

UNIVERZA V LJUBLJANI  
BIOTEHNIŠKA FAKULTETA  
ODDELEK ZA LESARSTVO

Igor LAPAJNE

**VPLIV SUŠILNEGA POSTOPKA NA KAKOVOST  
SUŠENJA BUKOVINE**

DIPLOMSKO DELO

Visokošolski strokovni študij

Ljubljana, 2007

UNIVERZA V LJUBLJANI  
BIOTEHNIŠKA FAKULTETA  
ODDELEK ZA LESARSTVO

Igor LAPAJNE

**VPLIV SUŠILNEGA POSTOPKA NA KAKOVOST SUŠENJA  
BUKOVINE**

DIPLOMSKO DELO  
Visokošolski strokovni študij

**INFLUENCE OF DRYING PROCESSES ON BEECH WOOD  
QUALITY**

GRADUATION THESIS  
Higher professional studies

Ljubljana, 2007

Diplomsko delo je zaključek Visokošolskega strokovnega študija lesarstva. Opravljeno je bilo na Katedri za tehnologijo lesa, na Katedri za patologijo in zaščito lesa in na Katedri za žagarstvo in lesna tvoriva na Oddelku za lesarstvo Biotehniške fakultete Univerze v Ljubljani.

Senat Oddelka za lesarstvo je za mentorja diplomskega dela imenoval prof. dr. Željka Goriška, za recenzenta pa prof. dr. Primoža Ovna.

Mentor: prof. dr. Željko Gorišek

Recenzent: prof. dr. Primož Oven

Komisija za oceno in zagovor:

Predsednik:

Član:

Član:

Datum zagovora:

Naloga je rezultat lastnega raziskovalnega dela.

Igor Lapajne

## KLJUČNA DOKUMENTACIJSKA INFORMACIJA

|    |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           |
|----|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| ŠD | Vs                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        |
| DK | UDK 630*847.3                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             |
| KG | les/bukev/sušenje/vakuumsko/komorsko/visoka frekvenca/na prostem/kakovost sušenja                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         |
| AV | LAPAJNE, Igor                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             |
| SA | GORIŠEK, Željko (mentor)/OVEN Primož (recenzent)                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          |
| KZ | SI-1000 Ljubljana, Rožna dolina, c. VIII/34                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               |
| ZA | Univerza v Ljubljani, Biotehniška fakulteta, Oddelek za lesarstvo                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         |
| LI | 2007                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      |
| IN | VPLIV SUŠILNEGA POSTOPKA NA KAKOVOST SUŠENJA BUKOVINE                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     |
| TD | Diplomsko delo (visokošolski strokovni študij)                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            |
| OP | X, 47 str., 13 pregl., 33 sl., 8 pril., 19 vir.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           |
| IJ | sl                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        |
| JI | sl/en                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     |
| AI | Specifične lastnosti, problematika sušenja in razširjenost bukovine v proizvodnji so bili najpomembnejši razlogi za preučevanje vpliva 4 različnih sušilnih postopkov sušenja na kakovost lesa. 34 mm debele vzorce smo iz svežega stanja do končne vlažnosti 10 % sušili na prostem, v komorah, z vakuumskim postopkom in v dielektričnem polju visoke frekvence. Sušilni postopek smo vrednotili z vidika hitrosti in časa sušenja, dosežene končne vlažnosti in vlažnostnega gradienta, stopnje zaskorjenja ter pojava sušilnih napak. Sušenje v dielektričnem polju visoke frekvence je bilo najhitrejše. Tudi vlažnostni gradient je bil pri visokofrekvenčnem sušenju v povprečju manjši kot pri vseh ostalih sušilnih postopkih. Z vidika kakovosti in časa sušenja lesa skozi ves postopek se je za prednostno izkazalo kontinuirano vakuumsko sušenje. Vlažnostni gradient in hitrost osušenega lesa sta bila pri kontinuiranem vakuumskem sušenju zadovoljiva in tako primerljiva z naravnim postopkom sušenja. |

## KEY WORDS DOCUMENTATION

- DN Vs
- DC UDC 630\*847.3
- CX wood/beech/drying/vacuum/kiln/high frequency/open air/drying quality
- AU LAPAJNE, Igor
- AA GORIŠEK, Željko (supervisor)/OVEN Primož (co-supervisor)
- PP SI-1000 Ljubljana, Rožna dolina, c. VIII/34
- PB University of Ljubljana, Biotechnical Faculty, Department of Wood Science and Technology
- PY 2007
- TI INFLUENCE OF DRYING PROCESSES ON BEECH WOOD QUALITY
- DT Graduation Thesis (Higher professional studies)
- NO X, 47 p., 13 tab., 33 fig., 8 ann., 19 ref.
- LA sl
- AL sl/en
- AB Specific features, problems of drying, and great usage of beech wood in production were the most important reasons for studying the influence of 4 different drying procedures on wood quality. 34 mm thick samples were dried from its raw state to the final humidity of 10 %; dried either in the open air, in drying chambers, with a vacuum procedure, and in an electric field of high frequency. Drying procedures were evaluated regarding speed and time of drying, achieved final humidity and humidity gradient, level of bark, and occurrence of drying failures. Drying in the electric field of high frequency was the fastest. Also, an average humidity gradient was lower with the high frequency drying than in other drying procedures. The continuing vacuum drying was preferential from the point of view of quality and time of drying. The humidity gradient and the speed of wood drying in continuing vacuum drying were satisfactory, and therefore comparable to the natural procedure of drying.

## KAZALO VSEBINE

|                                                                     | str.      |
|---------------------------------------------------------------------|-----------|
| KLJUČNA DOKUMENTACIJSKA INFORMACIJA.....                            | III       |
| KEY WORDS DOCUMENTATION .....                                       | IV        |
| KAZALO VSEBINE .....                                                | V         |
| KAZALO PREGLEDNIC .....                                             | VII       |
| KAZALO SLIK.....                                                    | VIII      |
| KAZALO PRILOG .....                                                 | X         |
| <br>                                                                |           |
| <b>1 UVOD IN POSTAVITEV PROBLEMA.....</b>                           | <b>1</b>  |
| <b>2 SPLOŠNI DEL .....</b>                                          | <b>2</b>  |
| 2.1 MEHANIZEM SUŠENJA LESA.....                                     | 2         |
| 2.1.1 Gibanje vode v lesu.....                                      | 2         |
| 2.1.1.1 Mastni tok vode v lesu.....                                 | 3         |
| 2.1.1.2 Difuzijski tok vode v lesu.....                             | 3         |
| 2.1.2 Odstranjevanje vode s površine lesa.....                      | 4         |
| 2.2 TEHNIKE SUŠENJA LESA.....                                       | 4         |
| 2.2.1 Sušenje lesa na prostem .....                                 | 4         |
| 2.2.1.1 Pogoji sušenja.....                                         | 4         |
| 2.2.2 Konvencionalno sušenje lesa .....                             | 5         |
| 2.2.2.1 Pogoji sušenja.....                                         | 6         |
| 2.2.3 Kontinuirano vakuumsko sušenje v pregreti pari.....           | 7         |
| 2.2.3.1 Mehanizem sušenja lesa pri nižjih tlakih.....               | 7         |
| 2.2.3.2 Pogoji sušenja.....                                         | 8         |
| 2.2.4 Sušenje v dielektričnem polju visoke frekvence .....          | 10        |
| 2.2.4.1 Mehanizem sušenja lesa v polju visoke frekvence.....        | 10        |
| 2.2.4.2 Pogoji sušenja.....                                         | 10        |
| 2.2.5 Kakovost sušenja lesa.....                                    | 11        |
| 2.2.5.1 Napake pri sušenju lesa .....                               | 11        |
| 2.2.5.2 Napake zaradi napetosti lesa .....                          | 12        |
| 2.2.6 Ocenjevanje sušilnega postopka.....                           | 13        |
| <b>3 MATERIAL IN METODE .....</b>                                   | <b>14</b> |
| 3.1 MATERIAL .....                                                  | 14        |
| 3.1.1 Izbira lesa .....                                             | 14        |
| 3.2 METODE .....                                                    | 15        |
| 3.2.1 Priprava lesa .....                                           | 15        |
| 3.2.2 Kontrola kakovosti .....                                      | 15        |
| 3.2.2.1 Vlažnost lesa in vlažnostni gradient.....                   | 16        |
| 3.2.2.2 Spremljanje vlažnosti les med sušenjem .....                | 17        |
| 3.2.2.3 Hitrost sušenja .....                                       | 17        |
| 3.2.2.4 Meritve notranjih napetosti.....                            | 18        |
| 3.2.3 Sušenje lesa na prostem pri konstantnih sušilnih pogojih..... | 19        |
| 3.2.4 Komorsko sušenje lesa z delno izmenjavo zraka.....            | 20        |
| 3.2.5 Sušenje lesa v vakuumu .....                                  | 21        |
| 3.2.6 Sušenje lesa v polju visoke frekvence .....                   | 24        |

|                                                                                                 |           |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>4 REZULTATI.....</b>                                                                         | <b>26</b> |
| 4.1 PREDSTAVITEV REZULTATOV SUŠENJA .....                                                       | 26        |
| 4.1.1 Naravno sušenje - sušenje lesa pri konstantnih sušilnih pogojih.....                      | 26        |
| 4.1.1.1 Hitrost sušenja in kakovost preizkušancev pri postopku naravnega sušenja .....          | 26        |
| 4.1.2 Komorsko sušenje lesa z delno izmenjavo zraka.....                                        | 29        |
| 4.1.2.1 Hitrost sušenja in kakovost preizkušancev pri komorskem postopku.....                   | 30        |
| 4.1.3 Sušenje v vakuumu.....                                                                    | 33        |
| 4.1.3.1 Hitrost sušenja in kakovost preizkušancev pri postopku vakuumskega sušenja .....        | 34        |
| 4.1.4 Sušenje v polju visoke frekvence.....                                                     | 36        |
| 4.1.4.1 Hitrost sušenja in kakovost preizkušancev pri postopku sušenja z visoko frekvenco ..... | 37        |
| <b>5 RAZPRAVA.....</b>                                                                          | <b>40</b> |
| 5.1 ČASI SUŠENJA: .....                                                                         | 40        |
| 5.2 KAKOVOST PREIZKUŠANCEV IN HITROST SUŠENJA: .....                                            | 41        |
| 5.2.1 Vlažnostni gradient .....                                                                 | 41        |
| 5.2.2 Stopnja zaskorjenja.....                                                                  | 43        |
| 5.2.3 Hitrost sušenja pri posameznem postopku .....                                             | 44        |
| <b>6 SKLEPI .....</b>                                                                           | <b>45</b> |
| <b>7 POVZETEK .....</b>                                                                         | <b>46</b> |
| <b>8 VIRI .....</b>                                                                             | <b>47</b> |
| <b>ZAHVALA</b>                                                                                  |           |
| <b>PRILOGE</b>                                                                                  |           |

## KAZALO PREGLEDNIC

|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     | str. |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------|
| Preglednica 2.1: Vpliv kakovosti lesa ali sušilnega postopka na pojav napak.....                                                                                                                                                                                                                                                    | 13   |
| Preglednica 3.1: Angleški režim sušenja za bukev ( <i>Fagus sylvatica</i> L.), debeline 34 mm (začetna vlažnost (uz) končna vlažnost (uk), ravnovesna vlažnost (ur), temperatura suhega termometra (Ts), temperatura vlažnega termometra (Tv), psihrometrška razlika( $\Delta T$ ), relativna zračna vlažnost (RZV)).....           | 20   |
| Preglednica 3.2: Tehnični podatki vakuumске komore.....                                                                                                                                                                                                                                                                             | 22   |
| Preglednica 3.3: Program sušenja v vakuumu za bukev ( <i>Fagus syvatica</i> L.) 34 mm.....                                                                                                                                                                                                                                          | 22   |
| Preglednica 3.4: Nastavitev moči generatorja po stopnjah.....                                                                                                                                                                                                                                                                       | 25   |
| Preglednica 4.1: Porazdelitev vlažnosti v bukovini v treh vlažnostnih območjih ( $u_{\text{zač.}}$ - $u_{\text{TNCS}}$ (Z), $u_{\text{TNCS}}$ (M), $u_{\text{TNCS}}$ - $u_{\text{kon.}}$ (K) pri postopku naravnega sušenja, na zunanjih (1,3) in notranjem (2) sloju preizkušanca ter osnovna statistika .....                     | 27   |
| Preglednica 4.2: Sušilna hitrost ( $\Delta u/\Delta t$ ), vlažnostni gradient ( $\Delta u/\Delta x$ ) in stopnja zaskorjenja (S.Z.) z osnovno statistiko v treh vlažnostnih območjih pri naravnem postopku sušenja pri konstantnih sušilnih pogojih (RZV=75 %, T=22°C, ur=14,5 %).....                                              | 28   |
| Preglednica 4.3: Porazdelitev vlažnosti v bukovini v treh vlažnostnih območjih ( $u_{\text{zač.}}$ - $u_{\text{TNCS}}$ (Z), $u_{\text{TNCS}}$ (M), $u_{\text{TNCS}}$ - $u_{\text{kon.}}$ (K)pri postopku komorskega sušenja po Angleškem režimu, na zunanjih (1,3) in notranjem (2) sloju preizkušanca ter osnovna statistika ..... | 30   |
| Preglednica 4.4: Sušilna hitrost ( $\Delta u/\Delta t$ ), vlažnostni gradient ( $\Delta u/\Delta x$ ) in stopnja zaskorjenja(S.Z.) z osnovno statistiko v treh vlažnostnih območjih pri komorskem postopku sušenja .....                                                                                                            | 32   |
| Preglednica 4.5: Porazdelitev vlažnosti v treh vlažnostnih območjih ( $u_{\text{zač.}}$ - $u_{\text{TNCS}}$ (Z), $u_{\text{TNCS}}$ (M), $u_{\text{TNCS}}$ - $u_{\text{kon.}}$ (K)) pri postopku kontinuiranega vakuumskega sušenja, na zunanjih (1,3) in notranjem (2) sloju preizkušanca ter osnovna statistika .....              | 34   |
| Preglednica 4.6: Sušilna hitrost ( $\Delta u/\Delta t$ ), vlažnostni gradient ( $\Delta u/\Delta x$ ) in stopnja zaskorjenja (S.Z.) z osnovno statistiko v treh vlažnostnih območjih pri vakuumskem postopku sušenja.....                                                                                                           | 35   |
| Preglednica 4.7: Porazdelitev vlažnosti v treh vlažnostnih območjih ( $u_{\text{zač.}}$ - $u_{\text{TNCS}}$ (Z), $u_{\text{TNCS}}$ (M), $u_{\text{TNCS}}$ - $u_{\text{kon.}}$ (K)) pri postopku visokofrekvenčnega sušenja na zunanjih slojih(1,3) in notranjem (2) sloju preizkušanca ter osnovna statistika .....                 | 37   |
| Preglednica 4.8: Sušilna hitrost ( $\Delta u/\Delta t$ ), vlažnostni gradient ( $\Delta u/\Delta x$ ) in stopnja zaskorjenja( S.Z.) z osnovno statistiko v treh vlažnostnih območjih pri postopku visoko frekvenčnega sušenja bukovine.....                                                                                         | 38   |

