je kapacitivnost obratno sorazmerna z debelino materiala in premo sorazmerna s površino plošč ter dielektrično vrednostjo snovi. Večja kot je dielektrična vrednost, večja je kapacitivnost. Izolatorji imajo v primerjavi s prevodniki nižjo dielektrično vrednost (Kladnik, 1977).

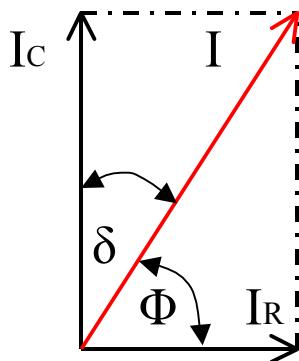
### 2.1.3 Izgubni faktor dielektrika

Poleg dielektrične vrednosti materiala v visokofrekvenčnem polju poznamo še en faktor, ki opredeljuje dielektrik in vpliva na dielektrično obnašanje snovi; imenujemo ga izgubni faktor, za katerega se uporablja oznaka  $\tg \delta$ . Ta faktor je mera za del v dielektriku absorbirane energije, ki se bo spremenila v toploto. V primeru idealnega dielektrika ne prihaja do izgub energije, vendar se v praksi srečujemo z nepopolnimi dielektriki. Fazni zamik napetosti glede na tok je manjši od  $90^\circ$ , razliko od  $90^\circ$  pa imenujemo kot izguba dielektrika. Tangens tega kota se imenuje izgubni faktor dielektrika, ki ima direkten, sorazmeren vpliv na intenzivnost gretja dielektrika, in s tem na količino porabljenene energije.  $\tg \delta$  je tisti del energije, ki se po prenehanju delovanja električnega polja ne povrne. Slabi dielektriki imajo kot izgub nekaj stopinj, dobri pa vsega nekaj minut. V praksi računamo s faktorjem izgub lesa 0,05 in faktorjem izgub lepila 0,5. (Resnik, 1995)

Izgubni faktor  $\tg \delta$  lahko izrazimo:

$$\tg \delta = \frac{I_R}{I_C} \quad \dots(4)$$

|              |                           |
|--------------|---------------------------|
| $\tg \delta$ | fazni zamik kota $\delta$ |
| $I_R$        | obremenilni tok           |
| $I_C$        | prevodni tok              |



Slika 1: Fazni zamik toka za kot  $\delta$ .

### 2.1.4 Princip meritev kapacitete kondenzatorja

Kondenzator je sistem dveh med seboj izoliranih elektrod. Če kondenzator priključimo na napetost, se pojavi med ploščama kondenzatorja električno polje. Po izključitvi napetostnega vira ostane ena izmed elektrod pozitivno nabita, druga pa negativno. Konstanta, značilna za kondenzator, se imenuje kapaciteta. Kapaciteta kondenzatorja je odvisna od izolatorja med elektrodami in jo merimo v faradih (F). Kapaciteto enega farada ima kondenzator, ki je nabit z nabojem 1 coulomba (C) in na katerem je napetost 1 volt (V). Če primerjamo kapaciteto kondenzatorja z dielektrikom, s kapaciteto praznega kondenzatorja (vakuum), dobimo dielektrično vrednost snovi  $\epsilon$ . Dielektrična vrednost je v

$$\text{vakuumu enaka influenčna konstanti } \epsilon_0 = 8,852 \times 10^{-12} \frac{\text{As}}{\text{Vm}}$$

Sprememba kapacitete zaradi dielektrika je posledica električnih pojavov v molekulah dielektrika. V dielektriku pride do polarizacije. Molekule dielektrika tvorijo dipole vzdolž silnic električnega polja. Električno polje dipolov ima nasprotno smer kot polje kondenzatorja. Silnice električnega polja v kondenzatorju so zaradi tega krajše kot pred vstavitevijo dielektrika, kar lahko primerjamo s krajšanjem razdalje med ploščama. Posledica tega je povečanje kapacitete kondenzatorja.

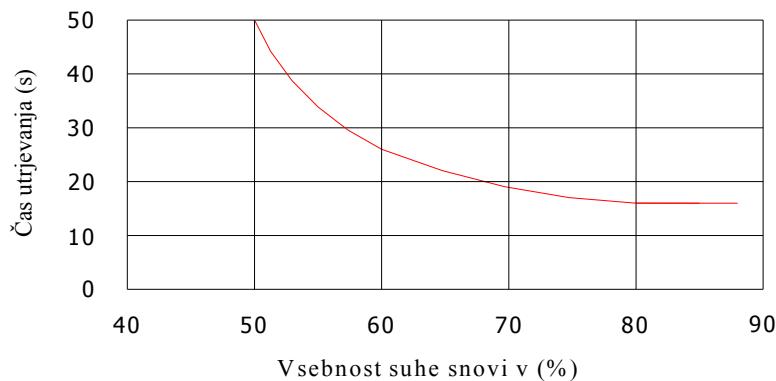
### 2.1.5 Lepila za visokofrekvenčno lepljenje

Na splošno lahko rečemo, da so za visokofrekvenčno lepljenje lesa primerna lepila z nekoliko višjo vsebnostjo suhe snovi (okoli 60%), kar hkrati omogoča zmanjšanje potrebnega nanosa lepila. V to skupino spadajo predvsem polikondenzacijska lepila in lepila, ki imajo podobno kemijsko sestavo.

Fenol-formaldehidna in urea-formaldehidna lepila so polikondenzacijska lepila. So zelo toplotno aktivna in tvorijo, pod vplivom toplotne, zamreženo tridimenzionalno prostorsko strukturo.

Osnova fenol-formaldehidnih lepil so rezoli, ki nastanejo s polikondenzacijo fenolov in formaldehida. Zamreženje, pri nižjih temperaturah poteka, s kondenzacijo (izločanje vode) fenolne smole, ki so v tem primeru povezane preko estrskih vezi (fenol  $-\text{CH}_2\text{-O-CH}_2-$  fenol). Pri višjih temperaturah lepljenja pa se ne izloča samo voda, ampak se izloča tudi formaldehid ( $\text{HCHO}$ ), ki je škodljiv za okolje in za človeka (kancerogenost).

Urea-formaldehidna lepila sestavljajo relativno visoko-molekularni polimeri uree in formaldehida v vodni disperziji. Zamreženje poteka s kondenzacijo (procesom utrjevanja), ki jo sproži dodatek katalizatorja in dovajanje toplotne energije. Katalizatorji so soli močnih kislin, ki znižujejo pH vrednost lepil, kar sproži reakcijo utrjevanja. Z dodajanjem toplotne povzročimo reakcijo utrjevanja in vplivamo na hitrost utrjevanja.



Slika 2: Odvisnost časa utrjevanja urea-formaldehidnega lepila od vsebnosti suhe snovi (Resnik, 1995)

Polimerizacijska lepila sodijo v skupino termoplastnih sintetičnih lepil. Osnovni surovini sta acetilen ( $\text{HC} \equiv \text{CH}$ ) in ocetna kislina ( $\text{CH}_3\text{COOH}$ ). Acetilen se pridobiva z izločitvijo vodika iz etilena, ocetno kislino pa z oksidacijo etilena v acetaldehid in dalje v ocetno kislino. Glede na stopnjo polimerizacije je produkt le-te lahko disperzija, emulzija ali trdna snov. Lepila lahko uporabljamo za hladna, topla in vroča lepljenja. Lepila so univerzalna, saj lepijo skoraj vse, po drugi strani pa je njihova slaba lastnost, da so zelo termoplastna pri temperaturnem razponu od  $60^\circ\text{C}$  do  $120^\circ\text{C}$ . Z dodajanjem toplotne pospešimo utrjevanje. Lahko jim dodamo tudi utrjevalce za hitrejše utrjevanje, tako kot pri urea-formaldehidnih lepilih.

### 3 MATERIALI IN METODE

#### 3.1 Karakteristike posameznih lepil

Pri proučevanju vpliva temperature na dielektrične lastnosti tekočih lepil smo pri raziskavi uporabili pet vrst lepil:

- Fenol-formaldehidno lepilo tipa GP 3120 – v nadaljevanju označeno kot PF0
- Fenol-formaldehidno lepilo tipa GP 3121 – v nadaljevanju označeno kot PF1
- Urea-formaldehidno lepilo tipa YTT –149-03 – v nadaljevanju označeno kot UF
- Disperzijsko lepilo Mekol 1163 – v nadaljevanju označeno kot PVA 1163
- Disperzijsko lepilo Mekol 1141 – v nadaljevanju označeno kot PVA 1141

Lepila so bila skladiščena v zaprtih posodah iz umetne snovi z dobro zatesnjenimi pokrovi. Lepila PF0, PF1 in UF smo skladiščili v hladilniku, lepila PVA 1163 in PVA 1141 pa smo skladiščili pri temperaturi 18 °C.

**Lepilo z oznako PF0** je fenol-formaldehidno lepilo in se uporablja za lepljenje srednjega sloja OSB plošč. Proizvaja ga Georgia-Pacific Resinc, Inc. Kemična formula lepila je  $(C_6H_6O \cdot CH_2O)_x \cdot Na$ . Lastnosti lepila z oznako PF0 po navedbah proizvajalca:

|                  |                                  |
|------------------|----------------------------------|
| izgled lepila:   | temnordeča do rjava tekočina     |
| vonj:            | rahel vonj po fenolu             |
| pH:              | povprečno 10                     |
| vrelišče:        | 100 °C                           |
| gostota (25 °C): | približno 1,22 g/cm <sup>3</sup> |

**Lepilo z oznako PF1** je fenol-formaldehidno lepilo, uporablja se za lepljenje zunanjega sloja OSB plošč. Proizvaja ga Georgia-Pacific Resinc, Inc. Kemična formula lepila je  $(C_6H_6O \cdot CH_2O)_x \cdot Na$ . Lepili PF0 in PF1 se med sabo razlikujeta predvsem po različni stopnji pred polikondenzacije.

**Lepilo z oznako UF** je urea-formaldehidno lepilo brez dodatkov in se uporablja za lepljenje MDF plošč. Proizvaja ga Dynea U.S.A. Inc. Lastnosti lepila z oznako UF po navedbah proizvajalca:

|                  |   |
|------------------|---|
| izgled lepila:   | motno bela tekočina                                       |
| vonj:            | rahel vonj po formaldehidu                                |
| pH:              | 7,5 - 8,5   |
| vrelišče:        | 100 °C  |
| gostota (25 °C): | približno 1,23 g/cm <sup>3</sup> - 1,34 g/cm <sup>3</sup> |

**Lepilo z oznako PVA 1163** je vodna disperzija polivinilacetatnega polimera in je namenjen za hitro širinsko in debelinsko lepljenje trdega masivnega lesa. Proizvaja ga Mitol Sežana d.d. Lastnosti lepila z oznako PVA 1163 po navedbah proizvajalca:

|                |                      |
|----------------|----------------------|
| izgled lepila: | motno oker tekočina  |
| vonj:          | ni posebnega vonja   |
| pH (ISO 976):  | 4,5                  |
| viskoznost:    | 8 000 – 11 000 mPa s |
| kredna točka:  | 5 °C                 |

**Lepilo z oznako PVA 1141** je vodna disperzija polivinilacetatnega polimera z dodatki in je namenjen uporabi v stavbnem pohištву (okna, zunanjа vrata), pohištву za vlažne prostore in kuhinjskim delovnim površinam. Proizvaja ga Mitol Sežana d.d. Lastnosti lepila z oznako PVA 1141 po navedbah proizvajalca:

|                |                       |
|----------------|-----------------------|
| izgled lepila: | motno bela tekočina   |
| vonj:          | ni posebnega vonja    |
| pH (ISO 976):  | 5,5                   |
| viskoznost:    | 12 000 – 15 000 mPa s |
| kredna točka:  | 4 °C                  |

### 3.2 PRIPRAVA LEPILA

Lepila PF0, PF1, PVA 1163 so bila že pripravljena za uporabo in smo jih pred začetkom meritve zgolj pustili eno uro pri sobni temperaturi 22,2 °C in relativni zračni vlagi 34%. Lepili UF in PVA 1141 pa smo morali pred merjenjem pripraviti.

#### 3.2.1 Priprava UF lepila

Uporabili smo UF lepilo, proizvajalca Dynea U.S.A. Inc. Lepilu smo dodali katalizator NH<sub>4</sub>Cl (amon klorid) v trdni obliki, v razmerju 1 : 99 (katalizator : lepilo). Lepilo smo pripravili po predpisanim receptu vsakokrat posebej pred meritvijo, saj smo hoteli, da je lepilna mešanica vedno sveže pripravljena. Razmerje pri pripravi lepila smo določali s pomočjo elektronske tehtnice. Katalizator in lepilo smo zmešali v majhni čaši z očiščeno stekleno paličico.

#### 3.2.2 Priprava lepila PVA 1141

Uporabili smo PVA 1141 lepilo, proizvajalca Mitol Sežana. Lepilu smo dodali utrjevalec AlCl<sub>3</sub> (aluminijev klorid) v tekoči obliki, v razmerju 1 : 20 (utrjevalec : lepilo). Lepilo smo pripravili vsakokrat posebej pred meritvijo. Razmerje pri pripravi lepila smo določali s pomočjo elektronske tehtnice. Utrjevalec in lepilo smo zmešali v majhni čaši z očiščeno stekleno paličico.



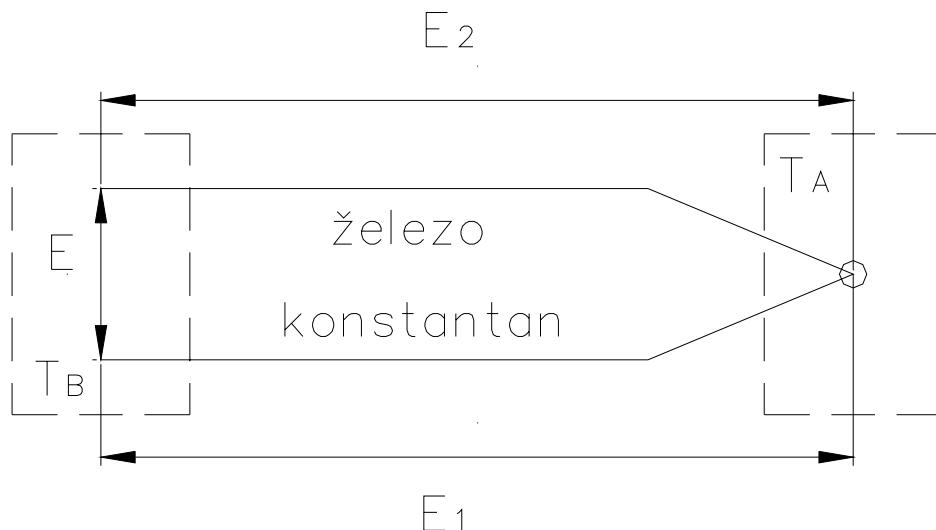
Slika 3: Elektronska tehnica in način merjenja mešanice lepila

### 3.3 PRIPRAVA TERMOČLENA ZA MERJENJE TEMPERATURE

Pri proučevanju dielektričnih lastnosti smo lepilo segrevali. Temperaturo lepila smo meril s termočlenom. Merjenje temperature s termočleni je ena najpomembnejših električnih metod merjenja temperature. Uporabljamo jih za merjenje temperature v zelo širokem območju, od kriogenih temperatur z nekaj K pa vse do temperature 2600 °C. Glavna pomanjkljivost termočlenov pa je relativno šibak izhodni signal.

Princip delovanja termočlenov lahko pojasnimo na modelu dveh vodnikov, ki sta sklenjena na enem mestu (slika 4) v našem primeru je bil to navoj. Materiala vodnikov sta izbrana tako, da je med njima čim večja razlika v elektronski gostoti. Pri segrevanju sklenjenega mesta termočlena nastopi migracija elektronov iz elektronsko bogatejšega v elektronsko revnejše območje. Posledica tega je nastanek termonapetosti med vodnikoma na razklenjenem mestu. Ta fenomen imenujemo *Seebeckov efekt*.

V našem primeru smo uporabljali termočlen tipa "J", ki je sestavljen iz železa (Fe) in konstantana ( $Cu_{60}Ni_{40}$ ). Na začetku smo z nožem prerezali skupno vlaknasto oblogo in ločili oba vodnika. Iz posameznih vodnikov smo odstranili izolacijo ter vodnika zvili v navoj tako, da smo dobili točko sklenitve. Navoj smo ovili z lepilnim trakom, da ne bi prišel v stik s kovinskimi deli sonde za merjenje dielektričnih lastnosti tekočin. Na dolžini 50 mm od konca smo termočlen prepognili in tako pripravljenega vstavili v sondu.



