

UNIVERZA V LJUBLJANI
BIOTEHNIŠKA FAKULTETA
ODDELEK ZA LESARSTVO

Matija KRANJC

**VPLIV DIELEKTRIČNIH LASTNOSTI LEPILA IN LESA NA
SELEKTIVNOST VF SEGREVANJA**

DIPLOMSKO DELO

Univerzitetni študij

**THE EFFECT OF DIELECTRIC PROPERTIES OF ADHESIVE AND
WOOD ON HF HEATING SELECTIVITY**

GRADUATION THESIS

University studies

Ljubljana, 2006

Diplomsko delo je zaključek Univerzitetnega študija lesarstva. Opravljeno je bilo v laboratoriju Katedre za žagarstvo in lesna tvoriva Oddelka za lesarstvo Biotehniške fakultete Univerze v Ljubljani.

Senat Oddelka za lesarstvo je za mentorja diplomskega dela imenoval doc. 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.

Matija Kranjc

KLJUČNA INFORMACIJSKA DOKUMENTACIJA

ŠD Dn
DK UDK 630*824.87
KG les/tekoče PVA lepilo/dielektrične lastnosti/visoka frekvenca/
segrevanje/selektivnost
AV KRANJC, Matija
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 VPLIV DIELEKTRIČNIH LASTNOSTI LEPILA IN LESA NA
SELEKTIVNOST VF SEGREVANJA
TD Diplomsko delo (univerzitetni študij)
OP XII, 55 str., 15 pregl., 35 sl., 6 pril., 17 vir.
IJ sl
JI sl/en
AI Raziskovali smo vpliv dielektričnih lastnosti lepila in lesa na selektivnost segrevanja preskušanca. Eksperimentalni del je potekal v 2 fazah. Najprej smo izmerili dielektrične lastnosti tekočega PVA lepila in furnirja bukve (*Fagus sylvatica* L.). Pri lepilu smo ugotavljali odvisnost dielektričnih lastnosti od temperature (22-80 °C) in frekvence (79,4 kHz-25,1 MHz), pri lesu pa samo odvisnost od frekvence na enakem območju kot pri lepilu. Meritve smo opravili z napravo Agilent 4285A Precision LCR Meter in pripadajočima sondama za merjenje dielektričnih lastnosti. V drugi fazi smo pripravili preskušance in jih v stiskalnici segrevali na posreden (klasično) in neposreden (VF) način. Med segrevanjem smo ugotavljali vpliv časa segrevanja na spreminjanje in porazdelitev temperature znotraj lepljenca. Ugotovili smo, da dielektrična vrednost in izgubni faktor lepila naraščata z naraščajočo temperaturo. Lepilo ima bistveno višje dielektrične lastnosti kot les, zato se je lepilni spoj v polju VF segreval hitreje kot les. Razlike v segrevanju so bile bolj očitne v začetni fazi segrevanja. V primerjavi hitrosti neposrednega in posrednega segrevanja nismo ugotovili bistvenih razlik.

KEY WORDS DOCUMENTATION

DN Dn
DC UDC 630*824.87
CX wood/liquid PVA adhesive/dielectric properties/high frequency/heating/selectivity
AU KRANJC, Matija
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 2006
TI THE EFFECT OF DIELECTRIC PROPERTIES OF ADHESIVE AND WOOD ON HF HEATING SELECTIVITY
DT Graduation Thesis (University studies)
NO XII, 55 p., 15 tab., 35 fig., 6 ann., 17 ref.
LA sl
AL sl/en
AB The effect of the dielectric properties of adhesive and wood on heating selectivity of test pieces was analysed. The experiment was carried out in 2 phases. First the influence of temperature (22–80 °C) and frequency (79.4 kHz–25.1 MHz) on the dielectric properties of liquid PVA adhesive, and the influence of frequency on the dielectric properties of beech wood (*Fagus sylvatica* L.) were measured. The measurements were performed with the Agilent 4285A Precision LCR Meter and the according test fixtures. In the second phase test pieces were made and heated indirectly and directly (HF). The test pieces were heated in a press, and the growth and distribution of temperature in the boards were monitored. It was determined that by increasing the temperature the dielectric properties of the adhesive increase. Adhesives have considerably higher dielectric properties than wood, and therefore, heat faster. The differences in heating were more obvious in early stages of heating. No differences in speed of indirect and direct heating were found.

KAZALO VSEBINE

	stran
KLJUČNA INFORMACIJSKA DOKUMENTACIJA	III
KEY WORDS DOCUMENTATION	IV
KAZALO VSEBINE	V
KAZALO PREGLEDNIC	VIII
KAZALO SLIK	X
KAZALO PRILOG	XII
1 UVOD	1
1.1 OPREDELITEV PROBLEMA	2
1.2 DELOVNE HIPOTEZE	2
1.3 CILJI NALOGE	2
2 PREGLED OBJAV	3
2.1 SPLOŠNO O SEGREVANJU LESA IN LEPILA	3
2.1.1 Toplotna prevodnost	3
2.1.2 Specifična toplota lesa	3
2.2 SEGREVANJE	4
2.2.1 Kapacitivnost	5
2.3 ELEKTRIČNE LASTNOSTI MATERIALOV	6
2.3.1 Dielektrična vrednost	6
2.3.2 Izgubni faktor v dielektriku	7
2.3.3 Faktor intenzivnosti segrevanja	7
2.4 SNOV V ELEKTRIČNEM POLJU	8
2.5 VPLIVI NA DIELEKTRIČNE LASTNOSTI LESA	9
2.5.1 Dielektrična vrednost	9
2.5.2 Izgubni faktor	9
2.6 LEPILA ZA VF LEPLJENJE LESA	10

2.7	OSNOVE VF SEGREVANJA IN LEPLJENJA LESA	10
2.8	PREGLED RELEVANTNE LITERATURE	12
3	MATERIAL IN METODE	14
3.1	MATERIAL	14
3.1.1	Lepilo	14
3.1.2	Les	15
3.2	METODE	15
3.2.1	Merjenje dielektričnih lastnosti	15
3.2.2	Merjenje dielektričnih lastnosti tekočega lepila	17
3.2.2.1	Potek meritve	18
3.2.3	Merjenje dielektričnih lastnosti furnirja	19
3.2.3.1	Potek meritve	21
3.2.4	Segrevanje	21
3.2.4.1	Priprava preskušancev	22
3.2.4.2	Klasično segrevanje	23
3.2.4.3	Dielektrično segrevanje	24
4	REZULTATI	25
4.1	DIELEKTRIČNE LASTNOSTI TEKOČEGA PVA LEPILA	25
4.1.1	Dielektrične lastnosti tekočega PVA lepila v odvisnosti od frekvence	25
4.1.2	Dielektrične lastnosti tekočega PVA lepila v odvisnosti od temperature	27
4.2	DIELEKTRIČNE LASTNOSTI FURNIRJA	29
4.2.1	Dielektrične lastnosti furnirja v odvisnosti od frekvence	29
4.3	PORAZDELITEV TEMPERATURE V PRESKUŠANCU MED SEGREVANJEM	32
4.3.1	Klasično segrevanje	32
4.3.2	Dielektrično segrevanje	33
5	RAZPRAVA IN SKLEPI	35
5.1	DIELEKTRIČNE LASTNOSTI LEPILA	35
5.1.1	Spremembe dielektričnih lastnosti lepila v odvisnosti od frekvence EM polja	35
5.1.1.1	Dielektrična vrednost PVA lepila v odvisnosti od frekvence EM polja	35
5.1.1.2	Izgubni faktor PVA lepila v odvisnosti od frekvence EM polja	37
5.1.2	Spremembe dielektričnih lastnosti lepila v odvisnosti od temperature	37
5.1.2.1	Dielektrična vrednost PVA lepila v odvisnosti od temperature	38
5.1.2.2	Izgubni faktor PVA lepila v odvisnosti od temperature	38

5.2	DIELEKTRIČNE LASTNOSTI FURNIRJA	39
5.2.1	Spremembe dielektričnih lastnosti furnirja v odvisnosti od frekvence EM polja	39
5.2.1.1	Dielektrična vrednost bukovega furnirja v odvisnosti od frekvence EM polja	39
5.2.1.2	Izgubni faktor bukovega furnirja v odvisnosti od frekvence EM polja	40
5.3	PRIMERJAVA DIELEKTRIČNIH LASTNOSTI LEPILA IN FURNIRJA	42
5.3.1	Primerjava dielektrične vrednosti PVA lepila in bukovega furnirja	42
5.3.2	Primerjava izgubnega faktorja PVA lepila in furnirja bukovine	44
5.4	SEGREVANJE	45
5.4.1	Klasično segrevanje	45
5.4.1.1	Klasično segrevanje s hladnima ploščama stiskalnice	45
5.4.1.2	Klasično segrevanje z ogretim ploščama stiskalnice	46
5.4.2	Dielektrično segrevanje	47
5.4.2.1	Dielektrično segrevanje s hladnima elektrodama	47
5.4.2.2	Dielektrično segrevanje z ogretim elektrodama	48
5.5	PRIMERJAVA KLASIČNEGA IN DIELEKTRIČNEGA SEGREVANJA	49
5.6	SKLEPI	51
6	POVZETEK	52
7	VIRI	54
	ZAHVALA	
	PRILOGE	

KAZALO PREGLEDNIC

	stran
Preglednica 1: Fizikalne in kemijske lastnosti lepila.	14
Preglednica 2: Lastnosti bukovine.	15
Preglednica 3: Povprečne vrednosti ϵ , $\tan \delta$ in ϵ'' za tekoče PVA lepilo v odvisnosti od frekvence.	25
Preglednica 4: Povprečne vrednosti ϵ , $\tan \delta$ in ϵ'' za tekoče PVA lepilo v odvisnosti od temperature.	27
Preglednica 5: Povprečne vrednosti ϵ , $\tan \delta$ in ϵ'' bukovega furnirja v odvisnosti od frekvence.	29
Preglednica 6: Oddaljenost posameznega merilnega mesta od lepilnega spoja pri klasičnem segrevanju.	32
Preglednica 7: Porazdelitev temperature [$^{\circ}$ C] v preskušancu med klasičnim (A) segrevanjem v odvisnosti od časa segrevanja. Plošči stiskalnice sta bili ob začetku segrevanja hladni.	33
Preglednica 8: Porazdelitev temperature [$^{\circ}$ C] v preskušancu med klasičnim (B) segrevanjem v odvisnosti od časa segrevanja. Plošči stiskalnice sta bili ob začetku segrevanja ogreti.	34
Preglednica 9: Oddaljenost posameznega merilnega mesta od lepilnega spoja pri dielektričnem segrevanju.	34
Preglednica 10: Porazdelitev temperature [$^{\circ}$ C] v preskušancu med dielektričnim (A) segrevanjem v odvisnosti od časa segrevanja. Elektrodi sta bili ob začetku segrevanja hladni.	34
Preglednica 11: Porazdelitev temperature [$^{\circ}$ C] v preskušancu med dielektričnim (B) segrevanjem v odvisnosti od časa segrevanja. Elektrodi sta bili ob začetku segrevanja ogreti.	34
Preglednica 12: Primerjava dielektrične vrednosti bukovega furnirja z rezultati sorodnih raziskav.	40
Preglednica 13: Primerjava izgubnega faktorja bukovega furnirja z rezultati sorodnih raziskav.	41

Preglednica 14: Primerjava izmerjenih dielektričnih vrednosti PVA lepila in bukovega furnirja.	42
Preglednica 15: Primerjava izmerjenih izgubnih faktorjev PVA lepila in bukovega furnirja.	44

KAZALO SLIK

	stran
Slika 1: Porazdelitev temperature skozi presek lesa (Resnik in sod., 1995).	4
Slika 2: Shema ploščnega kondenzatorja (Kladnik, 1977: 311)	5
Slika 3: Grafični prikaz definicije dielektrične vrednosti (Keller in sod., 1993: 586).	7
Slika 4: Princip VF segrevanja (Kladnik, 1977: 304).	8
Slika 5: Selektivnost VF segrevanja (Resnik in sod., 1995)	11
Slika 6: Povezava merilne naprave Agilent 4285A Precision LCR Meter in računalnika HP.	16
Slika 7: Program Agilent VEE Pro za merjenje dielektričnih lastnosti tekočega PVA lepila.	16
Slika 8: Vodna kopel v kateri je potopljena sonda Agilent 16452A Liquid Test Fixture.	17
Slika 9: Sonda Agilent 16452A Liquid Test Fixture.	17
Slika 10: Povezava sonde Agilent 16451B, merilne naprave Agilent 4285A Precision LCR Meter in računalnika med meritvijo dielektričnih lastnosti furnirja.	19
Slika 11: Sonda Agilent 16451B Dielectric Test Fixture z vstavljenim furnirjem.	20
Slika 12: Shema preskušanca z označenimi mesti merjenja temperature. Na mestu T6 smo temperaturo merili le pri klasičnem segrevanju.	22
Slika 13: Preskušanec po končani pripravi za segrevanje.	23
Slika 14: Merjenje porazdelitve temperature v preskušancu med klasičnim segrevanjem.	24
Slika 15: Prečno dielektrično segrevanje (Resnik in sod., 1995: 87)	24
Slika 16: Vpliv frekvence EM polja na dielektrično vrednosti tekočega PVA lepila.	26
Slika 17: Vpliv frekvence EM polja na izgubni faktor tekočega PVA lepila.	26
Slika 18: Vpliv frekvence EM polja na dielektrični faktor izgub tekočega PVA lepila.	27

Slika 19: Vpliv temperature na dielektrično vrednost tekočega PVA lepila.	28
Slika 20: Vpliv temperature na izgubni faktor tekočega PVA lepila.	28
Slika 21: Vpliv temperature na dielektrični faktor izgub tekočega PVA lepila.	29
Slika 22: Vpliv frekvence EM polja na dielektrično vrednost bukovega furnirja.	30
Slika 23: Vpliv frekvence EM polja na izgubni faktor bukovega furnirja.	31
Slika 24: Vpliv frekvence EM polja na dielektrični faktor izgub bukovega furnirja.	31
Slika 25: Sprememba dielektrične vrednosti PVA lepila na frekvenčnem območju od 79,4 kHz do 5 MHz pri treh različnih temperaturah lepila.	35
Slika 26: Sprememba dielektrične vrednosti PVA lepila na frekvenčnem območju od 5 MHz do 25 MHz pri treh različnih temperaturah lepila.	36
Slika 27: Sprememba izgubnega faktorja PVA lepila v odvisnosti od frekvence pri treh različnih temperaturah lepila.	37
Slika 28: Vpliv temperature na dielektrične vrednosti PVA lepila pri treh različnih frekvencah.	38
Slika 29: Vpliv temperature na izgubni faktor PVA lepila pri treh različnih frekvencah.	39
Slika 30: Primerjava dielektričnih vrednosti PVA lepila in furnirja bukovine v odvisnosti od frekvence EM polja.	43
Slika 31: Porazdelitev temperature v preskušancu med klasičnim (A) segrevanjem. Plošči stiskalnice sta bili ob začetku segrevanja hladni.	45
Slika 32: Porazdelitev temperature pri klasičnem (posrednem) segrevanju. Plošči stiskalnice sta bili ob začetku segrevanja ogreti.	46
Slika 33: Porazdelitev temperature v preskušancu med dielektričnim (A) segrevanjem. Elektrodi sta bili ob začetku segrevanja hladni.	47
Slika 34: Porazdelitev temperature med dielektričnim (B) segrevanjem. Elektrodi sta bili ob začetku segrevanja ogreti.	48
Slika 35: Primerjava temperaturne porazdelitve v preskušancu pri klasičnem in dielektričnem (B) načinu segrevanja po 0, 60 in 180 s. Plošči stiskalnice oziroma elektrodi sta bili ob začetku segrevanja ogreti.	49

KAZALO PRILOG

- Priloga A: Povprečne vrednosti dielektričnih lastnosti bukovega furnirja v odvisnosti od frekvence.
- Priloga B: Povprečne vrednosti dielektrične vrednosti PVA lepila Multibond EZ-1 v odvisnosti od frekvence.
- Priloga C: Povprečne vrednosti izgubnega faktorja PVA lepila Multibond EZ-1 v odvisnosti od frekvence.
- Priloga D: Izmerjene temperature [°C] pri klasičnem (A) segrevanju.
- Priloga E: Izmerjene temperature [°C] pri klasičnem (B) segrevanju.
- Priloga F: Izmerjene temperature [°C] pri dielektričnem (B) segrevanju.

1 UVOD

V tehnologiji obdelave lesa je potreba po segrevanju pogosta. Značilen primer je lepljenje lesa, saj moramo lepilni spoj pogosto segreti, če želimo, da lepilo utrdi.

Hitrost prehoda toplote pri vročem lepljenju je zelo pomemben tehnološko – ekonomski dejavnik. Tehnološki pomen je v vplivu temperature na začetek, potek, konec in kvaliteto utrditve lepila ter vpliv segretja lesa na gibanje in porazdelitev vlage v prerezu lepljenca, na kondicioniranje lepljenca po lepljenju in izenačitev vlažnosti in notranjih napetosti. Ekonomski pomen prehoda toplote pri lepljenju je predvsem v času segrevanja lepljenca, ki vpliva na ekonomičnost postopka. V primeru lepljenja lesa pomeni uporaba visoke frekvence za utrjevanje lepila prednost v možnosti, da se zaradi različnih dielektričnih lastnosti lesa in lepila slednje hitreje in prej segreje ter utrdi.

V industriji se uporabljata dva načina visokofrekvenčnega segrevanja, in sicer induktivni način, kjer magnetno polje nastane z uporabo posebne tuljave ter kapacitivni način, kjer je predmet segrevanja v visokofrekvenčnem električnem polju, ki nastane z uporabo elektrod kondenzatorja. Prvi način je uporaben za prevodnike električnega toka, drugi pa za boljše ali slabše električne izolatorje.

Frekvence, ki se uporabljajo za visokofrekvenčno segrevanje, segajo od omrežne frekvence 50 Hz pa do nekaj 10 MHz. Razdelimo jih lahko v tri skupine, in sicer: nizka frekvenca (50 Hz), srednja frekvenca (500 Hz do 20 kHz) in visoka frekvenca (100 kHz do 100 MHz). Frekvence do 3 MHz se uporabljajo za induktivno segrevanje, višje pa za kapacitivno.

Za visokofrekvenčno segrevanje lesa je pravilneje uporabljati izraz dielektrično segrevanje, ker natančno definira segrevanje dielektrika, ko je ta v visokofrekvenčnem, električnem, kondenzatorskem polju.

Dielektrično segrevanje se pojavi, če med dve vzporedni kovinski plošči (elektrodi) določene površine (S) postavimo kos lesa z dielektrično vrednostjo (ϵ) oziroma relativno dielektrično vrednostjo (ϵ'), z izgubnim faktorjem ($\tan \delta$) in debelino (d). Ko elektrodi priključimo na visokofrekvenčno električno napetost, lahko sistem elektrod in lesa obravnavamo kot kondenzator. Tak kondenzator je sposoben akumulirati del energije, ki bo tem večja, čim večja bo razlika v napetosti med ploščama. Lastnost kondenzatorja, da v določenih razmerah akumulira določeno količino energije, je njegova kapaciteta in je odvisna od površine elektrod, razdalje med elektrodama in materiala med elektrodama (Resnik in sod., 1995).

Prednosti dielektričnega segrevanja so v hitrosti, prilagodljivosti, enakomernosti in selektivnosti. Med slabosti dielektričnega segrevanja lahko štejemo visoke investicije, zahtevnost, drago obratovanje, težko regulacijo parametrov in nezaželene pojave med segrevanjem (Šernek, 2005).

1.1 OPREDELITEV PROBLEMA

Intenzivnost segrevanja materiala v visokofrekvenčnem (VF) elektromagnetnem (EM) polju je neposredno odvisna od faktorja intenzivnosti segrevanja, ki je zmnožek dielektrične vrednosti in izgubnega faktorja snovi. V primeru segrevanja več materialov v VF polju, se bo material z višjimi dielektričnimi lastnostmi segreval hitreje od ostalih materialov. Pri vročem lepljenju lesa je potrebno segreti predvsem lepilni spoj, da lahko poteče reakcija in lepilo utrdi. Zato je zaželeno, da ima lepilo čim višje dielektrične lastnosti.

1.2 DELOVNE HIPOTEZE

Predvidevamo, da:

- bo imelo lepilo bistveno višje dielektrične lastnosti kot les,
- se bo lepilni spoj hitreje segreval kot les,
- bodo razlike v segrevanju predvsem očitne v začetni fazi segrevanja,
- se bo lepilni spoj hitreje segrel pri dielektričnem segrevanju kot pri klasičnem.

1.3 CILJI NALOGE

Cilji diplomske naloge bodo:

- ugotavljanje dielektričnih lastnosti lepila in lesa,
- proučevanje vpliva dielektričnih lastnosti lepila in lesa na intenzivnost segrevanja v VF polju,
- proučevanje razlik v porazdelitvi temperature med dielektričnim in klasičnim segrevanjem.

2 PREGLED OBJAV

2.1 SPLOŠNO O SEGREVANJU LESA IN LEPILA

Segrevanje lepljenca (les + lepilo) pomeni največkrat nepotrebno porabo energije, porabo časa in morebitno nezaželeno spremembo fizikalnih, elastomehanskih in reoloških lastnosti lepljenca. Ena od možnosti za zmanjšanje nekaterih pomanjkljivosti segrevanja je VF segrevanje, ki omogoča selektivno segrevanje, torej hitrejše segrevanje vode v lesu ali lepila v lepilnem spoju. Osnova za tako segrevanje je kondenzator, pri katerem je med elektrodi vstavljen dielektrik, ki ga označujejo lesna substanca, voda in lepilna mešanica. Pri takem načinu segrevanja se sprošča toplota v obdelovancu samem, kar pomeni tehnično in ekonomsko prednost.

Pri lepljenju lesa govorimo o nehomogenem dielektriku, ki je sestavljen iz slojev lesa in lepila, dielektrične lastnosti teh slojev pa so seveda različne. Nehomogen dielektrik pa je tudi les sam. Segrevanje lesa je odvisno od njegovih termičnih lastnosti, ki so odvisne predvsem od gostote lesa (lesna vrsta), smeri gibanja toplote glede na smeri rasti lesa (vzdolžno, radialno, tangencialno), vlažnosti lesa, višine temperature segrevanja in specifične toplote lesa (Resnik in sod., 1995).

2.1.1 Toplotna prevodnost

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

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

Na prevodnost lesa za toploto vplivajo številni dejavniki. Vpliv gostote lesa je linearen in pozitiven, prav tako vpliv vlažnosti, ki pa je odvisen od gostote lesa. Toplotna prevodnost lesa narašča tudi z naraščajočo temperaturo; odvisnost je linearna.

2.1.2 Specifična toplota lesa

Specifična toplota lesa je lastnost snovi, ki predstavlja 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):

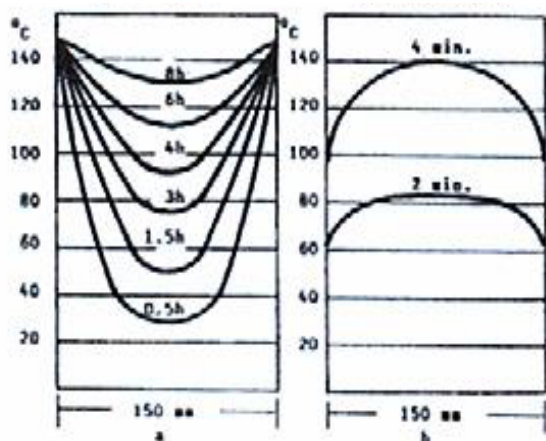
$$c = \frac{Q}{m \cdot (T_2 - T_1)} \quad [\text{kJ/kgK}] \quad \dots(2)$$

2.2 SEGREVANJE

Glede na način dovajanja toplote materialu, ki ga segrevamo, ločimo dva načina segrevanja. Pri posrednem (klasičnem) segrevanju je potrebno toploto pridobiti zunaj predmeta, ki ga segrevamo. Toplota se predmetu nato dovaja oziroma se nanj prenaša s prevajanjem, konvekcijo ali sevanjem. Postopki, ki se pri tem uporabljajo, so zelo različni in odvisni od segrevanega materiala ter vira toplote (Resnik in sod., 1995). Intenzivnost segrevanja je odvisna od termičnih lastnosti lesa, debeline in površine predmeta (Šernek, 2005).

Drug način segrevanja je neposredno segrevanje. Ta način je pri segrevanju lesa zastopan predvsem z dielektričnim segrevanjem lesa, oziroma segrevanjem lesa v polju visokofrekvenčne napetosti. Poleg kapacitivnega poznamo še induktivno segrevanje, ki pa za les ni primerno. Toplota pri neposrednem segrevanju nastaja v lesu samem, zato njeno širjenje ni odvisno od toplotne prevodnosti lesa, kot je to pri posrednem načinu segrevanja lesa. Na ta način segrevani les bi moral teoretično imeti enako temperaturo v notranjosti in na površini, a je zaradi izgub toplote, ki so posledica sevanja v okolico in prehoda toplote na elektrode, temperatura v notranjosti segrevalca višja kot na površini.

Na sliki 1 je prikazana porazdelitev temperature skozi presek lesa debeline 150 mm. Na levi strani (a) je prikazana porazdelitev pri klasičnem segrevanju, na desni strani (b) pa pri dielektričnem segrevanju.

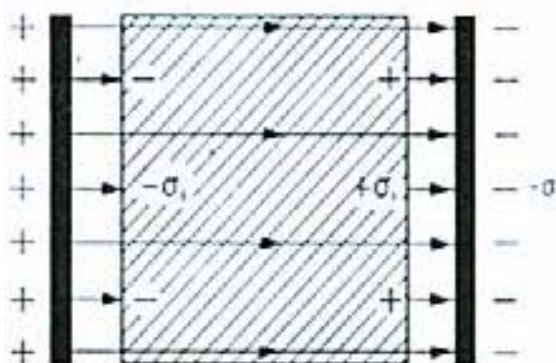


Slika 1: Porazdelitev temperature skozi presek lesa (Resnik in sod., 1995).

Problem uporabe dielektričnega segrevanja v lesni industriji so nehomogenost lesa, različna stopnja njegove vlažnosti in istočasna uporaba drugih materialov. Vse to skupaj rezultira zelo kompleksno električno sliko obdelovanca, ki jo še dodatno zaplete spreminjanje temperature in vlažnosti sistema (Resnik in sod., 1995).

2.2.1 Kapacitivnost

Naprava, ki je prirejena za shranjevanje električne energije, se imenuje kondenzator (slika 2). Kondenzator je sestavljen iz dveh prevodnikov, večinoma oblike plošč. En prevodnik nosi pozitivni naboj, drugi pa enako velik negativni naboj. Kondenzator nabijemo z električnim nabojem tako, da ga priključimo na izvor napetosti. Ta snema elektrone z ene plošče in jih prenaša na drugo ploščo, zaradi česar se prva plošča naelektri pozitivno, druga plošča pa negativno.



Slika 2: Shema ploščnega kondenzatorja (Kladnik, 1977: 311)

Med ploščama nastaja napetost, ki je premosorazmerna naboju na ploščah; naboj (e) na ploščah kondenzatorja je tem večji, čim večja je napetost (U) med ploščama kondenzatorja:

$$e = C \cdot U \quad [F] \quad \dots(3)$$

Sorazmernostni faktor C med nabojem in napetostjo kondenzatorja imenujemo kapaciteta kondenzatorja. To je naboj, ki ga kondenzator lahko prejme pri napetosti 1 V. Enota za kapaciteto je 1 farad (F); kondenzator ima napetost 1 F, če naboj 1 As ustvari napetost 1 V [$F = \text{As/V}$]. Kapaciteta kondenzatorja je odvisna od njegove oblike, to je od velikosti in razporeditve kondenzatorskih plošč. Najenostavnejši je ploščni kondenzator, ki ga sestavljata enaki, vzporedni plošči površine S .