## KAZALO SLIK

|                                                                                                                                                                                                                                                                                                             | str. |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------|
| Slika 2.1: Shematski prikaz pretoka vode v lesu pri sušenju (Gorišek, 2004) .....                                                                                                                                                                                                                           | 2    |
| Slika 2.2: Krivulja rosišča v odvisnosti od tlaka in temperature (Ressel, 1999) .....                                                                                                                                                                                                                       | 7    |
| Slika 2.3: Potek kontinuiranega vakuumskega sušenja v pregreti pari (Ressel, 1999).....                                                                                                                                                                                                                     | 8    |
| Slika 2.4: Razpored temperature pri dielektričnem in konvencionalnem načinu segrevanja lesa (Resnik s sod., 1995) .....                                                                                                                                                                                     | 10   |
| Slika 3.1: Priprava kontrolnih vzorcev .....                                                                                                                                                                                                                                                                | 15   |
| Slika 3.2: Skica za izdelavo vilic in diagram za določitev stopnje zaskorjenja z viličnim testom .....                                                                                                                                                                                                      | 18   |
| Slika 3.3: Komora za sušenja lesa pri konstantnih sušilnih pogojih (Laboratorij za sušenje lesa, Oddelek za lesarstvo).....                                                                                                                                                                                 | 19   |
| Slika 3.4: Komora za sušenje lesa z delno izmenjavo zraka (Laboratorij za sušenje lesa, Oddelek za lesarstvo) .....                                                                                                                                                                                         | 20   |
| Slika 3.5: Vakuumska komora (Laboratorij za zaščito lesa, Oddelek za lesarstvo) .....                                                                                                                                                                                                                       | 21   |
| Slika 3.6: Posebej pripravljen vzorec za vakuumsko sušenje.....                                                                                                                                                                                                                                             | 23   |
| Slika 3.7: Visokofrekvenčna sušilnica (Laboratorij za žagarstvo in lesna tvoriva, Oddelek za lesarstvo).....                                                                                                                                                                                                | 24   |
| Slika 4.1: Sušilna krivulja med postopkom naravnega sušenja bukovine pri konstantnih sušilnih pogojih (RZV=75 %, T=22°C, ur=14,5 %).....                                                                                                                                                                    | 26   |
| Slika 4.2: Porazdelitev povprečne vlažnosti po debelini pri naravnem postopku sušenja bukovine v treh vlažnostnih območjih ( $u_{\text{zač.}} - u_{\text{TNCS}}(Z)$ , $u_{\text{TNCS}}(M)$ , $u_{\text{TNCS}} - u_{\text{kon.}}(K)$ ), pri konstantnih sušilnih pogojih (RZV=75 %, T=22°C, ur=14,5 %) ..... | 27   |
| Slika 4.3: Stopnja zaskorjenosti pred in po postopku naravnega sušenja bukovine v treh vlažnostnih območjih ( $u_{\text{zač.}} - u_{\text{TNCS}}(Z)$ , $u_{\text{TNCS}}(M)$ , $u_{\text{TNCS}} - u_{\text{kon.}}(K)$ ) pri konstantnih sušilnih pogojih (RZV=75 %, T=22°C, ur=14,5 %) .....                 | 28   |
| Slika 4.4: Sušilna hitrost v treh vlažnostnih območjih ( $u_{\text{zač.}} - u_{\text{TNCS}}(Z)$ , $u_{\text{TNCS}}(M)$ , $u_{\text{TNCS}} - u_{\text{kon.}}(K)$ ) med postopkom naravnega sušenja pri konstantnih sušilnih pogojih (RZV=75 %, T=22°C, ur=14,5 %) .....                                      | 29   |
| Slika 4.5: Sušilna krivulja in pogoji med sušenjem bukovine v komorski sušilnici po Angleškem režimu ( $T_s$ - Temperatura suhega termometra, RZV ( $\phi$ ) - relativna zračna vlažnost, $u$ - vlažnost lesa) .....                                                                                        | 30   |
| Slika 4.6: Porazdelitev povprečne vlažnosti po debelini pri komorskem sušenju bukovine po Angleškem režimu v treh vlažnostnih območjih ( $u_{\text{zač.}} - u_{\text{TNCS}}(Z)$ , $u_{\text{TNCS}}(M)$ , $u_{\text{TNCS}} - u_{\text{kon.}}(K)$ ).....                                                      | 31   |

|                                                                                                                                                                                                                                              |    |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Slika 4.7: Stopnja zaskorjenosti pred, med in po postopku komorskega sušenja bukovine v treh vlažnostnih območjih ( $u_{\text{zač.}}$ - $u_{\text{TNCS}}(Z)$ , $u_{\text{TNCS}}(M)$ , $u_{\text{TNCS}} - u_{\text{kon.}}(K)$ ).....          | 31 |
| Slika 4.8: Sušilna hitrost v treh vlažnostnih območjih ( $u_{\text{zač.}}$ - $u_{\text{TNCS}}(Z)$ , $u_{\text{TNCS}}(M)$ , $u_{\text{TNCS}} - u_{\text{kon.}}(K)$ ) med postopkom komorskega sušenja bukovine po Angleškem režimu.....       | 32 |
| Slika 4.9: Sušilna krivulja in pogoji sušenja bukovine med kontinuiranim vakuumskim sušenjem ( $T_k$ - temperatura komore, $T_m$ - temperatura lesa, $T_n$ - nastavljena temperatura).....                                                   | 33 |
| Slika 4.10: Vlažnostni gradient pri kontinuiranem vakuumskem postopku sušenja v treh vlažnostnih območjih ( $u_{\text{zač.}}$ - $u_{\text{TNCS}}(Z)$ , $u_{\text{TNCS}}(M)$ , $u_{\text{TNCS}} - u_{\text{kon.}}(K)$ ).....                  | 34 |
| Slika 4.11: Stopnja zaskorjenosti pri kontinuiranem vakuumskem postopku sušenja v treh vlažnostnih območjih ( $u_{\text{zač.}}$ - $u_{\text{TNCS}}(Z)$ , $u_{\text{TNCS}}(M)$ , $u_{\text{TNCS}} - u_{\text{kon.}}(K)$ ).....                | 35 |
| Slika 4.12: Sušilna hitrost v treh vlažnostnih območjih ( $u_{\text{zač.}}$ - $u_{\text{TNCS}}(Z)$ , $u_{\text{TNCS}}(M)$ , $u_{\text{TNCS}} - u_{\text{kon.}}(K)$ ) med vakuumskim postopkom sušenja bukovine.....                          | 36 |
| Slika 4.13: Potek sušenja v polju visoke frekvence (Lesna vlažnost - $u[\%]$ , Temperatura materiala - $T_m [^{\circ}\text{C}]$ , Čas sušenja - $t [\text{h}]$ ).....                                                                        | 36 |
| Slika 4.14: Porazdelitev povprečne vlažnosti po debelini med sušenjem v polju visoke frekvence v treh vlažnostnih območjih ( $u_{\text{zač.}}$ - $u_{\text{TNCS}}(Z)$ , $u_{\text{TNCS}}(M)$ , $u_{\text{TNCS}} - u_{\text{kon.}}(K)$ )..... | 37 |
| Slika 4.15: Stopnja zaskorjenosti v treh vlažnostnih območjih ( $u_{\text{zač.}}$ - $u_{\text{TNCS}}(Z)$ , $u_{\text{TNCS}}(M)$ , $u_{\text{TNCS}} - u_{\text{kon.}}(K)$ ) pri postopku visokofrekvenčnega sušenja bukovine .....            | 38 |
| Slika 4.16: Sušilna hitrost v treh vlažnostnih območjih ( $u_{\text{zač.}}$ - $u_{\text{TNCS}}(Z)$ , $u_{\text{TNCS}}(M)$ , $u_{\text{TNCS}} - u_{\text{kon.}}(K)$ ) med visokofrekvenčnim postopkom sušenja bukovine .....                  | 39 |
| Slika 5.1: Primerjava casov sušenja bukovine glede na posamezni postopek.....                                                                                                                                                                | 40 |
| Slika 5.2: Primerjava vlažnostnih gradientov pred postopkom sušenja glede na posamezni sušilni postopek .....                                                                                                                                | 41 |
| Slika 5.3: Primerjava vlažnostnih gradientov med postopkom sušenja glede na posamezni sušilni postopek .....                                                                                                                                 | 41 |
| Slika 5.4: Primerjava vlažnostnih gradientov na koncu sušenja glede na posamezni sušilni postopek .....                                                                                                                                      | 42 |
| Slika 5.5: Primerjava stopnje zaskorjenosti med posameznimi sušilnimi postopki .....                                                                                                                                                         | 43 |
| Slika 5.6: Primerjava sušilnih hitrosti glede na posamezni sušilni postopek v treh vlažnostnih območjih ( $u_{\text{zač.}}$ - $u_{\text{TNCS}}(Z)$ , $u_{\text{TNCS}}(M)$ , $u_{\text{TNCS}} - u_{\text{kon.}}(K)$ ) .....                   | 44 |

## KAZALO PRILOG

- Priloga A Sprememba vlažnosti ( $u$ ) in hitrost sušenja ( $\Delta u/\Delta t$ ) v odvisnosti od časa simulacije naravnega sušenja.
- Priloga B Sprememba vlažnosti ( $u$ ), temperature sušenja ( $T_s$ ), Relativne začne vlažnosti (RZV) in hitrosti sušenja ( $\Delta u/\Delta t$ ) v odvisnosti od časa komorskega sušenja lesa z delno izmenjavo zraka po Angleškem režimu
- Priloga C Sprememba vlažnosti ( $u$ ), temperature (nastavljene temperature ( $T_n$ ) temperatura materiala ( $T_m$ )), tlaka ( $p$ ) in hitrosti sušenja ( $\Delta u/\Delta t$ ) v odvisnosti od časa vakuumskega sušenja lesa
- Priloga D Sprememba vlažnosti ( $u$ ), temperatura materiala ( $T_m$ ), in hitrosti sušenja ( $\Delta u/\Delta t$ ) v odvisnosti od časa sušenja lesa v polju visoke frekvence
- Priloga E Povprečna vlažnost ( $\bar{u}$ ), vlažnostni gradient ( $\Delta u/\Delta x$ ) in stopnja zaskorjenja (S.Z.) pri postopku naravnega sušenja lesa v odvisnosti od časa vzorčenja (začetno, vmesno, končno vzorčenje)
- Priloga F Povprečna vlažnost ( $\bar{u}$ ), vlažnostni gradient ( $\Delta u/\Delta x$ ) in stopnja zaskorjenja (S.Z.) pri postopku komorskega sušenja lesa z delno izmenjavo zraka v odvisnosti od časa vzorčenja (začetno, vmesno, končno vzorčenje)
- Priloga G Povprečna vlažnost ( $\bar{u}$ ), vlažnostni gradient ( $\Delta u/\Delta x$ ) in stopnja zaskorjenja (S.Z.) pri postopku vakuumskega sušenja lesa v odvisnosti od časa vzorčenja (začetno, vmesno, končno vzorčenje)
- Priloga H Povprečna vlažnost ( $\bar{u}$ ), vlažnostni gradient ( $\Delta u/\Delta x$ ) in stopnja zaskorjenja (S.Z.) pri postopku visokofrekvenčno sušenja lesa v odvisnosti od časa vzorčenja (začetno, vmesno, končno vzorčenje)

## 1 UVOD IN POSTAVITEV PROBLEMA

Sušenje lesa uvrščamo med najbolj drastične lesnopedelovalne postopke. Na kakovostno izvajanje le-teh pa vplivajo najrazličnejši dejavniki (procesni, pogoji, tehnološka oprema in lastnosti lesa), ki jih nikakor ne moremo obravnavati ločeno.

V zadnjem času postaja vse bolj očitno, da je sušenje lesa pomemben dejavnik za uspehe na področju lesarstva. Prednosti kakovostno posušenega lesa, kljub upoštevanju obratovalnih stroškov sušilnic, krepko odtehtajo strošek ob nakupu sušilne opreme.

Sušenje lesa je časovno in energetsko med najbolj potratnimi fazami predelave lesa. V zadnjih časih vse več lesne industrije stremi k vse hitrejšemu obračanju kapitala, kar narekuje krčenje zalog lesne surovine, hkrati pa se pojavlja vse več zahtev po prilagodljivi proizvodnji.

Želja po čim hitrejšem sušenju je vse večja, tveganje za nastanek sušilnih napak pa se s tem močno povečuje. Kakovost sušenja vrednotimo glede na napake, ki se lahko pojavijo na lesu med sušilnim postopkom. Kakovost posušenega materiala dosegamo predvsem s pravilnim vodenjem postopka. Sušenje lesa od svežega stanja do vlažnosti točke nasičenja celičnih sten poteka razmeroma hitro, v higroskopskem območju pa začne hitrost naglo padati. Časi se močno podaljšujejo pri sušenju debelejših sortimentov do nizkih končnih vlažnosti zaradi termičnega upora, ki ovira segrevanje sredice in difuzijskega upora, ki s padajočo vlažnostjo eksponentno narašča ter podaljšuje sušenje. Kakovost posušenega materiala pa mora ostati zagotovljena, zato se za doseg optimalnega cilja pojavljajo postopki v raznih kombinacijah.

Namen diplomske naloge je raziskati vpliv štirih različnih načinov sušenja, t. j. naravnega, konvekcijsko - komorskega, vakuumskega in sušenja v polju visoke frekvence, na nekatere fizikalne in mehanske lastnosti bukovine (*Fagus sylvatica* L.). Oceniti želimo kakovost posameznega sušilnega postopka s primerjavo časa in hitrosti med posameznimi sušilnimi postopki, s primerjavo stopnje zaskorjenosti ter z vidika vlažnostnih gradientov, ki se pojavijo pri sušenju bukovine. Hkrati pa nas zanima tudi vizualna kakovost osušenega lesa.

Ob upoštevanju vrojenih lastnosti bukovine je pričakovati najmanjše spremembe lesa pri vakuumskem sušenju, večje pri naravnem sušenju, največje pa v primeru normalno-temperaturnega komorskega in visokofrekvenčnega sušenja. Pri hitrejših postopkih in višjih sušilnih potencialih pričakujemo velike vlažnostne in tudi napetostne gradiente. Najvišjo kakovost posušenega lesa pričakujemo pri vakuumskem sušenju.

## 2 SPLOŠNI DEL

Sveži les takoj po poseku vsebuje velike količine vode, ki ne zagotavlja dimenzijske stabilnosti in biološke odpornosti. S tem tudi omejuje njegovo nadaljnjo obdelavo in predelavo. Zato je sušenje nujna in največkrat prva faza predelave lesa v končne izdelke.

Cilj sušilnega postopka je v najkrajšem času in pri najmanjši porabi energije kakovostno osušiti les do vlažnosti, ki je primerna za nadaljnjo uporabo.

Kakovost lesa pri sušenju mora ostati enaka ali pa se celo izboljšati, saj je les po sušenju dimenzijsko stabilnejši, biološko odpornejši, ima višje mehanske trdnosti, zmanjša se mu tudi gostota, kar pripomore k lažji manipulaciji in nižjim stroškom transporta.

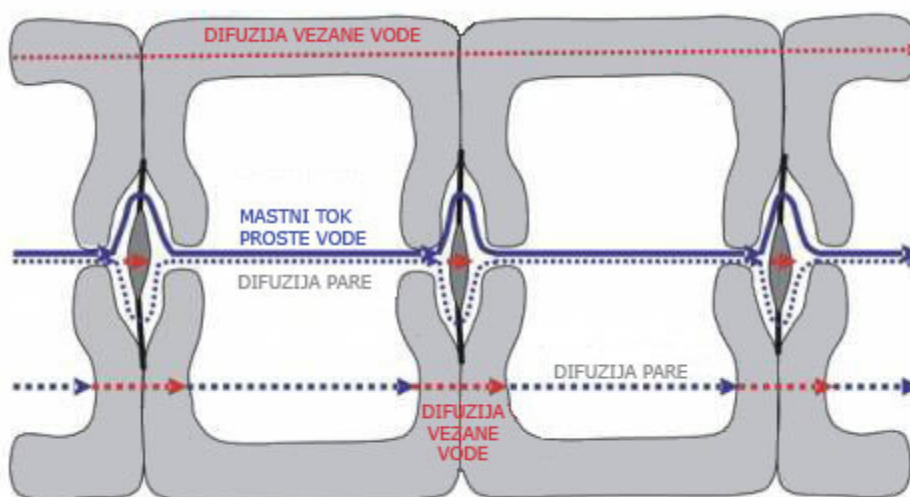
Cilj sušenja lesa je tudi doseči najnižje stroške, kar pomeni, da moramo les osušiti v čim krajšem času s čim manjšo porabo energije in ob zagotovljeni kakovosti.