Slika 4 : Princip delovanja termočlena

|                 |                               |
|-----------------|-------------------------------|
| $E_1$           | elektronsko bogatejše območje |
| $E_2$           | elektronsko revnejše območje  |
| $T_A$           | temperatura 1                 |
| $T_B$           | temperatura 2                 |
| $E = E_1 - E_2$ | električni potencial          |

### 3.4 PRIPRAVA SONDE ZA MERJENJE DIELEKTRIČNIH LASTNOSTI TEKOČIN

Na začetku meritve sondu razstavimo na dva dela in na elemente (tesnila, vijaki,...) ter jo dobro očistimo z destilirano vodo. Nato s suho papirnato krpo obrišemo vse elemente do suhega. Zelo pomembno je, da je sonda res suha in dobro očiščena, saj bo tako meritev res točna in primerljiva z ostalimi meritvami. Pri sestavi sonde vstavimo vsa tesnila in 1 mm debel distančnik med kondenzatorskima ploščama. Sondo stisnemo skupaj s štirimi vijaki in jo pokonci vstavimo v stojalo. Sondo priključimo na vodnike, ki so povezani z natančnim LCR metrom (Agilent 4285 A, 75-30 MHz), skozi odprtino pa vstavimo termočlen za merjenje temperature, ki je povezan z Data Acquisition/Switch Unit (Agilent 34970A).



Slika 5: Prikaz razstavljene sonde na osnovne elemente: tesnila, distančnik in oba dela sonde z elektrodama.



Slika 6: Priklopljeni sondi merjenje dielektričnih lastnosti tekočin na natančen LCR meter.

### 3.5 METODE

#### 3.5.1 Priprava načrta za izvedbo merjenj

Eksperiment smo zastavili tako, da smo merili kapacitivnost in upornost pri treh različnih frekvencah (100 kHz, 500 kHz, 1 MHz) in v temperaturnem razponu med 20 in 90 °C. Temperaturo 20 °C smo si izbrali zato, ker je bila sobna temperatura okrog te vrednosti in se je lepilo ogrelo na to temperaturo. Zgornjo maksimalno temperaturo 90 °C smo določili zaradi varnosti, da se nam lepilo v sondi ne bi utrdilo, kar bi pomenilo, da sonde ne bi mogli več odpreti in bi bila neuporabna za nadaljnje raziskave.

Na osnovi kapacitivnosti in upornosti smo kasneje izračunali dielektrično vrednost (enačba 9) in izgubni kot (enačba 10) lepila. Pri vsaki vrsti lepila smo izvedli po pet meritev. Za vsako meritev je bilo v enem postopku segrevanja z računalnikom zajetih 1600 podatkov.

Preglednica 2 : Število meritev in temperatura segrevanja

| Vrsta lepila                   | Dosežena temperatura (°C) | Število meritev |
|--------------------------------|---------------------------|-----------------|
| PF0 (samo smola)               | 90                        | 5               |
| PF1 (samo smola)               | 90                        | 5               |
| UF (samo smola)                | 85                        | 5               |
| UF (smola + katalizator)       | 65                        | 5               |
| PVA 1163 (samo smola)          | 90                        | 5               |
| PVA 1141 (smola + katalizator) | 85                        | 5               |

### 3.5.2 Postopek meritve

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

1. Sestavimo sondo in jo priključimo s povezovalnimi kabli na natančen LCR meter (Agilend 4285A),
2. Pripravimo termočlen za merjenje temperature,
3. Priključimo termočlen na Data acquisition / switch unit (Agilent 34970A),
4. Vstavimo termočlen skozi odprtino sonde,
5. Nastavimo program (čas, datoteka, kanal termočlena),
6. Izmerimo upornost ( $R_z$ ) in kapacitivnost ( $C_z$ ) prazne sonde z zrakom pri sobni temperaturi (kapaciteta zraka),
7. Z inekcijo vbrizgamo tekočino (leplilo) v sondu pri sobni temperaturi,
8. Počakamo dve do tri minute, da se temperaturi lepila in sonde izenačita,
9. Izmerimo upornost ( $R_L$ ) in kapacitivnost ( $C_L$ ) polne sonde z leplilom pri sobni temperaturi (kapaciteta lepila),
10. Sondo napolnjeno z leplilom vstavimo v laboratorijski sušilnik, ki je segret na konstantno temperaturo 98°C,
11. Segrevamo tekočino (leplilo) do ciljne temperature, ki smo si jo zadali za posamezno leplilo, ter merimo upornost in kapacitivnost sonde z leplilom v sušilniku,

12. Sondo vzamemo iz sušilnika in prekinemo meritev,

13. Izračunamo dielektrično vrednost ( $\epsilon$ ) kot kvocient kapacitivnosti sonde napolnjene z lepilom ( $C_{lepila}$ ) in kapacitete prazne sonde ( $C_{zraka}$ ),

$$\epsilon = \frac{C_{lepila}}{C_{zraka}} \quad \dots(9)$$

14. Izračunamo izgubni kot ( $\operatorname{tg}\delta$ ), pri čemer moramo poznati še:

- frekvenco  $\omega$
- kapacitivnost polnega kondenzatorja  $C_{i\text{ poln}}$
- upornost polnega kondenzatorja  $R_{i\text{ poln}}$

$$\operatorname{tg}\delta = \frac{1}{2 \times \pi \times \omega_i \times C_{i\text{ poln}} \times R_{i\text{ poln}}} \quad \dots(10)$$

15. Odklopimo sondu od naprav, jo očistimo z destilirano vodo, ter obrišemo do suhega .

Preglednica 3: Del zapisa dielektričnih lastnosti tekočih lepil (prvih 15 meritev).

|                  |          | T     | $C_1$    | $C_2$    | $C_3$    | $R_1$     | $R_2$    | $R_3$    |
|------------------|----------|-------|----------|----------|----------|-----------|----------|----------|
|                  | čas      | °C    | 100 kHz  | 500 kHz  | 1 MHz    | 100 kHz   | 500 kHz  | 1MHz     |
| FF0 prazen-zunaj | 12:20:57 | 25.38 | 1.06E-11 | 1.06E-11 | 1.06E-11 | 257334000 | 70502500 | 18432600 |
| FF0 prazen-zunaj | 12:20:59 | 25.37 | 1.06E-11 | 1.06E-11 | 1.06E-11 | 268995000 | 75490200 | 18003800 |
| FF0 prazen-zunaj | 12:21:01 | 25.38 | 1.06E-11 | 1.06E-11 | 1.06E-11 | 257212000 | 65824400 | 18655200 |
| FF0 prazen-zunaj | 12:21:03 | 25.37 | 1.06E-11 | 1.06E-11 | 1.06E-11 | 266076000 | 62013000 | 17100700 |
| FF0 prazen-zunaj | 12:20:43 | 25.41 | 1.06E-11 | 1.06E-11 | 1.06E-11 | 295345000 | 66516400 | 17650400 |
|                  |          |       |          |          |          |           |          |          |
| FF0 polna-zunaj  | 12:24:06 | 25.09 | 2.12E-07 | 1.25E-08 | 2.18E-08 | 0.501602  | 0.493679 | 0.517586 |
| FF0 polna-zunaj  | 12:24:08 | 25.07 | 2.12E-07 | 1.23E-08 | 1.48E-09 | 0.500522  | 0.494022 | 0.495226 |
| FF0 polna-zunaj  | 12:24:10 | 25.08 | 2.10E-07 | 1.23E-08 | 1.96E-09 | 0.501551  | 0.493503 | 0.496494 |
| FF0 polna-zunaj  | 12:24:13 | 25.05 | 2.14E-07 | 1.20E-08 | 5.69E-09 | 0.501718  | 0.492935 | 0.497391 |
| FF0 polna-zunaj  | 12:24:15 | 25.06 | 2.12E-07 | 1.15E-08 | 3.98E-09 | 0.502174  | 0.493752 | 0.49543  |
|                  |          |       |          |          |          |           |          |          |
| FF0 sušilnik     | 15:59:19 | 22.45 | 1.98E-07 | 1.15E-08 | 2.55E-09 | 0.546161  | 0.53809  | 0.536828 |
| FF0 sušilnik     | 15:59:22 | 22.48 | 2.02E-07 | 1.19E-08 | 3.40E-09 | 0.546212  | 0.538475 | 0.537581 |
| FF0 sušilnik     | 15:59:24 | 22.51 | 2.01E-07 | 1.17E-08 | 3.25E-09 | 0.546428  | 0.537373 | 0.536784 |
| FF0 sušilnik     | 15:59:27 | 22.53 | 2.04E-07 | 1.16E-08 | 3.53E-09 | 0.546614  | 0.538559 | 0.537166 |
| FF0 sušilnik     | 15:59:29 | 22.56 | 2.03E-07 | 1.08E-08 | 3.18E-09 | 0.546338  | 0.538123 | 0.537169 |

### 3.5.3 Programska in strojna oprema

Dielektrične lastnosti smo merili z natančnim LCR metrom Agilent 4285A (75 kHz – 30 MHz), ki je povezan z računalnikom. Vse podatke pri meritvi smo pridobivali preko računalniškega program VEE PRO 7.0, s katerim lahko izberemo, katere veličine bomo merili in v kakšnih časovnih presledkih. Izdelan je tako, da z njim merimo različne dielektrične vrednosti količin na frekvenčnem območju od 75 kHz do 30 MHz. Z napravo lahko direktno merimo upornost (R), prevodnost (G), induktivnost (L), kapacitivnost (C),...

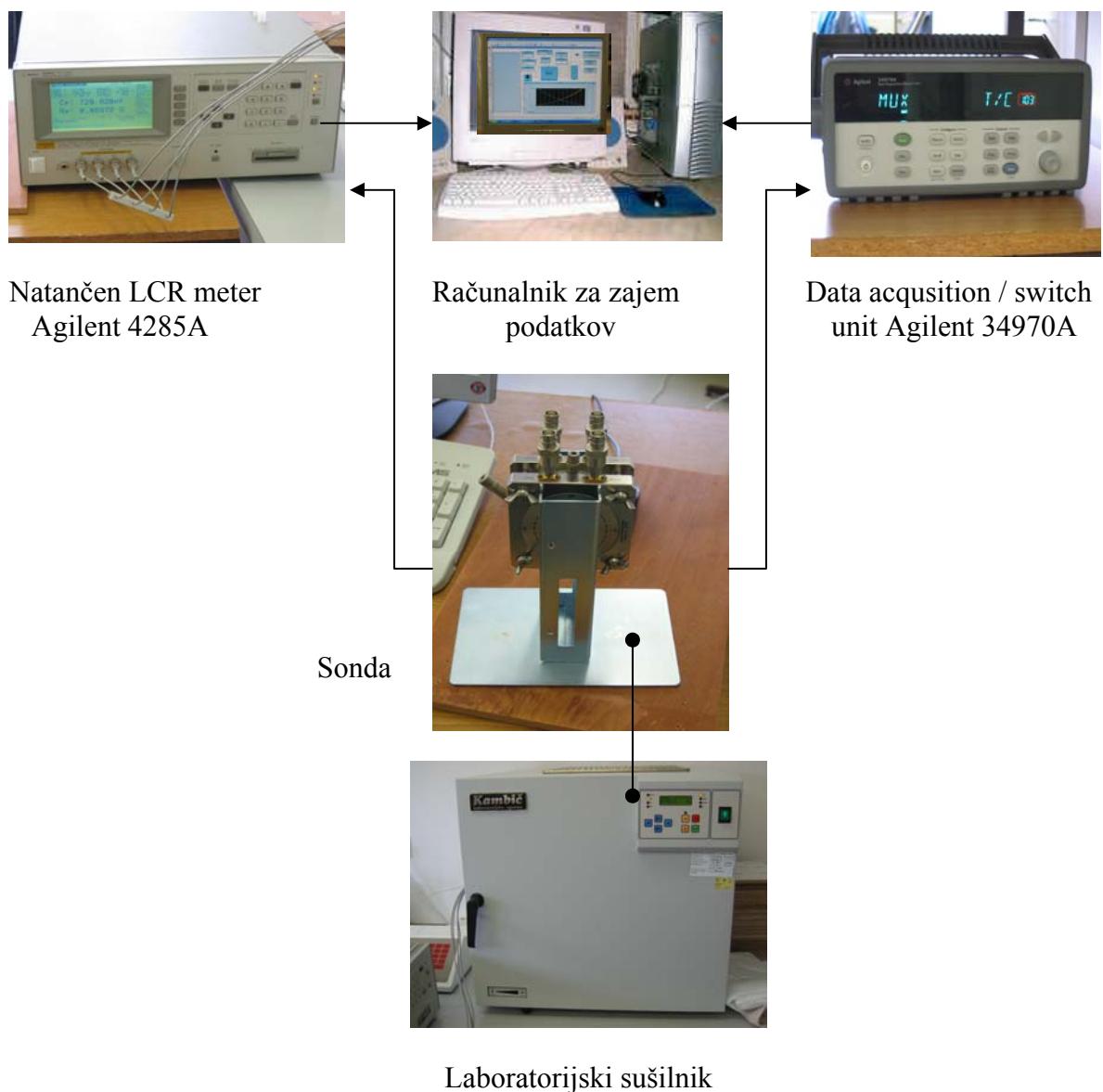


Slika 7: Natančni LCR meter Agilent 4285A za merjenje dielektričnih vrednosti količin na frekvenčnem območju od 75kHz do 30MHz.

Temperaturo smo merili s termočleni, ki so bili povezani preko Data acquisition / switch unit (Agilent 34970A), ki je v časovnem zaporedju dveh sekund izmeril dejansko temperaturo ter shranil podatke v program VEE PRO 7.0. Podatke smo kasneje po končani meritvi obdelali in dobili graf temperature v odvisnosti od časa.



Slika 8: Data acquisition / switch unit (Agilent 34970A) za merjenje temperature.



Slika 9: Shematski prikaz povezave strojne opreme za merjenje dielektričnih lastnosti in temperature lepila.

## 4 REZULTATI IN RAZPRAVA

### 4.1 REZULTATI MERITEV DIELEKTRIČNIH LASTNOSTI LEPIL

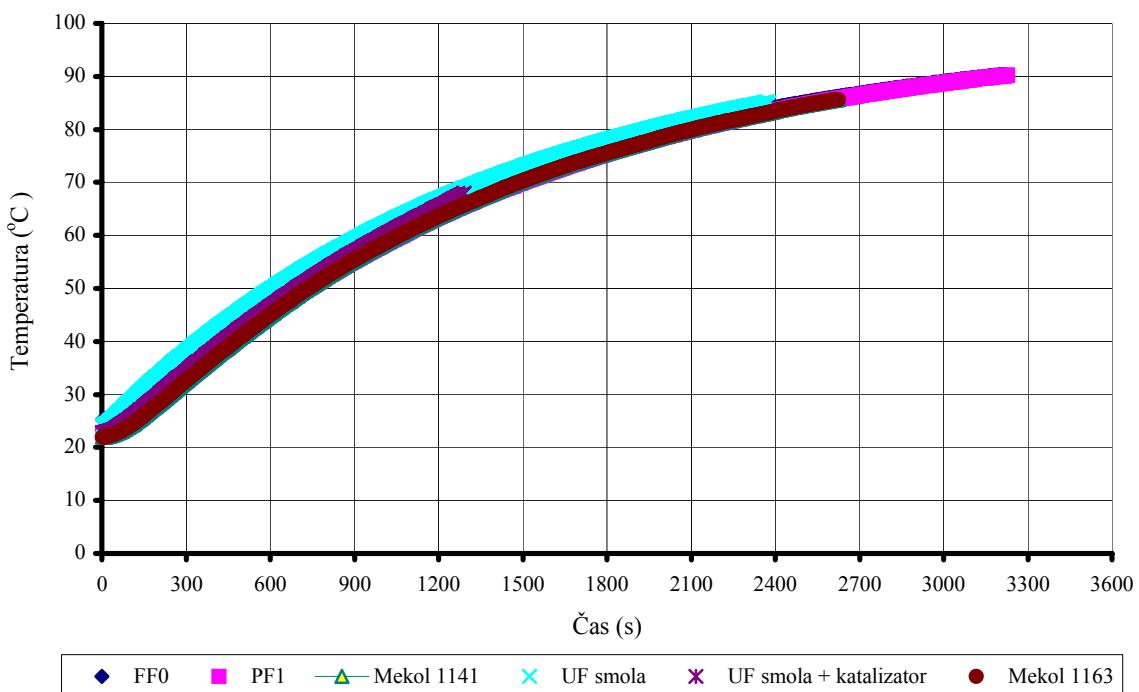
Brez sodobne računalniške podpore bi zelo težko obvladovali tako veliko množico podatkov, zato smo izmerjene podatke vstavili v enačbo (9) za izračun dielektričnih vrednosti in v enačbo (10) za izračun tangensa izgubnega kota. Iz petih ponovitev smo izračunali povprečno dielektrično vrednost in povprečen tangens izgubnega kota pri vsaki frekvenci za vsa lepila.

Preglednica (4) predstavlja del meritev dielektričnih lastnosti UF lepila (povprečje za dielektrično vrednost in tangens izgubnega kota). Prikazan je samo del teh podatkov, zaradi prevelikega obsega. Vsi podatki pa so kasneje grafično prikazani.