Električno polje med nabitima ploščama kondenzatorja je praktično homogeno, če je razmik (d) med ploščama majhen v primerjavi s prečno dimenzijo plošč. Električne silnice so ravne in vzporedne ter tečejo od pozitivne plošče k negativni plošči. Kapaciteta je tem večja, čim večji sta plošči kondenzatorja in čim manjša je razdalja med njima.

Naboj na kondenzatorju (C) se pri isti napetosti poveča iz C_0 za faktor ε , če v kondenzator vstavimo dielektrik z dielektričnostjo ε (Kladnik, 1977).

$$C = C_0 \cdot \varepsilon \quad \dots(4)$$

2.3 ELEKTRIČNE LASTNOSTI MATERIALOV

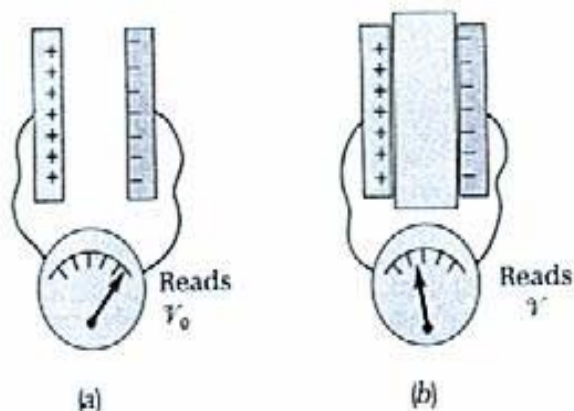
2.3.1 Dielektrična vrednost

Če v homogeno polje vstavimo kakršnokoli snov, električno polje prodre v snov, na atome snovi pa deluje električna sila. V snovi se influirajo naboji. Influenca je seveda bolj izrazita pri elektro prevodnih snoveh, njen pojav povzroči spremembo električnega polja, saj influirani naboji v snovi oslabijo električno poljsko jakost znotraj snovi za faktor ε , ki se imenuje dielektričnost:

$$E = E_0 / \varepsilon \quad [N/As] \quad \dots(5)$$

E_0 prvotna električna poljska jakost,
 E električna poljska jakost v snovi,
 ε dielektričnost snovi.

Dielektričnost snovi (ε) definiramo kot število, za katero se poveča kapaciteta nekega kondenzatorja, če vakuum med njegovima elektrodama nadomestimo s to snovjo (slika 3). Dielektrična vrednost je tudi mera za električno energijo, ki se absorbira in shrani v obliki električne polarizacije v neki snovi, ko je ta v električnem polju. Prevodniki imajo neskončno veliko dielektričnost, dielektričnost plinov pa je praktično 1 ($\varepsilon_{\text{vakuum}} = 1$) (Resnik in sod., 1995).



Slika 3: Grafični prikaz definicije dielektrične vrednosti (Keller in sod., 1993: 586).

2.3.2 Izgubni faktor v dielektriku

Izgubni faktor je mera za del, v dielektriku absorbirane energije, ki se bo spremenila v toploto. V primeru idealnega dielektrika ne prihaja do izgub energije med ploščama kondenzatorja, saj je napetost v fazi premaknjena za četrto nihaja v primerjavo s tokom (90°). V praksi se srečujemo z nepopolnimi dielektriki, v katerih prihaja do izgub. Fazni zamik napetosti glede na tok je manjši kot 90° , razliko do 90° pa imenujemo kot izgub dielektrika. Tangens tega kota se imenuje izgubni faktor dielektrika, ki ima direkten, sorazmerno vpliv na intenzivnost gretja dielektrika, s tem pa tudi na količino porabljene energije.

$\tan \delta$ je del energije, absorbirane v materialu, ki se po odstranitvi električnega polja ne povrne. Ko je material v spreminjajočem se polju, je $\tan \delta$ razmerje med prevodnim tokom in polarizacijskim tokom (Resnik in sod., 1995).

2.3.3 Faktor intenzivnosti segrevanja

Faktor intenzivnosti segrevanja (ϵ'') je produkt obeh osnovnih dielektričnih lastnosti lesa, to je dielektrične vrednosti (ϵ') in izgubnega faktorja ($\tan \delta$).

Naraščanje faktorja pomeni naraščanje intenzivnosti segrevanja dielektrika, kar v primeru dielektričnega segrevanja lesa pomeni dejansko koristne izgube električne energije, ki se pretvarja v toploto v segrevanem materialu.

$$\epsilon'' = \epsilon' \cdot \tan \delta \quad \dots(6)$$

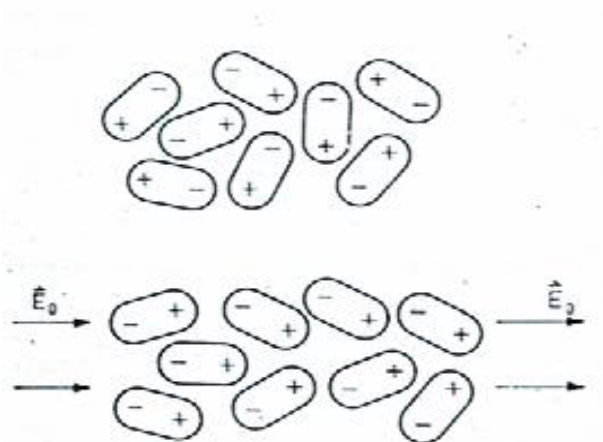
Energija, ki se v določenem času generira v materialu v obliki toplote, je funkcija uporabljene frekvence, gradienta napetosti in dielektričnih lastnosti materiala (Resnik in sod., 1995).

2.4 SNOV V ELEKTRIČNEM POLJU

V homogeno električno polje vstavimo neko snov, npr. prevodnik. Električno polje v prvem trenutku prodre v notranjost snovi, in na atome snovi deluje električna sila. Brž, ko snov vstavimo v polje, električna sila raztegne atome, tako da se pozitivni del vsakega atoma premakne v smer silnic, negativni del pa v nasprotni smeri. Prvotno sferično simetrični atom se na ta način razvleče v t.i. električni dipol, pri katerem sta težišči pozitivne in negativne elektrenine razmaknjeni. Pravimo, da se snov v električnem polju polarizira. Posledica polarizacije atomov je, da se na enem koncu snovi pojavijo negativni naboji, na drugem koncu pa pozitivni naboji. Pravimo, da se na površini snovi naboji influirajo (Kladnik, 1977).

Naboji se influirajo v bolj ali manj vsaki snovi, ki jo vstavimo v električno polje. Influenca je manj izrazita pri neprevodnih snoveh, v katerih se težišči pozitivnega in negativnega naboja atoma pod vplivom zunanjega polja težko razmakneta. Kljub temu se pri nekaterih slabo prevodnih snoveh influirajo precejšnji naboji. Te snovi – dielektriki so namreč sestavljene iz t.i. polarnih molekul ali molekularnih dipolov (Kladnik, 1977).

Ko vključimo kondenzator v električni krog, ki je pod napetostjo, se v dielektriku ustvari napetost električnega polja. Naboj atomov, s tem pa tudi molekule dielektrika, se pričnejo usmerjati v skladu s spremembami predznaka električnega naboja na ploščah kondenzatorja. Zaradi tega prihaja do polarizacije molekul dielektrika, kar pomeni obračanje molekul za določen kot proti eni in drugi plošči oziroma polu kondenzatorja kot prikazuje slika 4. Mera za električno polarizacijo, do katere pride, če boljši ali slabši dielektrik vstavimo v električno polje, je dielektrična vrednost snovi (ϵ).



Slika 4: Princip VF segrevanja (Kladnik, 1977: 304).

Snovi, ki imajo stalne dipole, imenujemo polarne snovi, druge snovi pa so nepolarne. Les in voda sta polarni snovi.

Do ionske polarizacije prihaja v heterogenih dielektrikih, ki so sestavljeni iz različnih sestavin, ki zagotavljajo navzočnost vmesnih površin, kjer se lahko kopičijo prosti ioni. Dosežena polarizacija je tem večja, čim večja je napetost električnega polja in čim večja je frekvenca. Zaradi trajajoče orientacije molekul in zaradi trajnih sprememb prihaja med molekulami do trenja, kar povzroča nastajanje toplote po celotnem prerezu dielektrika. Pri tem se plošče kondenzatorja skoraj ne segrevajo, njihovo segrevanje povzroči le toplota, ki jo oddaja segrevani dielektrik. Razvita toplota po prerezu segrevanega lesa ni enaka, manjše razlike so posledica zgradbe lesa in gradienta vlažnosti in oddajanja toplote okolici (Resnik in sod., 1995).

2.5 VPLIVI NA DIELEKTRIČNE LASTNOSTI LESA

2.5.1 Dielektrična vrednost

Dielektrična konstanta vakuumu je 1, praktično enaka je tudi dielektrična vrednost zraka, medtem ko ima absolutno suh les dielektrično vrednost okoli 2. Če je les vlažen, se njegova dielektrična vrednost močno poveča, saj znaša dielektrična vrednost vode okoli 80.

Dielektrična vrednost lesa je odvisna od (Resnik in sod., 1995):

- vrste in gostote lesa,
- smeri vlaken glede na smer silnic električnega polja,
- vlažnosti lesa,
- višine uporabljene frekvence,
- temperature lesa in
- kemijske zgradbe lesa.

2.5.2 Izgubni faktor

Dielektrične izgube so posledica zamika toka in napetosti. Pomenijo del energije, ki se izgubi kot toplota. To toploto ustvarja trenje, do katerega pride, ko skušajo molekule vzpostaviti ravnovesje glede na orientacijo silnic električnega polja.

Faktor izgub ($\tan \delta$) je odvisen od (Resnik in sod., 1995):

- vrste in gostote lesa
- vlažnosti lesa,
- višine uporabljene frekvence,
- smeri rasti lesa,
- temperature lesa in
- kemijske zgradbe lesa.

2.6 LEPILA ZA VF LEPLJENJE LESA

Glede na teoretične osnove dielektričnega lepljenja lahko sklepamo, da imajo manj viskozna lepila z manjšo vsebnostjo suhe snovi višjo dielektrično vrednost in večji faktor izgub. V procesu VF lepljenja je ta lastnost sicer pozitivna, vendar pa imajo takšna lepila nizko prebojno vrednost, pri segrevanju pride do močnejšega izparevanja disperzijskega sredstva, kar povzroči večjo porabo energije in daljši čas segrevanja za njihovo utrjevanje.

Pred uporabo lepila je potrebno njegove lastnosti preskusiti in določiti sestavo lepilne mešanice. Zelo važno je določiti natančno količino utrjevalca, katerega optimalni dodatek največ vpliva na hitrost utrjevanja. Pomembna je tudi količina polnila. Dodatek polnila do 30% nima bistvenega vpliva na kvaliteto lepljenja, lahko pa bistveno poceni lepljenje. Optimalna delovna viskoznost lepilne mešanice se običajno uravnava z dodatkom vode.

Na kvaliteto lepljenja vpliva tudi nanos lepilne mešanice na lepilno površino, ki ne sme biti prevelik niti premajhen. Zelo pomembno je, da lepilo nanese enakomerno (Resnik in sod., 1995).

2.7 OSNOVE VF SEGREVANJA IN LEPLJENJA LESA

Če poznamo izhodno moč generatorja, frekvenco in napetost ne elektrodah ter električno prevodnost dielektrika, je mogoče, ob upoštevanju že prej naštetih dielektričnih lastnosti lepila in lesa, razmeroma enostavno izračunati pomembnejše parametre VF segrevanja ali lepljenja lesa.

V najenostavnejšem in najpogostejšem primeru, ko elektrode nalegajo na sistem les – lepilo, je potrebno dovedeno napetost na elektrodah prilagoditi posameznim vrednostim sistema, saj je potrebno upoštevati velikost prebojne napetosti, ki je odvisna od frekvence električnega toka, tlaka lepljenja in različnih dielektričnih lastnosti lesa ali lepljenca, oziroma materiala, ki nastopa kot dielektrik.

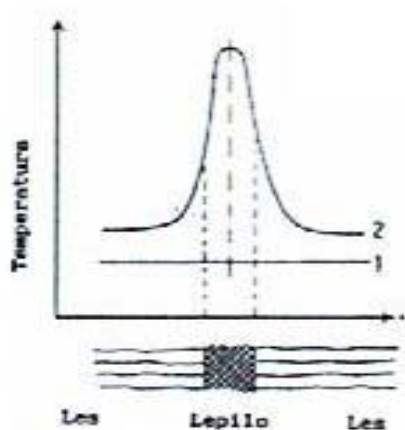
Smer električnega toka se v visokofrekvenčnem EM polju menja periodično. Energija EM polja, ki je v prostoru med ploščama delovnega kondenzatorja, je definirana z EM valovi (radio valovi). Čim manjša je frekvenca, večja je dolžina valov.

Hitrost segrevanja je odvisna od toplotnih lastnosti segrevanega materiala, torej lesa ali lepila. Hitrost segrevanja dielektrika je torej sorazmerna koncentraciji moči, ki se spreminja linearno s frekvenco in kvadratom jakosti električnega polja (Resnik in sod., 1995). Hitrost in stopnja, do katere lahko les segrejemo v polju VF, sta odvisna od več dejavnikov. Vsi ti dejavniki vplivajo tudi na dielektrične lastnosti lesa. Izgube električne energije v lesu med procesom segrevanja se spreminjajo in so prav tako odvisne od frekvence in električne poljske jakosti. V primeru VF segrevanja lesa je kritičnega pomena dielektrični faktor izgub, ki predstavlja lastnost lesa in je produkt med dielektrično konstanto in izgubnim faktorjem (Resnik in sod., 1997).

Toplota, ki predstavlja izgube v dielektriku, je produkt frekvence EM polja (f), dielektrične vrednosti snovi (ϵ), prostornine dielektrika (V), kvadrata jakosti električnega polja (E^2) in izgubnega faktorja dielektrika ($\tan \delta$).

$$P = 2 \cdot \pi \cdot f \cdot \epsilon \cdot V \cdot E^2 \cdot \tan \delta \quad [W] \quad \dots(7)$$

Slika 5 prikazuje selektivnost dielektričnega segrevanja. S krivuljo 1 je prikazana temperatura pred, s krivuljo 2 pa temperatura po segrevanju.



Slika 5: Selektivnost VF segrevanja (Resnik in sod., 1995)

Natančen izračun potrebnega časa segrevanja dielektrika ni mogoč, ker se dielektrična vrednost in izgubni faktor lesa in lepila menjata s temperaturo in frekvenco. Praksa kaže, da je potrebno dejanski čas segrevanja v primeru lepljenja ugotoviti s poskusom (Resnik in sod., 1995).

2.8 PREGLED RELEVANTNE LITERATURE

Dielektrične lastnosti lesa in vplive nanje so raziskovali številni raziskovalci.

Mravljak (2005) je raziskoval vpliv temperature, frekvence EM polja, gostote in usmerjenosti vlaken na dielektrične lastnosti lesa bukve, smreke, jesena, breze in bora. Radialne in tangencialne preskušance je izpostavil temperaturam 20, 30, 40 in 50 °C pri katerih jim je izmeril dielektrične lastnosti pri 22 različnih frekvencah od 79,4 kHz do 10,0 MHz. Meritve je izvedel z napravo Agilent 4285A Precision LCR Meter, in sicer po kontaktni in nekontaktni metodi. Ugotovil je, da so se dielektrične vrednosti in izgubni faktorji lesa povečevali z naraščajočo temperaturo, prav tako se je dielektrična vrednost povečevala z naraščajočo gostoto, pri izgubnem faktorju pa te povezave ni mogel potrditi. Na dielektrične lastnosti lesa je pomembno vplivala frekvenca. Mravljak je ugotovil, da so se dielektrične vrednosti lesa z naraščanjem frekvence zmanjševale, izgubni faktor pa je do frekvence 1 MHz padal, nato je bil do 4 MHz konstanten, od tu pa se je do konca frekvenčnega območja počasi povečeval.

Jošt in sod. (2004) so raziskovali vpliv temperature termične obdelave na dielektrične lastnosti bukovine in smrekovine. V eksperimentu so uporabili diskaste preskušance, ki so jih termično obdelali pri sedmih različnih temperaturah od 50 do 200 °C. Dielektrične lastnosti preskušancev so ugotavljali pri devetih različnih frekvencah od 2 do 10 MHz. Vse meritve so opravili pri sobni temperaturi z impendančnim analizatorjem HP 4191A RF po metodi z mikrometrom, na katerega sta bili pritrjeni aluminijasti elektrodi. Ugotovili so, da sta se dielektrična vrednosti in izgubni faktor lesa zmanjševala z naraščajočo temperaturo toplotne obdelave, če je le-ta bila višja od 100 °C. Smrekovina je imela nižje dielektrične vrednosti kot bukovina. Ugotovili so tudi, da je dielektrična vrednost padala z naraščajočo frekvenco elektromagnetnega polja, kar so pripisali slabši odzivnosti molekul na spremembe smeri električnega polja. Na izgubni faktor frekvenca ni imela vpliva, saj je bil na celotnem frekvenčnem območju skoraj konstanten.

Kabir in sod. (2001) so preučevali vpliv temperature na dielektrične lastnosti kavčuka pri različnih frekvencah in v vseh treh smereh rasti. Dielektrično vrednost in dielektrični faktor izgub so izmerili pri temperaturah od 25 do 100 °C ter pri širokem razponu frekvenc (od 0,01 Hz do 100 kHz ter od 130 MHz do 20 GHz). V eksperimentu so uporabili diskaste preskušance lesa kavčuka, debeline 3,0 do 3,5 mm s povprečno gostoto v absolutno suhem stanju 620 kg/m³. Ugotovili so, da se je dielektrična vrednost zmanjševala z naraščanjem frekvence pri vseh temperaturah. Dielektrična vrednost je bila višja pri višjih temperaturah.

Makoviny (2000) je raziskoval dielektrične in elektromagnetne lastnosti bukovine v odvisnosti od vsebnosti vlage in smeri rasti pri frekvencah 100 kHz ter 20 MHz. Preskušanci so bili diskaste oblike, premera 50 mm in debeline 4 mm. Bili so klimatizirani na ustrezno vlažnost med 0,7 in 22% pri temperaturi 22 °C. Makoviny je ugotovil, da so bile dielektrične lastnosti bukovine odvisne od vsebnosti vlage v lesu, saj sta se dielektrična vrednost in dielektrični faktor izgub povečevala z naraščanjem vlažnosti v vseh treh smereh in pri vseh frekvencah. Vpliv vlažnosti lesa na dielektrične lastnosti je bil bolj izražen pri nižji frekvenci. Podobno je imela na dielektrične lastnosti velik vpliv tudi frekvenca, saj se je z naraščanjem frekvence dielektrična vrednost bukovine zmanjševala.

Ugotovil je tudi, da je bila dielektrična vrednost v longitudinalni smeri višje kot v radialni in tangencialni smeri ($\epsilon'_L > \epsilon'_R \geq \epsilon'_T$ oziroma $\epsilon''_L > \epsilon''_R \geq \epsilon''_T$), kar je pripisal razlikam na makroskopski, mikroskopski ter molekularni ravni v omenjenih treh smereh.

Zhou in Avramidis (1999) sta preučevala dielektrični faktor izgub pri beljavi in jedrovini lesa zahodnoameriške čuge ter pri jedrovini orjaškega kleka. Preskušanci so bili radialni, dimenzij 2 x 0,2 x 0,1 m. Uporabila sta direktno kalorimetrično metodo pri frekvenci 13,56 MHz, vlažnosti lesa med 10 in 80% ter temperaturi od 25 do 55 °C. Rezultati so pokazali, da so lesna vlažnost, temperatura, električna poljska jakost in lesna vrsta bistveno vplivali na dielektrični faktor izgub. Ugotovila sta, da dielektrični faktor izgub narašča z naraščanjem vlažnosti pri vseh obravnavanih lesnih vrstah. Naraščanje je bilo nekoliko počasnejše pri vlažnostih nad točko nasičenja celičnih sten. Z naraščanjem temperature je linearno naraščal tudi dielektrični faktor izgub pri vseh vlažnostih preskušancev.

Resnik in sod. (1997) so proučevali vpliv gradienta vlažnosti na nastanek temperaturnega gradienta v lesu med segrevanjem v VF elektromagnetnem polju. Za simuliranje gradienta vlažnosti so uporabili liste luščenega furnirja bukovine, ki so bili kondicionirani na vlažnosti 5, 10, 15 in 20 %. Iz petnajstih listov furnirja so nato sestavljali lepljence, in sicer iz furnirjev z enako vlažnostjo (v lepljencu ni bilo gradienta vlažnosti) ali iz furnirjev z različno vlažnostjo (lepljenec z vlažnostnim gradientom). Vlažnost so ugotavljali z uporabo gravimetrične metode. Lepljence so 180 s segrevali v stiskalnici, meritve dielektričnih lastnosti furnirja pa so opravili z impendančnim analizatorjem HP 4191A pri frekvenci 6,3 MHz. Ugotovili so, da je imela vlažnost lesa velik vpliv na VF segrevanje, saj je vplivala tako na hitrost izgub toplote kot tudi na hitrost segrevanja lesa. Med VF segrevanjem lesa so lahko velikost vlažnostnega gradienta, njegova oblika in potencial za termične izgube vplivali na razvoj temperaturnega gradienta v preskušancu.

3 MATERIAL IN METODE

Pri izvedbi eksperimentalnega dela smo uporabljali polivinilacetatno (PVA) lepilo za VF lepljenje in bukov furnir, ker smo ocenili, da se najpogosteje uporabljata v praksi. Lepilo smo dobili od podjetja Novoles, lesna industrija Straža, furnir pa od podjetja Javor, Prestranek.

Eksperimentalni del je potekal v dveh fazah. Najprej smo proučevali dielektrične lastnosti PVA lepila in bukovega furnirja. V drugi fazi smo pripravili preskušance s PVA lepilnim spojem. Preskušance smo nato segrevali na klasičen način in v VF polju. Merili smo porazdelitev temperature po preseku preskušanca in ugotavljali razlike v intenzivnosti segrevanja lepilnega spoja in furnirja. Ugotavljali smo tudi razlike v intenzivnosti segrevanja med različnima načinoma segrevanja.

3.1 MATERIAL

3.1.1 Lepilo

Uporabili smo PVA lepilo MULTIBOND EZ-1, ki ga proizvaja Franklin International. Polivinilacetat je termoplastični polimer, ki je zelo raznovrsten in primeren za lepljenje širokega področja materialov, pridobijo pa ga z radikalsko polimerizacijo vinilacetata. Vinilacetat je brezbarvna vnetljiva tekočina z značilnim vonjem.

Vinilacetat najpogosteje polimerizirajo z emulzijsko polimerizacijo, možni tehniki pa sta še polimerizacija v masi in polimerizacija v raztopini. Polimerizacija v emulziji poteka po mehanizmu radikalske adicijske (verižne) polimerizacije. Polimerizacijo sprožijo prosti radikali, ki nastanejo s termičnim razpadom iniciatorja. V fazi rasti verige se monomeri z veliko hitrostjo vežejo na rastočo verigo polimera. Končni rezultat polimerizacije je lateks, ki vsebuje polimerne delce, vsak od njih pa več polimernih verig. Polimerni delci tvorijo disperzno fazo oziroma koloid, ki je proti koalescenci stabiliziran z emulgatorjem (Poljanšek, 2003). Lastnosti uporabljenega PVA lepila so prikazane v preglednici 1.

Preglednica 1: Fizikalne in kemijske lastnosti lepila (Varnostni list).

Lastnost	MULTIBOND EZ-1
Vrelišče	210 °F = 99 °C = 372 K
pH vrednost	3
Topnost	topno v vodi
Suha snov	58 %
Gostota	1,09 g/cm ³ pri 20 °C

3.1.2 Les

V eksperimentu smo uporabili rezan furnir lesa bukve (*Fagus sylvatica* L.). Dimenzije listov furnirja so bile 200 x 500 mm, debelina pa 0,55 mm. Liste furnirja smo pred izvedbo meritve klimatizirali v komori s standardno klimo (20 °C in 65% relativne zračne vlažnosti).

Bukev je prava evropska vrsta, za katero so značilna visoka, listopadna drevesa z gladko skorjo. V višino zraste do 40 m, v premer pa do 2 m. Ima gosto krošnjo, skorja je tanka in siva, listi pa jajčasti. Bukev je senčna vrsta, dobro prenaša mraz, občutljiva pa je na daljše suše in sončno pripeko. V Sloveniji je splošno razširjena (Mlakar, 1990). Bukev je zaradi pogostnosti in dimenzij gospodarsko ena najpomembnejših drevesnih vrst. Bukovina ima visoko gostoto, se dobro obdeluje, in izredno dobro krivi. Stabilnost bukovine je neugodna, nagnjena je k zvijanju in ni trajna. Uporaba lesa bukovine je zelo raznovrstna. Uporablja se kot masiven, krivljen ali vezan les in kot furnir. Nekatere lastnosti bukovine so prikazane v preglednici 2.

Preglednica 2: Lastnosti bukovine (Wagenführ, 1985).

R_0 [kg/m ³]	490...680...880
R_{15} [kg/m ³]	540...720...910
Upogibni modul, vzdolžni [N/mm ²]	16000
Tlačna trdnost, vzdolžna [N/mm ²]	53
Toplotna prevodnost [W/mK] ($u=15\%$, $r_{15}=720$)	0,157
pH vrednost	5,1...5,4

3.2 METODE

3.2.1 Merjenje dielektričnih lastnosti

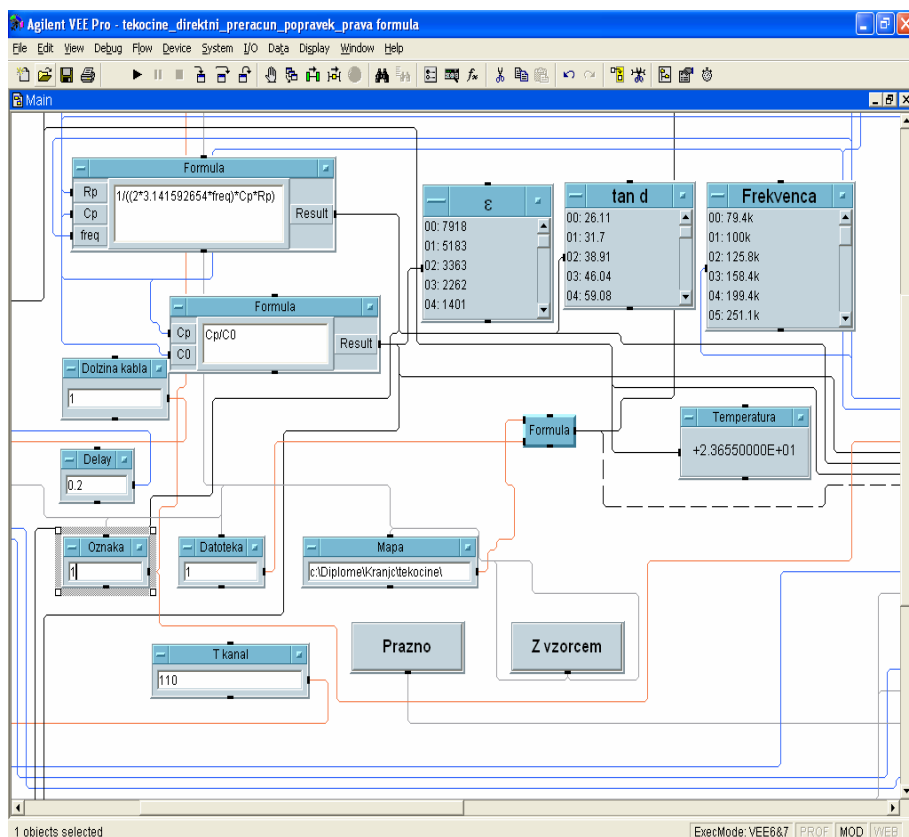
Dielektrične lastnosti materialov smo merili z merilno napravo Agilent 4285A Precision LCR Meter in pripadajočo sondo. Merilna naprava Agilent 4285A Precision LCR Meter je namenjena merjenju različnih električnih in dielektričnih veličin (impedanca, induktivnost, kapacitivnost, upornost, prevodnost, izgubni faktor, fazni kot, idr.). Frekvenčno območje, na katerem naprava izvaja meritve, je od 75 kHz do 30 MHz, natančnost meritev pa 0,01 %.