### 2.1 MEHANIZEM SUŠENJA LESA

Sušenje je sestavljeno iz toka vode iz notranjosti na površino in odstranjevanja vode s površine lesa. Od prevladujočega upora je tako odvisna vzpostavitev ustreznih parametrov sušenja, to je temperature, relativne zračne vlažnosti in hitrosti kroženja zraka.

#### 2.1.1 Gibanje vode v lesu

Gibanje vode skozi strukturo lesa je rezultat sušilnih procesov (sl. 2.1), ki poteka kot masni tok proste ali kapilarne vode in kot difuzijski transport vezane vode in pare. Difuzija vezane vode je sestavljena iz difuzije vezane vode skozi celične stene in difuzije pare skozi porozno strukturo (celične lumne).



**Slika 2.1:** Shematski prikaz pretoka vode v lesu pri sušenju (Gorišek, 2004)

#### 2.1.1.1 Mastni tok vode v lesu

Z vidika transporta proste vode je les heterokapilaren sistem, pri čemer predstavljajo kapilarni sistem celični lumni in piknje, oz. odprtine v pikenjskih membranah. Učinkovito prevajanje tekoče vode je omogočeno s porozno prostorsko strukturo lesa s sklenjenimi medsebojnimi povezavami.

Prosta ali kapilarna voda se nahaja v lumnih anatomskih elementov in se giblje na površino zaradi kapilarne tenzije, ki je obratno sorazmerna s premerom meniska. Ko se vodna gladina s površine sušečega se lesa umakne v drobne piknje in nastanejo meniski z majhnim radijem, nastane močan kapilarni vlek v globino lesnega tkiva, pri čemer nastane tlačni in vlažnostni gradient. Pri zelo prevodnih lesovih se kapilarni vlek izpostavi vse do sredice deske, meniski vztrajajo na površini, vlažnost površine pa ima vsaj vlažnost TNCS. Tako ugodna situacija se pojavi pri zelo vlažnih in prevodnih beljavah redkejših vrst in v blagih razmerah. V takšnih okoliščinah se transportirajo maksimalne količine vode ob najmanjši porabi energije. Sušilni postopki naj bi omogočili čim večji delež kapilarnega transporta (Siau, 1995).

V sušilnem postopku je vlažnost točke nasičenja celičnih sten (TNCS) kritična točka, ko preidemo iz konstantne hitrosti sušenja v pojemajočo kot posledico difuzijskega upora. Hkrati pa se pojavi še vlažnostni gradient, ki je vzrok za nastanek sušilnih napetosti, te pa ob prekoračitvi trdnosti lesnega tkiva povzročijo deformacije, ki so trajne (Gorišek, 2004).

Zaradi prisotnosti vlažnostnih gradientov velja definicija TNCS za les kot celoto le kot mejna vrednost, zato v praksi večkrat obravnavamo območje nasičenja celičnih sten in ne le točko (Gorišek, 1994).

#### 2.1.1.2 Difuzijski tok vode v lesu

Permeabilnost lesnega tkiva je pomembna lastnost, predvsem za transport proste vode, manj pa za gibanje vezane ali higroskopske vode. Pod vlažnostjo TNCS je značilen difuzijski tok vode, ki sestoji iz difuzije vezane vode skozi celične stene in difuzije pare skozi celične lumne. Čeprav je slednja znatno hitrejša (100 do 1000 krat), le-ta skorajda ne poteka skozi piknje, saj so za parno difuzijo premajhne in premalo številne. Ker poteka difuzija skozi lumne mnogo hitreje kot skozi celične stene, je difuzijski koeficient odvisen predvsem od količine stenskega materiala, t. j. gostote lesa, difuzivnost pa je obratno sorazmerna z gostoto lesa. Na skupno difuzivnost lesnega tkiva vpliva več dejavnikov, od katerih so najpomembnejši: gostota, temperatura, vlažnost, smer toka in usmerjenost vlaken.

Difuzija v radialni smeri je od 17 do 25 % večja od difuzije v tangencialni smeri. Razlog je v radialno potekajočih trakovih in v razporeditvi mikrofibril v radialnih stenah. Hkrati pa je difuzijski koeficient vezane vodne difuzije v vzdolžni smeri približno trikrat večji kot v tangencialni smeri in dvakrat večji kot v radialni smeri. Koeficient difuzije pare v lumnih je veliko večji od koeficienta difuzije vezane vode, temperaturno pa narašča zaradi naraščanja parnega tlaka (Siau, 1995).

## **2.1.2 Odstranjevanje vode s površine lesa**

Vlago iz površine lesa običajno prevzema okoliški zrak, le da je relativna zračna vlažnost pod 100 %. Količina vlage, ki jo je zrak sposoben sprejeti, je odvisna od nasičenja.

Dokler je površina vlažna, je sušilna hitrost konstantna. Če se vlažnost površine zmanjša, se zmanjšata temperaturna in vlažnostna razlika med površino in zrakom. Tik pod površino lesa nastane difuzijski upor, ki v nadaljevanju postopka sušenja določa ustrezne pogoje (Gorišek, 2004).

## **2.2 TEHNIKE SUŠENJA LESA**

### **2.2.1 Sušenje lesa na prostem**

Naravno sušenje je sušenje lesa na prostem ali v pokritem prostoru, kjer je les izpostavljen atmosferskemu zraku. Sušenje poteka pri relativno nizkih temperaturah in zato traja dalj časa. Sušenje na prostem se začne takoj, ko les posekamo in se konča, ko les doseže higroskopsko ravnovesje z vlago v zraku. Zato se les lahko posuši do 15 % vlažnosti in tudi manj, kar je seveda odvisno od klime določenega kraja. (Geršak s sod., 1986)

Čeprav smo pri hitrosti sušenja in doseganju nizke končne vlažnosti na prostem odvisni večinoma od vremenskih razmer, lahko s pravilno izbiro in pravilno ureditvijo sušilnega prostora ter ustrezno pripravo lesa za sušenje izkoristimo vse naravne možnosti.

Sušenje lesa na prostem je učinkovito, če zagotovimo ustrezen toplotni tok na sušečo se površino in hkrati čim hitrejšo odvajanje izhlapevajoče vode iz lesa. Nalogo prenosa toplote in vodne pare opravlja zrak. Zaradi oddajanja toplote se ta pri prehodu skozi zložaj ohlaja, hkrati pa se zaradi sprejemanja vode njegova vlažnost povečuje. Oba pojava zmanjšujeta učinkovitost sušenja, zato je pomembno, da se zrak čim hitreje izmenjuje. Hitrost izmenjave zraka je odvisna od hitrosti vetra, oblikovanosti zložaja, lege skladovnice na skladišču, oblike in urejenosti skladišča. (Gorišek, 2004).

#### **2.2.1.1 Pogoji sušenja**

Pri sušenju na prostem lahko na dejavnike le deloma vplivamo, medtem ko jih pri tehničnem sušenju lahko spremljamo po potrebi.

Temperatura zraka je pri sušenju na prostem relativno nizka, giblje se v območju od – 35°C do + 35°C. Pri višji temperaturi lahko zrak sprejme večje količine vlage in tudi sama difuzija vode v lesu je hitrejša. Na temperaturo pri sušenju na prostem ne moremo vplivati.

Relativna zračna vlažnost (RZV) se giblje med 50 in 90% in od nje je odvisna hitrost sušenja. Čim nižja je, tem intenzivnejše je izhlapevanje vode s površine lesa. Na količino RZV pa vplivata lokacija in makro lokacija. Tik nad zemljo je RZV največja, nato pa z višino pada. Žaganice se zato v zgornjem delu skladovnice hitreje sušijo kot v spodjem. Hitrost zraka je pri sušenju na prostem izredno pomembna, ker iz lesa izhaja prosta voda. Sušenje na prostem je zelo odvisno od jakosti in smeri vetra na skladišču žaganega lesa.

Močan veter, ob nizki zračni vlažnosti, poveča hitrost sušenja lesa. Posledica povečane hitrosti sušenja lesa je pogostejše nastajanje napak v lesu.

Čas in hitrost sušenja na prostem sta predvsem odvisna od:

- sušilnih značilnosti lesa,
- priprave zložajev,
- urejenosti skladišča in
- klimatskih razmer.

Večina iglavcev in redkejši listavci se v ugodnih klimatskih razmerah suši na prostem razmeroma hitro, vendar je dosežena končna vlažnost omejena s krajevnimi ravnovesnimi razmerami. Gostejše lesne vrste in debelejši sortimenti se sušijo zelo počasi ali pa celo zahtevajo omejevanje hitrosti sušenja. Z vidika časa sušenja lesa na prostem ima velik pomen tudi debelina sortimentov, saj se trajanje podaljšuje s potenčno odvisnostjo (Gorišek s sod., 1994).

Prednosti:

- ✓ ne potrebujemo dodatne energije,
- ✓ manj tvegan postopek,
- ✓ manj sušilnih napetosti,
- ✓ sušenje poteka pri nižjih temperaturah.

Pomanjkljivosti:

- ✗ dolgotrajen postopek sušenja,
- ✗ težko dosežemo nizke vlažnosti,
- ✗ procesa ne moremo uravnavati,
- ✗ les je bolj izpostavljen nevarnostim bioloških okužb,
- ✗ zahteva velike površine.

### **2.2.2 Konvencionalno sušenje lesa**

V zadnjih letih se sušenje lesa na prostem vse bolj umika najrazličnejšim tehničnim postopkom. Kljub uvajanju novih tehnik pa ostaja normalno temperaturno konvekcijsko komorsko sušenje z delno izmenjavo zraka postopek, po katerem danes sušimo daleč največje količine lesa. Drugi postopki tehničnega sušenja ne pomenijo večje alternative, so pa pomembni kot specialni in uveljavljeni za natančno določene namene. Vendar pa tudi s konvencionalnim sušenjem, z vedno bolj izpopolnjeno opremo, dosežemo vse večjo kakovost osušenega lesa, krajše čase sušenja in manjšo porabo energije.

### 2.2.2.1 Pogoji sušenja

Komorska sušilnica se v splošnem uporablja in je primerna za vse vrste lesa. Les v komori miruje, spreminja se klima, ki jo prilagajamo vlažnosti lesa glede na vrsto in debelino. Les sušimo pri najvišji možni temperaturi in ob hitrem gibanju zraka, tako da se čim hitreje in čimbolj kvalitetno posuši. Da bi zagotovili kontinuirano proizvodnjo in visoko kakovost, les po sušenju še temperiramo in umirimo v prostoru z nadzorovano klimo.

Temperature v konvencionalnih sušilnicah so odvisne od sušeče se lesne vrste, debeline, vlažnosti in kvalitete posušenega lesa. Gibljejo se od 40 do 100°C, relativna zračna vlažnost je med 20 in 100 odstotna, hitrost zraka pa navadno od 1,5 do 4 metre na sekundo. Izraz konvekcijski se nanaša na značilen prenos toplote in snovi (vode) z zrakom. Ta se v posebnem prostoru (agregatu) kondicionira (segreje, navlaži ali z delno izmenjavo tudi razvlaži), v sušilnem prostoru segreje les, od njega pa sprejme oddano vodo.

Dobra toplotna izoliranost ni pomembna zgolj zaradi zmanjševanja transmisijskih toplotnih izgub, kar nam narekujejo visoki stroški porabljene energije, temveč tudi zaradi preprečevanja kondenzacije vodne pare ter drugih hlapljivih in agresivnih organskih komponent (ocetna in mravljična kislina, tanini...) na hladnih površinah. Kondenzat negativno vpliva na toplotne lastnosti celotne zgradbe, agresivno deluje na vgrajene materiale in zmanjšuje njihovo trajnost ali pa z obarvanjem lesa zmanjša kakovost osušenega materiala (Geršak s sod., 2003).

Učinkovito izvajanje sušilnega postopka je odvisno od:

- naprav za gretje zraka,
- naprav za gibanje zraka,
- naprav za uravnavanje relativne vlažnosti zraka,
- naprav za polnjenje in praznjenje sušilnic,
- naprav za merjenje in regulacijo klime zraka ter vodenje sušilnega procesa.

Prednosti:

- ✓ primerno za vse vrste in debeline lesa,
- ✓ doseganje nizke končne vlažnosti,
- ✓ izvedba, oprema in tudi programi sušenja so najbolj podrobno raziskani, ter
- ✓ postopek relativno hiter (sušenje z najvišjo možno temperaturo).

Pomanjkljivosti:

- ✗ večja poraba energije,
- ✗ nevarnost za nastanek večjih napak,
- ✗ za ogrevanje sušilnice je potreben parni kotel.

## 2.2.3 Kontinuirano vakuumsko sušenje v pregreti pari

Sušenje lesa v podtlaku uvrščamo med posebne načine sušenja, kjer se les suši v nepredušno zaprtem jeklenem valju, v katerem je s pomočjo vakuumskih črpalk ustvarjen podtlak.

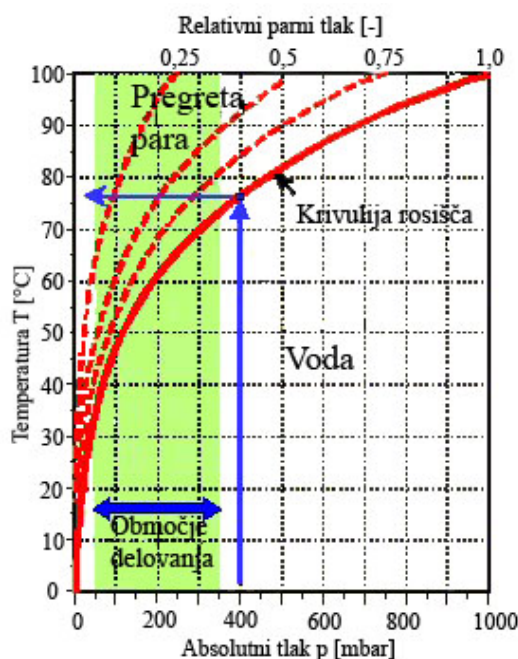
### 2.2.3.1 Mehanizem sušenja lesa pri nižjih tlakih

Pri znižanem tlaku se les suši z notranjim izparevanjem pri relativno nizkih temperaturah, kar je pomembno zlasti za temperaturno občutljive lesne vrste.

Neuman s sod.(1992) so istočasno izmerili tlak in temperaturo na različnih globinah desk med konvektivnim vakuumskim sušenjem v pregreti pari pri 0,2 bara. Ugotovili so, da so bili tlaki pri različnih globinah vedno višji od nasičenega tlaka glede na lokalne temperature. Tako so ugotovili, da voda ne vre v lesu in da hitro sušenje ne more biti predpisano pojavu vretja, kot to trdijo številne študije. Njune meritve so bile opravljene v središču desk. Vseeno pa njuno delo ni izključilo možnosti vretja na robu desk.

Chen in Lamb (1995) sta predlagala, da se ne pojavi le vrenje v lesu, ampak da se tam pojavi tudi območje vrenja. Od območja vrenja pa do površine lesa je tlak nižji od tlaka nasičenja vodne pare in vlaga na teh mestih izpari. Od območja vrenja pa do sredine lesa se vrenje ne pojavi, saj je tlak znotraj lesa višji od tlaka nasičenosti vodne pare. Območje vrenja se med sušenjem umika od površine proti sredini lesa. Hitrost tega gibanja je odvisna od moči gretja in od lastnosti lesa, kot je permeabilnost oz. prevodnost

Permeabilnost lesa je ocenjena kot poglavitni faktor pri nadzoru gibanja vlage pri vakuumskem sušenju. V tem primeru je ocenjeno, da se s kapilarnim tokom iz lesa odstrani največ vlage.