Preglednica 4: Delni prikaz izračunanih povprečnih vrednosti dielektričnih lastnosti za UF lepilo.

| T<br>[ °C ] | ε       |         |       | tgδ     |         |      |
|-------------|---------|---------|-------|---------|---------|------|
|             | 100 kHz | 500 kHz | 1 MHz | 100 kHz | 500 kHz | 1MHz |
| 24.00       | 116.09  | 90.95   | 84.27 | 16.18   | 4.36    | 2.42 |
| 24.03       | 116.25  | 90.93   | 84.26 | 16.33   | 4.39    | 2.44 |
| 24.09       | 116.24  | 90.93   | 84.26 | 16.34   | 4.39    | 2.44 |
| 24.16       | 116.24  | 90.93   | 84.26 | 16.35   | 4.40    | 2.44 |
| 24.23       | 116.23  | 90.92   | 84.26 | 16.36   | 4.40    | 2.44 |
| 24.28       | 116.27  | 90.92   | 84.27 | 16.37   | 4.40    | 2.44 |
| 24.37       | 116.29  | 90.92   | 84.26 | 16.38   | 4.41    | 2.45 |
| 24.42       | 116.28  | 90.92   | 84.26 | 16.39   | 4.41    | 2.45 |
| 24.52       | 116.23  | 90.93   | 84.26 | 16.41   | 4.41    | 2.45 |
| 24.58       | 116.27  | 90.92   | 84.26 | 16.42   | 4.42    | 2.45 |
| 24.68       | 116.26  | 90.92   | 84.25 | 16.44   | 4.42    | 2.45 |
| 24.76       | 116.28  | 90.91   | 84.24 | 16.45   | 4.43    | 2.46 |
| 24.84       | 116.26  | 90.89   | 84.21 | 16.47   | 4.43    | 2.46 |
| 24.93       | 116.24  | 90.89   | 84.21 | 16.49   | 4.44    | 2.46 |
| 24.99       | 116.32  | 90.90   | 84.22 | 16.51   | 4.45    | 2.47 |
| 25.09       | 116.28  | 90.90   | 84.22 | 16.53   | 4.45    | 2.47 |
| 25.17       | 116.32  | 90.90   | 84.22 | 16.55   | 4.46    | 2.47 |
| 25.25       | 116.27  | 90.91   | 84.22 | 16.58   | 4.46    | 2.48 |
| 25.35       | 116.33  | 90.91   | 84.22 | 16.60   | 4.47    | 2.48 |
| 25.43       | 116.35  | 90.91   | 84.22 | 16.63   | 4.48    | 2.48 |
| 25.53       | 116.41  | 90.91   | 84.22 | 16.65   | 4.49    | 2.49 |
| 25.61       | 116.39  | 90.91   | 84.23 | 16.68   | 4.49    | 2.49 |
| 25.71       | 116.44  | 90.92   | 84.23 | 16.71   | 4.50    | 2.50 |
| 25.79       | 116.48  | 90.95   | 84.23 | 16.73   | 4.51    | 2.50 |
| 25.90       | 116.46  | 90.93   | 84.24 | 16.77   | 4.52    | 2.51 |

#### 4.1.1 Naraščanje temperature v lepilu med segrevanjem v odvisnosti od časa



Slika 10: Naraščanje temperature v lepilih med segrevanjem v odvisnosti od časa.

Na diagramu, ki prikazuje naraščanje temperature v odvisnosti od časa (slika 10) lahko ugotovimo, da je temperatura lepila z začetne vrednosti 23°C podobno naraščala za vsa lepila in se približevala končni temperaturi v sušilniku (98 °C). Glede na to, da je lepilo UF z dodanim katalizatorjem začelo utrjevati že pri temperaturi nad 60°C, smo z meritvami s tem lepilom zaključili takoj, ko smo opazili, da lepilo želira. Tako je to lepilo v 1291 sekundah doseglo temperaturo 67.94°C, nakar smo meritve končali. Čisto UF smolo smo segrevali 2377 sekund do temperaturo 85.08°C, nakar je začela smola želirati, zato smo meritve končali. Meritve s PVA lepil smo zaključili pri temperaturi 85.66°C, ki je bila dosegjena v 2626 sekundah. Lepili PF smo segrevali 3229 sekund do končne temperature 90.36°C. Segrevanje in merjenje pri višji temperaturi za ti dve lepili ni bilo mogoče, saj smo se približali točki vrelisča.

#### 4.1.2 Dielektrične lastnosti proučevanih lepil

Preglednica 5: Dielektrična vrednost in tangens izgubnega kota za lepilo PF0 pri izbranih temperaturah.

| T<br>°C | <b><math>\epsilon</math></b> |         |         | <b><math>\operatorname{tg}\delta</math></b> |         |        |
|---------|------------------------------|---------|---------|---|---------|--------|
|         | 100 kHz                      | 500 kHz | 1 MHz   | 100 kHz                                     | 500 kHz | 1MHz   |
| 25      | 18086.52                     | 987.36  | 412.30  | 16.09                                       | 59.82   | 71.91  |
| 30      | 22614.34                     | 1272.16 | 343.98  | 14.76                                       | 53.45   | 98.65  |
| 35      | 28895.46                     | 1538.50 | 439.39  | 13.21                                       | 50.60   | 89.00  |
| 40      | 34449.87                     | 1848.27 | 476.89  | 12.59                                       | 47.87   | 93.16  |
| 45      | 41376.81                     | 2106.50 | 506.41  | 11.79                                       | 47.37   | 98.75  |
| 50      | 50552.89                     | 2418.37 | 487.39  | 10.78                                       | 46.12   | 114.95 |
| 55      | 62192.53                     | 3283.17 | 769.78  | 9.70  | 37.74   | 80.68  |
| 60      | 69114.31                     | 3795.27 | 631.61  | 9.63  | 35.99   | 108.53 |
| 65      | 80764.25                     | 3972.93 | 805.97  | 9.02  | 37.70   | 93.13  |
| 70      | 90154.93                     | 4342.59 | 1088.88 | 8.77  | 37.61   | 75.02  |
| 75      | 83799.63                     | 3532.79 | 493.11  | 10.33                                       | 50.26   | 179.51 |
| 80      | 87611.56                     | 3936.11 | 720.54  | 10.68                                       | 48.46   | 132.55 |
| 85      | 99506.30                     | 4239.08 | 854.37  | 10.07                                       | 48.17   | 120.36 |
| 90      | 107636.22                    | 4940.01 | 500.72  | 9.96  | 44.19   | 217.09 |

Preglednica 6: Dielektrična vrednost in tangens izgubnega kota za lepilo PF1 pri izbranih temperaturah.

| T<br>°C | <b><math>\epsilon</math></b> |         |        | <b><math>\operatorname{tg}\delta</math></b> |         |        |
|---------|------------------------------|---------|--------|---|---------|--------|
|         | 100 kHz                      | 500 kHz | 1 MHz  | 100 kHz                                     | 500 kHz | 1MHz   |
| 25      | 3228.43                      | 228.35  | 107.75 | 31.68                                       | 90.22   | 95.77  |
| 30      | 4024.85                      | 276.89  | 116.88 | 29.11                                       | 85.33   | 101.18 |
| 35      | 5043.56                      | 309.68  | 127.98 | 26.93                                       | 88.55   | 107.30 |
| 40      | 6310.49                      | 383.92  | 143.85 | 24.84                                       | 82.39   | 110.22 |
| 45      | 7927.87                      | 460.54  | 174.85 | 22.57                                       | 78.59   | 103.64 |
| 50      | 9680.59                      | 529.16  | 183.65 | 21.01                                       | 77.78   | 112.23 |
| 55      | 11596.32                     | 676.54  | 193.41 | 19.74                                       | 68.40   | 120.01 |
| 60      | 14036.97                     | 726.60  | 217.76 | 18.24                                       | 71.64   | 119.73 |
| 65      | 16590.47                     | 851.17  | 223.57 | 17.17                                       | 67.81   | 129.13 |
| 70      | 19551.08                     | 1110.83 | 299.86 | 16.09                                       | 57.50   | 106.68 |
| 75      | 22409.70                     | 1219.22 | 278.94 | 15.41                                       | 57.64   | 126.20 |
| 80      | 26207.24                     | 1308.45 | 304.22 | 14.42                                       | 58.77   | 126.61 |
| 85      | 28959.38                     | 1523.25 | 342.63 | 14.13                                       | 54.65   | 121.43 |
| 90      | 32047.72                     | 1584.71 | 311.28 | 13.67                                       | 56.25   | 143.21 |

Preglednica 7: Dielektrična vrednost in tangens izgubnega kota za lepilo Mekol 1141 pri izbranih temperaturah.

| T<br>°C | <b><math>\epsilon</math></b> |         |        | <b><math>\operatorname{tg}\delta</math></b> |         |        |
|---------|------------------------------|---------|--------|---|---------|--------|
|         | 100 kHz                      | 500 kHz | 1 MHz  | 100 kHz                                     | 500 kHz | 1MHz   |
| 25      | 7370.00                      | 493.30  | 310.99 | 36.31                                       | 109.11  | 86.95  |
| 30      | 9057.25                      | 529.76  | 306.00 | 32.65                                       | 112.30  | 97.75  |
| 35      | 10750.35                     | 706.65  | 398.45 | 30.32                                       | 93.04   | 82.90  |
| 40      | 13279.05                     | 760.08  | 425.01 | 26.94                                       | 95.04   | 85.14  |
| 45      | 15587.91                     | 961.31  | 500.22 | 25.01                                       | 82.05   | 79.14  |
| 50      | 18128.93                     | 1019.60 | 483.37 | 23.32                                       | 83.85   | 88.62  |
| 55      | 23049.02                     | 1324.33 | 565.78 | 19.78                                       | 69.67   | 81.65  |
| 60      | 25459.79                     | 1332.53 | 599.35 | 19.12                                       | 73.95   | 82.43  |
| 65      | 30899.39                     | 1734.11 | 644.55 | 16.74                                       | 60.69   | 81.62  |
| 70      | 36060.39                     | 1532.11 | 617.10 | 15.18                                       | 72.20   | 89.91  |
| 75      | 38594.85                     | 2035.44 | 626.92 | 14.91                                       | 57.47   | 93.89  |
| 80      | 43177.72                     | 2018.33 | 784.45 | 14.05                                       | 61.13   | 78.85  |
| 85      | 38364.02                     | 2047.88 | 618.00 | 16.62                                       | 62.85   | 104.92 |

Preglednica 8: Dielektrična vrednost in tangens izgubnega kota za lepilo Mekol 1163 pri izbranih temperaturah.

| T<br>°C | <b><math>\epsilon</math></b> |         |        | <b><math>\operatorname{tg}\delta</math></b> |         |        |
|---------|------------------------------|---------|--------|---|---------|--------|
|         | 100 kHz                      | 500 kHz | 1 MHz  | 100 kHz                                     | 500 kHz | 1MHz   |
| 25      | 3498.77                      | 258.59  | 175.58 | 48.31                                       | 131.41  | 97.12  |
| 30      | 4244.90                      | 246.34  | 184.28 | 44.06                                       | 152.73  | 102.31 |
| 35      | 4962.20                      | 347.69  | 211.11 | 41.40                                       | 119.05  | 98.38  |
| 40      | 6098.18                      | 366.83  | 227.37 | 36.85                                       | 123.31  | 99.67  |
| 45      | 6754.88                      | 414.48  | 244.49 | 35.62                                       | 117.09  | 99.56  |
| 50      | 7189.64                      | 442.88  | 250.07 | 35.51                                       | 116.14  | 103.17 |
| 55      | 7574.30                      | 433.93  | 253.67 | 35.40                                       | 124.46  | 106.83 |
| 60      | 8213.74                      | 517.32  | 271.50 | 34.21                                       | 109.35  | 104.60 |
| 65      | 8308.79                      | 549.08  | 278.80 | 35.40                                       | 107.87  | 106.44 |
| 70      | 8972.59                      | 510.40  | 263.24 | 34.16                                       | 120.89  | 117.79 |
| 75      | 9861.88                      | 554.38  | 252.46 | 32.46                                       | 116.21  | 127.83 |
| 80      | 10417.20                     | 681.68  | 285.30 | 31.87                                       | 97.91   | 117.56 |
| 85      | 11160.21                     | 608.86  | 303.86 | 30.75                                       | 113.52  | 114.09 |
| 90      | 11051.37                     | 474.77  | 301.56 | 30.43                                       | 142.85  | 112.79 |

Preglednica 9: Dielektrična vrednost in tangens izgubnega kota za UF lepilno smolo pri izbranih temperaturah.

| T<br>°C | <b><math>\epsilon</math></b> |         |       | <b><math>\operatorname{tg}\delta</math></b> |         |       |
|---------|------------------------------|---------|-------|---|---------|-------|
|         | 100 kHz                      | 500 kHz | 1 MHz | 100 kHz                                     | 500 kHz | 1MHz  |
| 25      | 122.65                       | 91.05   | 84.22 | 16.09                                       | 4.48    | 2.49  |
| 30      | 126.24                       | 91.62   | 84.50 | 18.28                                       | 5.19    | 2.88  |
| 35      | 130.75                       | 92.22   | 84.75 | 20.80                                       | 6.05    | 3.36  |
| 40      | 135.75                       | 92.84   | 84.95 | 23.41                                       | 7.01    | 3.90  |
| 45      | 141.03                       | 93.35   | 85.02 | 26.14                                       | 8.06    | 4.50  |
| 50      | 145.57                       | 93.75   | 84.97 | 29.19                                       | 9.24    | 5.17  |
| 55      | 149.85                       | 94.02   | 84.88 | 32.34                                       | 10.49   | 5.88  |
| 60      | 155.18                       | 94.27   | 84.68 | 35.43                                       | 11.85   | 6.67  |
| 65      | 161.80                       | 94.45   | 84.43 | 38.37                                       | 13.34   | 7.54  |
| 70      | 168.24                       | 94.54   | 84.18 | 41.55                                       | 14.98   | 8.50  |
| 75      | 173.57                       | 94.63   | 83.85 | 45.44                                       | 16.87   | 9.60  |
| 80      | 175.79                       | 93.33   | 82.56 | 50.24                                       | 19.13   | 10.90 |
| 85      | 179.95                       | 91.54   | 80.69 | 54.41                                       | 21.60   | 12.34 |

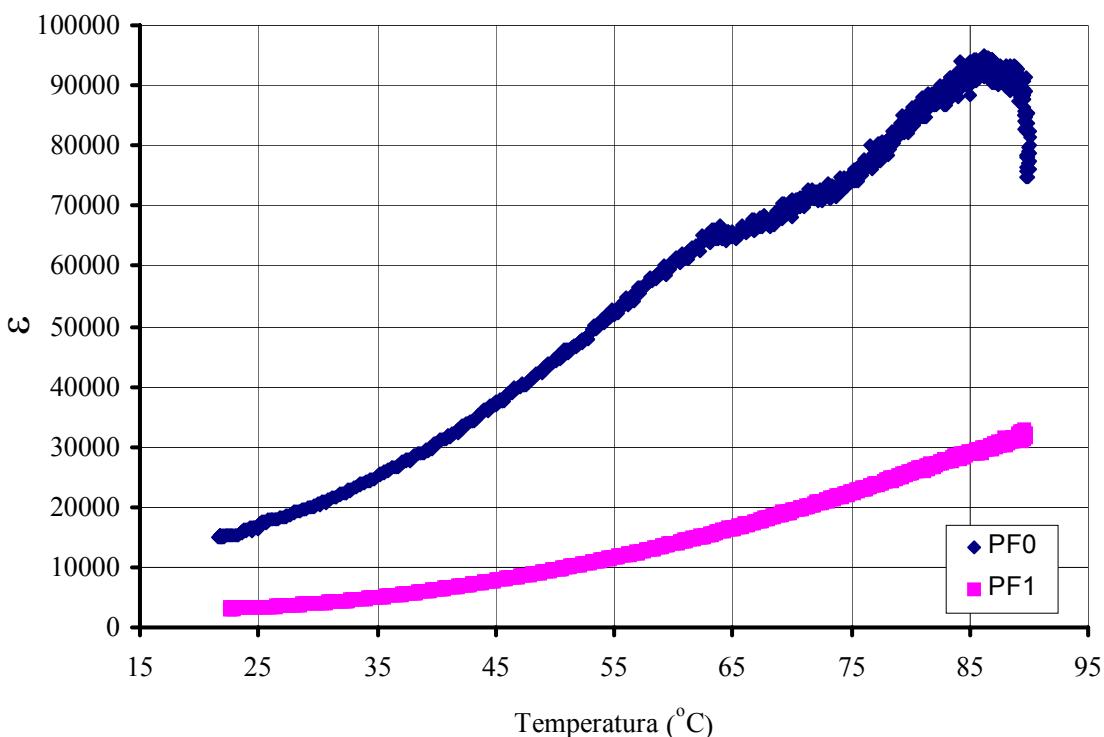
Preglednica 10: Dielektrična vrednost in tangens izgubnega kota za UF lepilno mešanico (smola + utrjevalec) pri izbranih temperaturah.

| T<br>°C | <b><math>\epsilon</math></b> |         |        | <b><math>\operatorname{tg}\delta</math></b> |         |       |
|---------|------------------------------|---------|--------|---|---------|-------|
|         | 100 kHz                      | 500 kHz | 1 MHz  | 100 kHz                                     | 500 kHz | 1MHz  |
| 25      | 456.39                       | 149.54  | 122.15 | 62.51                                       | 38.48   | 23.69 |
| 30      | 513.20                       | 153.47  | 124.14 | 63.27                                       | 42.66   | 26.52 |
| 35      | 584.24                       | 158.33  | 125.32 | 64.21                                       | 47.76   | 30.32 |
| 40      | 679.60                       | 163.99  | 127.25 | 63.78                                       | 53.27   | 34.47 |
| 45      | 768.82                       | 168.57  | 129.61 | 63.99                                       | 58.78   | 38.37 |
| 50      | 873.25                       | 171.60  | 128.78 | 62.81                                       | 64.36   | 43.02 |
| 55      | 936.44                       | 177.48  | 127.25 | 63.62                                       | 67.58   | 47.25 |
| 60      | 960.34                       | 175.14  | 129.19 | 65.44                                       | 72.22   | 49.08 |
| 65      | 899.30                       | 169.36  | 127.07 | 69.62                                       | 74.32   | 49.67 |