Naprava za merjenje dielektričnih lastnosti je bila povezana z računalnikom in programom Agilent VEE Pro (slika 6). Program VEE je na eni strani skrbel za zagon in izvajanje meritev, na drugi strani pa tudi za beleženje in shranjevanje izmerjenih količin.

Program je tudi iz izmerjenih veličin avtomatsko izračunal proučevane veličine (slika 7). Izmerjene in izračunane vrednosti smo nato uredili in analizirali v programu Microsoft Excel.



Slika 6: Povezava merilne naprave Agilent 4285A Precision LCR Meter in računalnika HP.



Slika 7: Program Agilent VEE Pro za merjenje dielektričnih lastnosti tekočega PVA lepila.

3.2.2 Merjenje dielektričnih lastnosti tekočega lepila

Dielektrične lastnosti lepila smo merili z napravo Agilent 4285A Precision LCR Meter in sondo Agilent 16452A Liquid Test Fixture. Ker smo dielektrične lastnosti merili v odvisnosti od temperature, je bila sonda z lepilom potopljena v vodni kopeli Kambič WB-30 kot prikazuje slika 8.



Slika 8: Vodna kopel v kateri je potopljena sonda Agilent 16452A Liquid Test Fixture.

Sonda Agilent 16452A Liquid Test Fixture (slika 9) omogoča natančno merjenje dielektričnih lastnosti tekočih snovi na širokem frekvenčnem območju. Razmik med elektrodama sonde določa debelina distančnika. Pri eksperimentu smo uporabili distančnik debeline 2 mm, kar pri dani geometriji sonde pomeni, da je znašal razmik med elektrodama 1 mm.



Slika 9: Sonda Agilent 16452A Liquid Test Fixture.

Nekatere lastnosti sonde:

- premer elektrod: 38 mm,
- masa: 1,4 kg,
- frekvenčno območje (ob uporabi z 4285A): 75 kHz do 30 MHz,
- delovna temperatura: -20 do 125 °C.

Merilna naprava je izmerila kapacitivnost prazne sonde oziroma kapacitivnost zraka (C_0) in lepila (C_p) ter upornost (R_p) pri vsaki od 26 izbranih frekvenc (f). Na osnovi dobljenih vrednosti je računalniški program nato izračunal dielektrično vrednost (ε), izgubni faktor ($\tan \delta$) in dielektrični faktor izgub (ε'') z naslednjimi enačbami:

$$\varepsilon = \frac{C_p}{C_0} \quad \dots(8)$$

$$\tan \delta = \frac{I}{(2 \cdot \pi \cdot f) \cdot C_p \cdot R_p} \quad \dots(9)$$

$$\varepsilon'' = \frac{I}{(2 \cdot \pi \cdot f) \cdot C_0 \cdot R_p} \quad \dots(10)$$

3.2.2.1 Potek meritve

Dielektrične lastnosti lepila smo merili v odvisnosti od temperature. Začetna temperatura je bila sobna temperatura (22 °C), nato 30, 35, 40, 45, 50, 55, 60, 65, 70, 75 in 80 °C. Pri vsaki temperaturi smo opravili po tri polnitve z lepilom, pri vsaki polnitvi pa smo izvedli tri meritve. V končni fazi je to pomenilo, da smo izvedli meritve pri dvanajstih različnih temperaturah, pri vsaki pa smo opravili devet meritev. Lepilo smo segrevali v vodni kopeli.

Najprej smo opravili meritev s prazno sondo. Nato smo v sondo vbrizgali približno 5 ml lepila in ga segreli do zelene temperature. V program VEE Pro smo vnesli oznako preskušanca. Ko je bila zelena temperatura dosežena, smo zagnali računalniški program. Meritev smo opravili pri 26 različnih frekvencah. Začetna frekvenca je bila 79,4 kHz, končna pa 25,1 MHz, pri čemer je bilo naraščanje frekvenc logaritemsko. Temperaturo lepila smo s termočleni izmerili dvakrat, in sicer tik ob začetku meritve dielektričnih lastnosti in tik po njej. Po opravljenih treh meritvah smo sondo izpraznili, jo oprali in dobro posušili. Tako je bila sonda pripravljena za naslednjo polnitev.

3.2.3 Merjenje dielektričnih lastnosti furnirja

Dielektrične lastnosti furnirja smo merili z napravo Agilent 4285A Precision LCR Meter in sondo Agilent 16451B Dielectric Test Fixture (slika 10). Debelino listov furnirja smo merili z digitalnim mikrometrom znamke Mitutoyo, njihovo maso pa s tehtnico Exacta 300 EB.



Slika 10: Povezava sonde Agilent 16451B, merilne naprave Agilent 4285A Precision LCR Meter in računalnika med meritvijo dielektričnih lastnosti furnirja.

Sonda Agilent 16451B Dielectric Test Fixture, ki je prikazana na sliki 11, se uporablja za merjenje dielektričnih lastnosti trdnih snovi. Sonda omogoča merjenje s kontaktno ali z nekontaktno metodo. Pri tem se lahko merjenje s kontaktno metodo opravi s trdnimi kovinskimi elektrodami ali preko tankega filma. Glede na tip in dimenzije preskušanca omogoča merjenje s štirimi različnimi elektrodami.



Slika 11: Sonda Agilent 16451B Dielectric Test Fixture z vstavljenim furnirjem.

Nekatere lastnosti sonde:

- masa: 3,7 kg,
- frekvenčno območje: 75 kHz do 30 MHz,
- delovna temperatura: 0 do 55 °C.

Merjenje dielektričnih lastnosti furnirja smo izvajali z nekontaktno metodo. Ta metoda omogoča, da lahko natančno ugotovimo dielektrično vrednost. Za to metodo je značilno, da preskušanelec v nobenem trenutku ni v stiku z zgornjo elektrodo. Razdaljo med elektrodama moramo pri obeh meritvah ohraniti konstantno. Ta metoda je posebej primerna za filmotvorne materiale, zelo stisljive materiale ali mehke materiale.

Prednosti nekontaktna metode so, da zračna reža med elektrodo in preskušancem ne povzroča napak pri meritvah ter, da na preskušanelec ni potrebno nanesti tankega prevodnega filma. Na drugi strani so slabosti te metode, da moramo kapacitivnost meriti dvakrat in da so enačbe za izračun dielektrične vrednosti bolj kompleksne kot pri uporabi kontaktne metode.

Dielektrična vrednost in izgubni faktor materiala smo izračunali z naslednjima enačbama:

$$\varepsilon = \frac{l}{l - \left(l - \frac{C_{s1}}{C_{s2}} \right) \cdot \frac{t_g}{t_d}} \quad \dots(11)$$

$$D_t = D_2 + \varepsilon_r \cdot (D_2 - D_1) \cdot \left(\frac{t_g}{t_d} - 1 \right) \quad \dots(12)$$

, kjer je	C_{s1}	kapacitivnost brez preskušanca [F],
	C_{s2}	kapacitivnost s preskušancem [F],
	t_g	razdalja med elektrodama [m],
	t_a	povprečna debelina preskušanca [m],
	D_2	izgubni faktor s preskušancem,
	D_1	izgubni faktor brez preskušanca.

3.2.3.1 Potek meritve

Liste furnirja smo pred meritvijo klimatizirali v klima komori pri temperaturi 20 °C in 65 % relativni zračni vlažnosti. Radialne vzorce dimenzij 55 x 55 mm smo narezali na rezalniku za papir, skupno je bilo narezanih 40 furnirjev. Furnirje smo nato označili in jih stehali na 0,001 g natančno. Z mikrometrom smo izmerili debelino vsakega furnirja na treh mestih na 0,001 mm natančno. Povprečna debelina furnirja je znašala 0,539 mm, povprečna vlažnost 7,7 %, povprečna gostota v absolutno suhem stanju pa 640 kg/m³. V program VEE smo vnesli oznako, maso in debelino furnirja, ter razdaljo med elektrodama sonde, ki je bila konstantna in je znašala 0,7 mm. Nato smo furnir vstavili v sondo in sprožili meritev, ki je potekala pri sobni temperaturi (22 °C). Da bi določili vlažnost preskušancev ob meritvi, smo jih po meritvi dali v sušilnik za 24 ur. Sušenju je sledilo hlajenje preskušancev v eksikatorju, tehtanje in ugotavljanje vlažnosti.

Dielektrične lastnosti furnirja smo izmerili pri 26 različnih frekvencah. Začetna frekvenca je bila 79,4 kHz, končna pa 25,1 MHz. Frekvence so naraščale logaritemsko.

3.2.4 Segrevanje

V drugi fazi eksperimentalnega dela smo pripravili preskušance in jih segrevali v stiskalnici. Eno serijo preskušancev smo segrevali na klasičen način, drugo pa dielektrično (v polju visoke frekvence). Med segrevanjem smo merili porazdelitev temperature po preseku preskušanca.

Meritve smo izvajali v hidravlični stiskalnici, preučevane veličine pa smo pri klasičnem segrevanju merili z napravo Agilent 34970A Data Acquisition Switch Unit, v polju VF pa z napravo MI7111 Power Analyzer. MI7111 Power Analyzer je digitalen instrument, ki je namenjen merjenju parametrov enofaznih in trifaznih sistemov, ne glede na vrsto priključenih obremenitev. Merimo lahko naslednje veličine: frekvenco (f), fazno napetost (U), medfazno napetost (U_{xy}), fazni tok (I), fazno moč (P) in aktivno energijo (W).

Iz naštetih veličin lahko z enostavnimi enačbami izračunamo vrsto drugih veličin. Poleg tega naprava omogoča merjenje osmih dodatnih količin (AUXi). MI7111 Power Analyzer je zasnovan kot prenosen instrument. Analizator ima na sprednji (komandni) plošči LCD zaslon, 16 tipk za upravljanje, režo za spominsko kartico in ključavnico, ki prepreči dostop do spominske kartice. Zadnja plošča ima vtičnico za izvor električnega toka, izhode za povezavo na generator in priključke za opravljanje dodatnih meritev.

Power Analyzer je bil povezan z računalnikom, pripadajoči program pa je zajemal izmerjene vrednosti. Podatke smo pri klasičnem segrevanju zajemali s programom Agilent VEE Pro, ki je skrbel tudi za sprožitev meritve in spremljanje parametrov med meritvijo.

3.2.4.1 Priprava preskušancev

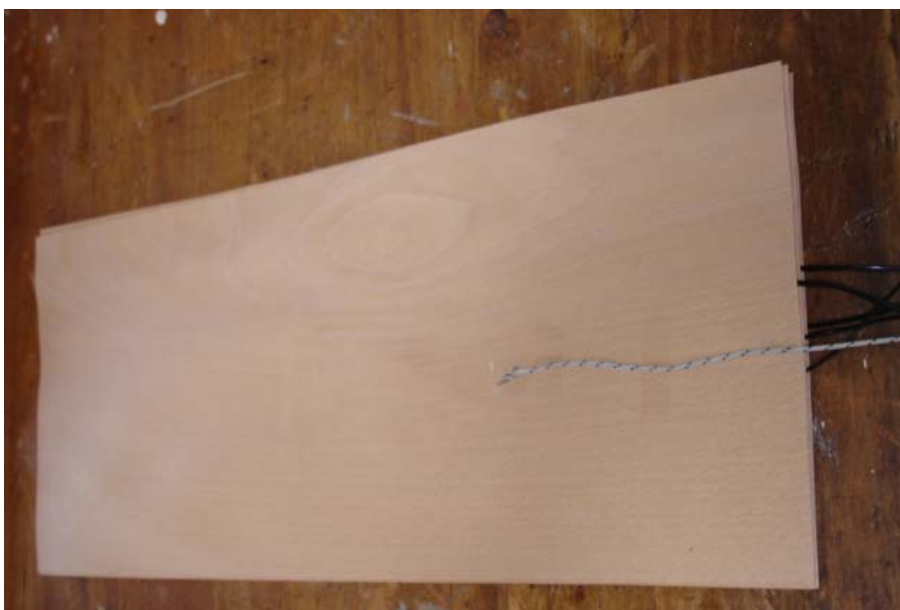
Preskušanec je bil sestavljen iz 10 listov furnirja, dimenzij 200 x 500 mm in PVA lepilnega spoja v sredini. Po deset listov furnirja smo vzeli iz klima komore in jih skupaj stehali na 0,01 g natančno. Nato smo vsakemu posebej izmerili debelino z digitalnim mikrometrom. Debelino smo merili na treh mestih na 0,001 mm natančno. Vsi furnirji, ki so sestavljali preskušanec, so bili usmerjeni vzdolžno.

Na vsakega od zgornjih pet listov furnirja smo z lepilnim trakom prilepil po en termočlen. Termočlen, ki je meril temperaturo T1 je bil vedno v lepilnem spoju, ostali so sledili po vrstnem redu proti zunanosti preskušanca kot prikazuje slika 12. Pri klasičnem načinu segrevanja smo uporabili še šesti termočlen, ki je bil v stiku z zgornjo ploščo stiskalnice.



Slika 12: Shema preskušanca z označenimi mesti merjenja temperature. Na mestu T6 smo temperaturo merili le pri klasičnem segrevanju.

Na list furnirja v sredini preskušanca smo enostransko nanесли lepilno mešanico. Želeni nanos lepilne mešanice je bil 150 g/m^2 . Ker je približno 2 g lepilne mešanice ostalo na nanašalnem valju, smo nanесли $17 \pm 0,5 \text{ g}$ lepilne mešanice. Po nanosu smo lepilo enakomerno porazdelili in preskušanec sestavili. Skupna debelina preskušanca je znašala $5,5 \pm 0,5 \text{ mm}$.



Slika 13: Preskušanelec po končani pripravi za segrevanje.

Tako pripravljeni preskušanelec smo vložili v stiskalnico in jo zaprli. Čim se je stiskalnica zaprla in se je vzpostavil želeni tlak, smo sprožili meritev. Po končanem segrevanju smo stiskalnico odprli, preskušanelec pa ponovno stehali.

Meritve so potekale pri pogojih okolja 22 °C in 39 % relativni zračni vlažnosti, ostali parametri pa so bili naslednji:

- vlažnost furnirja: 8 %,
- nanos lepila: 150 g/m²,
- vmesni čas: lepilo je bilo nanešeno tik preden smo preskušanelec sestavili in ga vstavili v stiskalnico,
- temperatura segrevanja pri klasičnem načinu: 140 °C,
- specifični tlak stiskanja: 1,0 MPa,
- čas stiskanja je bil odvisen od načina segrevanja.

3.2.4.2 Klasično segrevanje

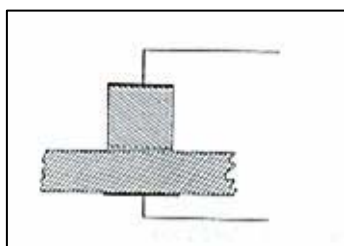
Plošči stiskalnice sta bili segreti na 140 °C. Temperaturo plošč stiskalnice smo ugotovili na osnovi poskusa v preliminarnem delu eksperimenta. Temperaturno porazdelitev znotraj preskušanca smo merili na šestih mestih, spreminjanje vrednosti temperature pa smo zajemali vsako sekundo. Tri serije preskušancev smo začeli segreti s hladnima ploščama stiskalnice. Preskušance smo segrevali toliko časa, da smo v lepilnem spoju dosegli 125 °C. Devet serij preskušancev pa smo začeli segrevali z že ogretim ploščama stiskalnice (140 °C). Segrevanje je trajalo 300 s. Klasično segrevanje preskušanca in merjenje temperature v preskušancu je prikazano na sliki 14.



Slika 14: Merjenje porazdelitve temperature v preskušancu med klasičnim segrevanjem.

3.2.4.3 Dielektrično segrevanje

Preskušance smo segrevali na prečni dielektrični način (Slika 15). Pri tem načinu dielektričnega segrevanja potekajo silnice električnega polja prečno glede na lepilni spoj. V takem primeru je selektivnost segrevanja, torej razlika v hitrosti segrevanja lesa in lepila, precej manjša kot pri vzporednem načinu. Preskušanec nismo segrevali vzporedno, ker je bila njegova širina prevelika, težave pa bi imeli tudi pri apliciranju tlaka nanj.



Slika 15: Prečno dielektrično segrevanje (Resnik in sod., 1995: 87)

Preskušanec smo segrevali 180 s. Temperaturno porazdelitev znotraj preskušanca smo merili na petih mestih. Temperature nismo mogli meriti zvezno. Ob meritvi smo venomer morali izklopiti VF generator, vklopiti naprave za merjenje in v čim krajšem času zabeležiti zadostno število vrednosti temperature. Generator je bil vklopljen po 30 s, nato pa smo ga izklopili za vsaj 5 s, kolikor je trajalo merjenje temperature. Power Analyzer je vrednosti temperature med meritvijo odčital vsako sekundo. Moč generatorja je bila nastavljena na stopnjo številka 2, anodni tok je znašal 0,8 A, mrežni pa 0,38 A.

4 REZULTATI

V eksperimentu pridobljene podatke smo prenesli v program Microsoft Excel in jih v njem obdelali.

4.1 DIELEKTRIČNE LASTNOSTI TEKOČEGA PVA LEPILA

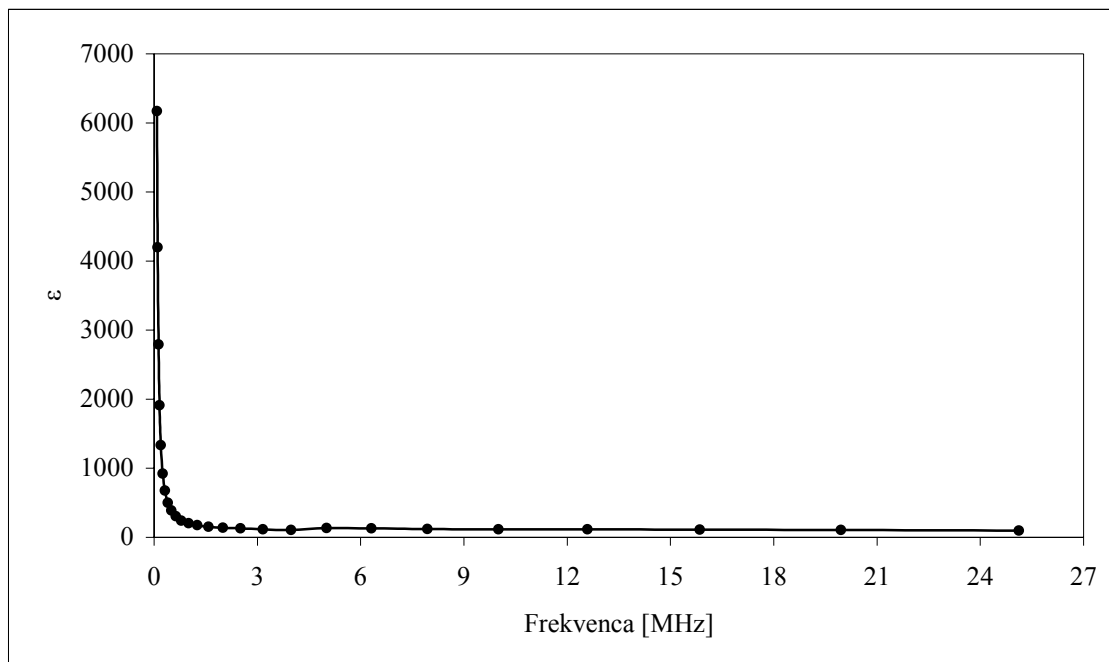
4.1.1 Dielektrične lastnosti tekočega PVA lepila v odvisnosti od frekvence

V preglednici 3 so prikazane povprečne dielektrične vrednosti (ϵ), izgubni faktorji ($\tan \delta$) in dielektrični faktorji izgub (ϵ'') za tekoče PVA lepilo v odvisnosti od frekvence elektromagnetnega polja. Temperatura je bila med merjenjem konstantna in je znašala 22 °C.

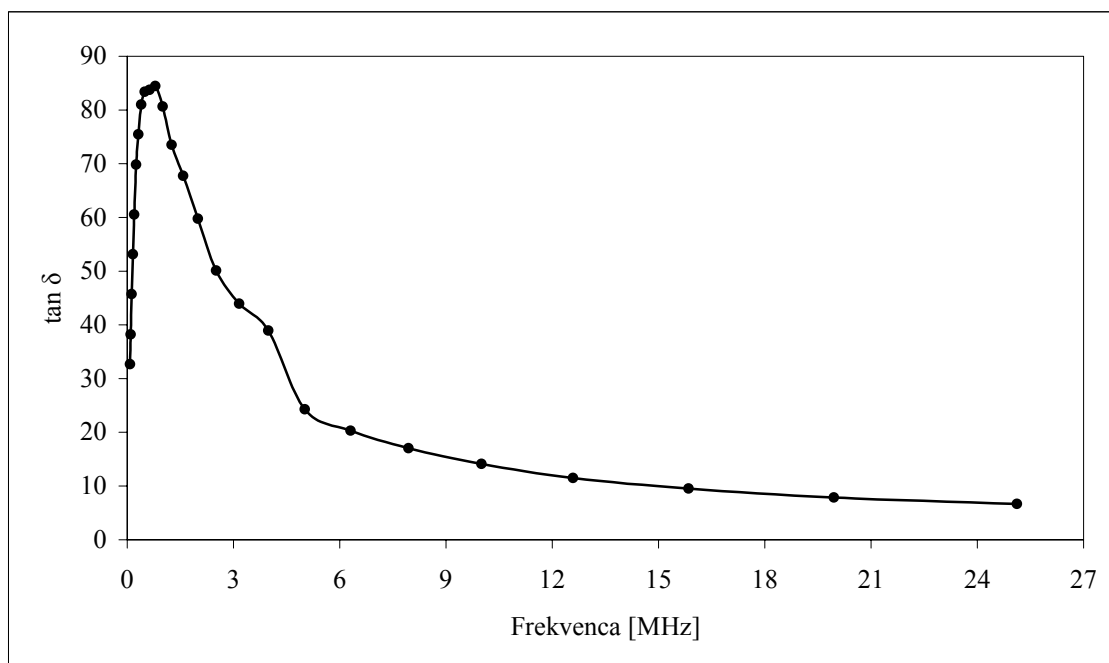
Preglednica 3: Povprečne vrednosti ϵ , $\tan \delta$ in ϵ'' za tekoče PVA lepilo v odvisnosti od frekvence.

f [MHz]	ϵ	$\tan \delta$	ϵ''
0,079	6171,9	32,692	201774,1
0,100	4198,4	38,244	160561,9
0,126	2792,3	45,703	127617,4
0,159	1910,6	53,157	101563,3
0,200	1334,8	60,560	80833,5
0,251	920,0	69,792	64210,5
0,316	677,3	75,491	51131,3
0,398	500,9	81,039	40592,2
0,501	387,9	83,402	32353,6
0,631	307,4	83,742	25742,8
0,794	241,8	84,474	20429,7
1,000	201,6	80,681	16261,8
1,259	175,7	73,538	12917,0
1,585	151,6	67,732	10265,6
1,995	136,7	59,758	8166,7
2,512	129,6	50,111	6493,9
3,162	117,8	43,904	5170,2
3,981	105,8	38,922	4118,6
5,012	134,5	24,301	3267,5
6,310	128,2	20,275	2599,9
7,943	121,4	17,052	2070,4
10,000	116,8	14,119	1648,8
12,589	114,2	11,500	1313,5
15,849	110,0	9,515	1046,4
19,953	105,9	7,870	833,4
25,119	99,5	6,683	664,8

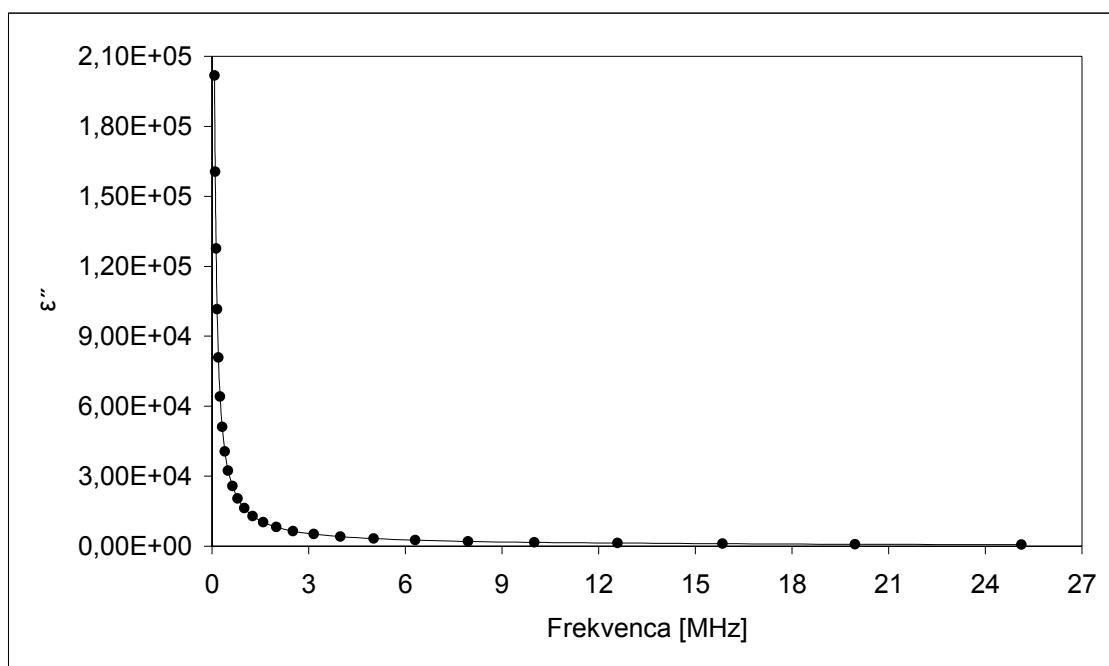
Slike 16, 17 in 18 prikazujejo vpliv frekvence elektromagnetnega polja na dielektrične lastnosti tekočega PVA lepila pri temperaturi 22 °C.



Slika 16: Vpliv frekvence EM polja na dielektrično vrednosti tekočega PVA lepila.



Slika 17: Vpliv frekvence EM polja na izgubni faktor tekočega PVA lepila.



Slika 18: Vpliv frekvence EM polja na dielektrični faktor izgub tekočega PVA lepila.