Slika 2.2: Krivulja rosišča v odvisnosti od tlaka in temperature (Ressel, 1999)

Ressel (1999) navaja, da se pri sušenju lesa v vakuumu uporabljajo absolutni tlaki, ki jih uvrščamo na področje grobega vakuumu (od 300 do 50 mbar (30...5 KPa), kjer voda vre pri temperaturi od 35 do 75°C) in jih je mogoče doseči s hidravličnimi črpalkami (sl. 2.2).

Podtlak povzroči, da se voda lažje in hitreje giblje v kapilarah in tudi hitreje izhlapeva v okolico, kjer je manjši upor izhajanju vode ali pare. Nižji tlak in nižje vrelišče pospešujeta tudi gibanje vezane vode v lesu. Voda namreč hitreje prehaja v plinasto stanje, difuzija vodne pare skozi les pa je precej hitrejša kot difuzija vode.

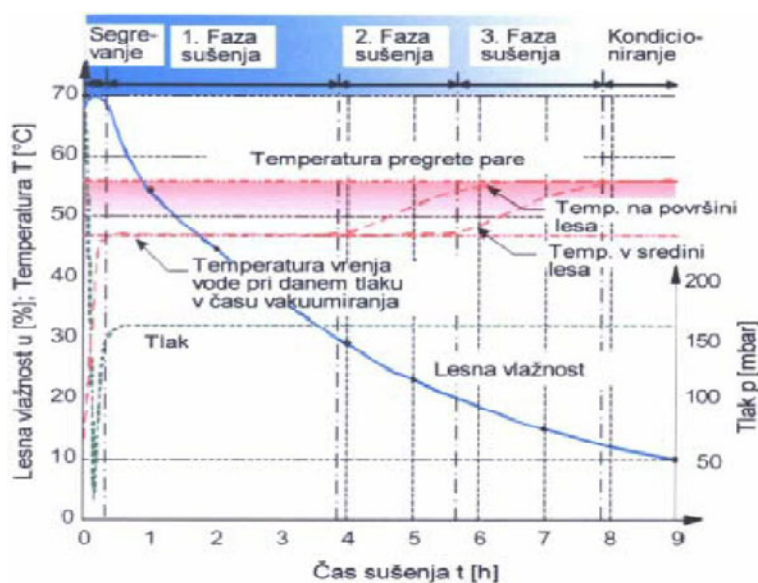
Vakuumsko sušenje je torej bistveno hitrejšo od konvencionalnega sušenja. Voda iz sredine lesa se pospešeno giblje v zunanje plasti, ki so zato bolj vlažne kot običajno. To pa pomeni, da je tudi padec vlažnosti manjši, manjše pa so tudi napetosti v lesu.

### 2.2.3.2 Pogoji sušenja

Tako sušenje je primerno za vse lesne vrste, ki ne prenesejo visokih temperatur (javor, hrast...), primerno je za sušenje debelejših sortimentov in gostejših listavcev, medtem ko za tanjše elemente redkejših lesnih vrst ni ekonomsko upravičeno.

Nižja temperaturna stopnja sušenja omogoča manjšo porabo energije za segrevanje in pregrevanje lesa in vseh naprav, manjše pa so tudi toplotne izgube v okolico. Kljub temu se zaradi povišane izparilne toplote in predvsem povečane potrebe po električni energiji vakuumsko sušenje ne uvršča ravno med energijsko najmanj potratne.

Prenos toplote opravlja tok pregrete pare, ki na lesu kondenzira in odda latentno izparilno toploto. Tako segrevanje lesa je zelo pospešeno in se konča z dvigom temperature lesa na temperaturo izparevanja. Vlažen les se zaradi visoke toplotne prevodnosti hitro segreje tudi v notranjosti.



Slika 2.3: Potek kontinuiranega vakuumskega sušenja v pregrete pari (Ressel, 1999)

Hitrost sušenja je med prvo fazo konstantna. Temperatura površine lesa je enaka vrelišču, hitrost izparevanja pa je omejena s količino toplote, ki jo pregreta para odda površini. Trajanje prve faze je odvisno od intenzivnosti kapilarnega gibanja proste vode in se konča, ko je tok proste vode na površini manjši od ekvivalentne količine toplote, potrebne za njeno uparitev (sl. 2.3).

Presežek toplote zvišuje temperaturo površine lesa, ki se osuši pod TNCS. Dosežena je kritična točka, ki prevesi sušenje v drugo fazo. Kapilarno gibanje proste vode obstaja v manjši meri le še v notranjosti lesnega tkiva, proti površini pa prevladuje mnogo počasnejši difuzijski tok. S sušenjem pod TNCS se pojavi tudi neugodno anizotropno krčenje, ki generira notranje napetosti. Če le-te prekoračijo trdnost lesnega tkiva, pride do razpok

Ravnovesna vlažnost je odvisna le od temperaturne razlike med temperaturo pregrete pare in vreliščem, absolutni tlak pa z znižanjem le nekoliko dvigne ravnovesno vlažnost. Površina doseže temperaturo pare in se hkrati osuši na ravnovesno vlažnost. Ostrina sušenja je odvisna od ravnovesne vlažnosti klime, ki se tako uravnava s stopnjo pregretja pare.

Prednosti:

- ✓ kratki časi sušenja in večja hitrost sušenja,
- ✓ primerno za sušenje krajših sortimentov,
- ✓ manjše tveganje obarvanj,
- ✓ preprosta postavitev in zagon postrojenja,
- ✓ z rekuperacijskimi sistemi dobra energijska učinkovitost in
- ✓ prilagodljivost.

Pomanjkljivosti:

- ✗ neprimerno za les z zelo visoko začetno vlažnostjo,
- ✗ manjša učinkovitost pri sušenju tanjših in redkejših lasov,
- ✗ večje tveganje obarvanja,
- ✗ potrebno več znanja za upravljanje,
- ✗ večja specifična poraba energije,
- ✗ višji investicijski stroški ter
- ✗ visoki stroški obratovanja in vzdrževanja.

Vakuumska tehnika v lesni industriji se ne uveljavlja le pri sušenju lesa, temveč tudi pri plemenitenju, globinskem barvanju, impregnaciji in pri dimenzijski stabilizaciji.

## 2.2.4 Sušenje v dielektričnem polju visoke frekvence

### 2.2.4.1 Mehanizem sušenja lesa v polju visoke frekvence

Sušenje lesa v električnem polju visoke frekvence se razlikuje od konvencionalnega sušenja zaradi delovanja elektromagnetnega polja na les. Razlike so predvsem v načinu segrevanja, kar vpliva na značilno temperaturno polje ter tako na mehanizem in hitrost sušenja.

Značilnost vzpostavljenega temperaturnega polja je, da je temperaturni gradient istosmeren z vlažnostnim, kar izredno ugodno vpliva na pretok vode v lesu. Ko se sredina lesa v električnem polju visoke frekvence segreje na 100°C, se voda začne uparjati.

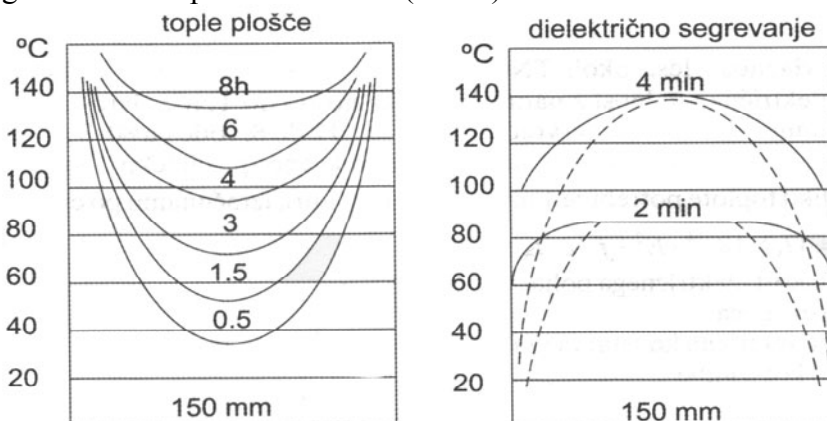
Pri tem se tlak vodne pare v lesu povečuje in posredno vpliva na povečanje notranjega tlaka. Višji notranji tlak izriva vodno paro na površino, kjer je nižji. Pri povečani tlačni razliki pa postane pomembna permeabilnost lesnega tkiva.

Pri sušenju v električnem polju visoke frekvence voda pretežno izpareva, kar pomeni, da se prosta in vezana voda izločata kot vodna para s difuzijo pare skozi porozno strukturo predvsem v vzdolžni smeri, kjer je ugodnejši vzdolžni tok po celičnih lumnih (Kobayashi s sod., 1999).

### 2.2.4.2 Pogoji sušenja

Pogoj vsakega sušenja kot termičnega postopka je segrevanje vlažnega lesa. Pri sušenju v električnem polju visoke frekvence poteka neposredno segrevanje lesa. Intenzivnost širjenja toplote in dosežene temperature je odvisna od lokalne vlažnosti. Les se segreva močnejše na mestih z višjo vlažnostjo oziroma v notranjosti, kar ugodno vpliva tudi na tok vode iz sredine lesa k površini (Resnik s sod., 1995).

Bistvena prednost sušenja z visoko frekvenco pred klasičnim segrevanjem je v porazdelitvi temperature v lesu. Pri klasičnem načinu sušenja je porazdelitev temperature po leseni masi neenakomerna. Šele po večurnem segrevanju (6-8ur) je temperatura v sredini 120 do 140 °C, če segrevamo s temperaturo 150 °C (sl. 2.4).



**Slika 2.4:** Razpored temperature pri dielektričnem in konvencionalnem načinu segrevanja lesa (Resnik s sod., 1995)

Temperatura na zunanjih površinah se dodatno zniža še zaradi oddajanja toplote v okolico in kondenzacije vodnih par, ki s kapilarnim in difuzijskim tokom prihajajo iz notranjosti lesa. Na mestih mokrin in tam, kjer se kondenzirajo velike količine vode, se lahko les pregreje. Posledice so napake, kot so obarvanja ali celo pooglenitve oziroma termični razkroj. Do zažiga ali celo eksplozij lesa lahko pride tudi pri preveliki jakosti električnega polja, če je v lesu kovina, in pri rastnih posebnostih, kot so grče, vrasla skorja, reakcijski les in smolni kanali (Gorišek, 2005).

Če les ne leži na ploščah, ampak je vmes zrak, in če pri tem lesna vlakna ležijo vzporedno z gibanjem električnega toka, nastane pregreteje lesa. Posledice so različne napake, kot so obarvanja, pokanje, sprememba dimenzij ali celo oblike lesa oz izdelka (Resnik s sod., 1995).

Prednosti:

- kratek čas sušenja,
- primerno za sušenje debelejših sortimentov, tudi nepravilnih oblik in
- proces je avtomatiziran.

Pomanjkljivosti:

- visoki stroški sušenja,
- visoki investicijski stroški,
- potrebno posebno dovoljenje radiodifuzijskih organov,
- velika poraba električne energije in
- omejene zmogljivosti.

## **2.2.5 Kakovost sušenja lesa**

### **2.2.5.1 Napake pri sušenju lesa**

Pri sušenju lesa nastajajo napake, ki lesu zmanjšujejo vrednost. Napakam se ni moč izogniti, paziti pa je treba, da bodo čim manjše. Poznati je treba napake in vzroke, zaradi katerih nastajajo, da jih pri procesu sušenja lahko preprečujemo.

Kolaps ali vdor celičnih sten nastane pri sušenju lesa, ki ima vlažnost nad točko nasičenosti celičnih sten pri previsoki temperaturi (zmanjšana trdnost lesnega tkiva). Zaradi nevarnosti kolapsa moramo les sušiti z nizko temperaturo, dokler še vsebuje prosto vodo.

Kolabiran les lahko vrnemo v prvotno obliko tako, da ga za nekaj časa izpostavimo visoki temperaturi in vlažnosti (rekondicioniranje). Tedaj zrak in vodna para v lesu zvišata tlak znotraj celice, kar obrne natezne sile, ki so prvotno povzročile kolaps (Gorišek s sod., 1994).

### 2.2.5.2 Napake zaradi napetosti lesa

Prav gotovo so v procesu sušenja najpomembnejše krčitvene napetosti, ki nastanejo zaradi vlažnostnega gradienta. Posebno vlogo pa ima točka nasičenosti celičnih sten, ki jo lahko definiramo kot vlažnost, pri kateri se v procesu sušenja les začne krčiti (Gorišek s sod., 1994).

Pri sušenju površinske plasti lesa pod točko nasičenosti celičnih sten se le-ta začne krčiti. Krčenju zunanjih plasti se upirajo notranje plasti, ki še niso posušene po TNCS. Zaradi tega je zunanja plast obremenjena na nateg, notranja pa na tlak. Napetosti na zunanje strani so lahko tako velike, da zunanja plast počne in nastanejo površinske razpoke.

Krčenju zunanjih plasti se upirajo notranje plasti, ki niso posušene pod TNCS. Zunanje plasti se torej ne morejo krčiti, ker jih zadržujejo notranje plasti, ki se še ne krčijo. V zunanjih plasteh lesa nastane natezna napetost, v notranjih pa tlačna.

Kasneje se začne krčiti še sredica, v kateri se začno pojavljati natezne napetosti, na površini pa tlačne. Površinske razpoke se zaprejo, vendar ostane tkivo trajno deformirano. Stanje lesa, v katerem so notranje plasti obremenjene na nateg, zunanje pa so obremenjene na tlak, imenujemo zaskoritev.

Zaskoritev lahko preprečimo s pravočasnim vlaženjem zunanjih plasti. Klimo v komori navlažimo toliko, da dosežemo ravnovesno vlažnost, ki je enaka povprečni vlažnosti lesa.

Razpoke na čelih nastanejo iz enakega vzroka, s tem da je hitrost gibanja vode na čelih večja kot na ostalih površinah. Čelne razpoke preprečimo tako, da čela zaščitimo pred prehitrim izhlapevanjem. Površinske in tudi čelna razpoke nastanejo, če les sušimo s presuhim zrakom (Geršak s sod., 1986).

Veženje ali nepravilen prerez sta napaki, pri katerih se spremeni oblika obdelovanca, povzroči jo predvsem različno krčenje v anatomskih smereh in neenakomerno sušenje lesa. Veženje je deformacija ravne ploskve obdelovanca. V to skupino napak sodijo:

- lok ali vzdolžna ukrivljenost,
- sabljavost ali bočna ukrivljenost v vzdolžni smeri in
- koritavost ali ukrivljenost bočnic po širini.

Zakrivljen obdelovanec lahko nastane tudi zaradi hitrejšega sušenja na eni strani obdelovanca. V tem primeru se deska vboči na bolj suhi strani. Rombični in eliptični prerez sta značilni napaki nepravilnega prereza. Nevarnost nastajanja opisanih napak se zmanjšuje s pravilnim sušenjem, obtežitvijo zložajev, počasnim sušenjem oziroma z sušenjem lesa na prostem do TNCS in nadaljevanjem sušenja v sušilnici na želeni odstotek vlažnosti (Geršak s sod., 2003).