#### 4.1.3 Dielektrične vrednosti lepil ( $\epsilon$ )

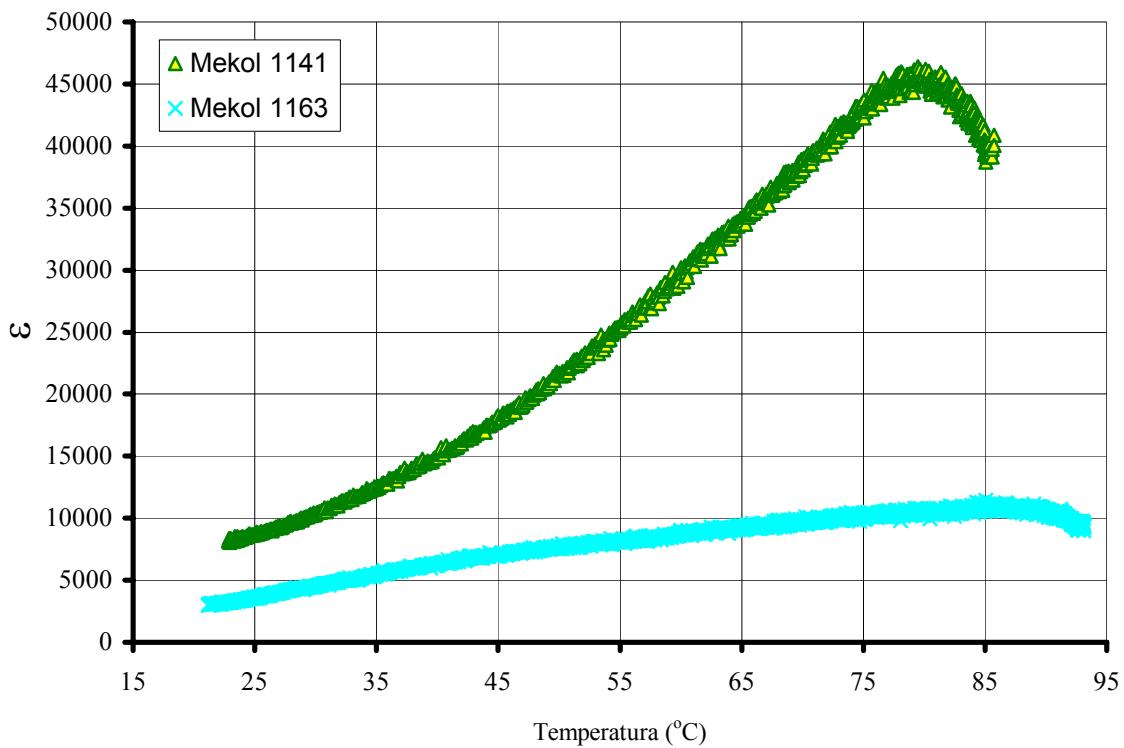
Pri primerjavi povprečnih vrednosti za dielektrične lastnosti posameznih lepil pri 100 kHz, 500 kHz in 1 MHz smo ugotovili, da so vrednosti meritev za določeno lepilo v območju, ki je značilno za posamezno vrsto lepila.

V splošnem smo za vsa lepila ugotovili, da se dielektrična vrednost povečuje s temperaturo in je odvisna od frekvence. Na začetku, ko začnemo s segrevanjem lepila, dielektrična vrednost v odvisnosti od temperature postopno narašča, dokler ne doseže maksimalne vrednosti. Predvidevamo, da takrat lepilo želira. S tem se lepilu spremeni viskoznost, hitrost utrjevanja pa je v tem trenutku zelo velika.



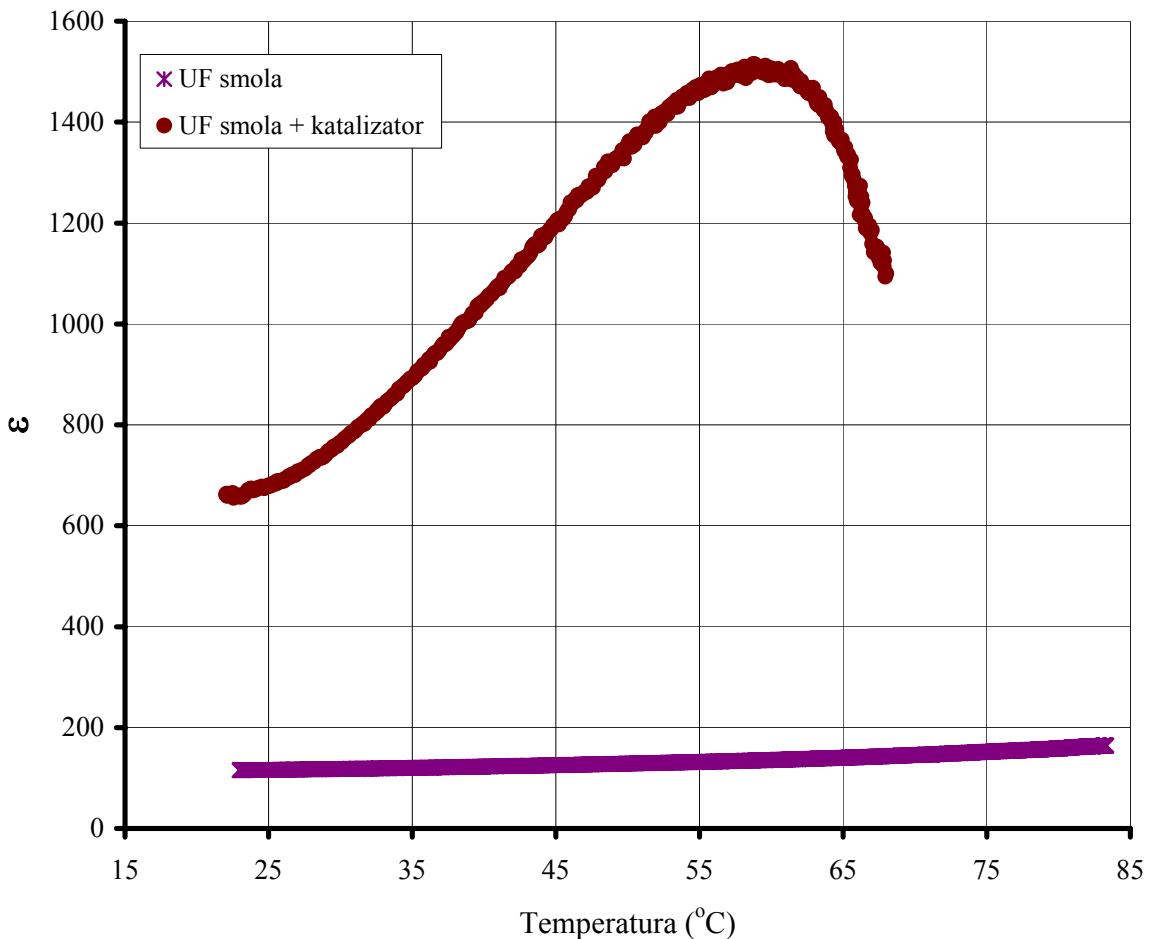
Slika 11: Dielektrična vrednost fenol-formaldehidnega lepila v odvisnosti od temperature segrevanja pri frekvenci 100 kHz

Kot je razvidno na sliki 11 ima lepilo PF0 višjo dielektrično vrednost v primerjavi z lepilom PF1. Dielektrična vrednost lepila PF0 bolj strmo narašča, kar pomeni, da lepilo PF0 hitreje utrdi do določene stopnje oz. želira pri nižji temperaturi kot PF1 lepilo. Tak rezultat je pričakovani, saj je lepilo PF0 namenjeno za lepljenje notranjega sloja OSB plošče, medtem ko je lepilo PF1 namenjeno za lepljenje zunanjega sloja.



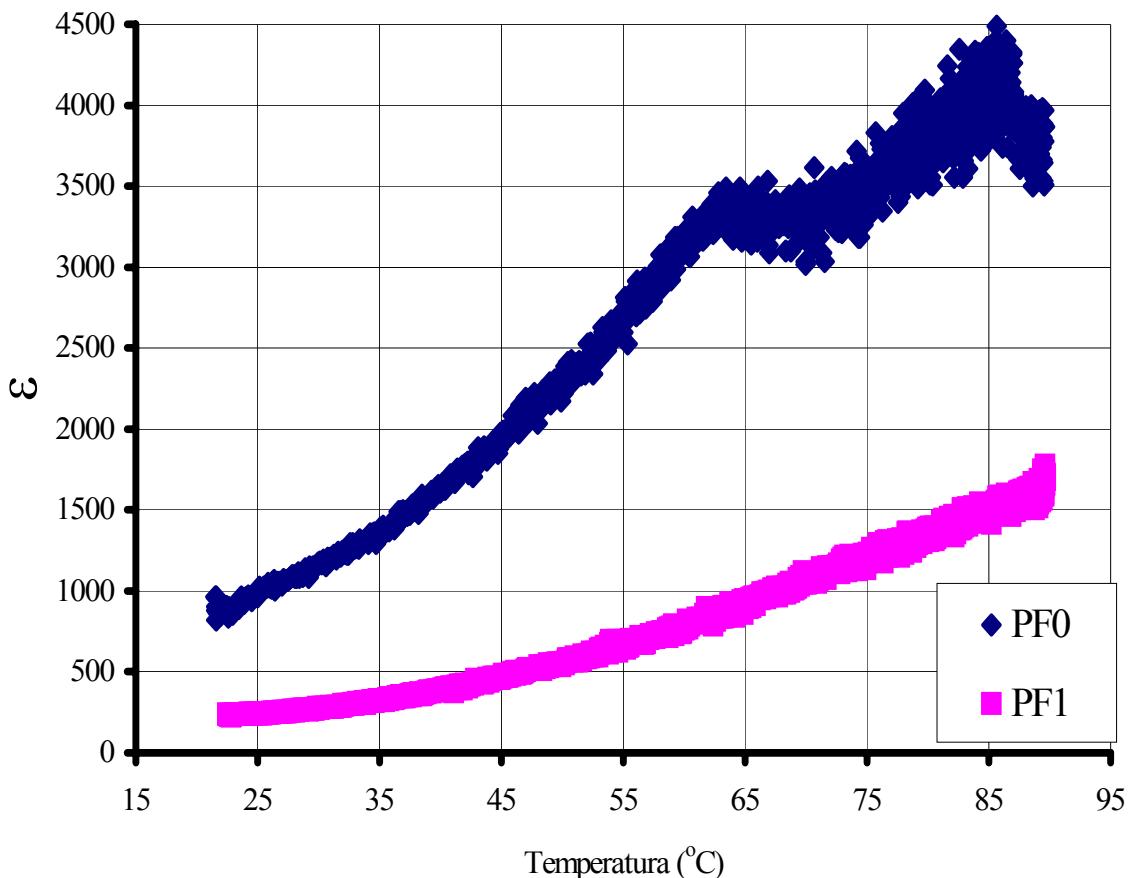
Slika 12: Dielektrična vrednost PVA lepila v odvisnosti od temperature segrevanja pri frekvenci 100 kHz

Na sliki 12 je prikazana dielektrična vrednost dveh polivinilacetatnih lepil. Lepilo PVA 1141 ima v primerjavi z lepilom PVA 1163 pet krat višje dielektrične lastnosti. Pri lepilu PVA 1141 krivulja doseže maksimalen vrh pri  $\epsilon = 46409.58$  in  $T = 79.46^{\circ}\text{C}$  v primerjavi z lepilom PVA 1163, kjer krivulja doseže maksimalen vrh pri  $\epsilon = 11265.74$  in  $T = 84.70^{\circ}\text{C}$ . Lepilu PVA 1141 je bil dodan katalizator, ki je dielektrične lastnosti povečal za pet krat v primerjavi z lepilom PVA 1163. Razlika v temperaturi želiranja obeh lepil je bila  $5.24^{\circ}\text{C}$ .



Slika 13: Dielektrična vrednost UF lepila v odvisnosti od temperature segrevanja pri frekvenci 100 kHz

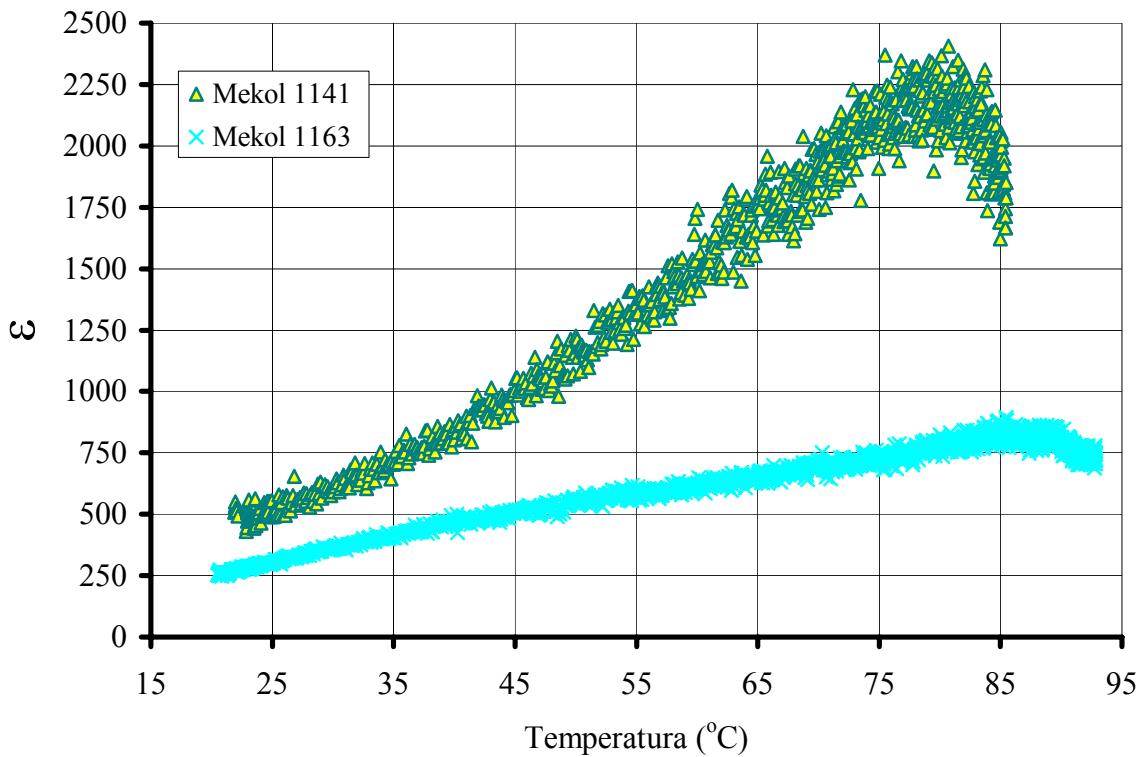
Slika 13 nazorno prikazuje primerjavo med UF lepilom, ki je vsebovalo samo smolo in UF lepilom, ki mu je bil dodan katalizator. UF lepilo, ki ni imelo dodanega katalizatorja, je imelo manjšo dielektrično vrednost v primerjavi z lepilom, ki je vsebovalo katalizator. Če sliko 13 primerjamo s sliko 12 ugotovimo, da je odvisnost dielektrične vrednosti lepila od temperature segrevanja podobna, le da je vrednost dielektričnosti petkrat višja. Iz tega lahko sklepamo, da katalizator poleg tega, da vpliva na pospešeno reakcijo utrjevanja, tudi poveča dielektrično vrednost. Ta lastnost je pri VF lepljenju zelo ugodna, saj se bo lepilo z dodanim katalizatorjem intenzivneje segrevalo in hitreje utrjevalo. Lepilo UF s katalizatorjem je doseglo maksimalno vrednost pri  $\epsilon = 1514.71$  in  $T = 58.82^{\circ}\text{C}$ , UF lepilna smola pa je do  $T = 83.33^{\circ}\text{C}$  še vedno naraščala.



Slika 14: Dielektrična vrednost fenol-formaldehidnega lepila v odvisnosti od temperature segrevanja pri frekvenci 500 kHz

S spremembo frekvence električnega polja s 100 kHz na 500 kHz so se spremenile tudi dielektrične lastnosti fenolnima lepiloma in sicer se je dielektrična vrednost zmanjšala za približno 20 krat. Na sliki 14 je razvidno, da se lepilu PF0 dielektrična vrednost do  $T = 63,47\text{ }^{\circ}\text{C}$  ( $\epsilon = 3486,84$ ) naraščala, nato se je delno znižala na  $\epsilon = 3015,31$ . Predvidevamo, da je to začetek reakcije, ki vodi v želiranje lepila, ki se nato nadaljuje z naraščajočo temperaturo.