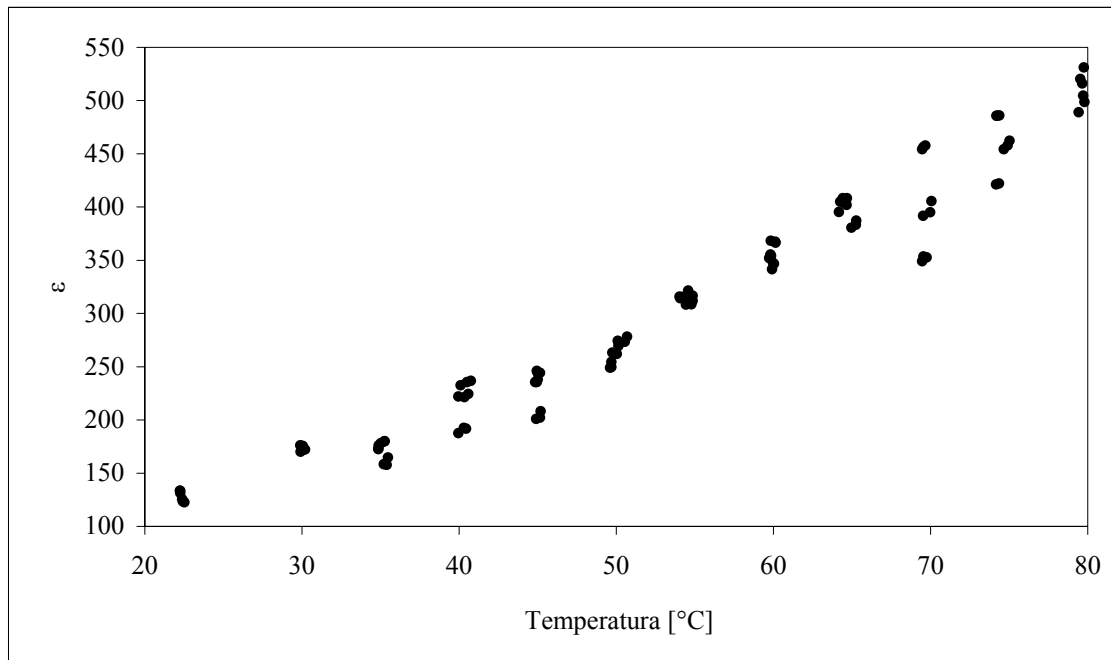
4.1.2 Dielektrične lastnosti tekočega PVA lepila v odvisnosti od temperature

V preglednici 4 so prikazane povprečne vrednosti dielektričnih lastnosti za tekoče PVA lepilo v odvisnosti od temperature lepila. Vrednosti so bile izmerjene pri frekvenci 6,3 MHz.

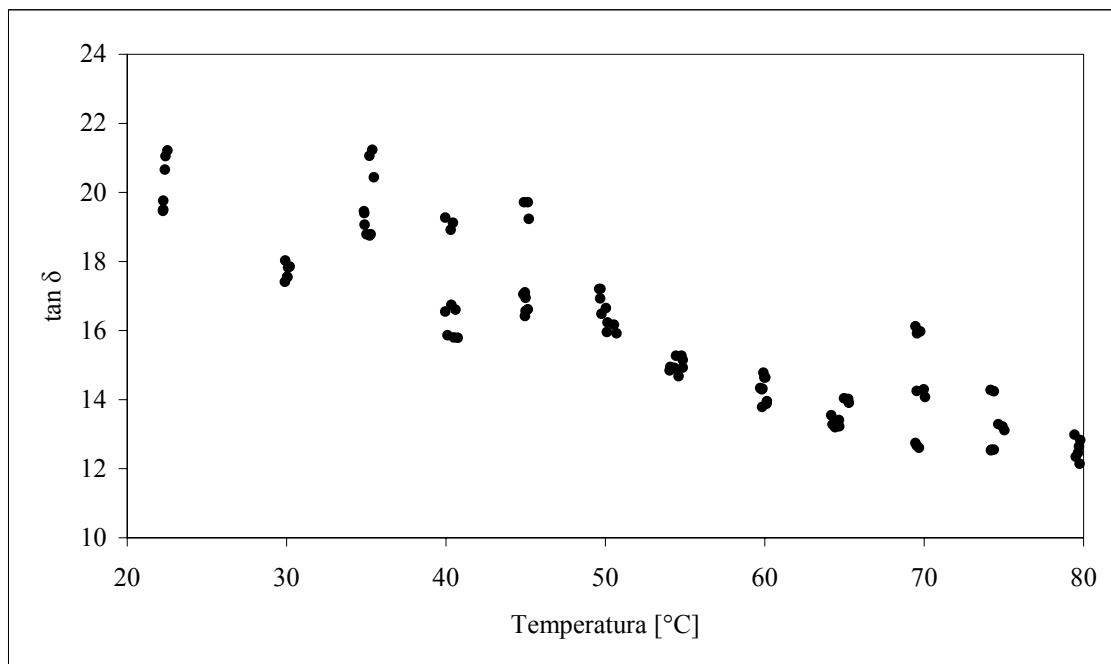
Preglednica 4: Povprečne vrednosti ϵ , $\tan \delta$ in ϵ'' za tekoče PVA lepilo v odvisnosti od temperature.

T [°C]	ϵ	$\tan \delta$	ϵ''
22	128,231	20,275	2599,9
30	173,477	17,702	3070,8
35	171,029	19,661	3362,6
40	216,028	17,181	3711,6
45	228,287	17,705	4041,9
50	263,642	16,527	4357,1
55	314,002	14,988	4706,1
60	355,432	14,291	5079,4
65	397,066	13,543	5377,4
70	401,690	14,294	5741,6
75	459,329	11,912	5471,5
80	509,961	12,563	6406,7

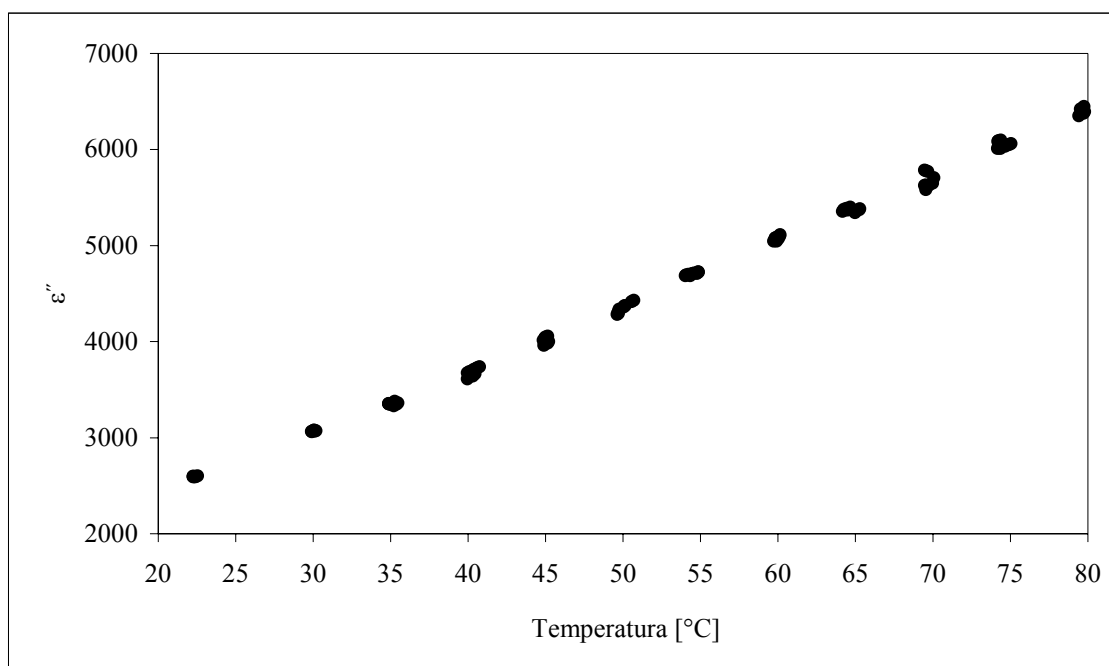
Slike 19, 20 in 21 prikazujejo vpliv temperature na dielektrične lastnosti tekočega PVA lepila pri frekvenci 6,3 MHz.



Slika 19: Vpliv temperature na dielektrično vrednost tekočega PVA lepila.



Slika 20: Vpliv temperature na izgubni faktor tekočega PVA lepila.



Slika 21: Vpliv temperature na dielektrični faktor izgub tekočega PVA lepila.

4.2 DIELEKTRIČNE LASTNOSTI FURNIRJA

4.2.1 Dielektrične lastnosti furnirja v odvisnosti od frekvence

V preglednici 5 so prikazane povprečne vrednosti dielektričnih lastnosti bukovega furnirja v odvisnosti od frekvence EM polja. Temperatura je bila med merjenjem konstantna in je znašala 22 °C. Povprečna debelina furnirjev je znašala 0,529 mm, povprečna masa pa 1,025 g.

Preglednica 5: Povprečne vrednosti ϵ , $\tan \delta$ in ϵ'' bukovega furnirja v odvisnosti od frekvence.

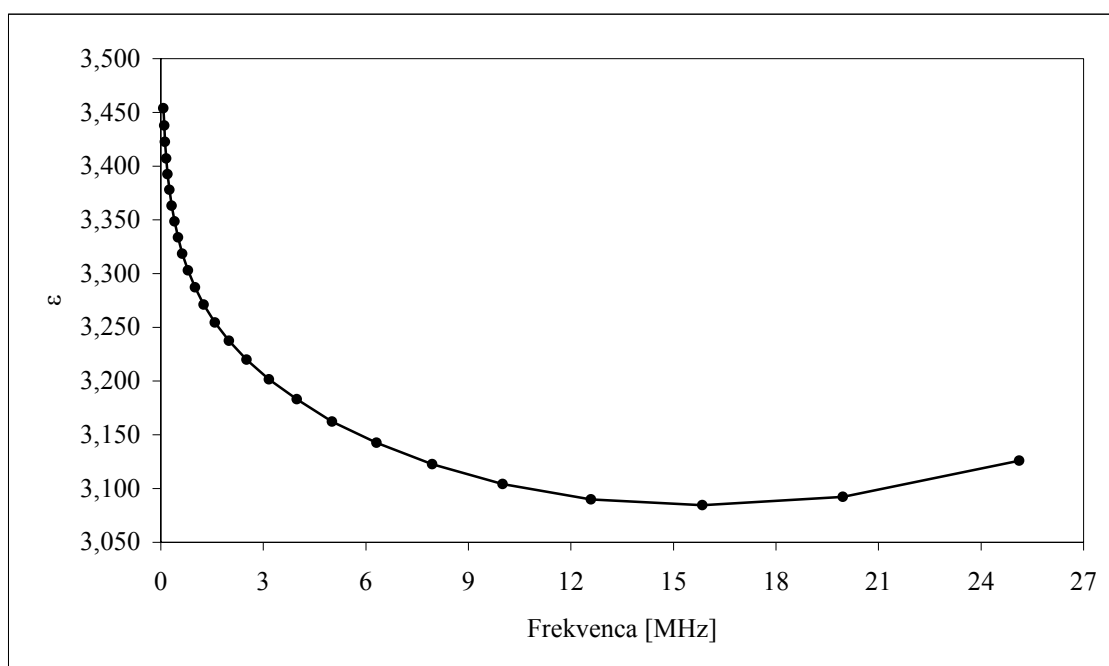
f [MHz]	ϵ	$\tan \delta$	ϵ''
0,079	3,454	0,038	0,131
0,100	3,438	0,037	0,126
0,126	3,423	0,035	0,120
0,159	3,407	0,034	0,117
0,200	3,393	0,034	0,115
0,251	3,378	0,034	0,114
0,316	3,363	0,034	0,114
0,398	3,348	0,034	0,114

se nadaljuje

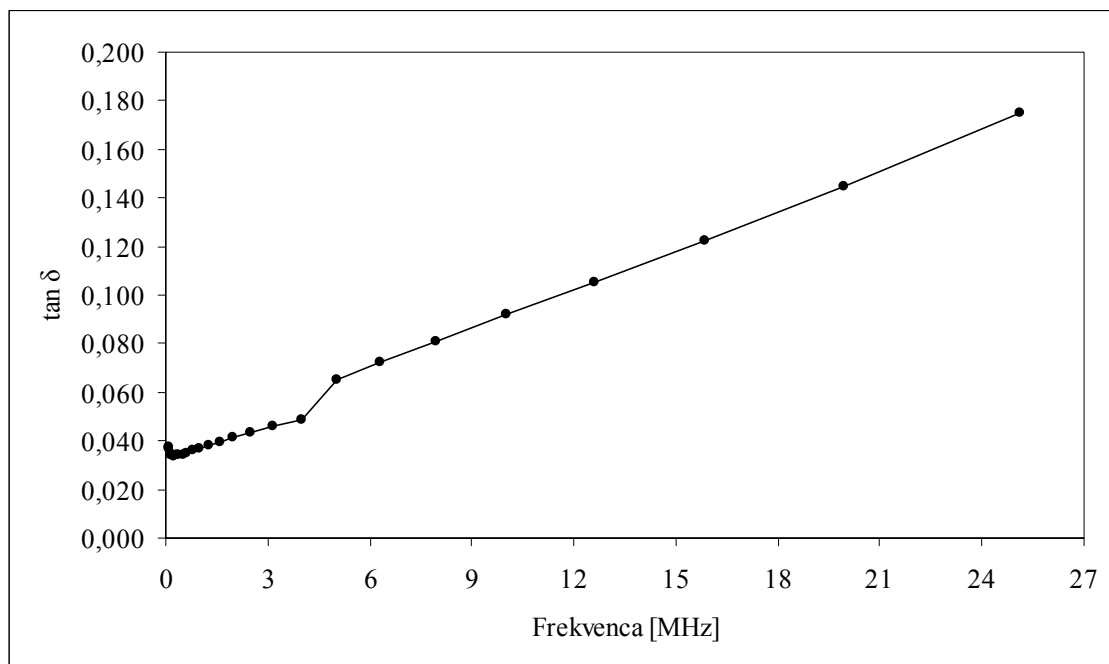
nadaljevanje

f [MHz]	ϵ	$\tan \delta$	ϵ''
0,501	3,334	0,034	0,115
0,631	3,319	0,035	0,116
0,794	3,303	0,036	0,119
1,000	3,287	0,037	0,122
1,259	3,271	0,038	0,125
1,585	3,254	0,040	0,129
1,995	3,237	0,041	0,134
2,512	3,220	0,043	0,140
3,162	3,202	0,046	0,147
3,981	3,183	0,048	0,154
5,012	3,162	0,065	0,205
6,310	3,142	0,072	0,227
7,943	3,123	0,081	0,253
10,000	3,104	0,092	0,286
12,589	3,090	0,105	0,326
15,849	3,084	0,122	0,377
19,953	3,092	0,145	0,448
25,119	3,126	0,175	0,547

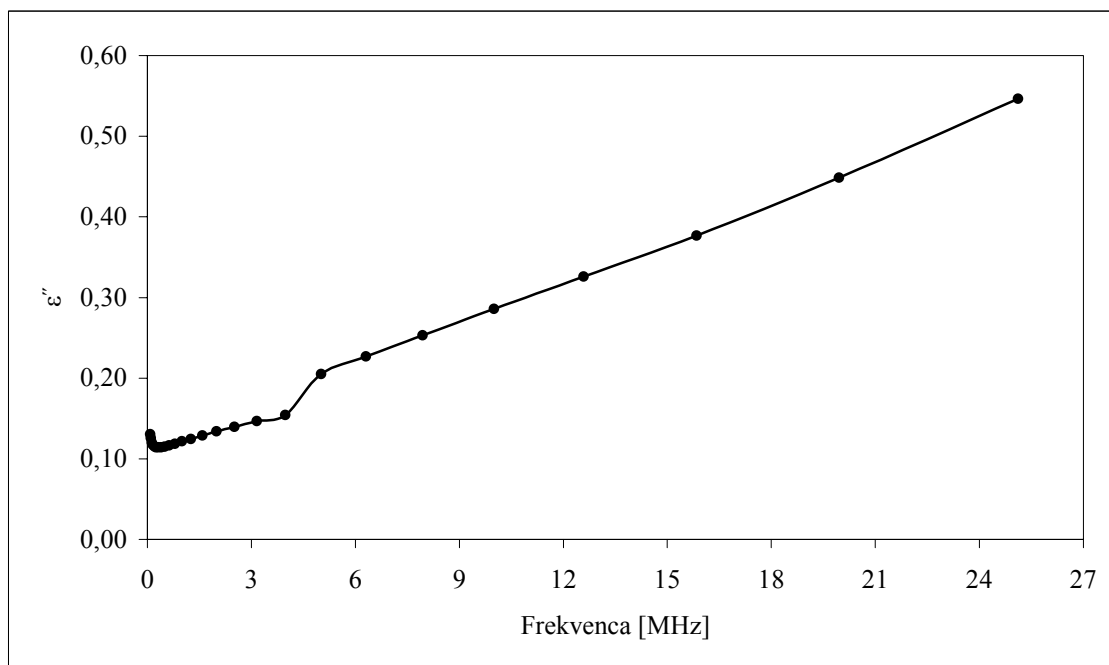
Slike 22, 23 in 24 prikazujejo vpliv frekvence EM polja na dielektrične lastnosti furnirja bukovine pri temperaturi 22 °C.



Slika 22: Vpliv frekvence EM polja na dielektrično vrednost bukovnega furnirja.



Slika 23: Vpliv frekvence EM polja na izgubni faktor bukovega furnirja.



Slika 24: Vpliv frekvence EM polja na dielektrični faktor izgub bukovega furnirja.

4.3 PORAZDELITEV TEMPERATURE V PRESKUŠANCU MED SEGREVANJEM

4.3.1 Klasično segrevanje

Zadnja faza eksperimenta je bila izveden v dveh delih. Želeli smo ugotoviti porazdelitev temperature znotraj preskušanca v odvisnosti od časa segrevanja. Najprej smo opravili segrevanje, ki smo ga začeli s hladnima ploščama stiskalnice (tip A). Temperatura plošč je bila enaka sobni temperaturi, ki je znašala 22 °C. V drugem delu sta bili plošči stiskalnice ob začetku že segreti na delovno temperaturo – 140 °C (tip B). Preskušance smo s tipom A segrevali 1480 s, segrevanje tipa B pa smo izvajali 300 s.

Temperaturo smo merili na šestih mestih znotraj preskušanca. Preglednica 6 prikazuje oddaljenost posameznega merilnega mesta od lepilnega spoja. Merilno mesto 6 se je nahajalo na površini preskušanca (v stiku s ploščama stiskalnice), merilno mesto 1 pa se je nahajalo v lepilnem spoju. Ostali termočleni so bili razporejeni med vsakim listom furnirja in na konstantni razdalji. Povprečna debelina enega lista furnirja je znašala 0,5219 mm.

Preglednica 6: Oddaljenost posameznega merilnega mesta od lepilnega spoja pri klasičnem segrevanju.

Pozicija termočlena	T1	T2	T3	T4	T5	T6
Oddaljenost od lepilnega spoja [mm]	0,00	0,52	1,04	1,57	2,09	2,61

V preglednici 7 so prikazane vrednosti temperature na posameznih merilnih mestih, kot smo jih izmerili vsakih 100 s, le zadnji interval je znašal 80 s.

Preglednica 7: Porazdelitev temperature [°C] v preskušancu med klasičnim (A) segrevanjem v odvisnosti od časa segrevanja. Plošči stiskalnice sta bili ob začetku segrevanja hladni.

Čas [s]	Pozicija termočlena					
	T1	T2	T3	T4	T5	T6
0	24,93	25,88	25,06	25,29	25,39	25,91
100	27,12	27,24	27,98	27,57	28,51	28,66
200	32,61	32,80	34,07	33,35	34,94	35,16
300	40,31	40,51	42,13	41,18	43,08	43,35
400	48,60	48,78	50,60	49,52	51,51	51,80
500	57,08	57,22	59,19	58,02	60,05	60,37
600	65,25	65,34	67,43	66,18	68,24	68,60
700	73,27	73,34	75,51	74,20	76,27	76,68
800	81,14	81,18	83,43	82,07	84,17	84,60
900	88,92	88,94	91,20	89,80	91,92	92,34

se nadaljuje

nadaljevanje

Čas [s]	Pozicija termočlena					
	T1	T2	T3	T4	T5	T6
1000	96,44	96,44	98,72	97,33	99,43	99,80
1100	103,71	103,74	105,30	104,81	106,44	107,24
1200	108,54	108,83	109,93	110,00	112,36	114,03
1300	113,68	113,85	115,60	115,87	118,66	120,79
1400	119,93	119,97	122,36	122,24	125,35	127,49
1480	125,59	125,62	128,43	127,78	131,00	132,90

V preglednici 8 so prikazane povprečne vrednosti temperature na posameznem merilnem mestu v preskušancu v odvisnosti od časa segrevanja. Plošči stiskalnice sta bili ob začetku že segreti na 140 ± 5 °C.

Preglednica 8: Porazdelitev temperature [°C] v preskušancu med klasičnim (B) segrevanjem v odvisnosti od časa segrevanja. Plošči stiskalnice sta bili ob začetku segrevanja ogreti.

Čas [s]	Pozicija termočlena					
	T1	T2	T3	T4	T5	T6
0	24,01	24,07	24,21	25,44	40,07	110,95
15	72,01	75,60	88,06	99,73	115,28	138,05
60	112,00	112,81	117,57	125,15	133,42	142,01
120	122,16	123,98	126,74	131,67	137,21	143,19
180	134,73	135,56	136,45	138,82	141,69	144,80
240	141,47	141,93	142,46	143,51	144,97	146,43
300	144,41	144,71	145,22	145,77	146,75	147,55

4.3.2 Dielektrično segrevanje

Tudi dielektrično segrevanje smo izvedli v dveh delih. Najprej smo opravili segrevanje, ki smo ga začeli s hladnima elektrodama (»hladno«) v stiskalnici. V drugem delu sta bili elektrodi ob začetku že nekoliko segreti zaradi toplote, ki jo je oddajal preskušanec. Med posameznima ponovitvama je preteklo približno 20 min, temperatura elektrod je v tem času padla na 35 ± 5 °C. Preskušance smo v obeh primerih segrevali 180 s. Temperaturo smo v visokofrekvenčnem delu eksperimenta merili na petih mestih. Preglednica 9 prikazuje oddaljenost posameznega merilnega mesta od lepilnega spoja preskušanca. Merilno mesto 5 se je nahajalo najdlje od lepilnem spoju. Ostali termočleni so bili razporejeni od lepilnega spoja navzgor med sosednjima listoma furnirja. Povprečna debelina enega lista furnirja je znašala 0,522 mm.

Preglednica 9: Oddaljenost posameznega merilnega mesta od lepilnega spoja pri dielektričnem segrevanju.

Pozicija termočlena	T1	T2	T3	T4	T5
Oddaljenost od lepilnega spoja [mm]	0,00	0,53	1,06	1,60	2,13

V preglednici 10 so prikazane izmerjene vrednosti temperature v odvisnosti od časa segrevanja. Temperaturo smo izmerili vsakih 30 s.

Preglednica 10: Porazdelitev temperature [°C] v preskušancu med dielektričnim (A) segrevanjem v odvisnosti od časa segrevanja. Elektrodi sta bili ob začetku segrevanja hladni.

Čas [s]	Pozicija termočlena				
	T1	T2	T3	T4	T5
0	23,59	23,10	23,22	23,31	23,48
30	89,83	66,94	58,81	53,10	40,45
60	106,35	87,74	83,59	71,73	57,46
90	111,22	96,66	94,56	82,68	67,80
120	107,21	98,87	101,94	87,41	74,02
150	113,27	107,37	108,59	94,49	82,21
180	119,55	112,26	112,03	102,26	90,70

V preglednici 11 so prikazane povprečne vrednosti temperature na posameznem merilnem mestu v preskušancu v odvisnosti od časa segrevanja. Dielektrično segrevanje smo izvajali 180 s, temperaturo pa smo izmerili vsakih 30 s.

Preglednica 11: Porazdelitev temperature [°C] v preskušancu med dielektričnim (B) segrevanjem v odvisnosti od časa segrevanja. Elektrodi sta bili ob začetku segrevanja ogreti.

Čas [s]	Pozicija termočlena				
	T1	T2	T3	T4	T5
0	30,97	30,76	33,06	38,31	42,75
30	100,78	96,70	88,06	79,97	75,34
60	117,16	112,69	109,31	104,35	100,43
90	127,53	122,89	119,60	114,96	110,51
120	132,51	128,33	125,19	120,14	115,29
150	133,96	130,07	127,11	122,76	117,84
180	130,93	127,54	124,88	120,55	115,96

5 RAZPRAVA IN SKLEPI

Eksperimentalni del diplomske naloge je bil na začetku zastavljen nekoliko drugače. Proučiti smo namreč želeli razlike v selektivnosti VF segrevanja glede na smer EM polja, saj smo predvidevali, da bo smer EM polja bistveno vplivala na selektivnost VF segrevanja. Vendar se je izkazalo, da je z obstoječo opremo VF segrevanje preskušancev, ki so debelejši od 10 mm, zelo težavno (številni preboji). Oprema za VF lepljenje na Oddelku za lesarstvo je v predvsem namenjena za lepljenje tanjših furnirnih plošč in je kot taka neprimerna za proučevanje vpliva smeri EM polja, ker le to zahteva les večjih debelin. Lastnosti opreme so vplivale tudi na izbiro materiala. V raziskavi smo tako uporabili tanke liste rezanega furnirja namesto debelejšega masivnega lesa.

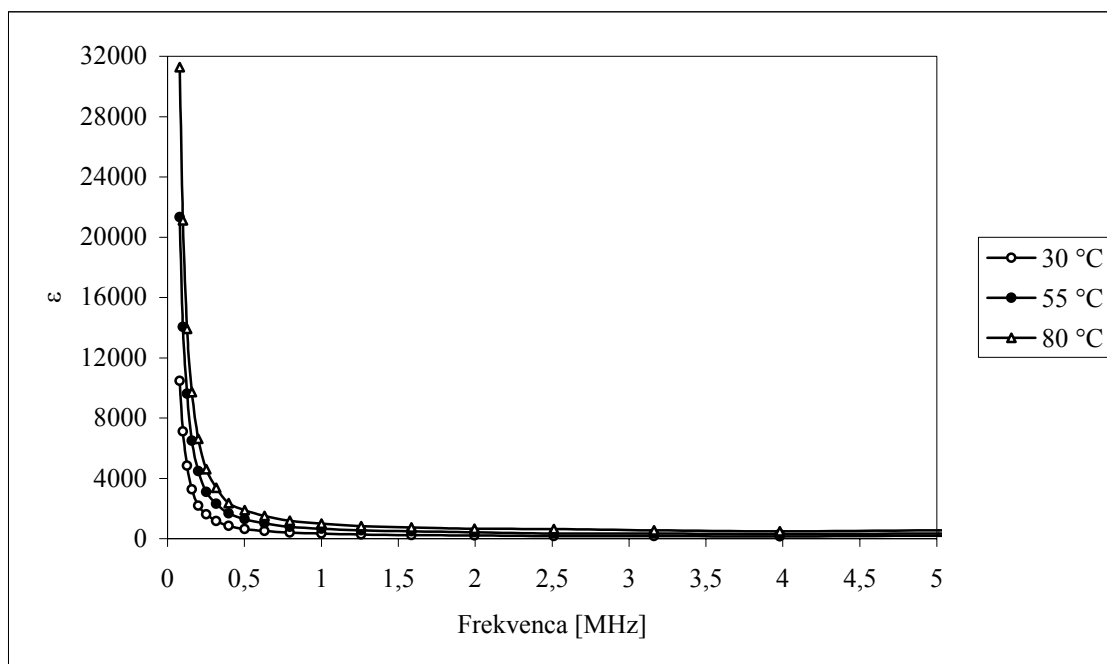
5.1 DIELEKTRIČNE LASTNOSTI LEPILA

5.1.1 Spremembe dielektričnih lastnosti lepila v odvisnosti od frekvence EM polja

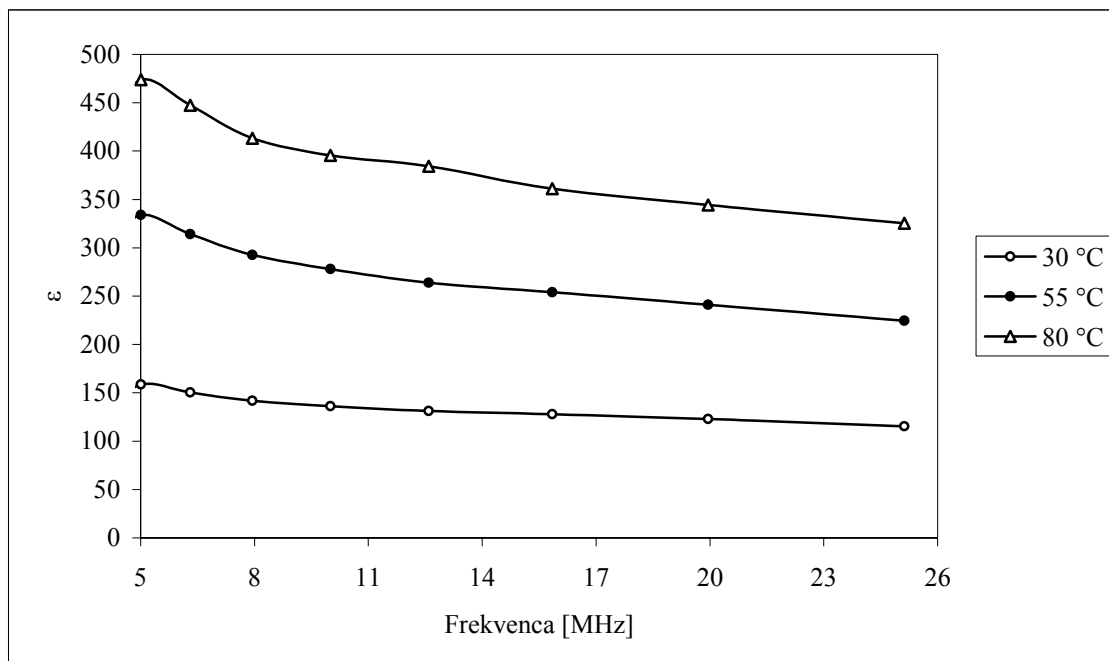
Ugotovili smo, da je vpliv frekvence na spremembo dielektričnih lastnosti lepila podoben pri vseh merjenih temperaturah.