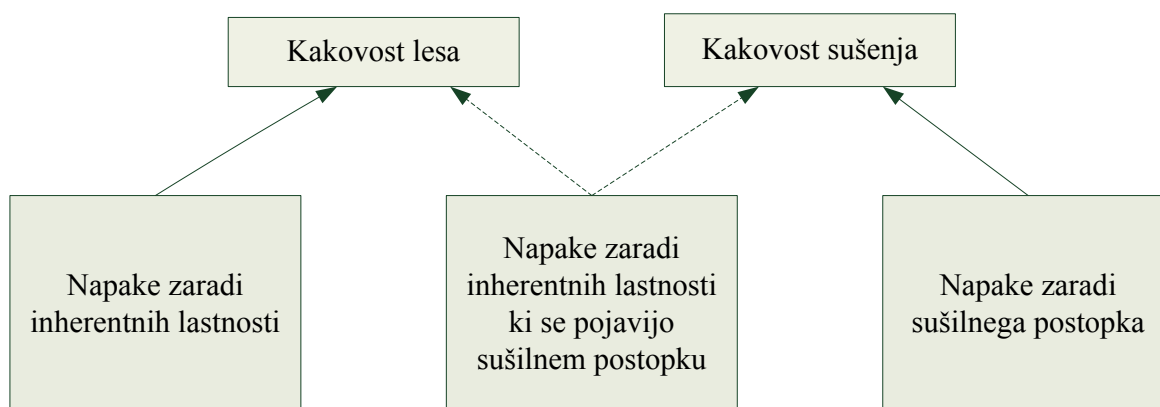
## 2.2.6 Ocenjevanje sušilnega postopka

Pravilnost izvajanja sušilnega postopka ocenjujemo z vidika osušenega lesa, to pa na podlagi:

- pojava vidnih mehanskih napak, kot so najrazličnejše vrste razpok in veženja,
- intenzivnost in razširjenost barvnih sprememb ter
- pojava notranjih napetosti in vlažnostnega gradienta, napaka pa se lahko pokaže šele v nadaljnji predelavi.

Vse napake niso nujno posledica nepravilnega sušilnega postopka.

**Preglednica 2.1:** Vpliv kakovosti lesa ali sušilnega postopka na pojav napak (Gorišek, 1997)



Za določanje kakovosti je potrebno določiti povprečno vlažnost, vlažnostni gradient in stopnjo zaskorjenosti. Druge napake, kot so razpoke (pokline, satavost, čelne reže in napoke), kolaps, obarvanja (biotska in abiotska) in veženja (lok, sloč, zavitost), se ocenjujejo po potrebi.

Gorišek (1997) navaja, na kaj je potrebno paziti pri ocenjevanju kakovosti. Pri ocenjevanju kakovosti je seveda potrebno ločiti med inherentnimi lastnostmi lesa oziroma napakami, ki nastanejo zaradi nepravilno izbranega, izvedenega ali vodenega sušilnega postopka (pregl. 2.1). Vsekakor moramo poudariti, da že napake, ki nastanejo v specifičnih razmerah rasti ali napake zaradi heterogene in anizotropne zgradbe lesa, pomenijo potencialno nevarnost, da se v postopku hidro-termične obdelave še močneje odrazijo, prav tako pa lahko s primerno obdelavo njihov vpliv močno zmanjšamo. V posameznih primerih je vse napake težko pripisati enemu ali drugemu dejavniku. Nekatere, ki jih najdemo na suhem lesu, lahko nastanejo zaradi kakovosti lesa ali zaradi nepravilnega sušenja.

Za zagotavljanje doseganja optimalne kakovosti suhega lesa se zahteva nenehni nadzor z ugotavljanjem stanja lesa pred sušenjem, kontrolo med sušenjem in oceno kakovosti po sušenju (Gorišek, 1997).

### 3 MATERIAL IN METODE

#### 3.1 MATERIAL

Specifične lastnosti lesne vrste, problematika sušenja in razširjenost drevesne vrste v proizvodnji, so bili razlogi za preučevanje vpliva štirih različnih sušilnih postopkov sušenja na kakovost sušenja bukovine (*Fagus sylvatica* L.).

Les bukve ima visoko gostoto, je trd in se zelo krči in nabreka. Nezaščiten les je podvržen okužbi z glivami in insekti ter je le zmerno trajen, zato je potrebna hitra in pravilna manipulacija po poseku. Notranje napetosti so lahko znatne, kar ima za posledico zvijanje in pokanje lesa. Zaradi visoke gostote in nagnjenosti k distorzijam, zvijanju, pokanju in nastajanju rjavo-rdečih, rdečemu srcu podobnih obarvanj, se za sušenje bukovine priporoča blag režim sušenja.

##### 3.1.1 Izbira lesa

V podjetju LIKO Vrhnika smo na skladišču žaganega lesa naključno izbrali deske debeline 34 mm iz sveže posekanih bukovih dreves, ki so bila v primarni obdelavi lesa razžagana v različne asortimente.

Zavedamo se, da ima kvaliteta vloženega lesa v sušilni proces izreden pomen na to, kakšen bo končni rezultat posušenega lesa. Izbrali smo deske različnih začetnih vlažnosti, različnih orientiranosti branik in smeri rasti brez notranjih napetosti, površinskih razpok, brez grč in enakomerno barvno usklajene, skratka les prve kvalitete.

Iz desk smo izžagali več vzporednih vzorcev, ki smo jih kasneje uporabili v različnih sušilnih procesih.

Uporabljen je bil les bukovine z območja Postojne.

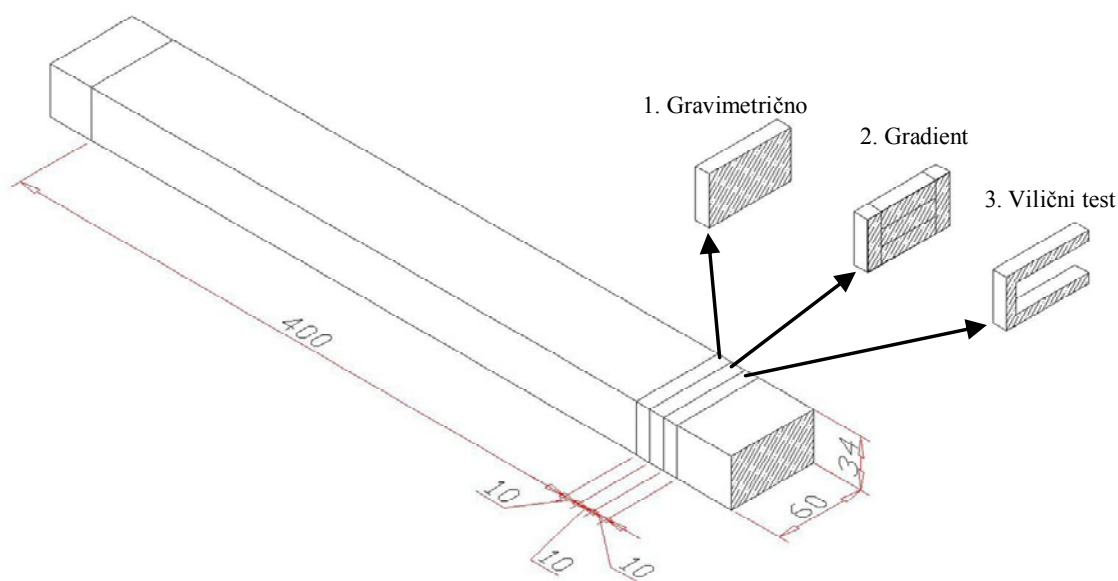
Za izbor te drevesne vrste smo se odločil, ker nam bukev pri sušenju lesa velikokrat povzroča težave. Bukkev pa je tista lesna vrsta, ki je najbolj komercialno zanimiva, oziroma je njena uporaba v proizvodnji zelo razširjena.

### 3.2 METODE

Pred pričetkom sušenja lesa smo pripravili elemente za sušenje. Ocenili smo kakovost vzorcev, na kar je sledilo sušenje ter spremljanje sušenja in na koncu sušenja ponovna ocenitev kakovosti sušenja lesa.

### 3.2.1 Priprava lesa

Deske povprečne debeline 34 mm, ki so imele vlažnost okrog 75 %, smo razžagali v elemente. Iz razžaganih vzorcev smo izbrali elemente brez napak, z radialno in tangencialno teksturo. Elementi, ki smo jih pripravili z dolžinsko nad mero, so bili dimenzij 500 x 60 x 34mm. Pred sušenjem se je les že nekoliko zračno posušil.



**Slika 3.1:** Priprava kontrolnih vzorcev

Pred vsakim postopkom smo elemente še dodatno pripravili za sušenje. Naredili smo vzorce za kontrolo kakovosti ter elemente prečno razžagali na končno dolžino. Dimenzije elementov, ki smo jih uporabljali za sušenje z različnimi postopki, so bile 400 x 60 x 34 mm (sl. 3.1). Ker ima na potek sušenja velik vpliv tudi vzdolžno gibanje vode, ki povzroči prehitro osušitev čel, smo vsa čela elementov zaščitili z sredstvom Stipol (proizvajalca Silvaproduct), ki preprečuje vzdolžno izhajanje vode.

### 3.2.2 Kontrola kakovosti

Kakovost smo ocenjevali pred pričetkom sušenja, med sušenjem in po končanem sušenju. Z izžaganimi kontrolnimi odrezki smo določili vlažnost, gradient in napetost. Za merjenje lesne vlažnosti smo uporabili gravimetrično metodo (metoda tehtanja), da smo se izognili vplivu hitrejšega sušenja čelnih površin, smo od čela odžagali približno 3 cm. Nato pa smo odžagali po tri vzorce, ki so bili naši kontrolni vzorci.

### 3.2.2.1 Vlažnost lesa in vlažnostni gradient

Vse meritve povprečne vlažnosti lesa smo opravili gravimetrično z metodo tehtanja (EN 13183-1:2002). Vlažnost lesa ( $u$ ) smo izračunali po definicijski formuli:

$$u = \frac{m_v}{m_0} * 100 = \frac{m_{vl} - m_0}{m_0} * 100 [\%] \quad \dots(1)$$

$u$  - vlažnost lesa [%]

$m_v$  - masa vode [g]

$m_{vl}$  - masa vlažnega lesa [g]

$m_0$  - masa lesa v absolutno suhem stanju [g]

Prvi vzorec smo uporabili za določevanje lesne vlažnosti po gravimetrični metodi. Vzorec dimenzij 60 x 34,4 x 10 mm smo očistili žagovine in drobnega iverja ter ga stehali v svežem stanju ( $m_{vl}$ ). Potem smo vzorec posušili v laboratorijskem sušilniku do sušilnično (absolutno) suhega stanja ( $m_0$ ), pri temperaturi  $103 \pm 2^\circ\text{C}$  in vzorec smo ponovno stehali. Uporabili smo tehtnico z natančnostjo tehtanja do 0,01 g natančno in laboratorijski sušilnik, ki je zagotavljal vzdrževanje temperature  $103 \pm 2^\circ\text{C}$  natančno. Lesno vlažnost ( $u$ ) smo izračunali po definicijski formuli (1).

Vlažnostni gradient smo ugotavljali na vzorcih širine 10 mm, ki smo jih po debelini razrezali na 3 sloje in jim odstranili bočne dele. Vlažnost posameznega sloja smo določali gravimetrično in izračunali vlažnostni gradient po enačbi (2).

$$\frac{\Delta u}{\Delta x} = \frac{u_{srednji} - u_{zunanji}}{\Delta x} \left[ \frac{\%}{cm} \right] \quad \dots(2)$$

$\Delta u / \Delta x$  - vlažnostni gradient [%/cm]

$u_{srednji}$  - vlažnost srednjega sloja [%]

$u_{zunanji}$  - vlažnost zunanjega sloja [%]

$\Delta x$  - razdalja med zunanjim in srednjim slojem [cm]

### 3.2.2.2 Spremljanje vlažnosti lesa med sušenjem

Vlažnost lesa med sušenjem smo spremljali tako, da smo proces sušenja prekinjali in elemente enega za drugim vzeli iz komore ter jih stehali na 0,1 g natančno. Te prekinitve so bile zelo kratke in niso vplivale na potek sušenja. Trenutno vlažnost lesa smo tako izračunali po formuli:

$$u_t = \frac{m_t}{m_z} (u_z + 100) - 100 [\%] \quad \dots(3)$$

$u_t$  - trenutna vlažnost lesa [%]

$u_z$  - začetna vlažnost lesa [%]

$m_t$  - trenutna masa elementa [g]

$m_z$  - masa elementa pred začetkom sušenja [g]

Ker pa vakuumskega sušenja ni bilo mogoče prekinjati, smo vlažnost lesa spremljali z električnim vlagomerom GANN, ki je bil preko posebnega priključka priključen na komoro.

### 3.2.2.3 Hitrost sušenja

Hitrost sušenja smo izračunali z razliko povprečne vlažnosti in z razliko časov časa sušenja lesa. Hitrost sušenja smo tako izračunali po definicijski formuli:

$$\frac{\Delta u}{\Delta t} = \frac{\bar{u}_p - \bar{u}_t}{t_t - t_p} [\%/min] \quad \dots(4)$$

$\Delta u / \Delta t$  - hitrost sušenja [%/min]

$\bar{u}_p$  - povprečna predhodna vlažnost [%]

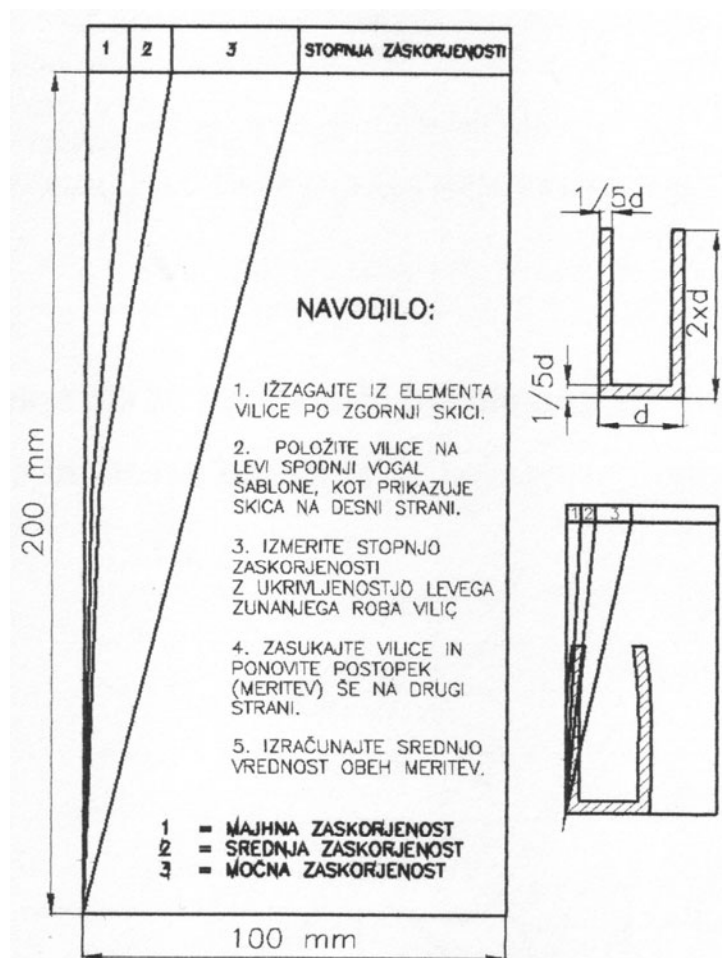
$\bar{u}_t$  - povprečna trenutna vlažnost [%]

$t_p$  - predhodni čas sušenja [min]

$t_t$  - trenutni čas sušenja [min]

### 3.2.2.4 Meritve notranjih napetosti

Meritve notranjih napetosti smo opravili po metodi z viličnim testom s pomočjo tretjega vzorca, kjer je bila širina vzorca manjša od 100 mm. Stopnjo zaskorjenosti smo ocenili po predlogi (sl. 3.2)