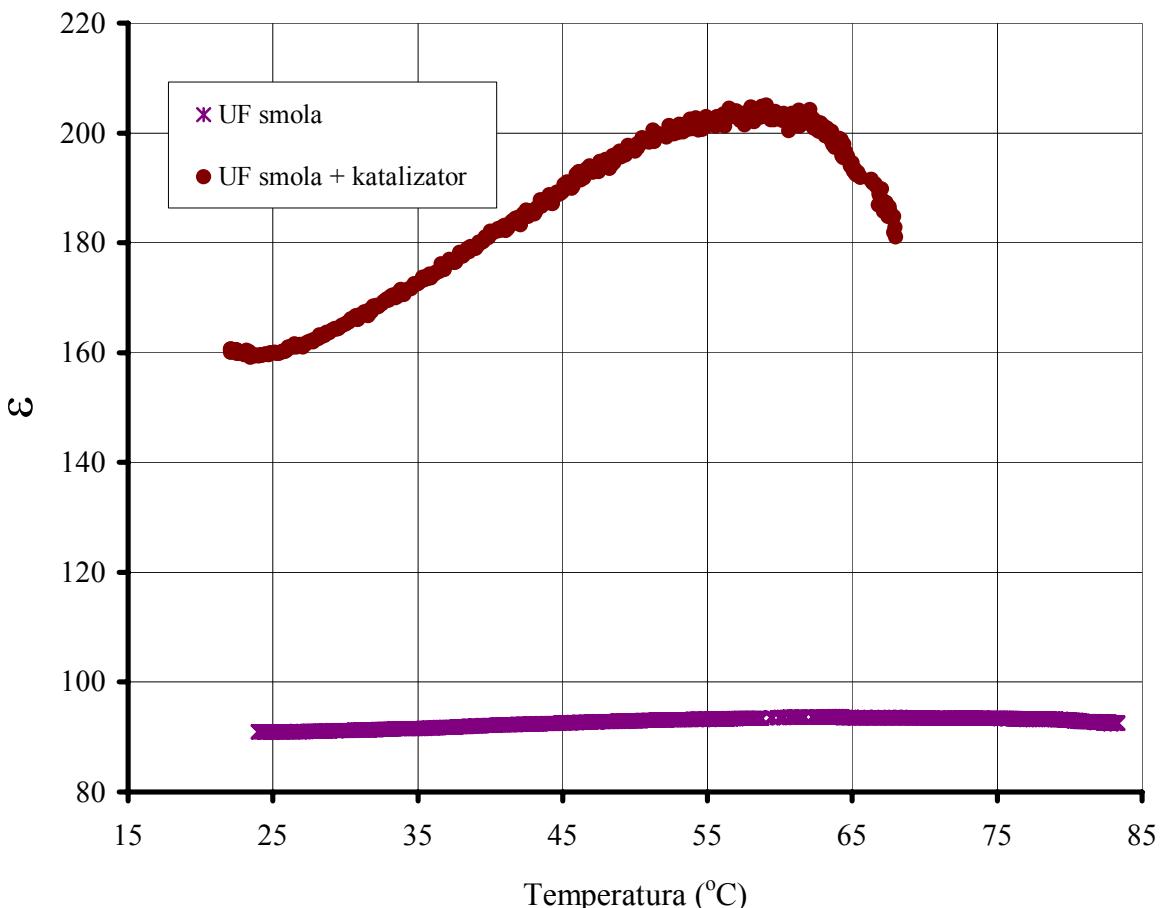
Pri lepilu PF1 dielektričnost narašča počasi – linearno vendar bolj strmo kot pri frekvenci 100 kHz. Utrjevanje oz. želiranje je počasnejše v primerjavi z lepilom PF0, čas utrjevanja je daljši, ker je potrebna višja temperatura segrevanja. Lepilo PF1 pri  $T = 89,60\text{ }^{\circ}\text{C}$  še ni doseglo faze želiranja.



Slika 15: Dielektrična vrednost PVA lepila v odvisnosti od temperature segrevanja pri frekvenci 500 kHz

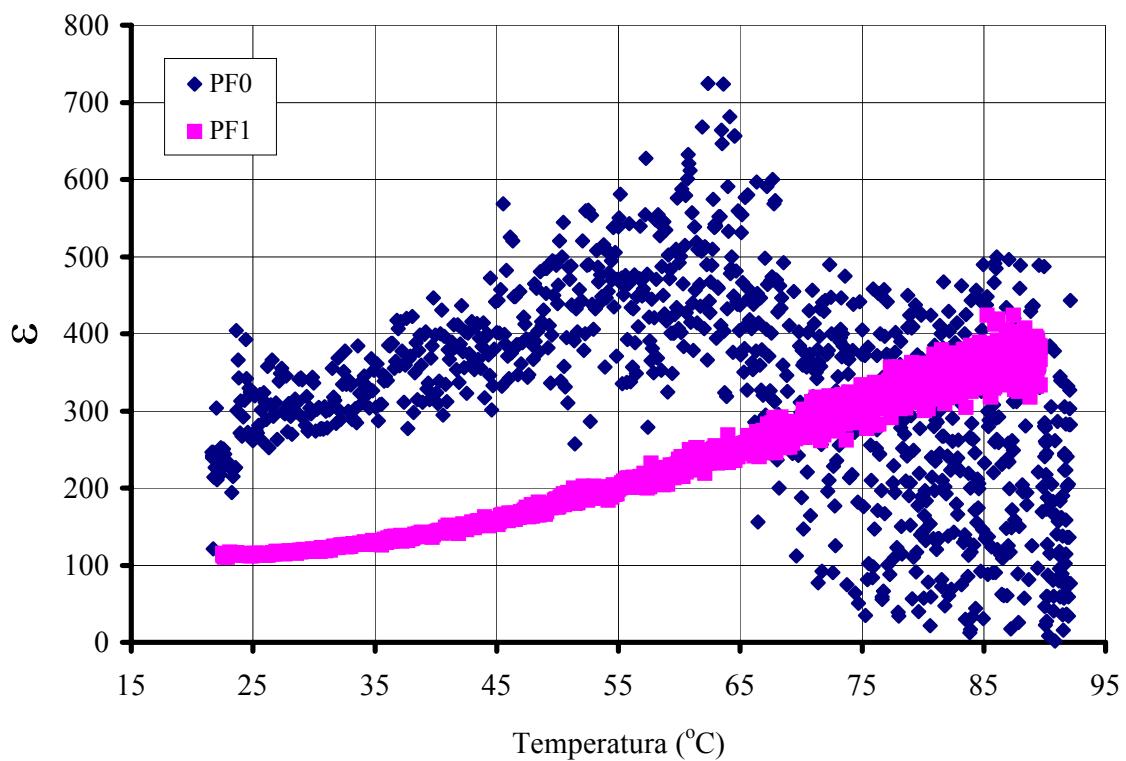
S spremembo frekvence električnega polja s 100 kHz na 500 kHz so se spremenile tudi dielektrične lastnosti PVA lepiloma. Dielektričnost je pri povišanju frekvence 20 krat nižja v primerjavi z frekvenco 100 kHz. Dielektrična vrednost lepila mekol 1141 zelo strmo narašča v primerjavi z lepilom mekol 1163. Dielektričnosti je pri lepilu mekol 1141 cca dva krat višja, kot pri lepilu mekol 1163, zaradi dodanega katalizatorja lepila. Pri  $T = 79.13^{\circ}\text{C}$  lepilo mekol 1141 doseže maksimalno vrednost dielektričnosti  $\epsilon=2344.91$  in z višanjem temperature pada oz lepilo začne utrjevati.

Lepilu mekol 1163 dielektričnost ne narašča tako izrazito, kot pri lepilu mekol 1141, zato ker lepilo nima dodanega katalizatorja. Dielektričnost z višanjem temperature narašča linearno in konstantno do maksimalne vrednost  $\epsilon = 883.15$  pri  $T = 85.49^{\circ}\text{C}$ , nakar začne krivulja spremenljati smer navzdol.



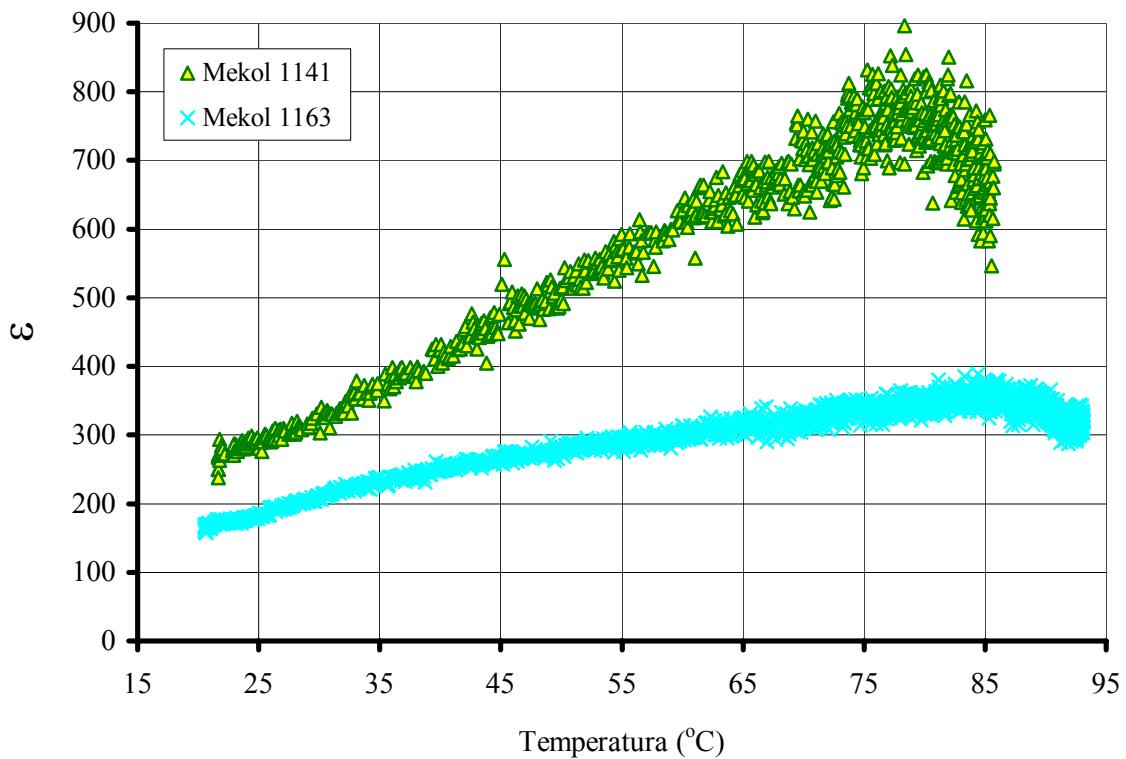
Slika 16: Dielektrična vrednost UF lepila v odvisnosti od temperature segrevanja pri frekvenci 500 kHz

S spremembo frekvence na 500 kHz se je dielektričnost lepila znižala za sedem krat v primerjavi z dielektrično vrednostjo pri frekvenci 100 kHz. Slika 16 prikazuje primerjavo med UF lepilom, ki je vsebovalo samo smolo in UF lepilom, ki mu je bil dodan utrjevalec. UF lepilo, ki ni imelo dodanega utrjevalca, je imelo manjšo dielektrično vrednost v primerjavi z lepilom, ki je vsebovalo utrjevalec. Iz tega lahko sklepamo, da utrjevalec zelo poveča dielektričnost, zato krivulja hitreje doseže maksimalno vrednost in začetek želiranja lepila. Krivulja za dielektrično vrednost UF lepila s utrjevalcem zelo nadzorno prikazuje segrevanje lepila in naraščanje dielektričnosti do maksimalne točke  $\epsilon = 205.12$  pri  $T = 59.04^{\circ}\text{C}$ , kjer je lepilo želiralo. V tej točki krivulja spremeni smer navzdol, dielektričnost pada pri naraščajoči temperaturi. Pri UF smoli je dielektričnost zelo nizka v primerjavi z UF lepilom, ki mu je dodan utrjevalec. Čista UF lepilna smola do  $T = 83.33^{\circ}\text{C}$  ni želirala.



Slika 17: Dielektrična vrednost fenol-formaldehidnega lepila v odvisnosti od temperature segrevanja pri frekvenci 1 MHz

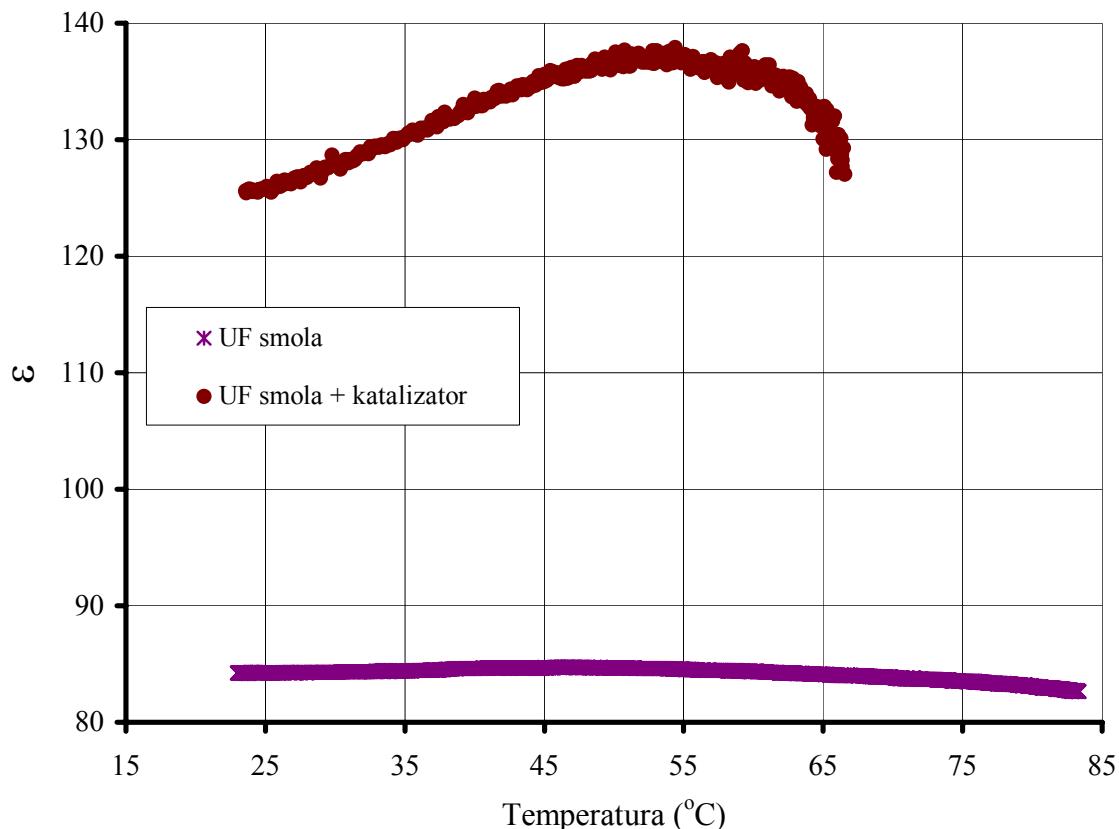
Pri frekvenci 1 MHz je dielektrična vrednost fenol-formaldehidnega lepila 5 krat manjša kot pri frekvenci 500 kHz in 120 krat manjša kot pri frekvenci 100 kHz. Odvisnost dielektrične vrednosti od temperature segrevanja je podobna kot pri nižjih dveh frekvencah. Pri izvajaju meritev za PF0 lepilo domnevamo, da je prišlo do nepojasnjениh motenj oziroma nerazložljivega pojava, zato je ta krivulja bolj razpršena v primerjavi z krivuljo za lepilo PF1.



Slika 18: Dielektrična vrednost PVA lepila v odvisnosti od temperature segrevanja pri frekvenci 1 MHz

Pri frekvenci 1 MHz ima najvišjo dielektrično vrednost med PVA lepili lepilo mekol 1141. Dielektričnost je pri povišanju frekvence štiriinpetdeset-krat nižja v primerjavi s frekvenco 100 kHz in tri-krat v primerjavi s frekvenco 500 kHz. Lepilo mekol 1141 zelo strmo narašča v primerjavi z lepilom mekol 1163. Dielektričnosti je pri lepilu mekol 1141 cca dva krat višja, kot pri lepilu mekol 1163, zaradi dodanega katalizatorja lepila. Pri  $T = 78.46^{\circ}\text{C}$  dielektrična vrednost lepila mekol 1141 doseže maksimalno vrednost  $\epsilon = 854.39$ .

Lepilo mekol 1163 ima cca polovično dielektričnost v primerjavi z lepilom mekol 1141 pri isti frekvenci. Dielektrična vrednost lepila mekol 1163 postopno narašča do maksimalne vrednosti  $\epsilon = 388.98$  pri  $T = 84.40^{\circ}\text{C}$ .