5.1.1.1 Dielektrična vrednost PVA lepila v odvisnosti od frekvence EM polja

Sliki 25 in 26 prikazujeta spreminjanje dielektrične vrednosti tekočega lepila v odvisnosti od frekvence. Za boljše ponazoritev je spreminjanje prikazano v dveh delih; najprej od frekvence 79,4 kHz do 5 MHz, nato pa še od 5 MHz do 25,1 MHz.



Slika 25: Sprememba dielektrične vrednosti PVA lepila na frekvenčnem območju od 79,4 kHz do 5 MHz pri treh različnih temperaturah lepila.



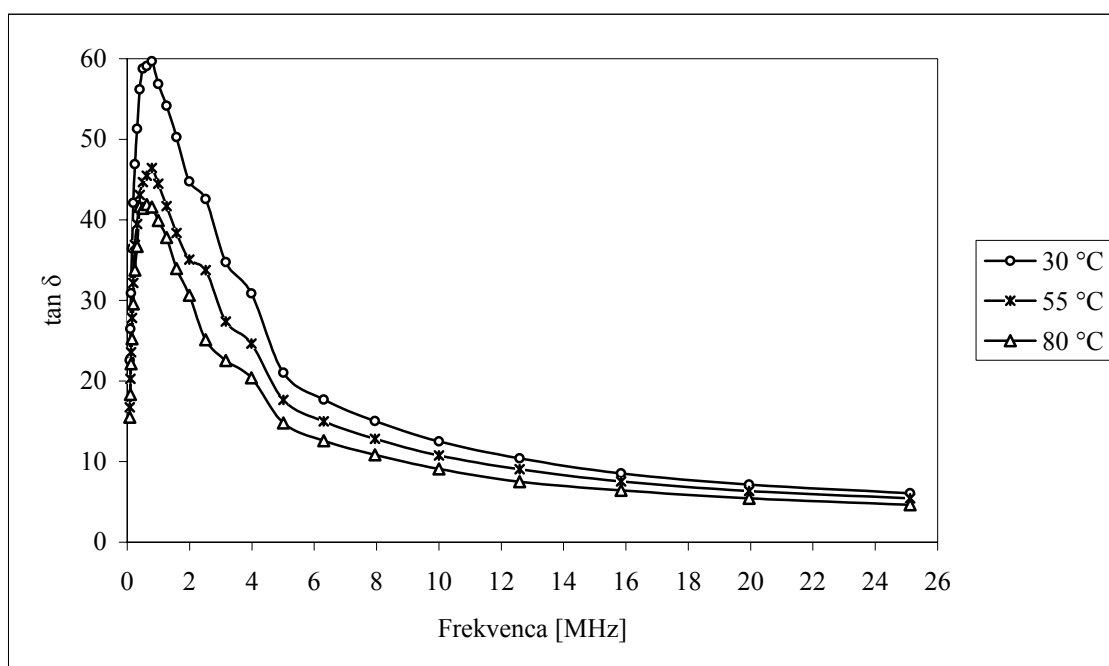
Slika 26: Sprememba dielektrične vrednosti PVA lepila na frekvenčnem območju od 5 MHz do 25 MHz pri treh različnih temperaturah lepila.

Dielektrična vrednost tekočega PVA lepila narašča z višanjem temperature lepila. Razlog za to je, da imajo molekule lepila pri višji temperaturi višjo energijo, so bolj okretne in se lažje prilagajajo spremembam EM polja.

Z naraščanjem frekvence se napetost EM polja spreminja vse hitreje, zato imajo molekule lepila vse manj časa, da se na te spremembe odzovejo. S tem lahko pojasnimo padanje dielektrične vrednosti z naraščanjem frekvence. Dielektrična vrednost tekočega lepila pada z naraščanjem frekvence na celotnem intervalu. Padanje je logaritemsko in je zelo izrazito pri nižjih frekvencah. Padanje dielektrične vrednosti je pri frekvencah nad 2 MHz veliko bolj umirjeno in skoraj linearno.

5.1.1.2 Izgubni faktor PVA lepila v odvisnosti od frekvence EM polja

Izgubni faktor PVA lepila z naraščanjem frekvence najprej zelo hitro narašča in doseže maksimum pri frekvenci 0,794 MHz. Od te točke dalje izgubni faktor pada do konca frekvenčnega območja, to je do 25,1 MHz. Padanje je bolj intenzivno pri nižjih frekvencah. Za razliko od dielektrične vrednosti padanje izgubnega faktorja v zadnjem delu frekvenčnega intervala ni linearno, ampak je vseskozi logaritemsko. Lepilo ima pri višji temperaturi manjši faktor izgub (slika 27).



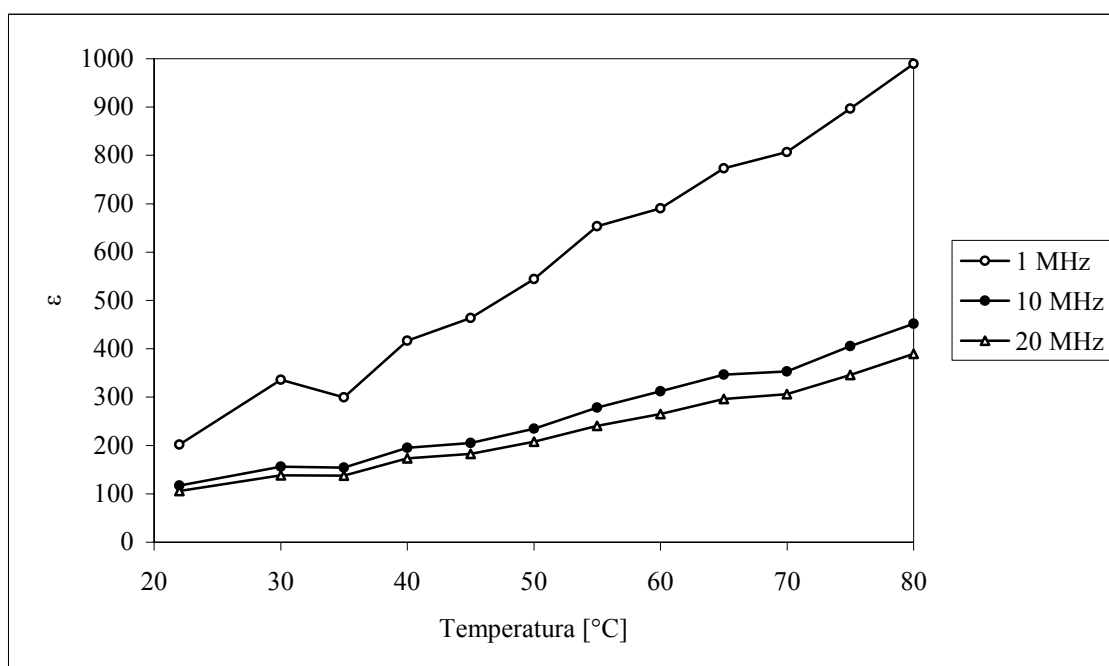
Slika 27: Sprememba izgubnega faktorja PVA lepila v odvisnosti od frekvence pri treh različnih temperaturah lepila.

5.1.2 Spremembe dielektričnih lastnosti lepila v odvisnosti od temperature

Lepilo smo segrevali v vodni kopeli. Meritve smo izvedli pri 12 različnih temperaturah. Začeli smo pri sobni temperaturi (22 °C), sledilo je segrevanje pri 30 °C, nato pa smo temperaturo segrevanja zviševali po 5 °C do končne, ki je znašala 80 °C. Pri 80 °C smo opazili, da je lepilo v merilni sondi začelo utrjevati. Z utrjevanjem se lepilu bistveno spremenijo dielektrične lastnosti, zato smo se odločili, da lepila ne segrevamo pri višji temperaturi. Obstajala je tudi možnost, da lepilo utrdi v sondi in je ne bo moč odpreti ter ponovno uporabiti. Vpliv temperature na dielektrične lastnosti PVA lepila je na slikah 28 in 29 prikazan pri treh različnih frekvencah.

5.1.2.1 Dielektrična vrednost PVA lepila v odvisnosti od temperature

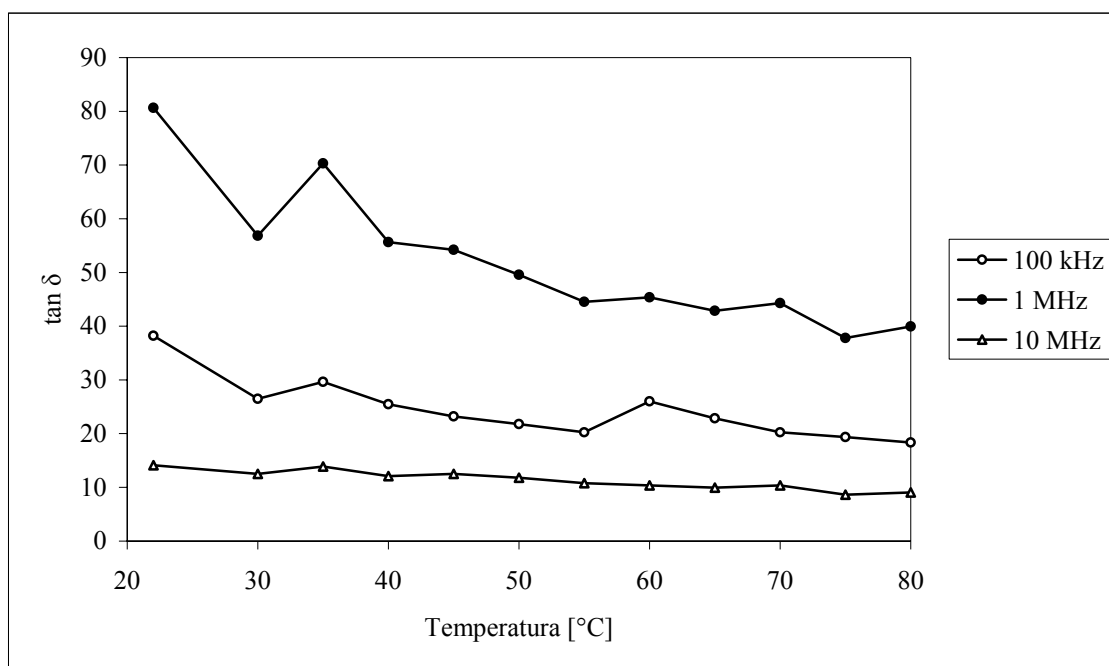
Dielektrična vrednost PVA lepila narašča s temperaturo. Pojav je toliko bolj izrazit pri nižjih frekvencah EM polja (slika 28). Pri višji temperaturi imajo molekule lepila več energije, zato se lažje prilagajajo spremembam napetosti elektromagnetnega polja. Naraščanje dielektrične vrednosti s temperaturo je značilno za celoten interval in je skoraj linearno. Višja, ko je frekvenca, manj časa imajo molekule za prilagoditev na spremembe naboja. Zato je naraščanje dielektrične vrednosti hitrejše pri nižji frekvenci.



Slika 28: Vpliv temperature na dielektrične vrednosti PVA lepila pri treh različnih frekvencah.

5.1.2.2 Izgubni faktor PVA lepila v odvisnosti od temperature

Odvisnost spreminjanja izgubnega faktorja PVA lepila v odvisnosti od temperature lepila je nasprotna zakonitosti pri dielektrični vrednosti. Izgubni faktor namreč pada z naraščanjem temperature (slika 29). Edino pri temperaturi 35 °C smo v primerjavi s prejšnjo izmerjeno vrednostjo (pri 30 °C) ugotovili porast vrednosti izgubnega faktorja. Na sliki 29 je vidna tudi različna hitrost padanja izgubnega faktorja pri različni frekvenci EM polja. Pri 1 MHz smo izmerili najvišji izgubni faktor PVA lepila Multibond EZ-1, prav tako pa je pri tej frekvenci najvišja hitrost padanja izgubnega faktorja. Pri frekvenci 10 MHz so vrednosti izgubnega faktorja skoraj konstantne; padanje je linearno, hitrost padanja pa je zelo majhna.



Slika 29: Vpliv temperature na izgubni faktor PVA lepila pri treh različnih frekvencah.

5.2 DIELEKTRIČNE LASTNOSTI FURNIRJA

Odvisnost dielektričnih lastnosti furnirja od frekvence elektromagnetnega polja smo ugotavljali pri temperaturi 22 °C.

5.2.1 Spremembe dielektričnih lastnosti furnirja v odvisnosti od frekvence EM polja

5.2.1.1 Dielektrična vrednost bukovega furnirja v odvisnosti od frekvence EM polja

Spreminjanje dielektrične vrednosti bukovega furnirja je prikazano na sliki 22. Z naraščanjem frekvence se dielektrična vrednost furnirja logaritemsko zmanjšuje. Hitrost padanja vrednosti se z naraščanjem frekvence zmanjšuje in minimum doseže pri frekvenci 15,8 MHz. Dielektrična vrednost pri zadnjih dveh frekvencah (20,0 in 25,1 MHz) v nasprotju s predvidevanji celo precej naraste v primerjavi z minimalno izmerjeno vrednostjo.

Vzrok za padanje dielektrične vrednosti je v krajšem času, ki ga imajo na voljo molekule lesa, da se prilagodijo na spremembe naboja elektromagnetnega polja. Čas za polarizacijo molekul lesa je torej z naraščanjem frekvence vse krajši. Porast dielektrične vrednosti pri frekvencah 20,0 in 25,1 MHz ne znamo pojasniti. Pojav smo zabeležili prav pri vseh od 40 furnirjev, ki smo jih uporabili pri meritvah. Morda je bilo spreminjanje naboja polja tako hitro, da mu molekule lesa niso mogle več slediti, zato izmerjene vrednosti odstopajo od pričakovanih.

Ugotovljeno odvisnost dielektrične vrednosti furnirja bukovine od frekvence EM polja potrjujejo tudi podobne raziskave na obravnavanem področju; Mravljak (2005), Jošt in sod. (2004), Makoviny (2000), Kabir in sod (2001) in Torgovnikov (1993).

Dielektrične vrednosti bukovega furnirja, ki smo jih izmerili v tej raziskavi in dielektrične vrednosti lesa, ki so jih ugotovili drugi raziskovalci, se razlikujejo (preglednica 12). V naši raziskavi smo ugotovili, da ima bukov furnir nižje dielektrične vrednosti. Razlike v vrednostih so verjetno posledica hidrotermične obdelave bukovine ter zaradi različnih pogojev med meritvami (gostota, vlažnost in temperatura preskušancev).

Preglednica 12: Primerjava dielektrične vrednosti bukovega furnirja z rezultati sorodnih raziskav.

f = 100 kHz	T [°C]	u [%]	ε
Torgovnikov (1993)	20,0	10,0	4,860
Makoviny (2000)	20,0	11,7	4,340
Kranjc (2006)	22,0	7,7	3,438
f = 6 MHz	T [°C]	u [%]	ε
Resnik in sod. (1997)	sobna	10,0	4,950
Mravljak (2005)	20,0	12,0	4,504
Kranjc (2006)	22,0	7,7	3,142
f = 20 MHz	T [°C]	u [%]	ε
Makoviny (2000)	22,0	11,7	3,890
Kranjc (2006)	22,0	7,7	3,092

5.2.1.2 Izgubni faktor bukovega furnirja v odvisnosti od frekvence EM polja

Spreminjanje faktorja izgub bukovega furnirja je prikazano na Sliki 23. V splošnem lahko rečemo, da izgubni faktor z naraščanjem frekvence narašča. Do frekvence 200 kHz faktor izgub sicer nekoliko pada, nato pa bolj ali manj linearno narašča do konca frekvenčnega območja. Naraščanje faktorja izgub lahko pripišemo večji mobilnosti molekul pri večjih frekvencah. Posledica tega je večje trenje med molekulami, zato se le-te bolj segrevajo. Večje segrevanje molekul lesa pomeni, da se večji del energije izgubi v lesu v obliki toplote.

Odvisnost izgubnega faktorja bukovega furnirja od frekvence EM polja je bolj kompleksna, kot je odvisnost dielektrične vrednosti od frekvence. Prav tako lahko ugotovimo bistvene razlike med izmerjenimi vrednostmi in ugotovljenimi odvisnostmi izgubnega faktorja od frekvence pri posameznih raziskovalcih (Torgovnikov, 1993), kar je razvidno iz preglednice 13.

Preglednica 13: Primerjava izgubnega faktorja bukovega furnirja z rezultati sorodnih raziskav.

f = 100 kHz	T [°C]	u [%]	tan δ
Torgovnikov (1993)	20,0	10,0	0,055
Makoviny (2000)	20,0	11,7	0,071
Kranjc (2006)	22,0	7,7	0,037
f = 6 MHz	T [°C]	u [%]	tan δ
Resnik in sod. (1997)	sobna	10,0	0,078
Kranjc (2006)	22,0	7,7	0,072
f = 20 MHz	T [°C]	u [%]	tan δ
Makoviny (2000)	22,0	11,7	0,070
Kranjc (2006)	22,0	7,7	0,145

Tudi pri vplivu frekvence EM polja na izgubni faktor bukovega furnirja obstajajo razlike med ugotovitvami naše raziskave in ugotovitvami drugih raziskovalcev. Mravljak (2005) ugotavlja, da izgubni faktor z naraščajočo frekvenco najprej upada, na območju med 1 in 4 MHz je konstanten, nato pa se do 10 MHz počasi povečuje. Jošt in sod. (2004) na drugi strani ugotavljajo, da je izgubni faktor na celem frekvenčnem območju (od 2 do 10 MHz) skoraj konstanten.

5.3 PRIMERJAVA DIELEKTRIČNIH LASTNOSTI LEPILA IN FURNIRJA

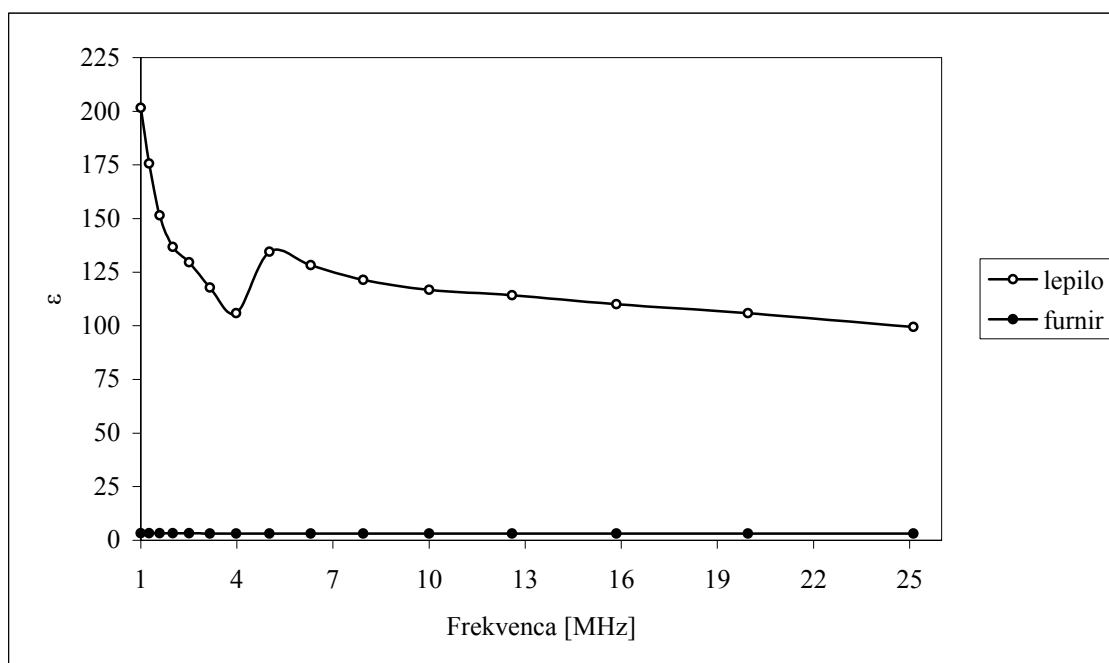
5.3.1 Primerjava dielektrične vrednosti PVA lepila in bukovega furnirja

V preglednici 14 so prikazane povprečne izmerjene dielektrične vrednosti tekočega PVA lepila in bukovega furnirja. Obe meritvi sta bili izvedeni pri sobni temperaturi, ki je v času merjenja znašala 22 °C.

Preglednica 14: Primerjava izmerjenih dielektričnih vrednosti PVA lepila in bukovega furnirja.

f [MHz]	Multibond EZ-1	Furnir
0,079	6171,936	3,454
0,100	4198,386	3,438
0,126	2792,344	3,423
0,159	1910,635	3,407
0,200	1334,758	3,393
0,251	920,026	3,378
0,316	677,315	3,363
0,398	500,900	3,348
0,501	387,923	3,334
0,631	307,406	3,319
0,794	241,846	3,303
1,000	201,558	3,287
1,259	175,651	3,271
1,585	151,563	3,254
1,995	136,662	3,237
2,512	129,590	3,220
3,162	117,762	3,202
3,981	105,819	3,183
5,012	134,460	3,162
6,310	128,231	3,142
7,943	121,416	3,123
10,000	116,780	3,104
12,589	114,222	3,090
15,849	109,966	3,084
19,953	105,891	3,092
25,119	99,485	3,126

Slika 30 prikazuje vpliv frekvence na dielektrično vrednost lepila in furnirja. Pri frekvencah, ki so nižje od 1 MHz, so razlike v dielektričnih vrednostih lepila in furnirja zelo velike, zato je zaradi boljše preglednosti slike prikazano frekvenčno območje od 1 do 25,1 MHz.



Slika 30: Primerjava dielektričnih vrednosti PVA lepila in furnirja bukovine v odvisnosti od frekvence EM polja.

Kot je razvidno iz preglednice 14 in slike 30, so razlike v dielektričnih lastnostih tekočega PVA lepila in furnirja velike, se pa z naraščanjem frekvence zmanjšujejo. Pri frekvenci 6,3 MHz, ki nas zaradi karakteristik opreme na Katedri za žagarstvo in lesna tvoriva najbolj zanima, ima lepilo kar 40-krat večjo dielektrično vrednost kot furnir.

PVA lepilo, s katerim smo izvedli meritve, je posebej prirejeno za VF lepljenje, zato so takšne razlike pričakovane in smiselne, saj tako pride do izraza selektivnost segrevanja, ki je značilna za dielektrično segrevanje. Kot smo že ugotovili, dielektrične vrednosti tako lepila kot tudi furnirja s frekvenco padajo. Iz slike 31 je razvidno, da je hitrost padanja dielektrične vrednosti veliko večja pri lepilu kot pri furnirju.

5.3.2 Primerjava izgubnega faktorja PVA lepila in furnirja bukovine

V preglednici 15 so prikazane vrednosti povprečnega faktorja izgub, ki smo ga izmerili pri PVA lepilu in bukovega furnirja. Obe meritvi sta bili izvedeni pri sobni temperaturi, ki je v času merjenja znašala 22 °C.

Preglednica 15: Primerjava izmerjenih izgubnih faktorjev PVA lepila in bukovega furnirja.

f [MHz]	Multibond EZ-1	Furnir
0,079	32,692	0,038
0,100	38,244	0,037
0,126	45,703	0,035
0,159	53,157	0,034
0,200	60,560	0,034
0,251	69,792	0,034
0,316	75,491	0,034
0,398	81,039	0,034
0,501	83,402	0,034
0,631	83,742	0,035
0,794	84,474	0,036
1,000	80,681	0,037
1,259	73,538	0,038
1,585	67,732	0,040
1,995	59,758	0,041
2,512	50,111	0,043
3,162	43,904	0,046
3,981	38,922	0,048
5,012	24,301	0,065
6,310	20,275	0,072
7,943	17,052	0,081
10,000	14,119	0,092
12,589	11,500	0,105
15,849	9,515	0,122
19,953	7,870	0,145
25,119	6,683	0,175

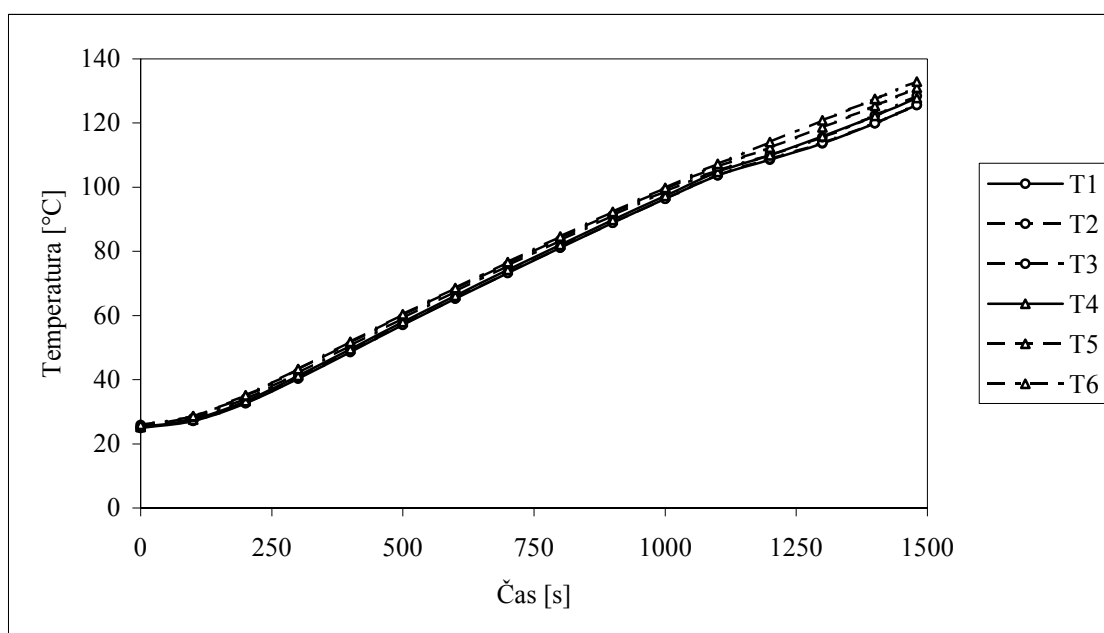
Zaključimo lahko, da ima PVA lepilo bistveno večji izgubni faktor kot bukov furnir pri vseh frekvencah. Maksimalna razlika je bila izmerjena pri 1 MHz; pri tej frekvenci je imelo lepilo kar 3250-krat večji izgubni faktor kot furnir. Razlika se z naraščanjem frekvence zmanjšuje in minimum doseže prav pri najvišji frekvenci pri kateri smo še izvajali meritve.