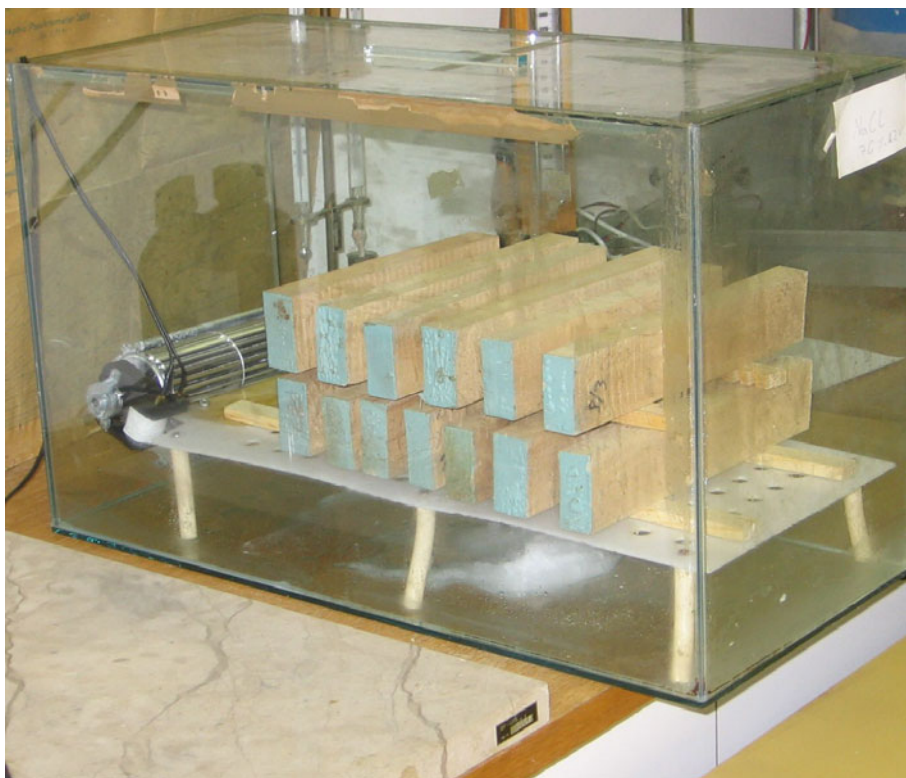


**Slika 3.2:** Skica za izdelavo vilic in diagram za določitev stopnje zaskorjenja z viličnim testom (Welling, 1993)

### 3.2.3 Sušenje lesa na prostem pri konstantnih sušilnih pogojih

Sušenje lesa na prostem pri konstantnih sušilnih pogojih smo simulirali v posebni komori, v kateri smo vzdrževali enakomerno klimo in temperaturo ter stalno gibanje zraka s pomočjo ventilatorja. Relativno zračno vlažnost 75 % smo zagotovili s pomočjo soli (NaCl), ki je bila na dnu komore. Vseh preizkušancev v komori je bilo 13, ti pa so bili dvignjeni od dna komore prib. 10 cm. Komora je imela aksialen ventilator, ki je pospešil gibanje zraka in posledično tudi samo sušenje (sl. 3.3).

Spremljanje vlažnosti lesa je potekalo tako, da smo proces sušenja prekinjali. Preizkušance smo vzeli iz komore in jih tehtali na 0,1 g natančno. Prekinitve so bile zelo kratke in niso vplivale na potek sušenja, vlažnost vzorcev smo izračunali po definicijski formuli (2).



**Slika 3.3:** Komora za sušenja lesa pri konstantnih sušilnih pogojih (Laboratorij za sušenje lesa, Oddelek za lesarstvo)

### 3.2.4 Komorsko sušenje lesa z delno izmenjavo zraka

Za simulacijo sušenja lesa v komori smo uporabljali laboratorijski sušilnik, ki smo ga prilagodili zahtevam. V komoro smo postavili termometer in higrometer, s pomočjo katerih smo vodili celoten postopek sušenja. Sušenje lesa v komori je potekalo po Angleškem režimu za debelino lesa 34 mm (pregl. 3.1). Simulacijo komorskega sušenja smo spremljali s 13 preizkušanci, ki smo jih sukcesivno tehtali.



**Slika 3.4:** Komora za sušenje lesa z delno izmenjavo zraka (Laboratorij za sušenje lesa, Oddelek za lesarstvo)

**Preglednica 3.1:** Angleški režim sušenja za bukev (*Fagus sylvatica* L.), debeline 34 mm (začetna vlažnost (uz) končna vlažnost (uk), ravnovesna vlažnost (ur), temperatura suhega termometra ( $T_s$ ), temperatura vlažnega termometra ( $T_v$ ), psihrometska razlika ( $\Delta T$ ), relativna zračna vlažnost (RZV))

| Faza            | Vlažnost - u[%]    |                    |                    | Temperatura         |                     |                 | RZV        | Ostrina  | Čas   |               |
|-----------------|--------------------|--------------------|--------------------|---------------------|---------------------|-----------------|------------|----------|-------|---------------|
|                 | u <sub>z</sub> [%] | u <sub>k</sub> [%] | u <sub>r</sub> [%] | T <sub>s</sub> [°C] | T <sub>v</sub> [°C] | $\Delta T$ [°C] | $\phi$ [%] |          | t [h] | $\Sigma$ [h]  |
| Segrevanje      | 75                 | 75                 | 22,4               | 40,5                | 39,5                | 1,0             | 96         | $\leq 1$ | 8,66  | 8,66          |
| Sušenje         | 75                 | 60                 | 16,8               | 40,5                | 38,0                | 2,5             | 85         | 4,46     | 17,33 | 25,99         |
|                 | 60                 | 40                 | 15,7               | 40,5                | 37,5                | 3,0             | 82         | 3,82     | 31,49 | 57,48         |
|                 | 40                 | 35                 | 12,6               | 40,5                | 35,5                | 5,0             | 71         | 3,17     | 10,37 | 67,85         |
|                 | 35                 | 30                 | 10,6               | 43,5                | 36,0                | 7,5             | 64         | 3,30     | 11,15 | 79,00         |
|                 | 30                 | 25                 | 8,5                | 46,0                | 36,0                | 10,0            | 51         | 3,53     | 12,47 | 91,47         |
|                 | 25                 | 20                 | 6,8                | 51,5                | 38,0                | 13,5            | 41         | 3,68     | 13,63 | 105,10        |
|                 | 20                 | 15                 | 4,8                | 60,0                | 40,5                | 19,5            | 32         | 4,17     | 15,08 | 120,18        |
|                 | 15                 | 8                  | 4,2                | 65,5                | 44,5                | 21,0            | 28         | 3,57     | 30,19 | 150,37        |
| Izenačevanje    | 8                  | 8                  | 6                  | 65,5                | 49,5                | 16,0            | 42         | 1,33     | 14,17 | 164,54        |
| Kondicioniranje | 8                  | 8                  | 11                 | 65,5                | 59,5                | 6,0             | 74         | 0,73     | 14,17 | 178,71        |
| Ohlajanje       | 8                  | 8                  | 8                  | /                   | /                   | /               | /          | /        | 8,66  | <b>187,37</b> |

Najprej smo laboratorijsko sušilnico s kontrolnimi vzorci segreli na delovno temperaturo. Najzahtevnejša in hkrati tudi najdaljša faza v procesu sušenja lesa je tista faza sušenja, kjer les oddaja vlago. Les smo sušili toliko časa, dokler vlažnost ni padla pod 8 %.

Po fazi sušenja sta sledili fazi izenačevanja in kondicioniranja po prečnem prerezu obdelovancev.

Po končanem izenačevanju in kondicioniranju smo izvajali še postopek ohlajanja, ki je trajal približno toliko časa, kot postopek segrevanja.

Med samim procesom sušenja smo odvzeli tudi vzorce, s katerimi smo spremljali povprečno vlažnost, vlažnostni gradient in sušilne napetosti med samim procesom sušenja.

### 3.2.5 Sušenje lesa v vakuumu

Za sušenje lesa v vakuumu smo uporabljali vakuumsko – tlačno komoro proizvajalca Kambič (sl. 3.5 in pregl 3.2). Celotna vakuumaska komora je izdelana iz nerjavečega materiala. Plašč sušilnika je ogrevan s specialnimi grelci, ki so pritrjeni na obodu komore. Temperaturo komore in program delovanja smo nastavljali na programatorju, oziroma z vključitvijo ustreznih stikal in ventilov. Za vakuumiranje komore smo uporabljali membransko vakuumsko črpalko. Omogočeno je tudi spremljanje temperature komore, temperature lesa in tlaka ter možnost izpisovanja teh parametrov po izbranem časovnem intervalu.



Slika 3.5: Vakuumaska komora (Laboratorij za zaščito lesa, Oddelek za lesarstvo)

**Preglednica 3.2:** Tehnični podatki vakuumske komore

Dimenzije delovnega prostora:

|                      |                                    |
|----------------------|------------------------------------|
| - premer             | 210 mm                             |
| - globina            | 600 mm                             |
| - prostornina        | 0,021 m <sup>3</sup>               |
| Priključna moč       | 2000 W                             |
| Grelci               | 1 x 210 W, 1 x 270 W, 1 x 1025 W   |
| Temperaturno območje | 5°C nad sobno temperaturo do 200°C |
| Tlak                 | 0,03 bar - 10 bar                  |
| Vakuumska črpalka    | MZ 2C, Vacuumbrand                 |

Kontrolna in merilna oprema:

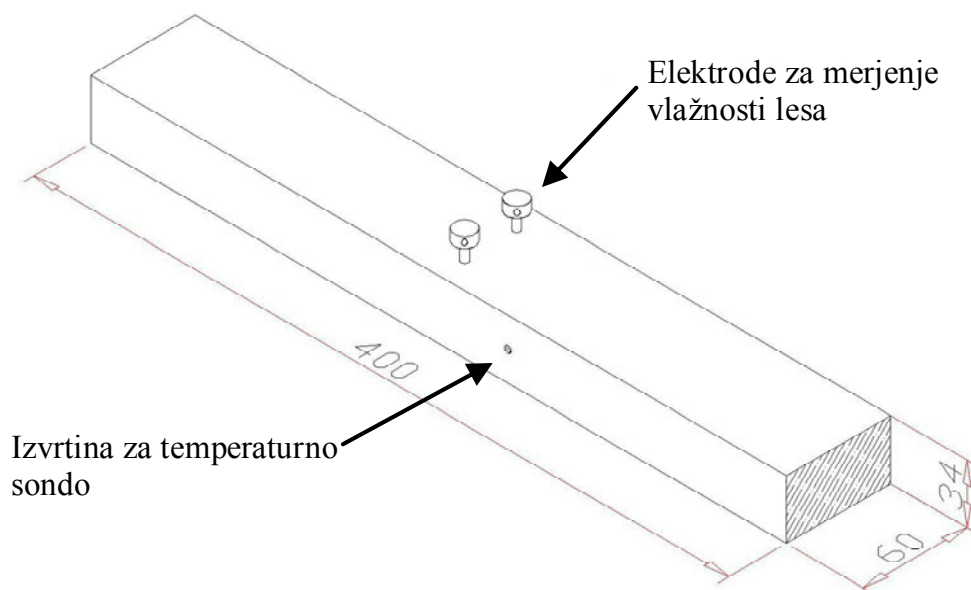
|                          |                                    |
|--------------------------|------------------------------------|
| Temperaturni regulator   | DIGITERM                           |
| Temperaturna sonda       | PT 100                             |
| Vakuummeter              | od -1bar do +15 bar                |
| Elektronski senzor tlaka | ECO - TRONIC, od -1 bar do +15 bar |

Izvajali smo kontinuirano vakuumsko sušenje bukovine s prirejenim programom (pregl. 3.3). Programi sušenja so definirani s temperaturo komore in temperaturo v sredini lesa, ki je predpostavljena glede na dosežen podtlak. Program se prilagaja vlažnostnemu stanju lesa.

**Preglednica 3.3:** Program sušenja v vakuumu za bukev (*Fagus sylvatica* L.) 34 mm

| Vlažnost lesa u (%) | Ravnovesna vlažnost ur (%) | Temperatura (°C) |     |
|---------------------|----------------------------|------------------|-----|
|                     |                            | Komora           | Les |
| 60 - 50             | 17                         | 68               | 54  |
| 50 - 40             | 15                         | 68               | 54  |
| 40 - 30             | 11                         | 70               | 56  |
| 30 - 25             | 5                          | 75               | 61  |
| 25 - 20             | 4                          | 78               | 64  |
| 20 - 15             | 4                          | 85               | 71  |
| 15 - 8              | 3                          | 88               | 74  |

Za postopek sušenja v vakuumu smo posebej pripravili vzorec (sl. 3.6) z izvrtinami za merjenje temperature in lesne vlažnosti. Sonda za merjenje temperature lesa je bila vstavljena s strani in sicer prib. 150 mm od čela in na sredini debeline elementa. Elektrode za merjenje lesne vlažnosti so bile vstavljene 200 mm od čela, do ½ debeline elementov in 30 mm narazen, saj je bilo to pomembno za natančnost meritve.



**Slika 3.6:** Posebej pripravljen vzorec za vakuumsko sušenje

S kontinuiranim vakuumskim sušenjem smo najprej začeli s fazo segrevanja, nadaljevali s fazo sušenja in zaključili s fazo kondicioniranja. Med procesom sušenja smo dvigovali temperaturo komore po izbranem režimu, glede na doseženo vlažnost lesa.

Po sušenju lesa je sledilo kondicioniranje, ki smo ga izvajali tako, da smo znižali temperaturo komore in dvignili absolutni tlak.

Med postopkom sušenja smo spremljali temperaturo komore, temperaturo lesa in tlak v komori ter te parametre izpisovali po izbranem časovnem intervalu.

### 3.2.6 Sušenje lesa v polju visoke frekvence

Les smo sušili v visokofrekvenčni stiskalnici proizvajalca KLI Logatec, s stopenjsko diskretno regulacijo moči generatorja in frekvenco 6,3 Mhz ter z nastavitvijo časa sušenja (sl. 3.7).

Bukovino s skupnim številom sedmih vzorcev smo sušili z močjo druge stopnje visokofrekvenčnega generatorja. Sušenje lesa z visokofrekvenčnim generatorjem je trajalo 2 h in 20 min. Ker so vzorci na začetku vsebovali nekoliko več vlage, smo v prvih dveh intervalih sušili po 25 min, nato pa nadaljevali z intervali po 15 min z vmesnimi presledki, med katerimi smo vzorce tehtali, merili temperaturo in določevali vlažnost.

Ker je les, kljub predhodnemu sušenju, imel visoko vlažnost, smo na vrata zaščitne kletke frekvenčne sušilnice dodatno postavili ventilator, ki je pospešil gibanje zraka med vzorci in posledično tudi samo sušenje. S tem smo se izognili morebitnim nevšečnostim, ki bi prišle pri preboju kondenzatorja in preprečili kondenzacijo oddane vlage na ploščah visokofrekvenčne sušilnice.



**Slika 3.7:** Visokofrekvenčna sušilnica (Laboratorij za žagarstvo in lesna tvoriva, Oddelek za lesarstvo)

**Preglednica 3.4:** Nastavitev moči generatorja po stopnjah

| Stopnja: | Moč [kW] |
|----------|----------|
| 1        | 2        |
| 2        | 4        |
| 3        | 6        |
| 4        | 8        |
| 5        | 10       |

Sušenje lesa smo izvajali med aluminijastimi elektrodami dimenzij 500 x 500 x 2 mm. Potekalo je toliko časa, dokler vlažnost kontrolnega vzorca ni padla pod zastavljeno vlažnost 8 %. Po opravljeni fazi sušenja sta sledili še fazi izenačevanja in kondicioniranja.