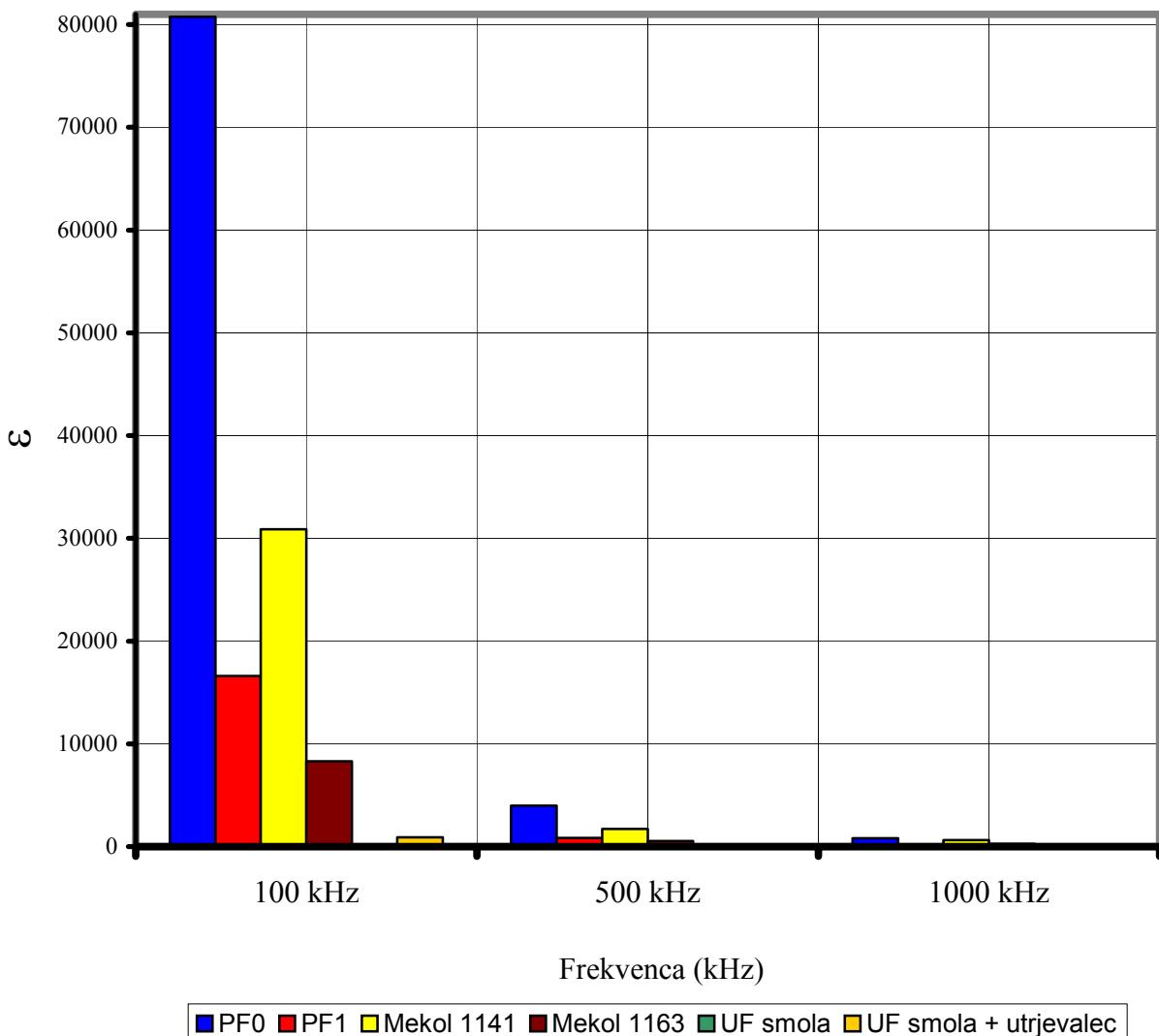


Slika 19: Dielektrična vrednost UF lepila v odvisnosti od temperature segrevanja pri frekvenci 1 MHz

S spremembo frekvence na 1 MHz se je dielektričnost UF lepila znižala za enajst-krat v primerjavi s frekvenco 100 kHz in en-krat v primerjavi s frekvenco 500 kHz. Slika 19 prikazuje primerjavo med UF lepilom, ki je vsebovalo samo smolo in UF lepilom, ki mu je bil dodan katalizator. Krivulja UF lepila s katalizatorjem zelo nadzorno prikazuje segrevanje lepila in naraščanje dielektričnosti do maksimalne točke  $\epsilon = 133.67$  pri  $T = 52.77^\circ\text{C}$ , kjer je lepilo želiralo. V tej točki krivulja spremeni smer navzdol, dielektričnost pada pri naraščajoči temperaturi, lepilo pa utruje.

Preglednica 11: Dielektrične vrednosti lepil pri temperaturi 65 °C.

|          | PF0      | PF1      | Mekol<br>1141 | Mekol<br>1163 | UF smola | UF smola +<br>utrjevalec |
|----------|----------|----------|---------------|---------------|----------|--------------------------|
| 100 kHz  | 80764.25 | 16590.47 | 30899.39      | 8308.79       | 161.80   | 899.30                   |
| 500 kHz  | 3972.93  | 851.17   | 1734.11       | 549.08        | 94.45    | 169.36                   |
| 1000 kHz | 805.97   | 223.57   | 644.55        | 278.80        | 84.43    | 127.07                   |



Slika 20: Dielektrična vrednost lepila v odvisnosti od frekvence pri temperaturi 65°C

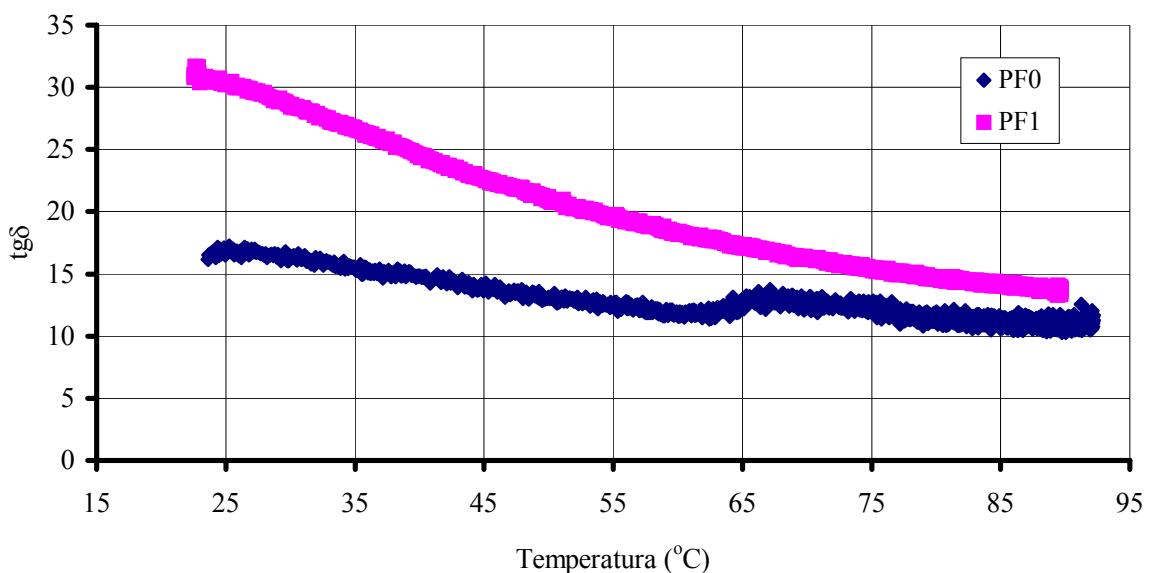
Na sliki 20 je nazorno prikazana primerjava dielektričnih vrednosti pri vseh petih vrstah lepila in treh različnih frekvencah. Iz diagrama lahko razberemo razlike dielektričnih vrednosti za posamezno vrsto lepilo pri  $T = 65^{\circ}\text{C}$ . S povečevanjem frekvence s 100 kHz na 1 MHz se zmanjšujejo dielektrične vrednosti lepilom. UF smola ima pri frekvenci 100 kHz zanemarljivo dielektrično vrednost (161.81) v primerjavi z ostalimi lepili pri enaki frekvenci. Pri frekvenci 500 kHz in 1 MHz so razlike v dielektrični vrednosti manjše, v primerjavi s frekvenco 100 kHz. Pri obeh frekvencah ima UF smola najmanjšo dielektrično vrednost.

#### 4.1.4 Tangens izgubnega kota ( $\text{tg}\delta$ )

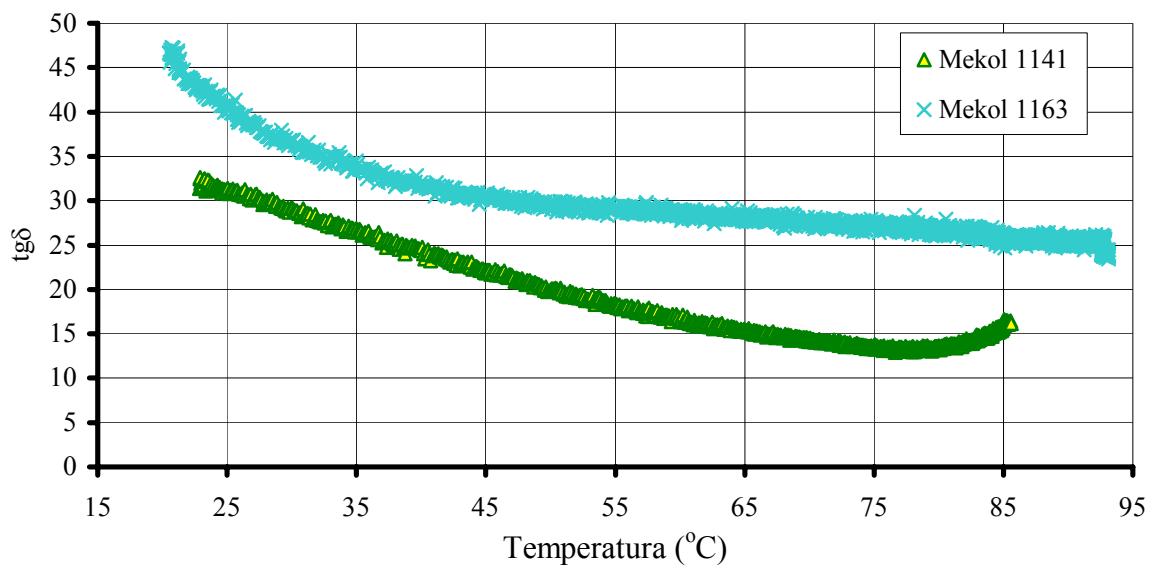
Pri dielektričnem segrevanju lepila sta elektrodi priključeni na tok z visoko frekvenco, kjer imamo veliko obratov polaritete in toploto, ki se razvije v lepilu, kot posledica energijskih izgub, ki je zadost velika, da segreje lepilo na želeno temperaturo. Tangens izgubnega kota označuje, kolikšen del akumulirane energije v snovi, se bo pri praznjenju kondenzatorja pretvorilo v toploto.

Hitrost spremembe vrednosti izgubnega kota je odvisna od temperature in od dielektrične prevodnosti lepila. Vrednost izgubnega kota se najhitreje spreminja pri visoki temperaturi segrevanja lepila. Najvišja vrednost izgubnega kota ( $\text{tg}\delta$ ) je v trenutku, ko je lepilo najbolj tekoče, oziroma, ko je viskoznost najnižja. Z večanjem viskoznosti lepila, padajo vrednosti izgubnega kota ( $\text{tg}\delta$ ).

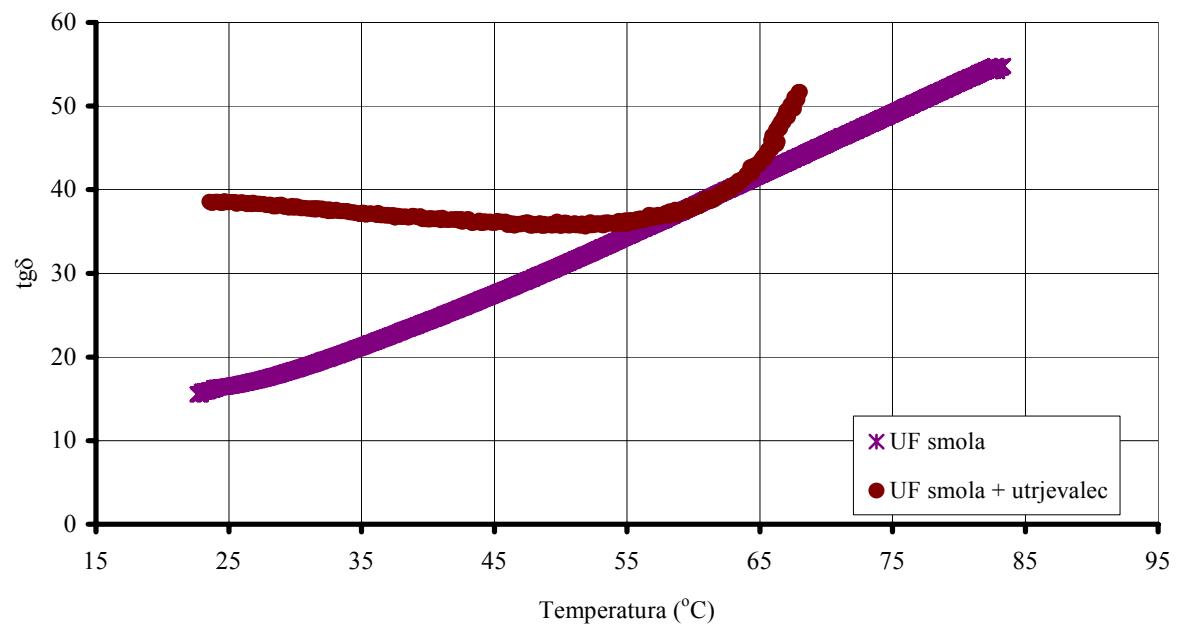
Primerjave povprečnih vrednosti tangensa izgubnega kota proučevanih lepil pri 100 kHz, 500 kHz in 1 MHz pokažejo, da so vrednosti meritev za določeno lepilo v območju, ki je značilno za posamezno lepilo. Primerjave rezultatov so prikazane grafično.



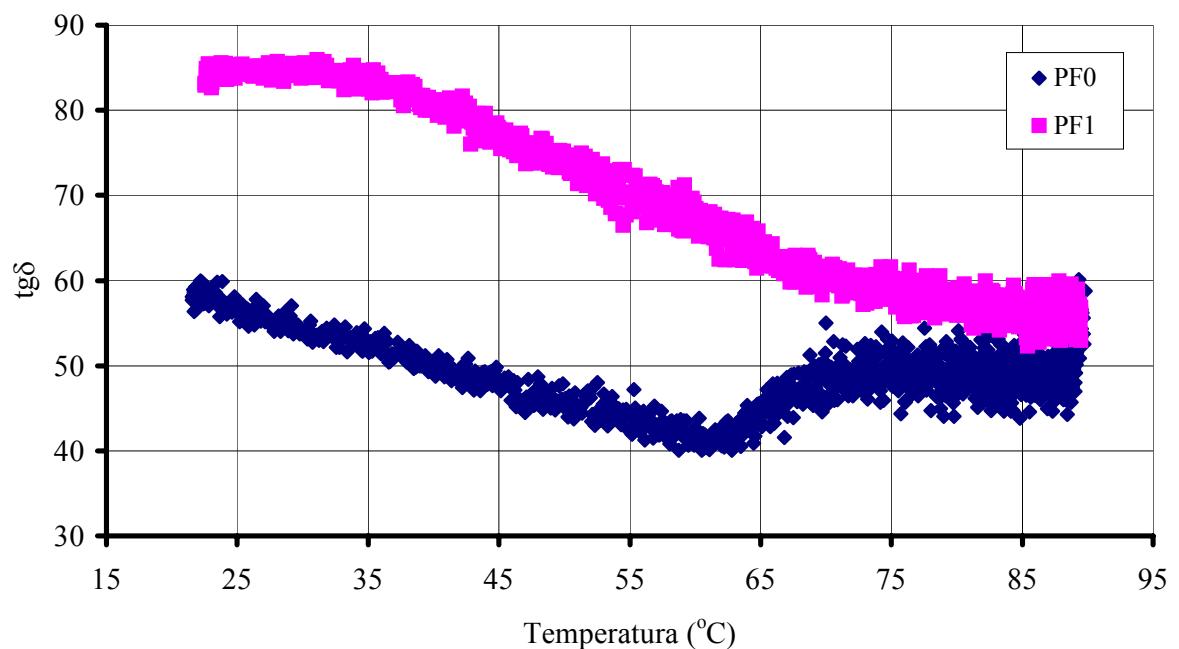
Slika 21: Tangens izgubnega kota fenol-formaldehidnega lepila v odvisnosti od temperature segrevanja pri frekvenci 100 kHz.