5.4 SEGREVANJE

5.4.1 Klasično segrevanje

5.4.1.1 Klasično segrevanje s hladnima ploščama stiskalnice

Slika 31 prikazuje vrednosti temperature na posameznih merilnih mestih, kot smo jih izmerili vsakih 100 s, le zadnji interval je znašal 80 s.

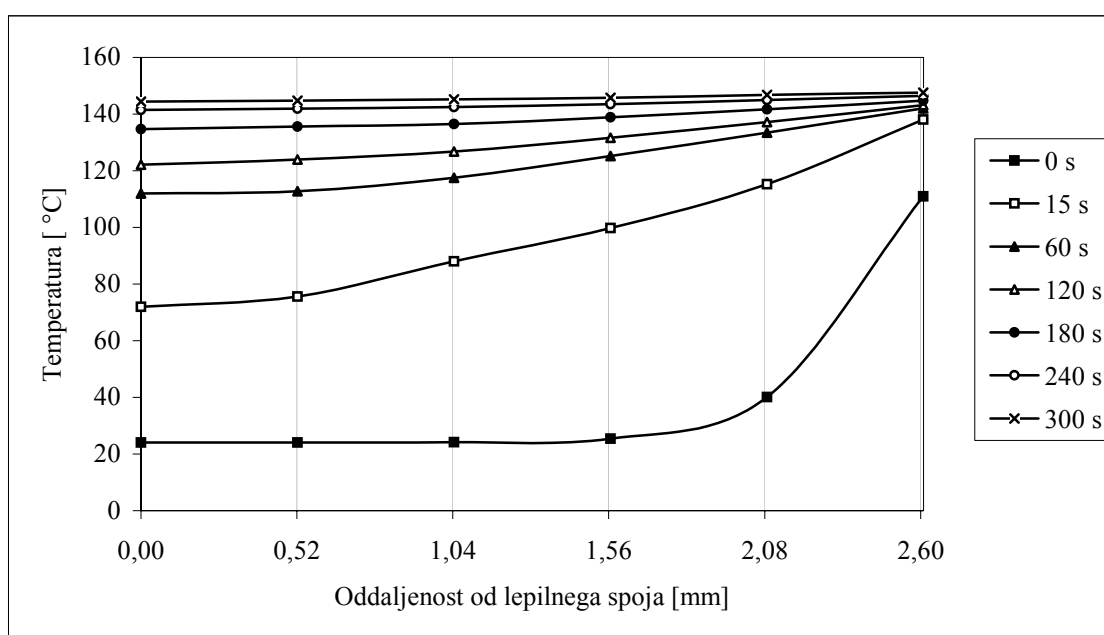


Slika 31: Porazdelitev temperature v preskušancu med klasičnim (A) segrevanjem. Plošči stiskalnice sta bili ob začetku segrevanja hladni.

Temperatura narašča na celotnem časovnem intervalu in na vseh merjenih mestih. V začetni fazi segrevanja (do 200 s) je naraščanje temperature nekoliko počasnejše in eksponentno. Nato je naraščanje temperature hitrejše in linearno, dokler v preskušancu ne dosežemo 100 °C. Do te točke je hitrost in oblika naraščanja temperature enaka za vsa merilna mesta, nad 100 °C pa temperatura hitreje narašča bliže robu preskušanca, v lepilnem spoju pa počasneje. Vzrok je voda, ki se nahaja v lepilu. Za izparevanje vode se porablja energija, zato je segrevanje lepila počasnejše.

5.4.1.2 Klasično segrevanje z ogretima ploščama stiskalnice

Slika 32 prikazuje temperaturno porazdelitev pri klasičnem segrevanju. Položaj merilnih mest je izražen z oddaljenostjo od lepilnega spoja, ki se je nahajal v sredini preskušanca. Termočlen, ki se je nahajal na oddaljenosti 2,6 mm od lepilnega spoja je bil v stiku s ploščo stiskalnice. Segrevanje smo izvajali 300 s, temperaturo pa izmerili vsako sekundo. Prikazane so temperature, ki smo jih merili v 60 sekundnem intervalu, zraven pa so dodane še vrednosti po 15 s segrevanja, saj je hitrost segrevanja v začetni fazi najvišja. Čas segrevanja smo določili po opravljenem preliminarnem poskusu. Ugotovili smo, da moramo preskušanec debeline 5,2 mm segrevati 300 s, če želimo doseči dokaj enakomerno porazdelitev temperature po prerezu preskušanca.



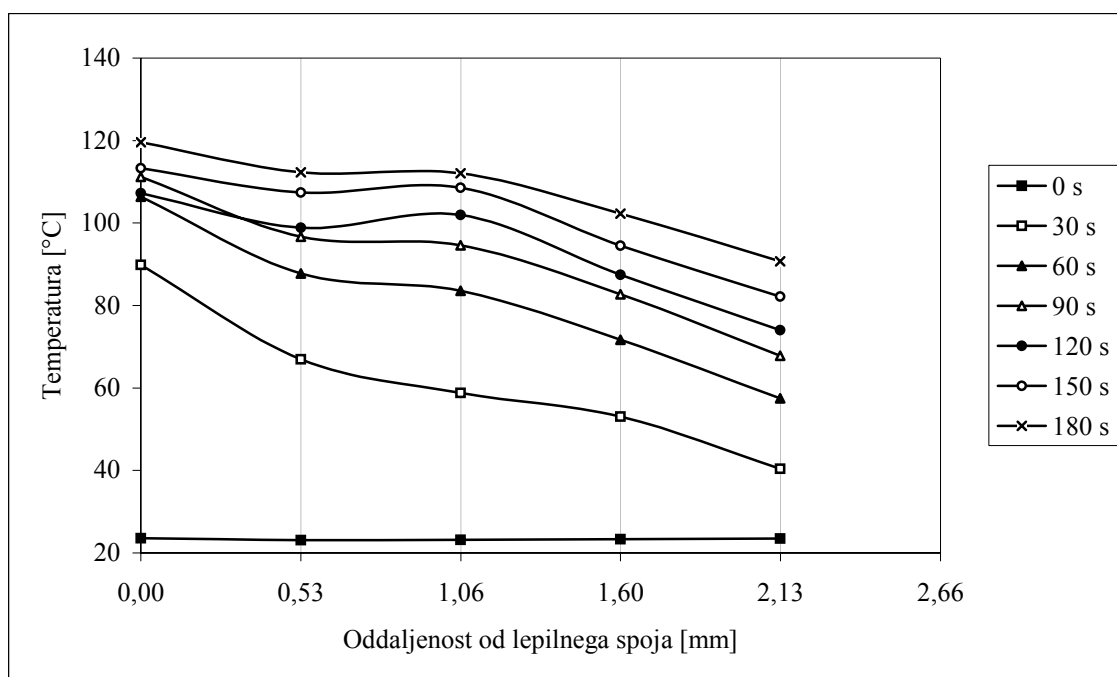
Slika 32: Porazdelitev temperature pri klasičnem (posrednem) segrevanju. Plošči stiskalnice sta bili ob začetku segrevanja ogreti.

Rezultati nazorno prikazujejo zakonitosti klasičnega (posrednega) segrevanja. Temperatura je najvišja na robu preskušanca, ki je v stiku s ploščo stiskalnice. Ker moramo najprej segreti furnir, da bi segreti lepilni spoj, temperatura od roba proti notranjosti preskušanca pada in ima najnižjo vrednost najgloblje v preskušancu oziroma v lepilnem spoju. Hitrost padanja temperature z daljšim časom segrevanja pada. Po 15 s segrevanja je razlika v temperaturi na robu preskušanca in v lepilnem spoju 66 °C, po 120 s se zmanjša na 21 °C, po 300 s pa znaša le še 3 °C.

5.4.2 Dielektrično segrevanje

5.4.2.1 Dielektrično segrevanje s hladnima elektrodama

Slika 33 prikazuje vpliv časa segrevanja na izmerjene vrednosti temperature. Položaj merilnih mest je izražen z oddaljenostjo od lepilnega spoja, ki se je nahajal v sredini preskušanca. Temperaturo smo na petih merilnih mestih izmerili vsakih 30 s.

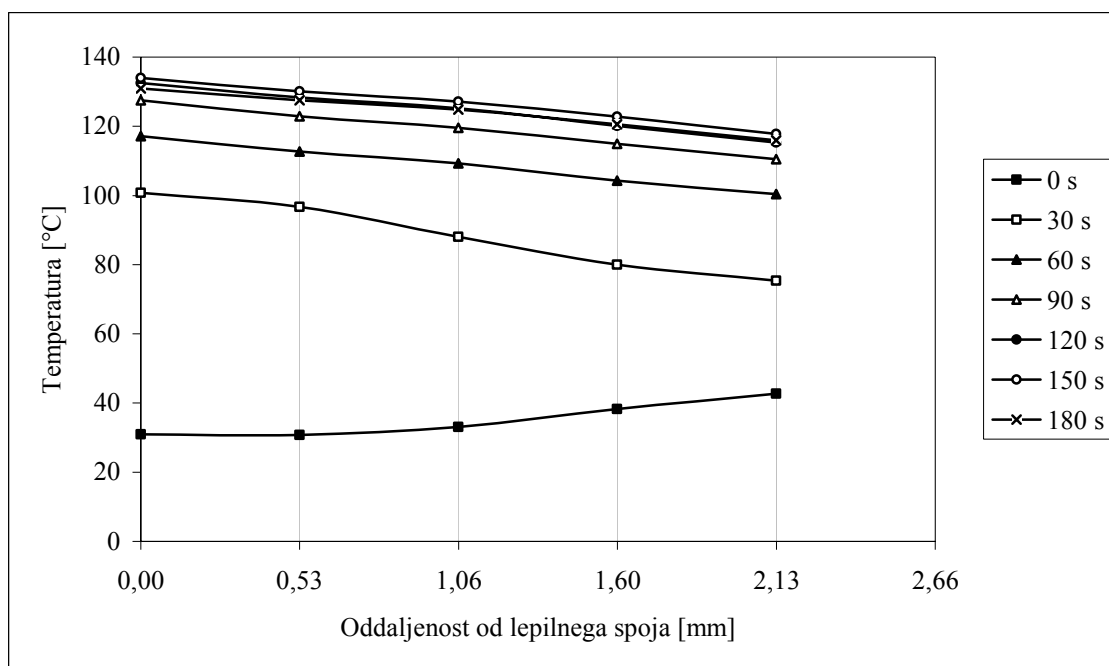


Slika 33: Porazdelitev temperature v preskušancu med dielektričnim (A) segrevanjem. Elektrodi sta bili ob začetku segrevanja hladni.

Ob začetku segrevanja je temperatura na vseh merilnih mestih enaka in znaša 22 °C, kolikor je znašala sobna temperatura v času meritve. Ugotovljena porazdelitev temperature v preskušancu je značilna za dielektrično segrevanje, saj temperatura od roba preskušanca proti notranjosti narašča in najvišjo vrednost doseže v lepilnem spoju. Z daljšim časom segrevanja temperatura v preskušancu na vseh merilnih mestih narašča.

5.4.2.2 Dielektrično segrevanje z ogretim elektrodama

Na sliki 34 je prikazana temperaturna porazdelitev pri dielektričnem segrevanju. Položaj merilnih mest je izražen z oddaljenostjo od lepilnega spoja, ki se je nahajal v sredini preskušanca. Ob začetku meritve sta bili elektrodi VF stiskalnice že nekoliko segreti s toploto, ki so jo oddajali preskušanci, zato je temperatura na robu preskušanca najvišja in proti sredini nekoliko pada.



Slika 34: Porazdelitev temperature med dielektričnim (B) segrevanjem. Elektrodi sta bili ob začetku segrevanja ogreti.

Že pri naslednji meritvi in vseh nadaljnjih je vidna selektivnost dielektričnega segrevanja. Lepilni spoj se segreva hitreje kot sloji furnirja. Razlog za to so večje vrednosti dielektričnih lastnosti lepila v primerjavi s furnirjem. Pri zadnji meritvi (po 180 s segrevanja) temperaturne razlike med posameznimi merilnimi mesti niso tako velike kot bi pričakovali. Razlika v temperaturi v lepilnem spoju in na robu preskušanca je le 15 °C. Razlog za to je debelina sloja furnirja, ki smo jo morali zelo zmanjšati, da bi jo prilagodili lastnostim VF stiskalnice. Prednosti dielektričnega segrevanja pridejo do izraza pri preskušancih večjih debelin, debelina preskušanca pa je pri naši raziskavi znašala le 5,30 mm.

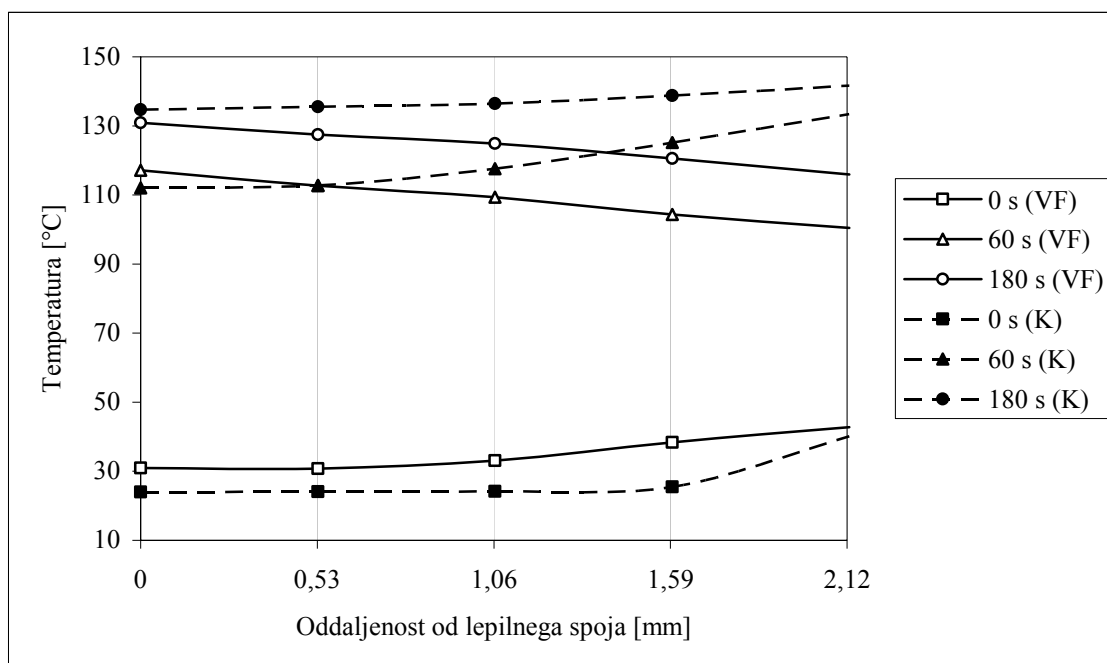
Resnik in sod. (1997) so v primeru segrevanja preskušancev z enotno vlažnostjo ugotovili, da sta imeli plošči stiskalnice ob začetku stiskanja višjo temperaturo kot preskušanec, zato se je toplota prevajala iz plošč v preskušanec. Ko se je temperatura zunanjih furnirjev preskušanca približala temperaturi plošč stiskalnice, je temperatura v preskušancu naraščala predvsem zaradi vpliva EM polja in ne toliko zaradi prevajanja toplote.

Ko je temperatura preskušanca presegla temperaturo plošč stiskalnice, so se v ploščah pojavile izgube toplote preko kondukcije. Z naraščanjem temperature v preskušancu so se toplotne izgube plošč stiskalnice povečevale.

Če primerjamo temperaturno porazdelitev, ki smo jo ugotovili v raziskavi s tisto, ki so jo ugotovili Resnik in sodelavci v preskušancu z enotno vlažnostjo 10% vidimo, da gre za podobno porazdelitev, kjer temperatura od roba preskušanca proti notranjosti narašča. Z daljšim časom segrevanja temperatura v preskušancu narašča.

5.5 PRIMERJAVA KLASIČNEGA IN DIELEKTRIČNEGA SEGREVANJA

Slika 35 prikazuje porazdelitev temperature v preskušancu, ki smo jo izmerili pri klasičnem in dielektričnem segrevanju. V obeh primerih je šlo za segrevanje tipa B, pri katerem sta bili plošči stiskalnice oziroma elektrodi ob začetku segrevanja že ogreti. Vrednosti temperature so bile izmerjene ob začetku meritve, po 60 s in po 180 s segrevanja. Vrednosti temperature, ki smo jo izmerili pri dielektričnem segrevanju, so v legendi Slike 35 označene z VF, tiste ki smo jih izmerili pri klasičnem segrevanju pa s K.



Slika 35: Primerjava temperaturne porazdelitve v preskušancu pri klasičnem in dielektričnem (B) načinu segrevanja po 0, 60 in 180 s. Plošči stiskalnice oziroma elektrodi sta bili ob začetku segrevanja ogreti.

Ob začetku segrevanja so izmerjene temperature in temperaturna porazdelitev zelo podobne pri obeh načinih segrevanja. Že pri naslednji meritvi, po 60 s segrevanja, so vidne razlike med klasičnim in dielektričnim segrevanjem.

Pri klasičnem načinu je temperatura maksimalna na robu preskušanca in proti sredini pada, medtem ko je pri dielektričnem segrevanju porazdelitev obratna; temperatura je maksimalna v sredini – v lepilnem spoju.

Po 180 s segrevanja vidimo, da je T v lepilnem spoju praktično enaka pri obeh načinih segrevanja, čeprav bi pričakovali, da bo lepilni spoj bolj segret pri dielektričnem načinu. Razlog za to je v majhni debelini preskušanca, zaradi česar je pri klasičnem segrevanju toplota lahko hitro prešla skozi furnir do lepila. Temperatura lepilnega spoja je pri klasičnem segrevanju celo višja kot pri dielektričnem, kar je posledica težavne regulacije temperature grelnih plošč stiskalnice in porazdelitve temperature po površini le-teh.

Prednost selektivnosti dielektričnega segrevanja v primeru temperature v lepilnem spoju niso izražene, se pa lepo vidijo, če primerjamo temperaturo, ki smo jo izmerili med prvim in drugim slojem furnirja (merilno mesto 5). Na tem mestu smo po 180 s klasičnega segrevanja izmerili temperaturo 141,7 °C, pri dielektričnem segrevanju pa 116,0 °C. Razlika je bistvena in ima lahko velike vplive na kvaliteto toplotne obdelave.

Z večanjem debeline preskušanca bi se razlike v temperaturi lesa med segrevanjem še povečale v korist dielektričnega segrevanja, kar je z vidika kvalitete in stroškov toplotne obdelave pozitivno. Te prednosti VF segrevanja in lepljenja v industriji s pridom izkoriščajo.

Enako kot smo ugotovili za dielektrično (B) segrevanje, lahko ugotovimo tudi za dielektrično (A) segrevanje. Tudi pri A segrevanju, pri katerem smo segrevanje začeli s hladnima ploščama ali elektrodama, smo ugotovili, da se lepilo hitreje segreva kot furnir, le da so razlike v hitrosti segrevanja tu bolj izražene, kar je razvidno in slike 33. Ker sta bili elektrodi stiskalnice ob začetku meritve hladni, je začetna temperatura na vseh merilnih mestih enaka. Po 30 s segrevanja je razlika v temperaturi v lepilnem spoju (merilno mesto 1) in na robu preskušanca (merilno mesto 5) skoraj 50 °C. Ta razlika se z daljšim časom segrevanja manjša; po 120 s znaša 33 °C, po 180 s pa 30 °C.

Razlog za hitrejše segrevanje lepila v primerjavi z furnirjem so višje dielektrične lastnosti. Rezultati so pričakovani, še posebej če upoštevamo, da je bilo PVA lepilo, ki smo ga uporabili v raziskavi, prirejeno za VF lepljenje.

5.6 SKLEPI

V raziskavi smo ugotovili naslednje:

1. Temperatura lepila in višina frekvence elektromagnetnega polja sta vplivali na dielektrične lastnosti PVA lepila Multibond EZ-1. Pri konstantni temperaturi je z naraščanjem frekvence dielektrična vrednost lepila logaritemsko padala, izgubni faktor pa je sprva hitro naraščal, nato pa tudi logaritemsko padal. Pri konstantni frekvenci je z naraščanjem temperature dielektrična vrednost lepila linearno naraščala, izgubni faktor pa je padal.
2. Višina frekvence je vplivala na dielektrične lastnosti bukovega furnirja. Pri konstantni temperaturi je z naraščanjem frekvence dielektrična vrednost bukovega furnirja logaritemsko padala, izgubni faktor pa je naraščal skoraj linearno.
3. Tekoče PVA lepilo Multibond EZ-1, ki smo ga uporabili v raziskavi, je imelo bistveno večje dielektrične lastnosti kot bukov furnir. V primeru segrevanja preskušanca v VF polju (dielektrično segrevanje), se je zato lepilo segrelo hitreje od furnirja. Razlike so bile večje v začetnih fazah segrevanja.
4. Primerjava klasičnega (posrednega) in dielektričnega (neposrednega) segrevanja je pokazala, da razlik v hitrosti segrevanja lepilnega spoja praktično ni bilo. Ko govorimo o segrevanju furnirja, so se pokazale precejšnje razlike, saj je imel furnir po dielektričnem segrevanju občutno nižjo temperaturo kot jo je imel furnir, ki smo ga segrevali na klasični način.

Raziskovanje VF segrevanja in lepljenja je zelo zahtevno in težavno. Številni pojavi pri uporabi VF še niso raziskani, zato so nadaljnje raziskave VF segrevanja lesa in lepila smiselne in potrebne. Nujen predpogoj za to je ustrezna oprema za VF segrevanje, ki bi omogočala preskušanje vzorcev večje debeline, kjer bi selektivnost VF segrevanja pri lepljenju lesa prišla do izraza.

6 POVZETEK

Raziskovali smo vpliv dielektričnih lastnosti PVA lepila in bukovega furnirja na selektivnost segrevanja v VF polju. V primeru segrevanja več materialov v VF polju, se bo material z višjimi dielektričnimi lastnostmi segrel hitreje od ostalih materialov. Zato smo želeli ugotoviti dielektrične lastnosti PVA lepila in bukovega furnirja ter proučiti vpliv dielektričnih lastnosti lepila in furnirja na intenzivnost segrevanja v VF polju. Proučiti smo želeli tudi razlike v selektivnosti VF segrevanja glede na smer EM polja.

Postavili smo hipotezo, da bo imelo PVA lepilo višje dielektrične lastnosti kot bukov furnir, da se bo zato lepilni spoj segrel hitreje kot furnir in da bodo razlike v segrevanju očitne predvsem v začetni fazi segrevanja. Domnevali smo, da bo smer EM polja (prečno in vzporedno dielektrično segrevanje) vplivala na selektivnost VF segrevanja.

Zaradi karakteristik stiskalnice za VF lepljenje, v kateri smo izvajali eksperimentalni del raziskave, smo morali prvotno raziskavo v bistvenem delu spremeniti. Ker nismo mogli ugotavljati vpliva smeri EM polja na selektivnost VF segrevanja, smo izvedli primerjavo klasičnega (posrednega) in dielektričnega (neposrednega) segrevanja.

V raziskavi smo uporabili tekoče PVA lepilo Multibond EZ-1 proizvajalca Franklin International in 0,53 mm debele liste rezanega bukovega furnirja (*Fagus sylvatica* L.). Eksperiment je potekal v dveh fazah. Najprej smo izmerili dielektrične lastnosti lepila in furnirja. Pri lepilu smo ugotavljali odvisnost dielektričnih lastnosti od temperature (12 različnih temperatur od 22 do 80 °C) in frekvence (26 različnih frekvenc od 79,4 kHz do 25,1 MHz), pri furnirju pa samo odvisnost od frekvence na enakem območju kot pri lepilu. Lepilo smo segrevali v sondi, ki je bila potopljena v vodni kopeli, dielektrične lastnosti furnirja pa smo merili pri temperaturi 22 °C.

Meritve dielektričnih lastnosti smo opravili z napravo Agilent 4285A Precision LCR Meter in pripadajočima sondama: za merjenje dielektričnih lastnosti lepila smo uporabili sondo Agilent 16452A Liquid Test Fixture, za merjenje dielektričnih lastnosti furnirja pa sondo Agilent 16451B Dielectric Test Fixture. Podatke smo računalniško zajemali s programom Agilent VEE Pro, obdelali pa smo jih v programu Microsoft Excel.

V drugem delu smo pripravili preskušance iz desetih listov furnirja in v sredino nanegli PVA lepilo. Nato smo preskušance segrevali v stiskalnici, in sicer na posreden (klasično) in neposreden (VF oziroma dielektrični) način. Med segrevanjem smo spremljali spreminjanje in porazdelitev temperature znotraj preskušanca v odvisnosti od časa segrevanja. Pri obeh načinih segrevanja smo izvedli dva tipa segrevanja. Pri segrevanju tipa A sta bili plošči oziroma elektrodi stiskalnice ob začetku meritve hladni (sobna temperatura), pri segrevanju tipa B pa sta bili že nekoliko ogreti.

Temperaturo smo merili s termočleni, ki so bili vstavljeni med posamezne liste furnirja od lepilnega spoja navzgor. Razdalja med termočleni je bila vseskozi enaka, in sicer 0,53 mm, kolikor je znašala debelina enega lista furnirja.

Pri klasičnem segrevanju smo za merjenje temperature uporabljali napravo Agilent 34970A Data Acquisition Switch Unit, pri dielektričnem pa napravo MI7111 Power Analyzer. Zajemanje podatkov je bilo računalniško.

Rezultati raziskave so bili pričakovani. Ugotovili smo, da sta dielektrična vrednost in izgubni faktor PVA lepila pri konstantni frekvenci linearno naraščala z naraščajočo temperaturo, na drugi strani pa sta pri konstantni temperaturi logaritemsko padala z naraščajočo frekvenco. Povezava med višino frekvence in dielektrično vrednostjo furnirja je bila pri konstantni temperaturi negativna, saj je ϵ'' logaritemsko padala. 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 večje dielektrične lastnosti kot furnir, kar smo tudi pričakovali, saj je bilo prirejeno posebej za VF lepljenje.

Rezultati pri klasičnem segrevanju so bili skladni s teorijo posrednega segrevanja. Izmerjena temperatura je bila najvišja ob robu preskušanca in je padala proti sredini, kjer je dosegla minimum. Razlike v temperaturi na robu preskušanca in v lepilnem spoju so se z daljšim časom segrevanja manjšale. Po 300 s segrevanja smo v lepilnem spoju praktično dosegli temperaturo plošč stiskalnice (140 °C).

V primeru segrevanja preskušanca v VF polju (dielektrično segrevanje), se je lepilo zaradi bistveno večjih dielektričnih lastnosti, segrelo hitreje od furnirja. Razlike so bile bolj opazne v začetnih fazah segrevanja.

Primerjava klasičnega (posrednega) in dielektričnega (neposrednega) segrevanja je pokazala, da razlik v hitrosti segrevanja lepilnega spoja praktično ni bilo. Ker je znašala skupna debelina preskušanca le 5,30 mm, je toplota pri klasičnem segrevanju lahko hitro prodrla do lepilnega spoja in ga segrela enako hitro kot ga je segrelo polje visoke frekvence.

Pri segrevanju furnirja so se pokazale precejšnje razlike, saj je imel furnir po dielektričnem segrevanju občutno nižjo temperaturo kot jo je imel furnir, ki smo ga segrevali na klasični način.