Spremljanje vlažnosti lesa je potekalo tako, da smo proces sušenja prekinjali. Preizkušance smo vzeli iz sušilnice in jih tehtali na 0,1 g natančno. Prekinitve so bile zelo kratke in niso vplivale na potek sušenja, vlažnost vzorcev pa smo izračunali po definicijski formuli (2).

Merjenje temperature smo izvajali z električnim vlagomerom GANN, na katerega smo priključili sondo za merjenje temperature.

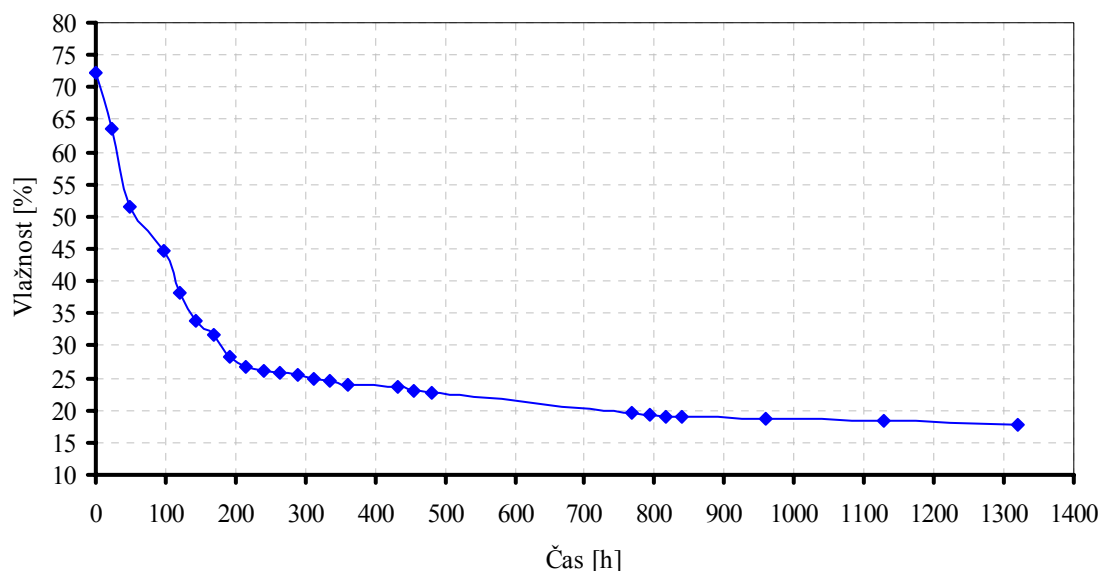
Med samim procesom sušenja smo odvzeli tudi vzorce, s katerimi smo spremljali vlažnost, vlažnostni gradient in sušilne napetosti.

## 4 REZULTATI

### 4.1 PREDSTAVITEV REZULTATOV SUŠENJA

#### 4.1.1 Naravno sušenje - sušenje lesa pri konstantnih sušilnih pogojih

Simulacija naravnega sušenja v prostoru s kontrolirano klimo je trajala 1320 ur. Začetna vlažnost svežega lesa je bila 72,1 %, v vzpostavljenih pogojih ( $T = 22^{\circ}\text{C}$ ,  $\phi = 75\%$ ,  $u_r = 14,5\%$ ) smo dosegli 17,8 % vlažnost. Da bi dosegli ravnovesno vlažnost 14,5 %, bi morali sušenje podaljšati, tega pa nismo storili, saj je bila sušina hitrost zelo nizka in bi tako bil sušilni postopek dolgotrajen. Iz grafa je razvidno, da so preizkušanci med postopkom sušenja v vzpostavljenih pogojih izgubil 54,4 % vlažnosti (sl. 4.1 pril. A).



**Slika 4.1:** Sušilna krivulja med postopkom naravnega sušenja bukovine pri konstantnih sušilnih pogojih ( $RZV = 75\%$ ,  $T = 22^{\circ}\text{C}$ ,  $u_r = 14,5\%$ )

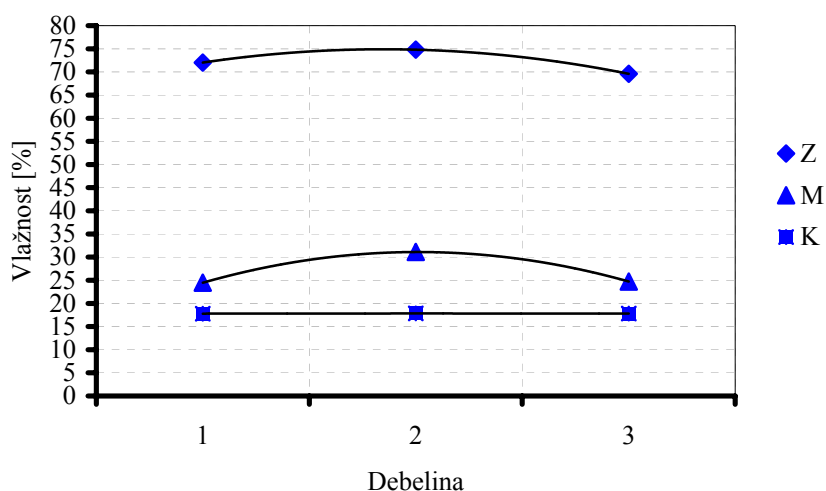
##### 4.1.1.1 Hitrost sušenja in kakovost preizkušancev pri postopku naravnega sušenja

Vlažnostni gradient pri naravnem sušenju smo določali v treh vlažnostnih območjih, in sicer pri vlažnosti nad TNCS (Z), v območju TNCS (M) in od TNCS pa do konca sušenja (K) (pregl. 4.1 in pril. E). Vlažnostni gradient nad TNCS (Z) je v povprečju znašal 2,75 %/cm. V območju TNCS (M) se je vlažnostni gradient nekoliko povešal in je v znašal povprečju 4,63 %/cm. Po končanem sušenju, oz. v območju pod TNCS (K) se je vlažnostni gradient občutno zmanjšal in v povprečju znašal 0,02 %/cm (pregl. 4.2).

Zaradi dolgotrajnega sušenja se je vlažnostni gradient izenačil in v lesu ni bilo več bistvenih razlik v vlažnosti.

**Preglednica 4.1:** Porazdelitev vlažnosti v bukovini v treh vlažnostnih območjih ( $u_{\text{zač.}} - u_{\text{TNCS}} (Z)$ ,  $u_{\text{TNCS}} (M)$ ,  $u_{\text{TNCS}} - u_{\text{kon.}} (K)$ ) pri postopku naravnega sušenja, na zunanjih (1,3) in notranjem (2) sloju preizkušanca ter osnovna statistika

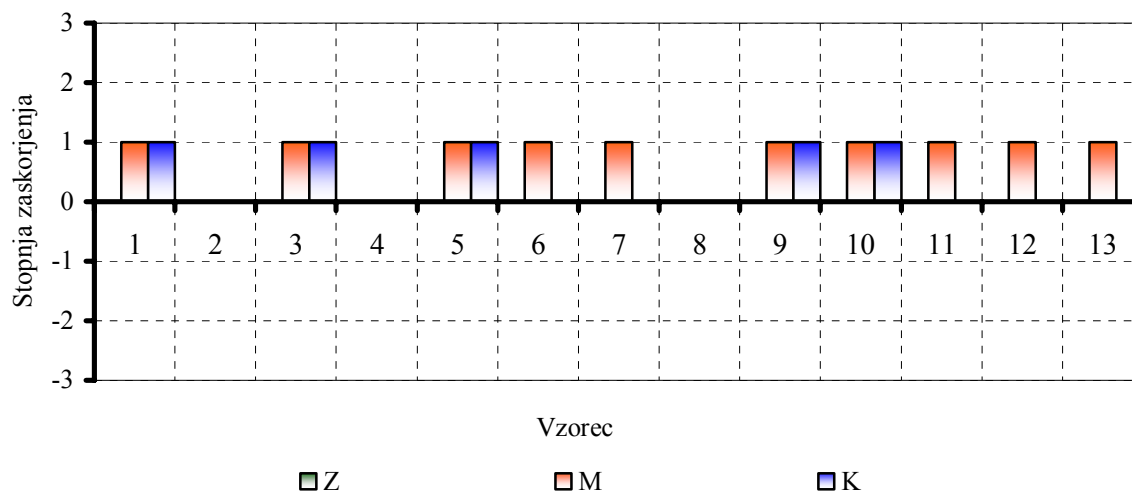
| Oddaljenost od površine: | Kontrola stanja | n   | $\bar{u}$ | $u_{\text{max}}$ | $u_{\text{min}}$ | $\sigma$ | KV    |
|--------------------------|-----------------|-----|-----------|------------------|------------------|----------|-------|
|                          |                 | [ ] | [%]       | [%]              | [%]              | [ ]      | [%]   |
| 1                        | Z               | 13  | 72,0      | 102,54           | 59,13            | 14,26    | 19,80 |
|                          | M               | 13  | 24,5      | 26,88            | 22,33            | 1,29     | 5,26  |
|                          | K               | 13  | 17,8      | 18,53            | 17,31            | 0,35     | 1,95  |
| 2                        | Z               | 13  | 74,8      | 110,64           | 58,51            | 14,36    | 19,20 |
|                          | M               | 13  | 31,1      | 34,73            | 27,70            | 2,26     | 7,25  |
|                          | K               | 13  | 17,8      | 18,55            | 17,34            | 0,34     | 1,92  |
| 3                        | Z               | 13  | 69,6      | 92,69            | 55,51            | 11,08    | 15,92 |
|                          | M               | 13  | 24,7      | 26,92            | 22,32            | 1,34     | 5,42  |
|                          | K               | 13  | 17,8      | 18,54            | 17,29            | 0,35     | 1,98  |



**Slika 4.2:** Porazdelitev povprečne vlažnosti po debelini pri naravnem postopku sušenja bukovine v treh vlažnostnih območjih ( $u_{\text{zač.}} - u_{\text{TNCS}} (Z)$ ,  $u_{\text{TNCS}} (M)$ ,  $u_{\text{TNCS}} - u_{\text{kon.}} (K)$ ), pri konstantnih sušilnih pogojih ( $RZV=75\%$ ,  $T=22^{\circ}\text{C}$ ,  $u_r=14,5\%$ )

Pri naravnem sušenju (uravnovešanju lesa pri konstantnih pogojih) so bili vzorci v območju nad TNCS (Z) popolnoma brez sušilnih napetosti. Pri kontroli med sušenjem, oz. v območju TNCS (M), se zaskorjenost ni pojavila pri 23.1 % preizkušancev, ostali preizkušanci pa so bili zaskorjeni s prvo stopnjo, teh je bilo 76,9 % oz. povprečna stopnja zaskorjenosti je bila 0,77. Po končanem sušenju oz. v območju pod TNCS (K) pa se je zaskorjenost prve stopnje pojavila pri 38,5 % preizkušancev, ostali preizkušanci pa so bili brez napetosti, teh je bilo 61,5 % oz. povprečna stopnja zaskorjenja je bila 0,38 (pregl. 4.2).

Skozi celoten postopek sušenja je bilo 38.5 % preizkušancev popolnoma brez napetosti (sl. 4.3).

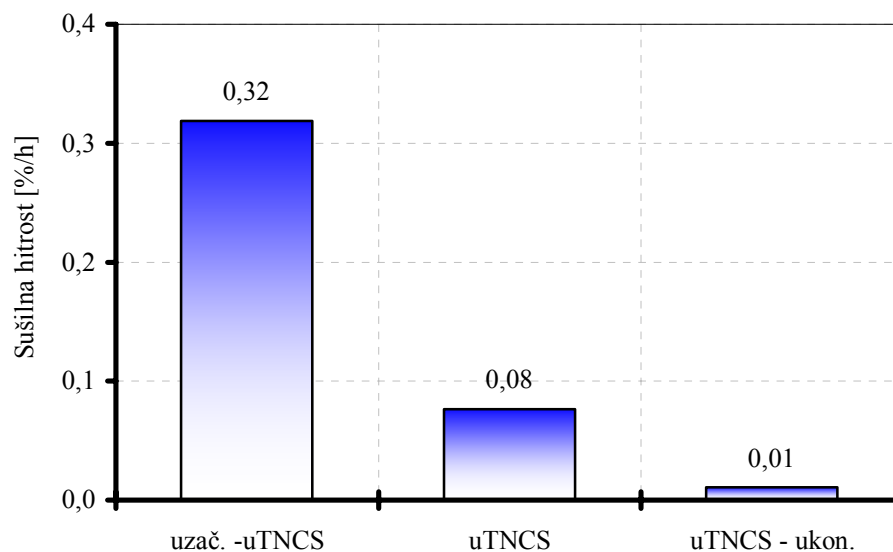


**Slika 4.3:** Stopnja zaskorjenosti pred in po postopku naravnega sušenja bukovine v treh vlažnostnih območjih ( $u_{\text{zač.}} - u_{\text{TNCS}} (Z)$ ,  $u_{\text{TNCS}} (M)$ ,  $u_{\text{TNCS}} - u_{\text{kon.}} (K)$ ) pri konstantnih sušilnih pogojih ( $RZV=75\%$ ,  $T=22^{\circ}\text{C}$ ,  $u_r=14,5\%$ )

**Preglednica 4.2:** Sušilna hitrost ( $\Delta u/\Delta t$ ), vlažnostni gradient ( $\Delta u/\Delta x$ ) in stopnja zaskorjenja (S.Z.) z osnovno statistiko v treh vlažnostnih območjih pri naravnem postopku sušenja pri konstantnih sušilnih pogojih ( $RZV=75\%$ ,  $T=22^{\circ}\text{C}$ ,  $u_r=14,5\%$ )

|                                         | $\Delta u/\Delta t$ [%/h] | $\Delta u/\Delta x$ [%/cm] | S.Z.:       |
|-----------------------------------------|---------------------------|----------------------------|-------------|
| $u_{\text{zač.}} - u_{\text{TNCS}} (Z)$ | 0,32                      | 2,75                       | 0           |
| $u_{\text{TNCS}} (M)$                   | 0,08                      | 4,63                       | 0,77        |
| $u_{\text{TNCS}} - u_{\text{kon.}} (K)$ | 0,01                      | 0,02                       | 0,38        |
| Min:                                    | 0,00                      | -1,14                      | 0,00        |
| Max:                                    | 0,51                      | 9,22                       | 1,00        |
| <b>Povprečje:</b>                       | <b>0,08</b>               | <b>2,47</b>                | <b>0,38</b> |
| $\sigma$ [ ]                            | 0,13                      | 2,66                       | 0,49        |
| KV [%]                                  | 156,63                    | 107,82                     | 126,49      |

Pri naravnem sušenju (uravnovešanju lesa pri konstantnih pogojih), se je les nad TNCS (Z) sušil z hitrostjo 0,32 %/h, v območju TNCS (M) je sušilna hitrost nekoliko padla in je v povprečju znašala 0,08 %/h, od TNCS pa do konca sušenja (K) se je les v povprečju sušil z hitrostjo 0,01%/h. Skozi celoten postopek pa se je les v poprečju sušil s hitrostjo 0,08 %/h. Iz grafa (sl. 4.4) in iz preglednice (preg. 4.2) je razvidno, da je s padanjem vlažnosti padala tudi sušilna hitrost.