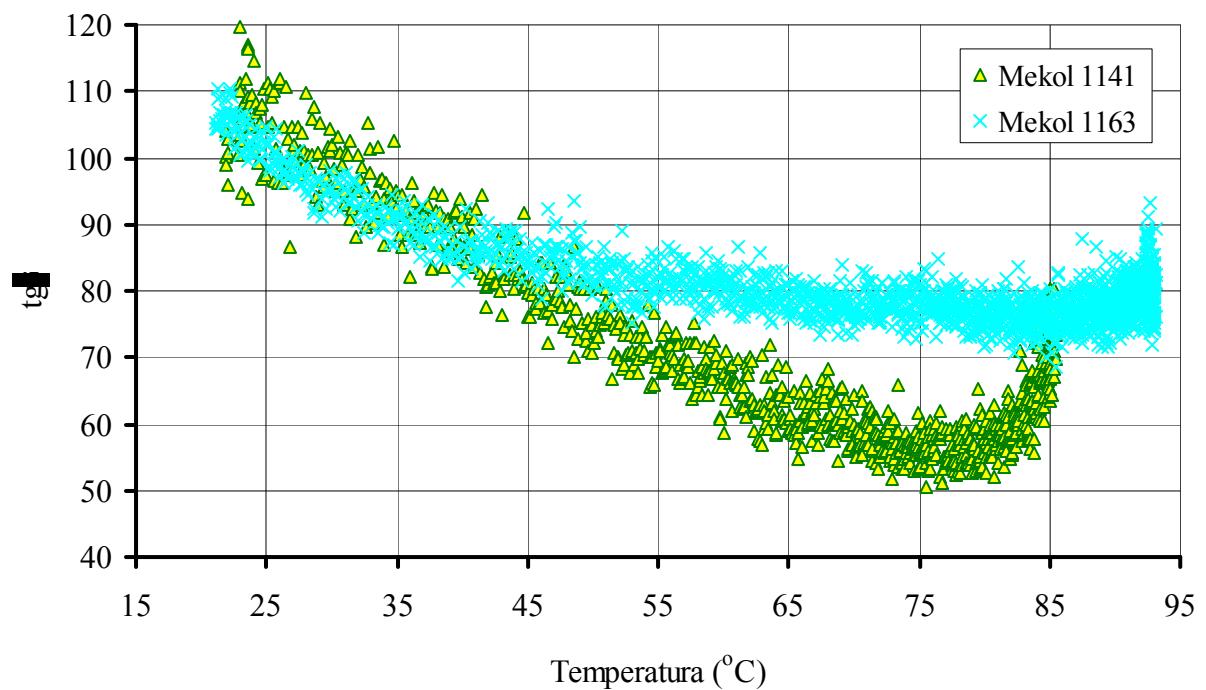
Slika 22: Tangens izgubnega kota PVA lepila v odvisnosti od temperature segrevanja pri frekvenci 100 kHz.



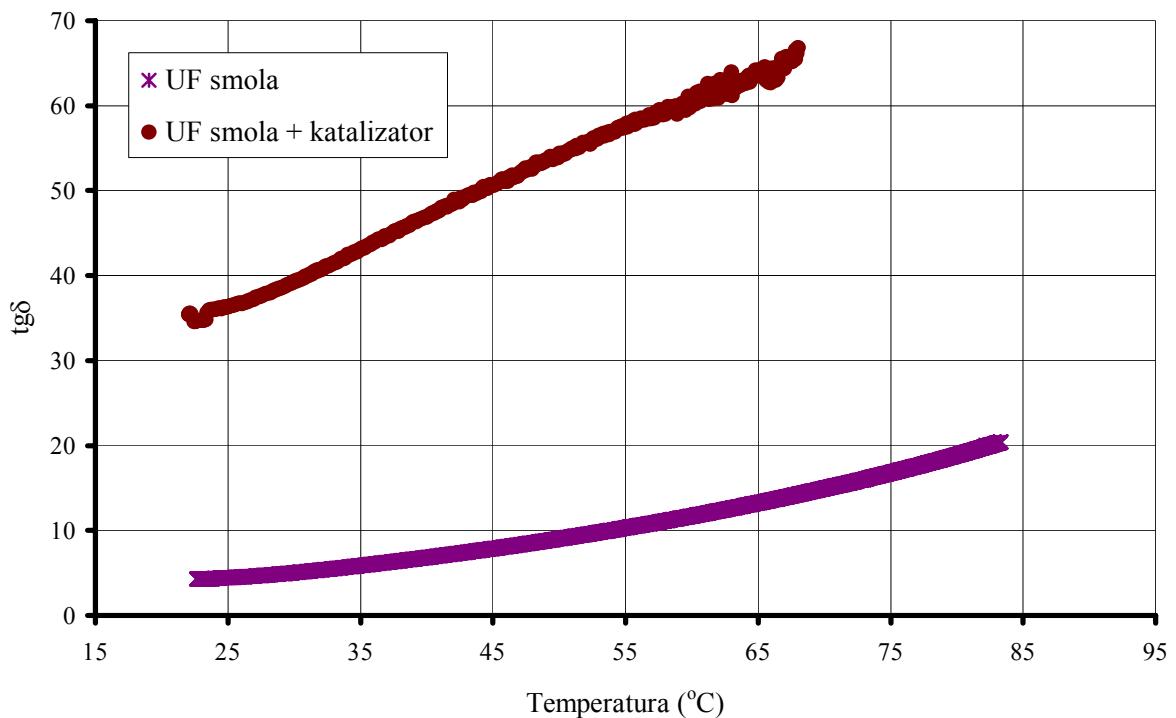
Slika 23: Tangens izgubnega kota UF lepila v odvisnosti od temperature segrevanja pri frekvenci 100 kHz.



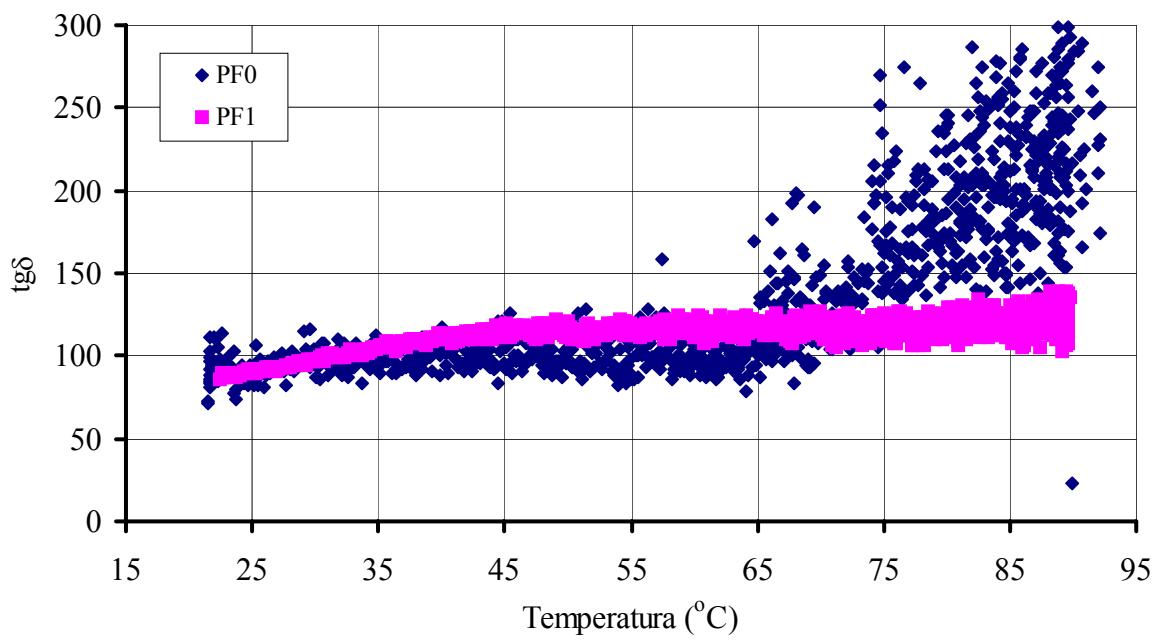
Slika 24: Tangens izgubnega kota fenol-formaldehidnega lepila v odvisnosti od temperature segrevanja pri frekvenci 500 kHz.



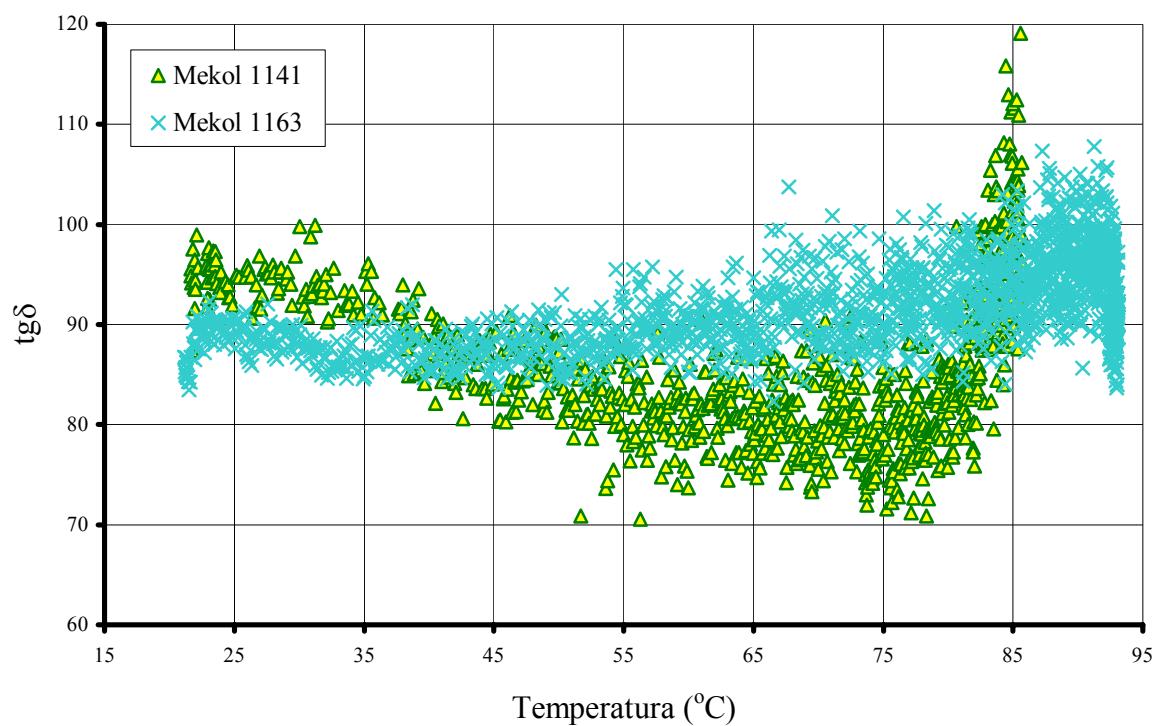
Slika 25: Tangens izgubnega kota PVA lepila v odvisnosti od temperature segrevanja pri frekvenci 500 kHz.



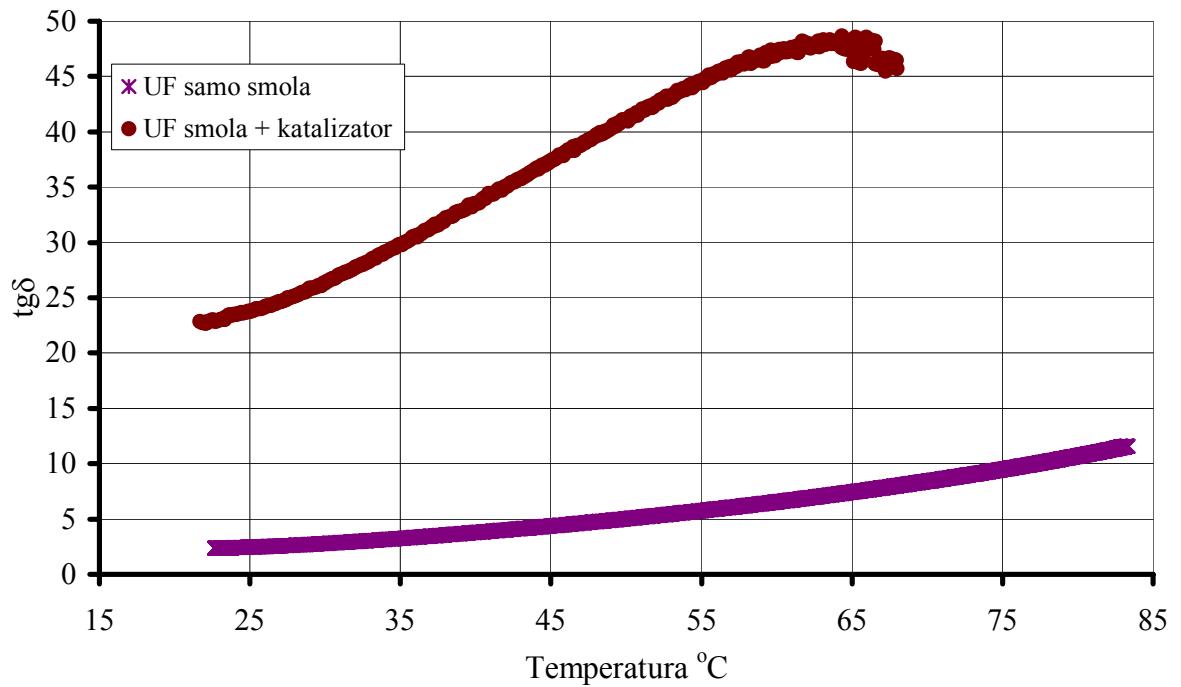
Slika 26: Tangens izgubnega kota UF lepila v odvisnosti od temperature segrevanja pri frekvenci 500 kHz.



Slika 27: Tangens izgubnega kota fenol-formaldehidnega lepila v odvisnosti od temperature segrevanja pri frekvenci 1 MHz.



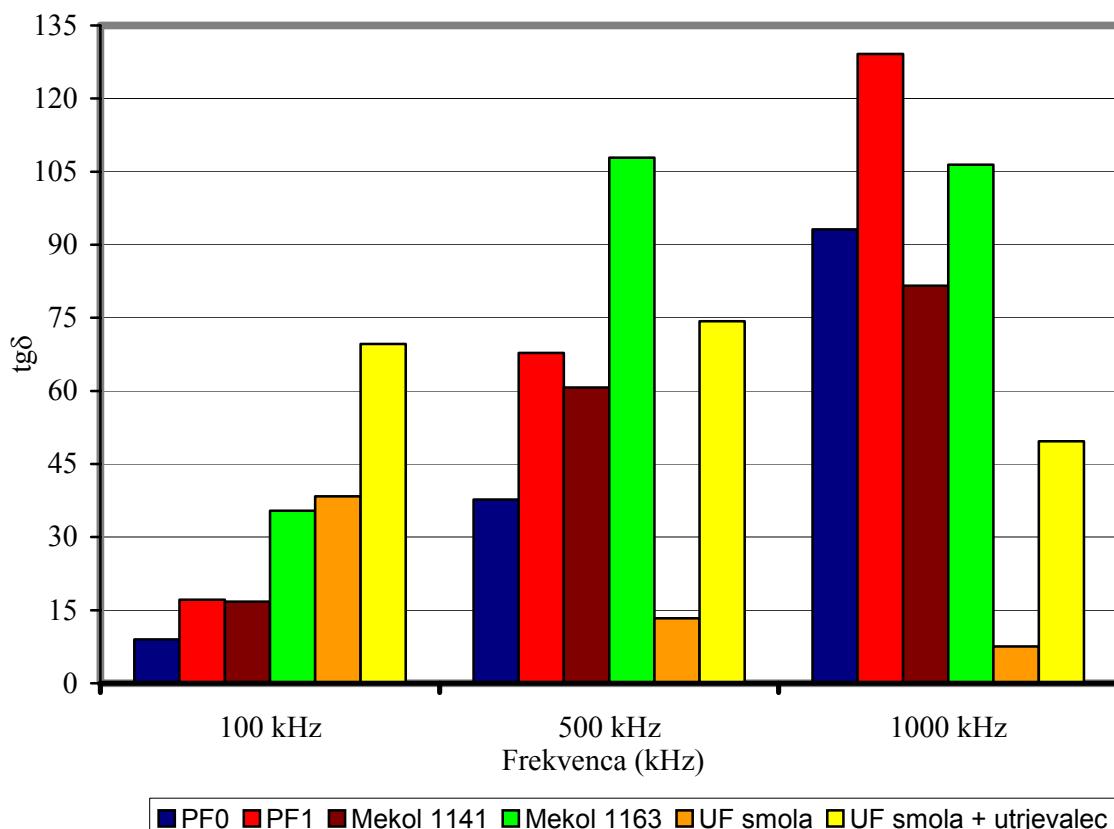
Slika 28: Tangens izgubnega kota PVA lepila v odvisnosti od temperature segrevanja pri frekvenci 1 MHz.



Slika 29: Tangens izgubnega kota UF lepila v odvisnosti od temperature segrevanja pri frekvenci 1 MHz.

Preglednica 12: Tangens izgubnega kota lepil pri temperaturi 65 °C

|          | PF0   | PF1    | Mekol 1141 | Mekol 1163 | UF smola | UF smola + utrjevalec |
|----------|-------|--------|------------|------------|----------|-----------------------|
| 100 kHz  | 9.02  | 17.17  | 16.74      | 35.40      | 38.37    | 69.62                 |
| 500 kHz  | 37.70 | 67.81  | 60.69      | 107.87     | 13.34    | 74.32                 |
| 1000 kHz | 93.13 | 129.13 | 81.62      | 106.44     | 7.54     | 49.67                 |



Slika 30: Tangens izgubnega kota v odvisnosti od frekvence pri temperaturi 65°C

Na sliki 30 je nazorno prikazana primerjava za tangens izgubnega kota ( $\text{tg}\delta$ ) za pet vrst lepila pri treh različnih frekvencah. Iz diagrama lahko razberemo razlike za tangens izgubnega kota za posamezno vrsto lepila pri  $T = 65^\circ\text{C}$ . S povečevanjem frekvence s 100 kHz na 1 MHz se vsem lepilom povečuje izgubni kot ( $\text{tg}\delta$ ), razen pri UF smoli, kjer se izgubni kot z večanjem frekvence zmanjšuje. Z večanjem viskoznosti lepila padajo vrednosti izgubnega kota ( $\text{tg}\delta$ ).