Razlik v selektivnosti VF segrevanja glede na smer EM polja se z opremo, ki je na razpolago, ni dalo raziskati. Področje je vsekakor zanimivo in zelo primerno za nadaljnje raziskovanje, pogoj za to pa je oprema, ki bi omogočala meritve tudi pri večjih debelinah lesa. Enako velja za raziskavo razlik med klasičnim in dielektričnim segrevanjem, saj selektivnost segrevanja v polju visoke frekvence pride do izraza šele pri večjih debelinah preskušancev.

7 VIRI

Agilent 16451B Dielectric Test Fixture. Operation and Service Manual. 2000. 3rd edition. Kobe.

Agilent 16452A Liquid Test Fixture. Operation and Service Manual. 2000. Kobe.

Jošt M., Resnik J., Šernek M. 2004. Vpliv temperature termične obdelave na dielektrične lastnosti lesa. Zbornik gozdarstva in lesarstva, 73: 123-135

Kabir M.F., Daud W.M., Khalid K.B., Sidek H.A.A. 2001. Temperature dependence of the dielectric properties of rubber wood. Wood and Fiber Science, 33, 2: 233-238

Keller F.J., Gettys W.E., Skove M.J. 1993. Physics: Classical and Modern. 2nd edition. New York, McGraw Hill.

Kladnik R. 1977. Osnove fizike II. Ljubljana, Državna založba Slovenije: 342 str.

Makoviny I. 2000. Dielectric and electromagnetic characteristic of beech wood. Drevarsky vyskum, 45, 3: 23-34

Mlakar J. 1990. Dendrologija. Drevesa in grmi Slovenije. Ljubljana, Tehniška založba Slovenije: 164 str.

Mravljak M. 2005. Vpliv temperature na dielektrične lastnosti lesa. Ljubljana, Biotehniška fakulteta, Oddelek za lesarstvo: 47 str.

Poljanšek I. 2003. Navodila za vaje iz polimerov. Ljubljana, Fakulteta za kemijo in kemijsko tehnologijo: 98 str.

Resnik J., Berčič, S., Cikač, B. 1995. Visokofrekvenčno segrevanje in lepljenje lesa. Ljubljana, Biotehniška fakulteta, Oddelek za lesarstvo: 109 str.

Resnik J., Šernek, M., Kamke, F.A. 1997. High-frequency heating of wood with moisture content gradient. Wood and Fiber Science, 29, 2: 264-271

Šernek M. 2005. Visokofrekvenčno lepljenje lesa. Predavanje za učitelje strokovno-teoretičnih predmetov na srednjih lesarskih šolah. Ljubljana, Biotehniška fakulteta, Oddelek za lesarstvo: 13 str.

Torgovnikov G.I. 1993. Dielectric properties of wood and wood based materials. Berlin, Springer – Verlag: 195 str.

Varnostni list Multibond EZ-1. 2003: 4 str.

Wagenführ R., Scheiber C. 1985. Holzatlas. Leipzig, Veb fachbuchverlag: 720 str.

Zhou B., Avramidis S. 1999. On the loss factor of wood during radio frequency heating.
Wood Science and Technology, 33, 4: 299-310

ZAHVALA

Za strokovno vodenje se zahvaljujem mentorju, doc. dr. Milanu Šerneku in recenzentu, prof. dr. Jožetu Resniku. Za vso pomoč in potrpežljivost pri izvedbi eksperimentalnega dela se zahvaljujem mlademu raziskovalcu Mateju Joštu, univ. dipl. inž. les. Zahvaljujem se tudi vsem ostalim zaposlenim na Oddelku za lesarstvo, ki so kakorkoli pripomogli k pričujočemu delu. Za donacijo PVA lepila se zahvaljujem podjetju Novoles, Straža, za furnir bukovine pa podjetju Javor, Prestranek.

PRILOGE

Priloga A: Povprečne vrednosti dielektričnih lastnosti bukovega furnirja v odvisnosti od frekvence.

f [MHz]	Dielektrična vrednost				Izgubni faktor			
	Povprečje	Min	Max	St. odklon	Povprečje	Min	Max	St. odklon
0,079	3,454	3,316	3,574	0,073	0,0378	0,0315	0,0449	0,0033
0,100	3,438	3,302	3,555	0,072	0,0365	0,0307	0,0430	0,0030
0,126	3,423	3,288	3,538	0,071	0,0351	0,0297	0,0410	0,0027
0,159	3,407	3,275	3,522	0,070	0,0344	0,0293	0,0397	0,0025
0,200	3,393	3,261	3,506	0,069	0,0340	0,0292	0,0390	0,0023
0,251	3,378	3,247	3,491	0,069	0,0338	0,0293	0,0383	0,0021
0,316	3,363	3,234	3,476	0,068	0,0340	0,0298	0,0381	0,0020
0,398	3,348	3,219	3,460	0,067	0,0341	0,0302	0,0379	0,0018
0,501	3,334	3,206	3,445	0,067	0,0345	0,0307	0,0379	0,0017
0,631	3,319	3,192	3,429	0,066	0,0351	0,0315	0,0383	0,0016
0,794	3,303	3,177	3,413	0,066	0,0359	0,0325	0,0389	0,0015
1,000	3,287	3,162	3,396	0,065	0,0370	0,0337	0,0399	0,0014
1,259	3,271	3,147	3,379	0,065	0,0381	0,0350	0,0410	0,0013
1,585	3,254	3,130	3,362	0,064	0,0396	0,0366	0,0425	0,0013
1,995	3,237	3,114	3,343	0,063	0,0414	0,0385	0,0442	0,0013
2,512	3,220	3,097	3,325	0,063	0,0434	0,0405	0,0460	0,0012
3,162	3,202	3,079	3,306	0,062	0,0459	0,0431	0,0485	0,0012
3,981	3,183	3,061	3,286	0,062	0,0485	0,0456	0,0511	0,0012
5,012	3,162	3,040	3,264	0,061	0,0649	0,0621	0,0676	0,0013
6,310	3,142	3,021	3,245	0,061	0,0722	0,0694	0,0749	0,0013
7,943	3,123	3,002	3,225	0,060	0,0810	0,0782	0,0839	0,0013
10,000	3,104	2,984	3,206	0,059	0,0921	0,0892	0,0953	0,0013
12,589	3,090	2,969	3,193	0,059	0,1055	0,1031	0,1088	0,0014
15,849	3,084	2,963	3,186	0,059	0,1222	0,1189	0,1279	0,0019
19,953	3,092	2,969	3,191	0,059	0,1450	0,1395	0,1542	0,0032
25,119	3,126	3,000	3,231	0,061	0,1749	0,1642	0,1905	0,0063

Priloga B: Povprečne dielektrične vrednosti PVA lepila Multibond EZ-1 v odvisnosti od frekvence.

f [MHz]	22 °C				30 °C				35 °C			
	Povprečje	Min	Max	St. odklon	Povprečje	Min	Max	St. odklon	Povprečje	Min	Max	St. odklon
0,079	6171,9	5988,0	6430,8	198,2	10461,4	9644,0	11419,3	704,3	10710,8	9650,5	11490,0	679,0
0,100	4198,4	4023,5	4336,4	128,9	7099,6	6521,8	7587,4	405,6	7094,3	6382,6	7535,6	422,6
0,126	2792,3	2716,9	2870,4	52,4	4836,5	4492,3	5103,4	227,0	4743,7	4383,6	5057,8	258,6
0,159	1910,6	1832,0	1980,5	54,7	3271,2	3015,5	3532,3	210,9	3235,3	3009,2	3493,4	181,2
0,200	1334,8	1243,0	1389,0	55,4	2178,1	2169,0	2188,5	9,8	2111,3	1893,8	2239,5	132,9
0,251	920,0	887,5	956,9	24,9	1607,0	1492,7	1723,7	79,6	1495,9	1308,3	1641,1	126,1
0,316	677,3	628,4	719,1	35,1	1169,7	1093,9	1267,2	65,9	1085,2	905,6	1156,1	90,1
0,398	500,9	474,9	522,8	17,5	849,3	803,9	882,8	35,9	773,5	683,0	848,3	61,2
0,501	387,9	371,5	413,8	15,3	645,3	618,4	655,2	13,7	575,9	495,1	625,8	53,2
0,631	307,4	292,1	321,5	11,8	510,3	496,9	522,9	9,5	449,5	392,8	485,8	37,5
0,794	241,8	228,4	253,6	11,2	402,0	392,1	411,1	8,1	346,6	301,9	394,3	29,5
1,000	201,6	186,9	223,5	12,6	336,0	320,1	347,3	11,6	299,7	255,4	326,5	27,1
1,259	175,7	166,4	186,5	8,2	280,3	271,0	293,6	8,2	248,6	208,3	273,9	23,8
1,585	151,6	143,4	157,6	5,9	240,3	234,4	245,1	4,4	211,0	180,5	235,8	20,1
1,995	136,7	129,3	143,4	6,7	214,9	206,5	222,0	5,5	187,5	163,7	201,6	15,4
2,512	129,6	123,3	136,0	5,7	179,7	177,1	183,7	2,7	181,6	159,7	197,6	15,0
3,162	117,8	111,4	125,5	6,4	175,1	171,5	179,6	3,1	163,0	140,4	174,9	13,6
3,981	105,8	99,1	112,5	6,7	157,0	154,8	157,9	1,2	145,4	129,7	158,4	11,2
5,012	134,5	128,1	140,2	5,5	183,2	178,9	186,4	3,1	179,9	164,2	190,7	9,8
6,310	128,2	122,6	133,4	5,0	173,5	169,9	176,1	2,4	171,0	157,8	179,9	8,8
7,943	121,4	115,8	125,9	4,7	162,6	160,9	164,3	1,2	161,5	148,1	171,0	8,2
10,000	116,8	111,6	121,2	4,5	156,0	153,6	157,7	1,4	153,8	144,0	161,2	6,6
12,589	114,2	110,3	118,2	3,9	149,5	147,9	151,0	1,1	150,6	142,1	157,8	6,0
15,849	110,0	106,5	113,5	3,8	145,1	144,3	146,0	0,7	143,5	135,7	150,6	5,6
19,953	105,9	102,5	109,2	3,4	138,4	137,8	138,7	0,3	137,5	130,9	143,1	4,4
25,119	99,5	96,4	102,8	3,2	129,5	128,7	130,5	0,7	128,7	123,1	133,5	3,8

f [MHz]	40 °C				45 °C				50 °C			
	Povprečje	Min	Max	St. odklon	Povprečje	Min	Max	St. odklon	Povprečje	Min	Max	St. odklon
0,079	13174,7	11836,0	14295,5	794,6	15920,8	14703,0	17228,7	813,9	18305,5	17564,8	19539,2	620,1
0,100	8826,4	7907,0	9499,3	543,9	10572,0	9695,4	11017,3	443,9	12085,9	11817,7	12467,9	222,1
0,126	5889,4	5450,8	6234,3	262,1	7108,1	6597,6	7568,2	331,2	8206,0	7883,8	8543,9	249,3
0,159	4042,6	3591,8	4290,1	243,7	4809,9	4309,1	5187,7	266,3	5546,8	5306,8	5738,4	127,9
0,200	2950,6	2826,9	3066,5	93,4	3235,3	2967,1	3400,7	160,4	3771,0	3640,8	3918,6	113,9
0,251	1940,6	1698,1	2089,1	135,3	2298,0	1973,7	2479,1	168,4	2641,9	2545,1	2865,2	97,9
0,316	1433,2	1211,1	1593,9	133,3	1668,8	1506,5	1771,5	102,8	1943,1	1831,3	2081,3	74,9
0,398	1044,6	908,4	1196,2	91,5	1178,7	1002,6	1289,3	91,4	1396,7	1357,0	1499,0	44,2
0,501	791,2	658,5	908,9	86,1	914,2	786,9	994,4	72,1	1064,1	985,0	1136,8	51,7
0,631	632,4	554,8	701,7	59,6	699,5	613,4	758,4	59,7	834,5	790,8	884,0	33,5
0,794	491,4	414,8	570,3	61,0	541,0	450,6	605,9	56,7	642,2	604,8	714,2	33,9
1,000	416,9	331,6	490,0	54,8	463,3	411,5	519,6	39,7	544,2	514,6	584,7	26,6
1,259	348,7	285,2	390,8	44,0	377,1	306,5	425,2	44,8	448,8	419,8	486,5	22,9
1,585	303,8	252,8	346,2	36,1	321,1	277,0	354,4	31,3	389,4	363,6	419,6	20,1
1,995	263,8	210,9	302,5	33,1	284,4	230,1	323,1	36,5	338,4	314,4	363,1	18,2
2,512	218,4	180,0	246,2	26,7	233,5	196,0	258,1	25,1	277,4	258,4	297,2	16,4
3,162	218,4	179,5	253,3	28,1	231,7	195,8	255,3	25,6	276,0	256,7	292,5	13,3
3,981	196,4	164,0	223,7	24,0	204,1	172,4	227,6	22,9	244,1	225,7	266,2	14,6
5,012	225,7	195,2	249,5	21,8	241,1	214,7	258,2	19,0	279,2	266,9	295,3	10,5
6,310	216,0	187,5	236,7	19,9	228,3	201,0	245,9	18,9	263,6	248,9	278,3	10,9
7,943	202,4	175,6	224,8	19,1	213,9	185,3	232,3	18,9	247,4	235,8	262,9	9,7
10,000	194,8	170,7	214,6	17,6	204,8	181,2	222,5	16,5	235,0	224,4	245,3	7,9
12,589	186,7	164,3	202,7	16,1	196,8	177,1	208,9	14,1	225,2	215,8	234,7	7,3
15,849	181,4	161,7	198,3	14,8	191,2	170,6	203,1	14,8	217,2	209,2	224,3	5,8
19,953	173,5	155,3	188,3	13,2	182,7	164,8	193,3	13,0	207,7	200,6	216,7	5,9
25,119	162,6	146,5	175,3	11,6	171,5	154,0	181,6	11,9	194,8	187,7	202,8	5,2

f [MHz]	55 °C				60 °C				65 °C			
	Povprečje	Min	Max	St. odklon	Povprečje	Min	Max	St. odklon	Povprečje	Min	Max	St. odklon
0,079	21327,5	20419,9	22078,8	531,0	16981,0	16269,9	17892,4	640,6	20619,1	19770,4	21182,9	439,0
0,100	14040,5	13531,3	14582,5	376,5	11780,4	11171,3	12496,0	438,1	14164,8	13581,2	14556,6	318,6
0,126	9614,9	9026,7	9926,2	291,8	7993,1	7701,6	8430,0	242,2	9453,8	9181,2	9721,8	172,8
0,159	6487,6	6233,3	6725,5	161,8	5596,8	5316,6	5791,4	171,9	6598,4	6238,1	6856,0	197,1
0,200	4529,5	4428,9	4616,8	78,1	3909,8	3772,4	4093,5	114,8	4721,7	4491,3	4854,6	140,1
0,251	3097,6	2987,3	3259,1	90,4	2821,1	2721,4	2957,4	81,7	3310,9	3123,3	3464,9	105,8
0,316	2306,3	2210,0	2399,6	51,0	2118,9	2005,2	2191,1	60,3	2418,6	2312,8	2524,7	70,1
0,398	1680,4	1617,3	1742,7	35,4	1624,3	1541,2	1693,1	48,0	1795,6	1641,0	1922,4	92,1
0,501	1290,8	1254,8	1340,6	26,8	1266,0	1222,9	1327,3	36,8	1421,4	1327,0	1524,5	64,6
0,631	1008,4	989,0	1064,5	23,6	1016,4	966,5	1062,9	36,1	1131,0	1037,8	1176,3	46,3
0,794	786,3	754,3	815,8	18,7	831,0	786,5	868,5	21,5	921,1	836,5	989,4	44,9
1,000	653,8	613,6	688,6	24,0	690,7	617,5	725,8	34,2	773,1	720,7	804,5	32,1
1,259	554,3	535,5	576,6	12,5	585,3	538,3	621,3	29,9	645,1	614,8	684,5	25,0
1,585	479,7	467,6	495,9	10,1	507,6	485,3	530,0	16,6	553,7	515,2	591,5	28,3
1,995	417,8	406,7	427,5	6,3	456,5	431,0	478,1	16,3	503,7	468,1	544,1	25,1
2,512	345,8	336,1	351,6	5,5	435,1	422,7	459,8	12,6	482,7	450,9	514,4	19,8
3,162	339,6	330,9	345,0	3,9	383,1	362,1	400,1	13,1	425,4	404,3	450,0	16,1
3,981	300,8	289,9	307,6	5,0	338,2	323,9	357,3	12,4	377,7	359,7	394,7	12,4
5,012	334,2	328,6	339,2	3,6	380,8	366,5	395,7	11,1	420,9	401,8	435,1	12,7
6,310	314,0	308,2	321,3	4,1	355,4	341,6	368,4	9,8	397,1	380,6	408,3	10,9
7,943	292,7	288,9	297,6	2,6	329,5	319,4	338,5	7,0	366,1	348,5	378,4	9,6
10,000	278,2	274,2	282,7	2,5	312,3	307,0	317,8	4,2	346,4	334,5	352,6	7,8
12,589	263,8	260,7	266,3	2,1	297,6	293,1	304,2	4,1	334,6	324,0	341,1	6,0
15,849	253,8	250,6	255,6	1,5	280,1	275,8	283,7	2,8	314,5	306,4	321,5	5,6
19,953	241,0	239,2	244,0	1,3	265,2	261,4	268,5	2,6	296,1	286,8	302,3	6,2
25,119	224,6	223,6	226,6	0,9	248,1	245,2	251,1	2,0	277,3	266,9	283,1	6,5

f [MHz]	70 °C				75 °C				80 °C			
	Povprečje	Min	Max	St. odklon	Povprečje	Min	Max	St. odklon	Povprečje	Min	Max	St. odklon
0,079	25320,0	22806,5	28641,1	2484,3	28095,6	27545,7	28560,8	319,4	31280,9	30333,7	32281,4	697,9
0,100	17099,3	15139,7	19995,6	1701,7	18889,8	18301,1	19418,9	401,5	21105,5	20179,3	21923,2	700,3
0,126	11451,0	10180,0	13056,5	1105,8	12694,8	11897,5	13110,2	350,4	13923,9	13635,8	14209,9	201,8
0,159	7900,6	6748,2	9078,4	747,2	8666,2	8547,5	8941,7	124,7	9708,6	9429,2	10048,2	225,4
0,200	5060,8	4451,3	5551,0	450,2	5938,1	5749,4	6089,0	126,8	6610,8	6444,4	6904,2	170,5
0,251	3784,5	3138,8	4373,3	447,5	4188,5	4027,9	4391,0	135,7	4601,6	4435,8	4805,2	128,6
0,316	2756,8	2376,0	3074,2	251,2	3056,7	2767,8	3177,6	136,7	3368,3	3241,8	3473,9	77,6
0,398	2022,1	1667,8	2268,9	253,4	2186,3	2059,1	2265,3	68,1	2361,1	2200,7	2468,8	94,2
0,501	1551,2	1312,6	1725,0	175,4	1720,3	1615,7	1819,3	60,5	1898,7	1812,1	1987,9	72,1
0,631	1220,9	993,3	1357,2	157,4	1351,4	1284,7	1443,7	53,2	1497,7	1431,6	1558,1	42,4
0,794	992,7	808,1	1130,0	134,2	1081,2	992,3	1144,8	58,2	1192,3	1171,1	1208,6	13,5
1,000	806,8	630,4	927,3	115,6	897,0	808,7	945,8	51,4	989,4	936,2	1049,6	47,3
1,259	669,3	522,2	754,5	105,8	740,9	677,7	816,2	47,6	831,3	806,2	883,7	29,8
1,585	567,8	442,1	660,3	87,6	652,9	602,9	704,1	35,4	738,3	684,1	788,8	45,9
1,995	513,0	399,8	587,5	76,3	578,7	529,7	628,8	41,6	650,0	623,5	672,9	21,7
2,512	470,9	400,7	568,9	70,2	563,2	506,1	611,5	38,7	631,8	602,7	679,8	29,5
3,162	428,0	356,4	498,1	58,5	492,3	438,9	530,1	33,5	561,8	528,4	598,8	30,7
3,981	379,2	306,9	440,7	52,8	444,3	403,0	485,4	31,8	494,3	472,9	524,5	21,7
5,012	425,5	370,8	488,4	49,3	488,2	444,5	523,1	30,5	542,8	526,4	555,6	12,2
6,310	401,7	348,9	457,8	45,5	459,3	421,0	486,0	26,7	510,0	489,0	531,2	15,4
7,943	373,0	325,0	422,2	40,4	424,3	384,5	456,9	26,9	472,4	455,4	486,8	11,3
10,000	353,4	307,8	403,9	40,0	405,2	367,9	432,2	25,4	451,9	440,1	462,8	10,1
12,589	339,7	300,7	384,1	35,6	389,5	358,3	414,3	22,0	437,5	423,3	450,7	13,4
15,849	322,2	281,5	362,5	33,9	365,1	336,1	386,7	20,9	410,2	394,2	424,0	14,2
19,953	306,3	268,0	343,2	32,1	345,9	317,7	366,9	19,7	389,6	371,4	406,3	16,0
25,119	288,5	252,7	324,4	29,8	323,5	296,4	343,7	19,3	367,3	350,5	382,8	16,1

Priloga C: Povprečni izgubni faktorji PVA lepila Multibond EZ-1 v odvisnosti od frekvence.

f [MHz]	22 °C				30 °C				35 °C			
	Povprečje	Min	Max	St. odklon	Povprečje	Min	Max	St. odklon	Povprečje	Min	Max	St. odklon
0,079	32,692	31,329	33,605	1,020	22,586	20,527	24,297	1,517	24,291	22,538	26,742	1,574
0,100	38,244	37,077	39,784	1,164	26,483	24,627	28,622	1,530	29,173	27,311	32,165	1,765
0,126	45,703	44,550	46,951	0,843	30,914	29,139	33,088	1,463	34,709	32,623	37,262	1,879
0,159	53,157	51,356	55,463	1,514	36,452	33,515	39,268	2,364	40,494	37,385	43,390	2,293
0,200	60,560	58,266	64,953	2,581	42,095	39,748	43,519	1,588	49,401	46,512	54,551	3,150
0,251	69,792	67,014	72,368	1,912	46,924	43,500	50,249	2,343	55,623	50,660	62,851	4,878
0,316	75,491	70,942	81,224	3,983	51,322	47,115	54,543	2,844	60,980	56,824	72,186	5,490
0,398	81,039	77,571	85,414	2,927	56,179	53,887	59,406	2,418	67,938	61,909	76,877	5,573
0,501	83,402	77,968	87,187	3,335	58,758	57,688	61,093	1,212	72,940	66,301	83,707	7,174
0,631	83,742	79,782	88,085	3,327	59,088	57,668	60,725	1,143	74,313	68,311	84,275	6,501
0,794	84,474	80,286	89,290	4,028	59,668	58,195	61,129	1,232	76,392	67,127	87,124	6,451
1,000	80,681	72,562	86,793	4,913	56,851	54,936	59,434	1,936	70,303	64,007	81,419	6,684
1,259	73,538	69,044	77,491	3,499	54,174	51,741	56,002	1,529	67,513	60,909	79,371	6,887
1,585	67,732	64,891	71,542	2,772	50,288	49,347	51,627	0,899	63,262	56,423	73,631	6,294
1,995	59,758	56,761	63,072	2,992	44,745	43,358	46,595	1,153	56,483	52,049	63,872	4,831
2,512	50,111	47,696	52,592	2,240	42,563	41,685	43,180	0,656	46,365	42,473	52,137	3,936
3,162	43,904	41,133	46,325	2,405	34,773	33,954	35,482	0,586	41,118	38,208	47,091	3,562
3,981	38,922	36,519	41,449	2,487	30,887	30,696	31,243	0,197	36,680	33,587	40,608	2,843
5,012	24,301	23,293	25,534	1,024	21,042	20,688	21,491	0,321	23,492	22,158	25,491	1,264
6,310	20,275	19,466	21,217	0,794	17,702	17,406	18,030	0,235	19,661	18,747	21,229	0,990
7,943	17,052	16,392	17,828	0,659	15,040	14,912	15,182	0,089	16,594	15,743	17,903	0,812
10,000	14,119	13,597	14,731	0,541	12,484	12,389	12,642	0,088	13,880	13,310	14,686	0,564
12,589	11,500	11,112	11,876	0,390	10,385	10,314	10,462	0,052	11,304	10,865	11,868	0,414
15,849	9,515	9,213	9,834	0,321	8,536	8,515	8,562	0,016	9,469	9,083	9,906	0,334
19,953	7,870	7,630	8,104	0,244	7,130	7,099	7,168	0,027	7,887	7,637	8,190	0,214
25,119	6,683	6,479	6,869	0,202	6,084	6,031	6,125	0,036	6,732	6,546	6,966	0,168

f [MHz]	40 °C				45 °C				50 °C			
	Povprečje	Min	Max	St. odklon	Povprečje	Min	Max	St. odklon	Povprečje	Min	Max	St. odklon
0,079	21,390	19,917	23,341	1,132	19,355	17,909	20,698	0,901	18,071	17,166	18,770	0,462
0,100	25,455	23,720	27,818	1,399	23,213	22,366	24,991	0,891	21,791	21,314	22,380	0,308
0,126	30,336	28,977	32,140	1,062	27,490	25,942	29,247	1,151	25,597	24,931	26,415	0,590
0,159	35,240	33,403	38,854	1,882	32,370	30,147	35,823	1,705	30,158	29,597	31,100	0,510
0,200	40,171	37,355	43,830	2,575	37,491	35,845	41,285	1,772	35,260	34,428	36,076	0,582
0,251	46,577	43,648	52,147	3,023	43,023	39,743	49,329	3,140	40,169	37,627	41,504	1,131
0,316	50,352	45,517	58,105	4,416	47,072	44,290	51,905	2,810	43,450	41,183	45,426	1,320
0,398	54,968	47,417	61,684	4,555	53,114	48,371	61,468	4,112	48,153	45,514	49,333	1,193
0,501	57,942	50,554	67,715	6,118	54,500	50,191	62,268	4,241	50,309	47,805	53,854	2,027
0,631	57,492	52,075	64,531	5,204	56,710	52,327	63,550	4,821	51,012	48,589	53,085	1,660
0,794	59,219	50,683	68,651	7,059	58,563	52,090	68,817	6,288	52,827	48,217	55,402	2,223
1,000	55,680	47,255	67,749	7,381	54,210	48,390	60,038	4,500	49,576	46,568	51,694	1,961
1,259	52,916	46,825	62,663	6,743	53,351	46,929	64,076	6,485	47,864	44,555	50,304	2,062
1,585	48,223	42,118	56,237	5,626	49,629	44,864	56,943	4,861	43,909	41,385	46,271	1,807
1,995	44,302	38,588	53,648	5,579	44,883	39,205	54,003	5,935	40,229	37,861	42,785	1,754
2,512	42,547	37,504	50,011	5,121	43,302	38,882	50,748	4,677	39,090	36,854	41,438	1,931
3,162	33,912	29,180	40,277	4,303	34,761	31,311	40,439	3,910	31,248	29,771	33,029	1,180
3,981	30,016	26,356	35,087	3,621	31,446	28,005	36,575	3,573	28,205	26,253	30,120	1,376
5,012	20,654	18,769	23,268	1,882	21,023	19,662	23,221	1,597	19,560	18,831	20,164	0,518
6,310	17,181	15,787	19,266	1,486	17,705	16,414	19,714	1,410	16,527	15,919	17,205	0,500
7,943	14,611	13,262	16,511	1,286	15,074	13,919	17,052	1,302	14,032	13,440	14,524	0,379
10,000	12,093	11,072	13,426	0,995	12,527	11,582	13,892	0,960	11,768	11,423	12,119	0,256
12,589	10,056	9,334	11,104	0,779	10,374	9,845	11,371	0,689	9,798	9,530	10,069	0,201
15,849	8,258	7,644	9,030	0,582	8,535	8,083	9,390	0,614	8,113	7,976	8,275	0,117
19,953	6,886	6,431	7,472	0,436	7,124	6,776	7,739	0,452	6,779	6,625	6,928	0,105
25,119	5,879	5,536	6,312	0,335	6,074	5,790	6,605	0,371	5,791	5,675	5,901	0,079

f [MHz]	55 °C				60 °C				65 °C			
	Povprečje	Min	Max	St. odklon	Povprečje	Min	Max	St. odklon	Povprečje	Min	Max	St. odklon
0,079	16,732	16,079	17,528	0,452	22,631	21,519	23,522	0,772	19,722	19,264	20,392	0,360
0,100	20,268	19,436	21,096	0,567	26,007	24,670	27,310	0,899	22,878	22,297	23,684	0,466
0,126	23,571	22,742	24,943	0,727	30,506	29,123	31,708	0,815	27,305	26,620	27,878	0,445
0,159	27,818	26,745	28,782	0,727	34,684	33,523	36,613	1,074	31,165	30,023	32,715	0,858
0,200	32,190	31,080	33,913	0,957	39,407	37,987	41,127	1,183	34,727	33,612	36,327	0,879
0,251	36,921	34,933	38,327	1,099	43,587	41,825	45,160	1,225	39,321	37,547	41,332	1,169
0,316	39,467	37,775	40,954	0,852	46,187	44,701	48,561	1,236	42,866	41,169	44,678	1,227
0,398	43,111	41,433	44,863	0,962	47,933	45,957	50,252	1,446	45,990	42,921	49,911	2,361
0,501	44,669	42,860	46,032	0,964	49,152	47,084	50,753	1,439	46,406	43,318	49,765	2,073
0,631	45,477	42,980	46,233	1,025	48,835	46,808	51,466	1,660	46,514	44,784	50,716	1,995
0,794	46,438	44,617	48,474	1,109	47,302	45,250	49,716	1,219	45,243	42,030	49,880	2,247
1,000	44,503	42,094	47,294	1,684	45,357	43,284	50,781	2,430	42,838	40,960	45,920	1,806
1,259	41,724	40,047	42,987	0,918	42,633	40,189	46,091	2,189	40,913	38,608	42,989	1,553
1,585	38,388	37,027	39,402	0,812	39,094	37,361	40,805	1,307	37,977	35,581	40,747	1,920
1,995	35,088	34,158	36,080	0,568	34,617	33,192	36,468	1,155	33,221	30,803	35,652	1,588
2,512	33,763	33,098	34,713	0,525	28,892	27,488	29,777	0,815	27,589	25,964	29,312	1,064
3,162	27,385	27,021	28,145	0,330	26,175	25,169	27,542	0,881	24,958	23,668	26,303	0,919
3,981	24,660	24,050	25,488	0,413	23,674	22,401	24,707	0,799	22,422	21,409	23,383	0,713
5,012	17,651	17,346	17,976	0,209	16,730	16,092	17,371	0,457	16,018	15,546	16,675	0,469
6,310	14,988	14,673	15,272	0,202	14,291	13,783	14,773	0,357	13,543	13,190	14,040	0,351
7,943	12,816	12,647	12,964	0,115	12,318	12,012	12,628	0,222	11,738	11,390	12,259	0,290
10,000	10,763	10,619	10,946	0,107	10,385	10,225	10,534	0,104	9,925	9,753	10,260	0,216
12,589	9,059	8,966	9,190	0,081	8,722	8,580	8,810	0,085	8,229	8,096	8,461	0,137
15,849	7,528	7,480	7,626	0,048	7,420	7,353	7,513	0,054	7,017	6,876	7,171	0,119
19,953	6,337	6,280	6,379	0,026	6,278	6,224	6,352	0,042	5,978	5,874	6,149	0,122
25,119	5,455	5,420	5,491	0,023	5,399	5,361	5,451	0,030	5,145	5,058	5,325	0,117

f [MHz]	70 °C				75 °C				80 °C			
	Povprečje	Min	Max	St. odklon	Povprečje	Min	Max	St. odklon	Povprečje	Min	Max	St. odklon
0,079	17,137	14,703	18,930	1,783	16,320	16,023	16,682	0,223	15,507	14,997	15,945	0,348
0,100	20,230	17,071	22,665	2,094	17,445	2,094	20,026	5,768	18,338	17,581	19,135	0,610
0,126	24,054	20,633	26,885	2,413	20,661	2,413	24,379	6,869	22,133	21,621	22,550	0,340
0,159	27,767	23,947	32,203	2,776	24,100	2,776	27,091	8,003	25,247	24,327	26,021	0,604
0,200	32,649	27,572	38,876	3,873	28,093	3,873	31,999	9,101	29,565	28,332	30,453	0,752
0,251	36,938	31,170	43,896	4,638	31,742	4,638	36,617	10,222	33,779	32,329	35,146	0,961
0,316	40,105	35,196	46,171	3,883	34,461	3,883	42,051	11,584	36,704	35,538	37,978	0,824
0,398	43,811	38,531	52,238	5,882	38,492	5,882	44,969	12,289	41,680	39,611	44,605	1,720
0,501	45,476	41,027	53,055	5,460	39,034	5,460	45,793	12,661	41,443	39,552	43,304	1,527
0,631	46,206	41,038	55,920	6,302	39,754	6,302	46,148	12,633	41,895	40,307	43,811	1,176
0,794	45,102	39,549	54,184	6,261	39,349	6,261	46,984	12,585	41,594	41,054	42,308	0,457
1,000	44,276	38,250	55,385	6,741	37,826	6,741	45,956	11,871	39,914	37,612	42,050	1,836
1,259	42,727	37,365	53,154	7,370	36,600	7,370	43,616	11,199	37,833	35,594	38,908	1,248
1,585	40,005	34,129	49,902	6,478	32,994	6,478	39,169	10,092	33,963	31,723	36,447	2,055
1,995	35,186	30,512	43,979	5,441	29,648	5,441	35,324	9,305	30,623	29,614	31,691	0,928
2,512	30,424	25,174	34,882	3,971	24,187	3,971	29,422	7,749	25,117	23,452	26,138	1,044
3,162	26,644	22,867	31,271	3,518	22,044	3,518	27,057	7,106	22,524	21,154	23,837	1,144
3,981	23,997	20,643	28,931	3,250	19,503	3,250	23,469	6,242	20,406	19,266	21,259	0,820
5,012	16,921	14,819	19,051	1,754	14,050	1,754	16,928	4,688	14,794	14,492	15,117	0,257
6,310	14,294	12,605	16,120	1,446	11,912	1,446	14,280	3,981	12,563	12,137	12,985	0,314
7,943	12,278	10,937	13,816	1,187	10,310	1,187	12,473	3,478	10,836	10,570	11,138	0,204
10,000	10,373	9,164	11,660	1,037	8,647	1,037	10,440	2,901	9,072	8,871	9,261	0,160
12,589	8,622	7,723	9,552	0,770	7,193	0,770	8,597	2,439	7,516	7,326	7,711	0,199
15,849	7,281	6,560	8,168	0,675	6,160	0,675	7,349	2,083	6,431	6,249	6,631	0,194
19,953	6,139	5,554	6,870	0,569	5,222	0,569	6,249	1,767	5,445	5,243	5,655	0,197
25,119	5,243	4,760	5,868	0,474	4,506	0,474	5,407	1,534	4,662	4,491	4,852	0,183

Priloga D: Izmerjene temperature [°C] pri klasičnem (A) segrevanju. Plošči stiskalnice sta bili ob začetku segrevanja hladni.

t [s]	T1	T2	T3	T4	T5	T6	t [s]	T1	T2	T3	T4	T5	T6	t [s]	T1	T2	T3	T4	T5	T6
0	24,93	25,88	25,06	25,29	25,39	25,91	300	40,31	40,51	42,13	41,18	43,08	43,35	600	65,25	65,34	67,43	66,18	68,24	68,60
10	25,04	25,44	25,15	25,23	25,44	25,63	310	41,12	41,33	42,97	42,01	43,92	44,19	610	66,05	66,14	68,23	66,98	69,04	69,40
20	25,19	25,43	25,37	25,38	25,62	25,79	320	41,96	42,16	43,82	42,84	44,76	45,03	620	66,87	66,97	69,06	67,81	69,86	70,23
30	25,35	25,54	25,62	25,57	25,88	26,02	330	42,78	42,98	44,67	43,67	45,60	45,88	630	67,68	67,77	69,88	68,61	70,66	71,04
40	25,53	25,66	25,86	25,75	26,14	26,27	340	43,57	43,77	45,48	44,48	46,43	46,71	640	68,48	68,56	70,68	69,34	71,47	71,85
50	25,68	25,80	26,13	25,96	26,44	26,58	350	44,41	44,60	46,34	45,32	47,29	47,57	650	69,28	69,36	71,51	70,19	72,28	72,67
60	25,88	25,98	26,41	26,20	26,76	26,91	360	45,27	45,47	47,21	46,18	48,14	48,43	660	70,10	70,19	72,32	71,01	73,09	73,48
70	26,17	26,26	26,77	26,50	27,17	27,29	370	46,11	46,29	48,06	47,00	48,98	49,27	670	70,88	70,96	73,11	71,79	73,88	74,28
80	26,42	26,51	27,12	26,79	27,55	27,69	380	46,91	47,10	48,89	47,84	49,82	50,12	680	71,67	71,75	73,90	72,60	74,67	75,09
90	26,71	26,82	27,49	27,13	27,99	28,13	390	47,76	47,95	49,74	48,68	50,67	50,96	690	72,47	72,53	74,71	73,38	75,47	75,87
100	27,12	27,24	27,98	27,57	28,51	28,66	400	48,60	48,78	50,60	49,52	51,51	51,80	700	73,27	73,34	75,51	74,20	76,27	76,68
110	27,54	27,66	28,47	28,01	29,04	29,19	410	49,41	49,58	51,42	50,33	52,33	52,65	710	74,06	74,13	76,32	74,98	77,06	77,48
120	27,96	28,09	28,96	28,47	29,57	29,74	420	50,26	50,43	52,28	51,19	53,20	53,50	720	74,88	74,93	77,13	75,80	77,88	78,29
130	28,43	28,57	29,49	28,97	30,15	30,33	430	51,11	51,28	53,14	52,03	54,05	54,35	730	75,67	75,73	77,93	76,59	78,67	79,08
140	28,93	29,09	30,08	29,51	30,77	30,95	440	52,09	52,26	54,14	53,02	55,03	55,34	740	76,47	76,52	78,72	77,38	79,46	79,88
150	29,48	29,63	30,68	30,09	31,40	31,58	450	52,91	53,05	54,97	53,83	55,86	56,18	750	77,22	77,26	79,47	78,14	80,23	80,66
160	30,02	30,19	31,28	30,65	32,05	32,25	460	53,75	53,91	55,81	54,67	56,71	57,02	760	78,01	78,06	80,27	78,94	81,02	81,45
170	30,64	30,82	31,95	31,31	32,77	32,96	470	54,57	54,74	56,66	55,51	57,54	57,86	770	78,80	78,85	81,06	79,72	81,80	82,23
180	31,30	31,49	32,68	31,99	33,48	33,68	480	55,43	55,58	57,53	56,35	58,38	58,71	780	79,59	79,63	81,86	80,50	82,59	83,02
190	31,93	32,12	33,35	32,65	34,20	34,41	490	56,24	56,37	58,35	57,17	59,20	59,53	790	80,34	80,38	82,62	81,26	83,37	83,81
200	32,61	32,80	34,07	33,35	34,94	35,16	500	57,08	57,22	59,19	58,02	60,05	60,37	800	81,14	81,18	83,43	82,07	84,17	84,60
210	33,30	33,51	34,82	34,06	35,71	35,93	510	57,90	58,03	60,04	58,82	60,87	61,20	810	81,94	81,97	84,22	82,85	84,96	85,38
220	34,04	34,25	35,61	34,82	36,50	36,73	520	58,71	58,85	60,85	59,64	61,69	62,02	820	82,73	82,76	85,02	83,65	85,74	86,17
230	34,80	35,01	36,40	35,60	37,31	37,56	530	59,52	59,64	61,67	60,46	62,51	62,84	830	83,48	83,50	85,76	84,40	86,50	86,93
240	35,56	35,78	37,21	36,38	38,13	38,37	540	60,35	60,47	62,50	61,28	63,33	63,67	840	84,25	84,27	86,54	85,17	87,28	87,71
250	36,36	36,57	38,05	37,18	38,95	39,20	550	61,18	61,29	63,33	62,11	64,16	64,50	850	85,04	85,07	87,33	85,95	88,06	88,49
260	37,12	37,33	38,83	37,95	39,75	40,00	560	62,01	62,12	64,17	62,94	65,00	65,33	860	85,83	85,85	88,12	86,72	88,84	89,27
270	37,90	38,09	39,64	38,74	40,57	40,83	570	62,82	62,92	64,98	63,75	65,80	66,15	870	86,56	86,56	88,83	87,47	89,59	90,03
280	38,68	38,88	40,45	39,54	41,40	41,66	580	63,64	63,75	65,81	64,57	66,62	66,97	880	87,31	87,32	89,58	88,22	90,35	90,79
290	39,50	39,71	41,31	40,37	42,25	42,52	590	64,44	64,54	66,62	65,38	67,42	67,78	890	88,11	88,13	90,40	89,02	91,13	91,57

t [s]	T1	T2	T3	T4	T5	T6	t [s]	T1	T2	T3	T4	T5	T6	t [s]	T1	T2	T3	T4	T5	T6
900	88,92	88,94	91,20	89,80	91,92	92,34	1100	103,71	103,74	105,30	104,81	106,44	107,24	1300	113,68	113,85	115,60	115,87	118,66	120,79
910	89,66	89,66	91,93	90,55	92,68	93,10	1110	104,27	104,38	105,73	105,41	107,11	107,97	1310	114,24	114,42	116,23	116,48	119,30	121,45
920	90,40	90,40	92,68	91,29	93,42	93,85	1120	104,83	104,97	106,16	105,92	107,71	108,69	1320	114,82	114,96	116,84	117,08	119,95	122,11
930	91,18	91,17	93,46	92,06	94,19	94,62	1130	105,33	105,54	106,56	106,37	108,26	109,37	1330	115,39	115,53	117,48	117,69	120,59	122,77
940	91,96	91,96	94,25	92,84	94,97	95,38	1140	105,83	106,12	107,01	106,85	108,84	110,04	1340	116,01	116,13	118,15	118,33	121,27	123,45
950	92,71	92,70	94,98	93,58	95,70	96,13	1150	106,28	106,60	107,48	107,35	109,40	110,70	1350	116,66	116,75	118,84	118,99	121,95	124,13
960	93,44	93,43	95,72	94,32	96,44	96,83	1160	106,77	107,08	107,99	107,88	110,01	111,38	1360	117,30	117,37	119,52	119,61	122,62	124,81
970	94,18	94,19	96,47	95,07	97,20	97,47	1170	107,21	107,53	108,47	108,39	110,60	112,04	1370	117,92	117,98	120,19	120,24	123,27	125,46
980	94,95	94,95	97,24	95,83	97,95	98,16	1180	107,65	107,95	108,94	108,93	111,19	112,71	1380	118,56	118,61	120,88	120,89	123,95	126,14
990	95,70	95,72	98,00	96,59	98,70	98,95	1190	108,10	108,39	109,44	109,46	111,77	113,36	1390	119,23	119,27	121,61	121,56	124,65	126,81
1000	96,44	96,44	98,72	97,33	99,43	99,80	1200	108,54	108,83	109,93	110,00	112,36	114,03	1400	119,93	119,97	122,36	122,24	125,35	127,49
1010	97,21	97,21	99,47	98,09	100,17	100,57	1210	109,04	109,32	110,49	110,56	112,99	114,72	1410	120,61	120,63	123,09	122,91	126,04	128,16
1020	97,98	97,98	100,24	98,85	100,93	101,34	1220	109,48	109,76	110,97	111,11	113,58	115,39	1420	121,29	121,30	123,81	123,57	126,72	128,83
1030	98,75	98,76	100,98	99,62	101,64	102,11	1230	109,94	110,21	111,49	111,67	114,18	116,03	1430	121,98	121,98	124,56	124,25	127,43	129,50
1040	99,47	99,49	101,69	100,35	102,34	102,86	1240	110,43	110,69	112,03	112,26	114,82	116,73	1440	122,71	122,72	125,33	124,96	128,14	130,18
1050	100,19	100,24	102,41	101,09	102,97	103,60	1250	110,94	111,19	112,60	112,84	115,44	117,40	1450	123,42	123,45	126,10	125,66	128,86	130,86
1060	100,95	101,03	103,16	101,85	103,68	104,34	1260	111,50	111,73	113,22	113,48	116,11	118,12	1460	124,14	124,18	126,88	126,37	129,57	131,55
1070	101,71	101,88	103,88	102,66	104,53	105,08	1270	112,01	112,23	113,78	114,05	116,73	118,77	1470	124,88	124,90	127,67	127,08	130,28	132,22
1080	102,49	102,54	104,47	103,53	105,23	105,79	1280	112,53	112,74	114,35	114,64	117,35	119,43	1480	125,59	125,62	128,43	127,78	131,00	132,90
1090	103,14	103,12	104,92	104,17	105,84	106,51	1290	113,06	113,26	114,94	115,22	117,99	120,10							

Priloga E: Izmerjene temperature [°C] pri klasičnem (B) segrevanju. Plošči stiskalnice sta bili ob začetku segrevanja ogreti.

0 s	Ponovitev									Povprečje	St. odklon
	1	2	3	4	5	6	7	8	9		
T1	23,05	22,14	24,12	23,25	24,13	25,56	24,28	26,24	23,33	24,01	1,27
T2	22,50	22,93	23,55	23,55	24,38	25,54	24,19	25,53	24,49	24,07	1,05
T3	23,44	23,59	23,49	23,86	24,06	24,20	25,38	25,03	24,82	24,21	0,71
T4	23,81	24,35	24,34	24,65	25,06	25,33	26,77	28,90	25,76	25,44	1,57
T5	44,37	28,04	41,70	32,98	40,18	44,10	41,82	41,58	45,88	40,07	5,82
T6	107,48	114,09	117,21	108,34	110,56	100,34	108,87	111,01	120,68	110,95	5,91
15 s	Ponovitev									Povprečje	St. odklon
	1	2	3	4	5	6	7	8	9		
T1	68,73	68,83	79,17	72,45	73,55	69,18	68,31	75,55	72,31	72,01	3,69
T2	70,21	74,62	82,03	82,94	71,45	71,72	73,67	78,29	75,50	75,60	4,59
T3	80,09	90,69	94,72	91,23	95,48	83,27	76,56	92,26	88,23	88,06	6,64
T4	96,10	100,90	102,62	99,43	100,77	98,29	99,69	102,05	97,72	99,73	2,11
T5	116,63	110,23	118,75	113,80	114,39	116,14	114,97	113,65	118,95	115,28	2,72
T6	134,97	142,99	140,65	138,36	138,13	133,95	136,89	138,37	138,14	138,05	2,71
60 s	Ponovitev									Povprečje	St. odklon
	1	2	3	4	5	6	7	8	9		
T1	114,26	114,01	110,49	111,19	112,99	112,15	110,42	110,99	111,51	112,00	1,45
T2	112,24	115,45	113,38	110,39	112,02	112,00	110,75	113,24	115,79	112,81	1,87
T3	117,70	120,39	116,98	117,26	117,80	116,16	114,97	117,33	119,51	117,57	1,62
T4	125,20	129,24	123,09	123,40	125,09	122,11	126,42	126,65	125,13	125,15	2,15
T5	135,70	135,71	134,41	131,60	132,17	131,11	134,04	132,33	133,69	133,42	1,71
T6	142,20	146,32	143,27	141,20	141,58	138,17	142,66	141,04	141,63	142,01	2,16
120 s	Ponovitev									Povprečje	St. odklon
	1	2	3	4	5	6	7	8	9		
T1	120,62	123,02	122,79	123,43	123,05	122,74	121,63	122,58	119,57	122,16	1,29
T2	121,87	127,64	126,29	121,60	123,07	120,93	123,40	123,39	127,64	123,98	2,57
T3	126,44	130,57	127,88	126,67	125,74	123,28	125,91	126,94	127,26	126,74	1,94
T4	131,92	134,22	130,46	130,28	131,69	127,66	134,63	132,14	131,99	131,67	2,09
T5	140,75	139,53	137,89	134,86	136,85	134,21	139,11	135,11	136,61	137,21	2,28
T6	146,18	146,13	143,34	141,31	143,52	140,19	145,31	140,98	141,73	143,19	2,29
180 s	Ponovitev									Povprečje	St. odklon
	1	2	3	4	5	6	7	8	9		
T1	132,57	134,85	135,87	135,44	135,92	133,86	135,84	135,18	133,02	134,73	1,28
T2	134,90	137,18	137,07	134,17	136,69	132,58	136,64	134,44	136,39	135,56	1,60
T3	136,66	138,28	137,31	136,02	136,70	134,01	137,19	136,68	135,23	136,45	1,25
T4	140,15	139,55	137,91	137,82	140,90	135,53	141,65	137,99	137,92	138,82	1,90
T5	145,50	142,60	141,43	139,87	143,57	139,18	143,80	139,85	139,40	141,69	2,28
T6	149,13	146,10	143,41	143,38	146,65	143,25	146,77	142,55	141,94	144,80	2,43

240 s	Ponovitev									Povprečje	St. odklon
	1	2	3	4	5	6	7	8	9		
T1	141,27	141,54	141,24	141,43	142,92	140,47	142,49	141,51	140,33	141,47	0,83
T2	143,33	142,10	141,68	141,28	143,99	140,11	142,73	141,08	141,12	141,93	1,23
T3	143,82	142,65	141,57	141,59	143,74	142,30	142,99	142,86	140,59	142,46	1,06
T4	145,84	143,08	141,54	142,77	146,79	142,07	144,85	142,69	141,98	143,51	1,86
T5	148,29	144,32	143,03	143,58	148,48	144,22	146,40	144,04	142,38	144,97	2,23
T6	150,38	146,07	143,43	145,20	149,62	146,95	147,46	145,30	143,46	146,43	2,44
300 s	Ponovitev									Povprečje	St. odklon
	1	2	3	4	5	6	7	8	9		
T1	145,21	144,29	142,93	143,81	146,11	143,90	144,79	144,89	143,79	144,41	0,94
T2	146,73	144,04	143,14	143,85	146,93	144,00	144,81	144,96	143,95	144,71	1,31
T3	146,87	144,39	142,94	143,79	147,06	146,22	145,05	146,77	143,92	145,22	1,55
T4	148,28	144,48	142,72	144,36	149,04	145,72	145,90	146,39	145,03	145,77	1,96
T5	149,47	144,97	143,43	144,97	150,18	147,22	147,29	147,68	145,50	146,75	2,22
T6	150,80	145,91	143,27	145,75	150,81	148,94	147,64	148,69	146,19	147,55	2,51

Priloga F: Izmerjene temperature [°C] pri dielektričnem (B) segrevanju. Elektrodi sta bili ob začetku segrevanja ogreti.

0 s	Ponovitev										Povprečje	St. odklon
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10		
T1	30,4	31,8	30,3	34,4	25,5	33,7	33,6	31,5	30,5	28,0	30,97	2,72
T2	30,3	32,0	29,1	34,9	25,6	33,8	34,1	32,0	27,8	28,1	30,76	3,08
T3	36,1	38,2	34,0	35,4	27,1	35,5	35,9	33,0	26,7	28,7	33,06	4,08
T4	41,7	43,4	42,1	43,0	31,6	39,8	39,1	37,6	35,1	29,9	38,31	4,76
T5	51,3	49,8	42,9	47,1	39,6	44,4	44,1	40,8	37,2	30,4	42,75	6,18
30 s	Ponovitev										Povprečje	St. odklon
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10		
T1	105,8	113,6	107,5	107,0	96,9	89,0	99,4	112,4	81,9	94,3	100,78	10,36
T2	102,2	99,7	98,0	115,9	96,5	91,1	96,7	107,0	79,9	79,9	96,70	11,11
T3	94,5	90,7	92,0	95,8	92,6	80,3	92,1	103,2	66,8	72,6	88,06	11,26
T4	92,4	84,8	86,6	81,6	82,6	73,2	88,0	93,8	65,4	51,2	79,97	13,23
T5	88,6	82,4	84,3	77,9	77,3	64,2	80,9	84,4	60,2	53,3	75,34	11,88
60 s	Ponovitev										Povprečje	St. odklon
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10		
T1	118,3	118,9	126,6	119,0	115,9	111,2	113,6	124,1	108,4	115,6	117,16	5,52
T2	118,9	110,4	117,5	115,9	112,8	111,0	109,3	117,7	106,0	107,5	112,69	4,57
T3	114,3	109,9	114,1	111,9	108,3	107,6	108,3	114,3	102,4	102,0	109,31	4,53
T4	114,5	107,7	110,0	106,6	105,0	102,7	105,9	107,7	97,2	86,2	104,35	7,80
T5	110,9	108,4	105,5	105,4	100,5	95,7	101,4	100,1	89,0	87,4	100,43	7,79
90 s	Ponovitev										Povprečje	St. odklon
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10		
T1	133,6	130,5	133,2	130,4	126,3	124,6	129,8	127,8	116,9	122,3	127,53	5,21
T2	129,3	122,6	125,6	130,0	121,9	123,3	122,8	122,7	113,1	117,5	122,89	4,99
T3	123,5	122,2	123,0	124,0	118,2	120,2	122,1	120,2	110,2	112,4	119,60	4,73
T4	123,1	118,8	118,2	117,3	114,9	114,2	118,9	113,1	107,1	104,1	114,96	5,74
T5	118,1	118,7	113,7	115,6	110,9	109,2	112,4	105,4	100,3	100,8	110,51	6,57

120 s	Ponovitev										Povprečje	St. odklon
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10		
T1	135,3	138,7	135,6	136,1	131,4	132,2	132,9	131,0	125,3	126,7	132,51	4,21
T2	131,3	132,2	130,3	133,6	128,0	130,5	127,6	126,2	120,8	123,0	128,33	4,08
T3	126,9	130,1	127,0	128,6	125,0	126,7	126,0	124,2	118,8	118,6	125,19	3,79
T4	127,0	125,1	122,0	121,9	120,3	121,4	121,9	116,5	114,7	110,5	120,14	4,92
T5	121,9	121,6	116,9	119,0	116,7	115,4	115,4	108,9	110,3	106,8	115,29	5,16
150 s	Ponovitev										Povprečje	St. odklon
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10		
T1	132,7	132,2	136,5	132,5	135,7	136,9	137,8	134,6	129,3	131,5	133,96	2,75
T2	128,5	128,2	131,1	132,9	131,6	135,3	131,4	130,4	125,4	125,8	130,07	3,09
T3	125,3	124,9	128,3	128,0	127,9	131,5	130,2	129,4	122,9	122,7	127,11	3,02
T4	126,0	120,3	124,8	121,0	125,4	125,7	126,6	123,0	119,0	115,9	122,76	3,60
T5	119,3	118,4	118,1	118,8	120,1	120,2	119,9	116,6	114,2	112,9	117,84	2,54
180 s	Ponovitev										Povprečje	St. odklon
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10		
T1	124,3	131,8	135,2	131,7	135,4	138,3	129,3	128,6	131,5	123,3	130,93	4,77
T2	116,8	127,7	129,9	130,8	134,3	136,1	126,5	124,2	128,1	121,0	127,54	5,83
T3	117,0	125,2	126,6	126,8	129,5	133,4	122,9	124,4	125,5	117,4	124,88	4,98
T4	119,2	121,5	122,9	120,4	123,7	126,4	120,4	118,1	121,7	111,0	120,55	4,09
T5	113,1	117,4	118,3	119,0	119,5	121,0	114,7	112,9	116,8	106,9	115,96	4,16