## 5 SKLEPI

Na podlagi rezultatov opravljenе raziskave lahko oblikujemo naslednje sklepe:

- Dielektrične lastnosti lepila so odvisne predvsem od vrste lepila, njegove sestave in njegove viskoznosti.
- Najvišjo dielektrično vrednost je imelo lepilo PF0, sledijo mu lepila mekol 1141, PF1, mekol 1163 in UF lepilo, ki je imelo najnižjo dielektrično vrednost.
- Z dodajanjem katalizatorja lepilu bistveno povečamo dielektrične lastnosti. V primeru UF lepila je dodatek katalizatorja povečal dielektrično vrednost za približno 5 krat pri frekvenci 100 kHz in približno 2 krat pri frekvenci 1 MHz.
- Z večanjem frekvence električnega polja se lepilu niža dielektrična vrednost.
- Najvišjo vrednost izgubnega kota so imela proučevana lepila takrat, ko so bila najbolj tekoča oz. so imela najnižjo viskoznost.

Raziskave na tem področju so nakazale nove izzive in naloge, ki bi jih bilo potrebno podrobnejše raziskati v prihodnjih raziskavah. Zanimivo bi bilo raziskati pojav velike variabilnosti pri meritvah dielektričnih lastnosti za lepilo PF0 pri frekvenci 1 MHz. Smiselno bi bilo izdelati cenejšo varianto sonde in izmeriti dielektrične lastnosti lepilom do končne utrditve lepila in ne zgolj do točke želiranja.

## 6 POVZETEK

Raziskovali smo vpliv temperature segrevanja na dielektrične lastnosti tekočih lepil. V raziskavi smo skušali dokazati, da se dielektrične lastnosti lepila povečujejo z naraščajočo temperaturo. Predpostavili smo, da hitrost utrjevanja polikondenzacijskih in polimerizacijskih lepil narašča v odvisnosti od temperature segrevanja lepila, da ta odvisnost ni popolnoma linearна, da so dielektrične lastnosti tekočega lepila bistveno drugačne od utrjenega lepila in da je hitrost utrjevanja odvisna od vrste in sestave lepila.

Eksperiment smo izvedli pri treh različnih frekvencah (100 kHz, 500 kHz in 1 MHz) in uporabili pet vrst lepil, ki smo jih segrevali od 20 do 90 °C. Pri segrevanju smo lepilom merili spremembo dielektrične vrednosti in tangens izgubnega kota.

Meritve smo opravljali tako, da smo z inekcijsko brizgalko vbrizgali posamezno vrsto pripravljenega lepila v sondi, ki je bila priključena na natančen LCR meter za merjenje dielektričnih lastnosti tekočin. Temperaturo smo merili s termočlenom tipa 'J' preko Data acquisition / switch unit (Agilent 34970A) v časovnem presledku dveh sekund. Sonda z lepilom smo segrevali v laboratorijskem sušilniku pri temperaturi 98°C in merili dielektrične lastnosti. Podatke smo z računalnikom shranjevali v datoteko. Iz dobljenih podatkov smo izračunali povprečno dielektrično vrednost ( $\epsilon$ ) in povprečni tangens izgubnega kota ( $\text{tg}\delta$ ) pri vseh treh frekvencah za posamezno lepilo.

Rezultate smo grafično prikazali in ugotovili, da odvisnost med temperaturo segrevanja in časom segrevanja lepila ni linearна. Ugotovili smo, da se dielektrične vrednosti lepil povečujejo z naraščajočo temperaturo segrevanja, in da so dielektrične lastnosti lepil odvisne predvsem od vrste lepila, njegove sestave in njegove viskoznosti. Pri večanju frekvence se niža dielektričnost lepila. Tudi dodajanje katalizatorja lepilu spremeni dielektrične lastnosti, ki se povečajo. Ugotovili smo, da je tangens izgubnega kota najvišji takrat, ko je lepilo najbolj tekoče oz. ima najnižjo viskoznost. Pri primerjavi obeh vrst lepil smo prišli do sklepa, da imajo polimerizacijska lepila pri dodanem katalizatorju podobne dielektrične lastnosti kot polikondenzacijska lepila.

Z eksperimentom smo potrdili našo domnevo, da dielektrična vrednost lepila narašča s temperaturo in doseže največjo vrednost, ko lepilo želira. Nato krivulja odvisnosti pada, saj je zaradi utrjevanja v lepilu čedalje manj dipolov, od katerih je odvisna dielektrična vrednost.

## 7 VIRI

- Bučar B. 2002. Merjenje temperature. Študijsko gradivo za interno uporabo. Ljubljana, Biotehniška fakulteta, Oddelek za lesarstvo: 24 str.
- Kladnik R. 1977. Osnove fizike (drugi del). Ljubljana, Državna založba Slovenije: 342 str.
- Resnik J., Berčič S., Cikač B. 1995. Visokofrekvenčno segrevanje in lepljenje lesa. Ljubljana, Biotehniška fakulteta, Oddelek za lesarstvo: 109 str.
- Resnik J. 1997. Lepila in lepljen les. Ljubljana, Biotehniška fakulteta, Oddelek za lesarstvo: 103 str.
- Šega B. 2003. Osnove lepljenja lesa. Ljubljana, Biotehniška fakulteta, Oddelek za lesarstvo: 62 str.
- Šernek M., Kamke F. A., Šernek M. I. 2000. Influence of temperature and time on the curing of UF adhesive. Wood adhesives V: 2000. South Lake, Forest product Society: 106-107
- Šernek M. 2004. Spremljanje utrjevanja lepila z dielektrično analizo. Les, 56, 12: 404-408
- Taki K., Yoshida H. 2000. Thermal analysis and bond quality of phenol-formaldehyde resin adhesives V: South Lake, Forest product Society: Wood adhesives 2000: 74-75

## ZAHVALA

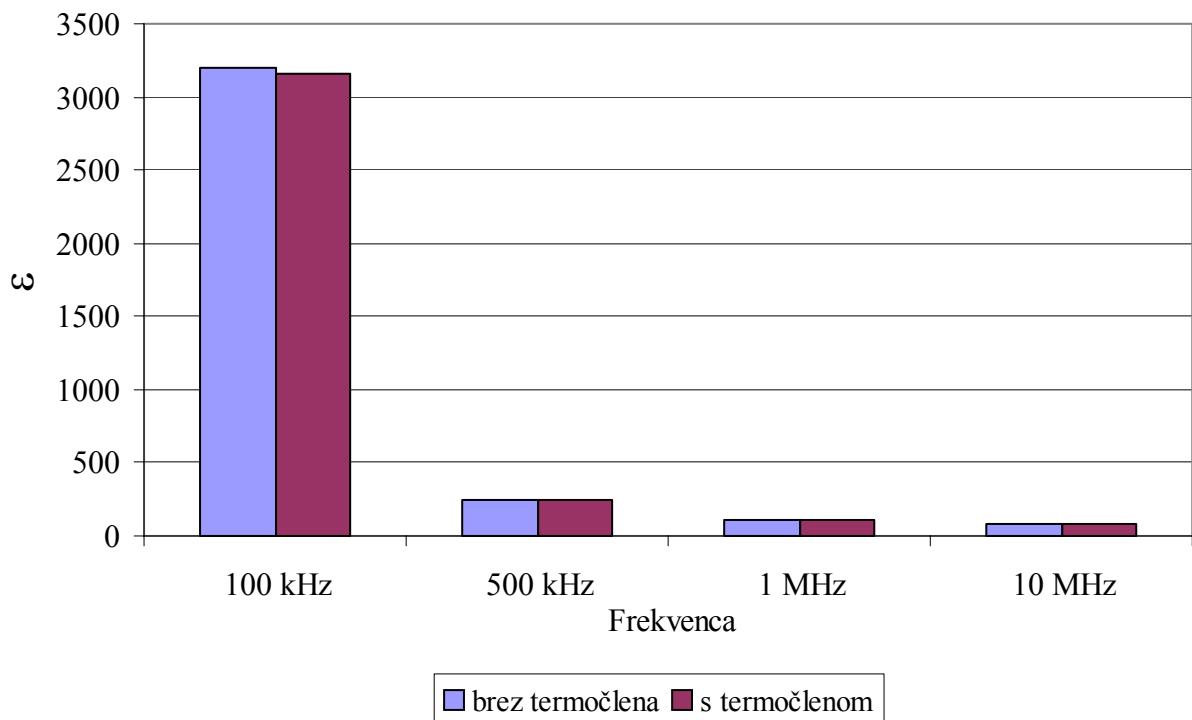
Zahvaljujem se Univerzi v Ljubljani, Biotehniški fakulteti, oddelku za lesarstvo, ker so mi omogočili visokošolski strokovni študij lesarstva in vsem profesorjem, asistentom in sošolcem, ki so mi ob tem času stali ob strani in mi vsestransko pomagali pri mojem izobraževanju.

Posebna zahvala velja doc.dr. Milanu Šernekmu za mentorstvo in pomoč pri izdelavi diplomske naloge, recenzentu prof.dr. Jožetu Resniku za opravljeno recenzijo in mlademu raziskovalcu Mateju Joštu za pomoč pri meritvah in nasvetih.

Prav tako se zahvaljujem prof. slov. Darji Vranjek za pomoč in podporo in mag. prof. angl. Nadi Kuzmin za lektoriranje izvlečka v angleščini.

## PRILOGE

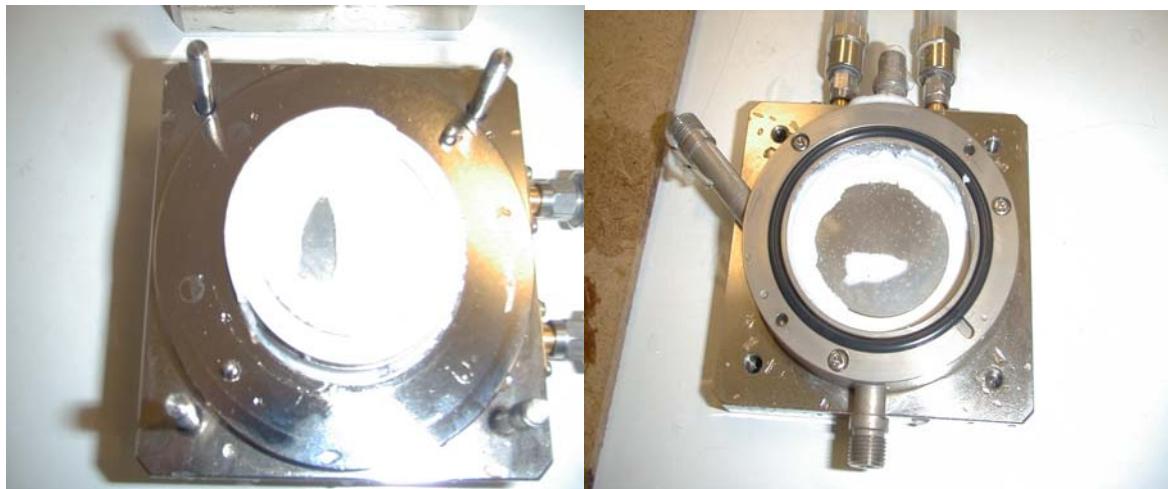
Priloga A: Vpliv termočlena na meritev.



Priloga B: Prikaz UF lepila smola + katalizator in sonde, ki je delno želiralo pri  $T = 67.7^{\circ}\text{C}$ , ponekod ob straneh pa že delno utrdilo.



Priloga C: Prikaz lepila UF smola + katalizator, ki je utrdilo v sondi pri  $T = 70.91\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Sondo smo odprli s pomočjo klešč, čiščenje je bilo zelo zamudno, saj se je lepilo prijelo na obe elektrodi.



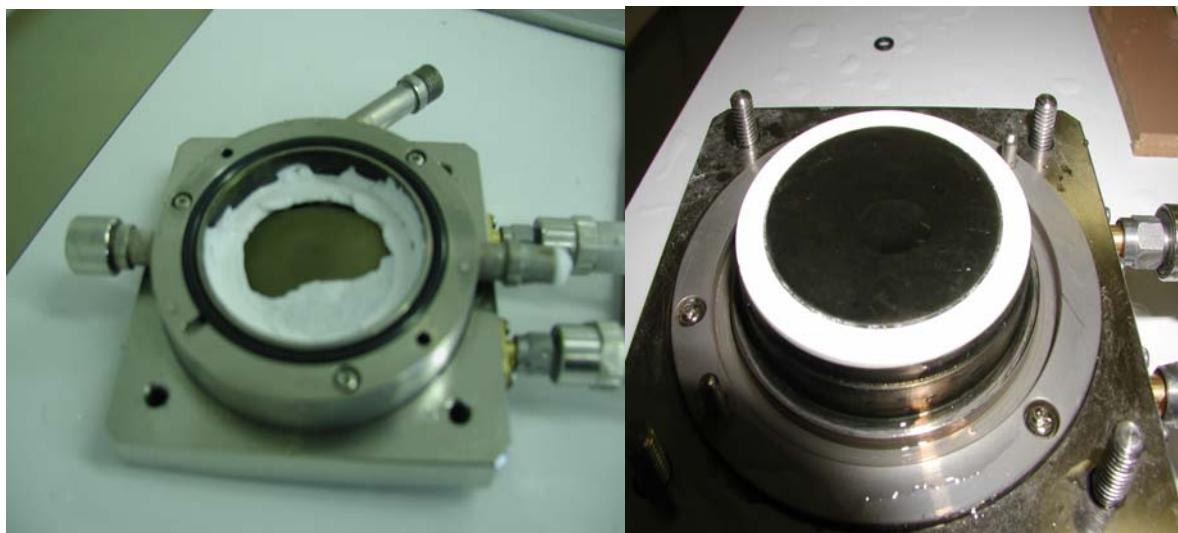
Priloga D: Prikaz lepila PF0 in PF1 pri  $T = 90\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Lepila sta po odprtju sonde bila še v tekočem stanju, čiščenje je potekalo brez problemov.



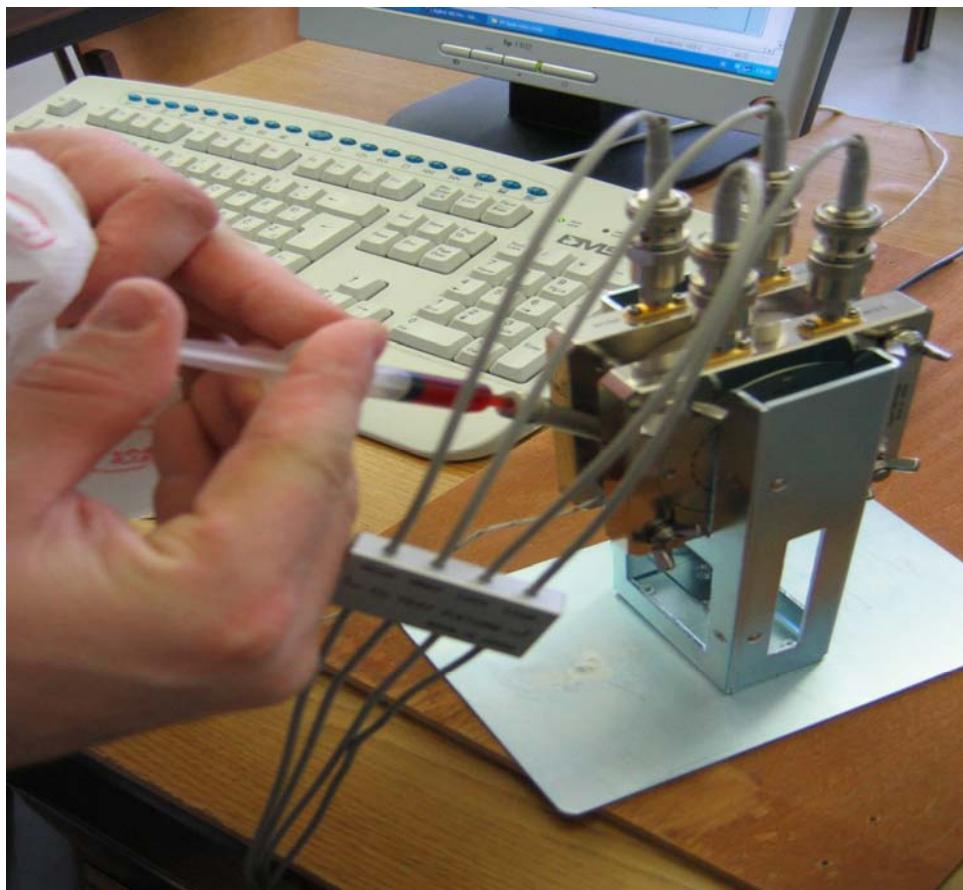
Priloga E: Prikaz lepila PF0 in PF1 pri  $T = 90^{\circ}\text{C}$ , kjer je lepilo teklo iz sonde.



Priloga F: Prikaz lepila Mekol 1141, ki je reagiralo s sondom in delno poškodovalo zgornjo plast elektrode. Na sliki se vidijo elektrode, ki so postale temne.



Priloga G: Prikaz polnjenja sonde z inekcijo v kateri je PF0 lepilo.



Priloga H: Specifikacija lepila Mekol 1141.

Priloga I: Specifikacija lepila Mekol 1163.