**Slika 4.4:** Sušilna hitrost v treh vlažnostnih območjih ( $u_{\text{zač.}} - u_{\text{TNCS}}$  (Z),  $u_{\text{TNCS}}$  (M),  $u_{\text{TNCS}} - u_{\text{kon.}}$  (K)) med postopkom naravnega sušenja pri konstantnih sušilnih pogojih (RZV=75 %,  $T=22^{\circ}\text{C}$ ,  $u_r=14,5$  %)

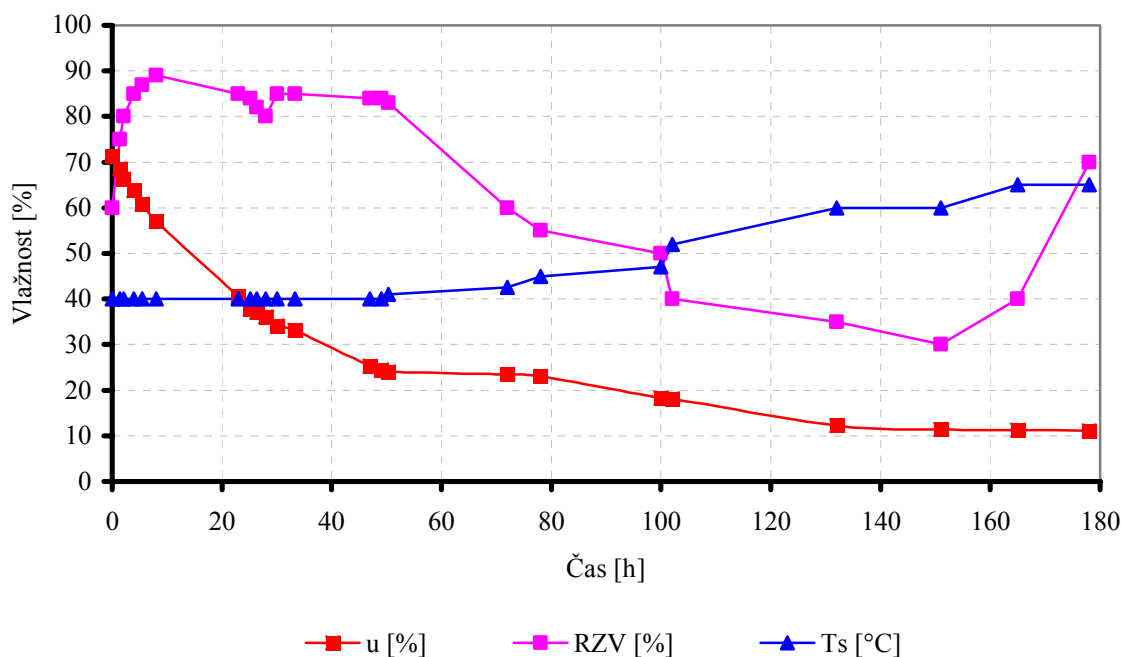
#### 4.1.2 Komorsko sušenje lesa z delno izmenjavo zraka

Sušenje bukovine smo izvajali po načrtovanem programu (pregl. 3.1). V času segrevanja in sušenja lesa je bila dosežena temperatura v sušilnici od  $40$  do  $65^{\circ}\text{C}$  pri relativni zračni vlažnosti od 30 do 89 %. Med postopkom izenačevanja je bila temperatura v komori  $65^{\circ}\text{C}$  pri relativni zračni vlažnosti okrog 40 %. Med postopkom kondicioniranja je temperatura v komori ostala enaka, relativna zračna vlažnost pa se je povišala na 70 % (sl. 4.5 in pril. B).

Pred sušenjem je bila povprečna vlažnost preizkušancev 71,2 %, po končanem sušenju je bila povprečna vlažnost preizkušancev 11,1 %. Med postopkom sušenja so tako preizkušanci izgubili 60,1 % vlažnosti.

Čas segrevanja je trajal 8 ur, čas sušenja 143 ur in čas izenačevanja in kondicioniranja pa je trajal 27 ur. Celotno sušenje je skupaj trajalo 178 ur.

Ker je bil laboratorijski sušilnik nekakšna improvizacija sušilne komore, je bilo z njim zelo težko ves čas vzpostavljati take sušilne pogoje, kot so bili zastavljeni po programu (pregl. 3.1). To je bila najverjetneje posledica tega, da je bila končna vlažnost višja od želene za 3,1 %. Čas sušenja bi morali podaljšati, da bi dosegli zastavljeno vlažnost  $8\% \pm 1\%$ .



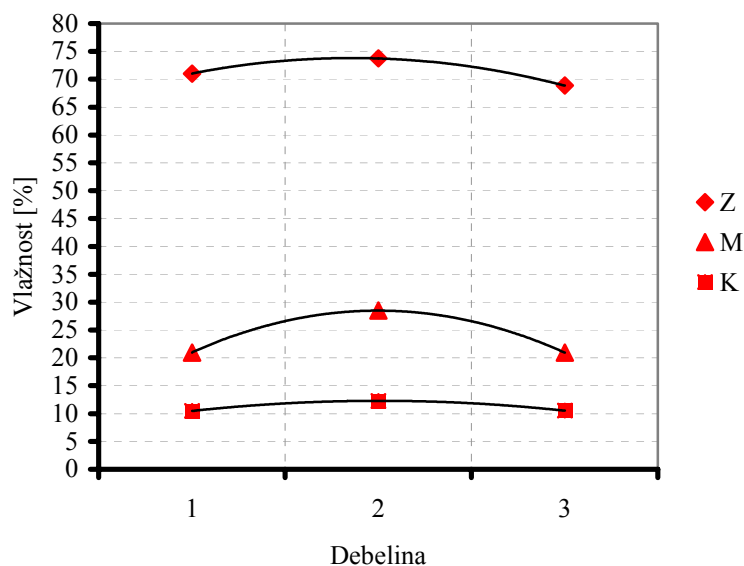
**Slika 4.5:** Sušilna krivulja in pogoji med sušenjem bukovine v komorski sušilnici po Angleškem režimu (  $T_s$  - Temperatura suhega termometra, RZV ( $\varphi$ ) - relativna zračna vlažnost,  $u$  - vlažnost lesa)

#### 4.1.2.1 Hitrost sušenja in kakovost preizkušancev pri komorskem postopku

Vlažnostni gradient smo določali nad TNCS (Z), v območju TNCS (M) in pod TNCS (K) (sl. 4.6 in pril. F). Vlažnostni gradient je nad TNCS je v povprečju znašal 2,62 %/cm. V območju TNCS se je vlažnostni gradient v povprečju nekoliko povešal in je znašal 5,53 %/cm. Po končanem sušenju oz. pod TNCS je bil vlažnostni gradient nekoliko nižji in je v povprečju znašal 1,3 %/cm (pregl. 4.4).

**Preglednica 4.3:** Porazdelitev vlažnosti v bukovini v treh vlažnostnih območjih ( $u_{\text{zač.}}$  -  $u_{\text{TNCS}}$  (Z),  $u_{\text{TNCS}}$  (M),  $u_{\text{TNCS}}$  -  $u_{\text{kon.}}$  (K)) pri postopku komorskega sušenja po Angleškem režimu, na zunanjih (1,3) in notranjem (2) sloju preizkušanca ter osnovna statistika

| Oddaljenost od površine: | Kontrola stanja | n   | $\bar{u}$   | $u_{\max}$ | $u_{\min}$ | $\sigma$ | KV    |
|--------------------------|-----------------|-----|-------------|------------|------------|----------|-------|
|                          |                 | [ ] | [ % ]       | [ % ]      | [ % ]      | [ ]      | [ % ] |
| 1                        | Z               | 13  | <b>71,0</b> | 100,55     | 55,45      | 14,12    | 19,88 |
|                          | M               | 13  | <b>21,0</b> | 25,50      | 18,35      | 2,07     | 9,88  |
|                          | K               | 13  | <b>10,5</b> | 13,19      | 8,62       | 1,38     | 13,13 |
| 2                        | Z               | 13  | <b>73,7</b> | 107,32     | 57,00      | 14,00    | 18,98 |
|                          | M               | 13  | <b>28,5</b> | 34,94      | 22,50      | 3,16     | 11,08 |
|                          | K               | 13  | <b>12,3</b> | 16,63      | 9,54       | 2,08     | 16,92 |
| 3                        | Z               | 13  | <b>68,8</b> | 91,76      | 54,90      | 10,99    | 15,97 |
|                          | M               | 13  | <b>20,9</b> | 25,63      | 17,29      | 2,32     | 11,07 |
|                          | K               | 13  | <b>10,5</b> | 13,29      | 8,93       | 1,38     | 13,14 |

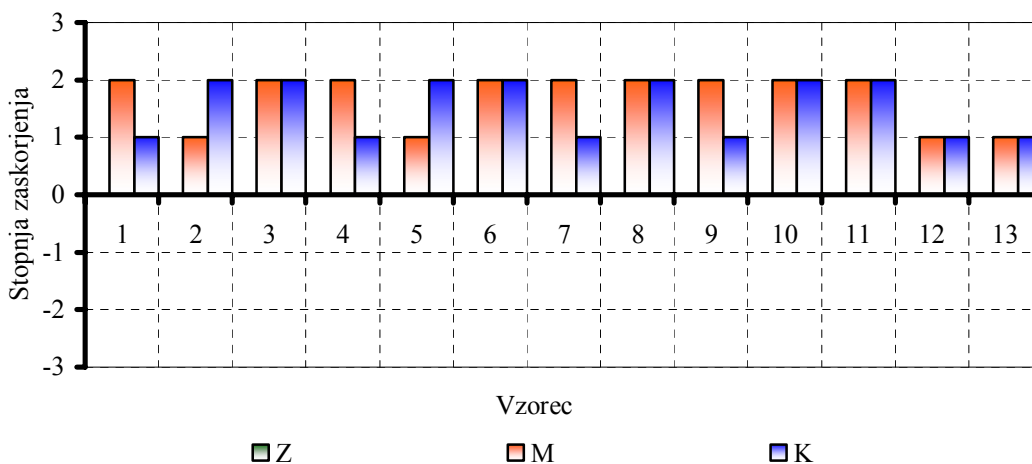


**Slika 4.6:** Porazdelitev povprečne vlažnosti po debelini pri komorskem sušenju bukovine po Angleškem režimu v treh vlažnostnih območjih ( $u_{\text{zač.}} - u_{\text{TNCS}}$  (Z),  $u_{\text{TNCS}}$  (M),  $u_{\text{TNCS}} - u_{\text{kon.}}$  (K))

Pri komorskem sušenju so se pojavile notranje napetosti, ki so posledica neenakomernega pospešenega sušenja lesa.

Iz grafa (sl. 4.7) je razvidno, da so bili vzorci pred sušenjem oz. v območju nad TNCS (Z) popolnoma brez napetosti. Pri kontroli med sušenjem oz. v območju TNCS se je zaskorjenje pojavilo pri 100 % preizkušancev. Zaskorjenje do prve stopnje se je pojavilo na 30,8 % preizkušancev, na 69,2 % preizkušancev je bila zaskorjenost do druge stopnje. Povprečna stopnja zaskorjenosti v tem območju je bila 1,69.

Na koncu sušenja oz. v območju pod TNCS (K) je bila zaskorjenost prisotna pri 100 % preizkušancev, od tega je bila zaskorjenost do prve stopnje na 46,2 % preizkušancev in na 53,8 % preizkušancev je bila zaskorjenost druge stopnje. Povprečna stopnja zaskorjenosti v območju pod TNCS je bila 1,54.

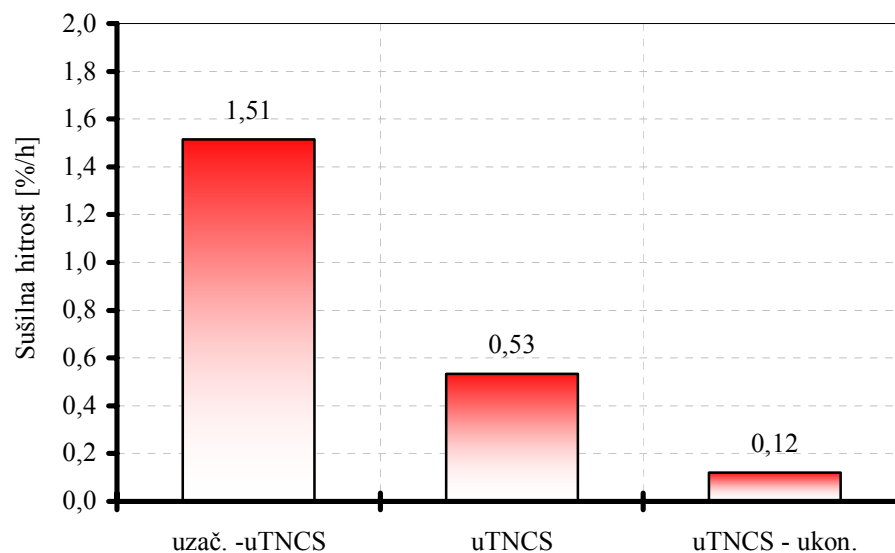


**Slika 4.7:** Stopnja zaskorjenosti pred, med in po postopku komorskega sušenja bukovine v treh vlažnostnih območjih ( $u_{\text{zač.}} - u_{\text{TNCS}}$  (Z),  $u_{\text{TNCS}}$  (M),  $u_{\text{TNCS}} - u_{\text{kon.}}$  (K))

**Preglednica 4.4:** Sušilna hitrost ( $\Delta u/\Delta t$ ), vlažnostni gradient ( $\Delta u/\Delta x$ ) in stopnja zaskorjenja (S.Z.) z osnovno statistiko v treh vlažnostnih območjih pri komorskem postopku sušenja

|                                         | $\Delta u/\Delta t$ [%/h] | $\Delta u/\Delta x$ [%/cm] | S.Z.:       |
|-----------------------------------------|---------------------------|----------------------------|-------------|
| $u_{\text{zač.}} - u_{\text{TNCS}} (Z)$ | 1,51                      | 2,62                       | 0,00        |
| $u_{\text{TNCS}} (M)$                   | 0,53                      | 5,53                       | 1,69        |
| $u_{\text{TNCS}} - u_{\text{kon.}} (K)$ | 0,12                      | 1,30                       | 1,54        |
| Min:                                    | 0,01                      | -1,79                      | 0,00        |
| Max:                                    | 3,20                      | 9,32                       | 2,00        |
| <b>Povprečje:</b>                       | <b>0,82</b>               | <b>3,15</b>                | <b>1,08</b> |
| $\sigma$ [ ]                            | 0,81                      | 2,81                       | 0,86        |
| KV [%]                                  | 98,82                     | 89,08                      | 79,75       |

Pri postopku komorskega sušenja se je les v območju nad TNCS (Z) sušil s hitrostjo 1,51 %/h, v območju TNCS (M) je sušilna hitrost nekoliko padla in je v povprečju znašala 0,53 %/h in v območju od TNCS pa do konca sušenja (K) se je les v povprečju sušil z hitrostjo 0,12 %/h. Skozi celoten postopek pa se je les v povprečju sušil s hitrostjo 0,81 %/h. Iz grafa (sl. 4.8) in iz preglednice (preg. 4.4) je razvidno, da je s padanjem vlažnosti padala tudi sušilna hitrost.

**Slika 4.8:** Sušilna hitrost v treh vlažnostnih območjih ( $u_{\text{zač.}} - u_{\text{TNCS}} (Z)$ ,  $u_{\text{TNCS}} (M)$ ,  $u_{\text{TNCS}} - u_{\text{kon.}} (K)$ ) med postopkom komorskega sušenja bukovine po Angleškem režimu

#### 4.1.3 Sušenje v vakuumu

Kontinuirano vakuumsko sušenje bukovine smo izvajali po prilagojenem programu (preg. 3.2). V času segrevanja in dogrevanja lesa je bila dosežena temperatura komore od 68 do 88 °C pri tlaku 1,000 bar, v času vakuumiranja pri enaki temperaturi so bili tlaki od 0,140 do 0,191 bara, med kondicioniranjem pa je bila temperatura 73 °C pri tlaku od 0,475 do 0,702 bara (sl. 4.9 in pril. C )

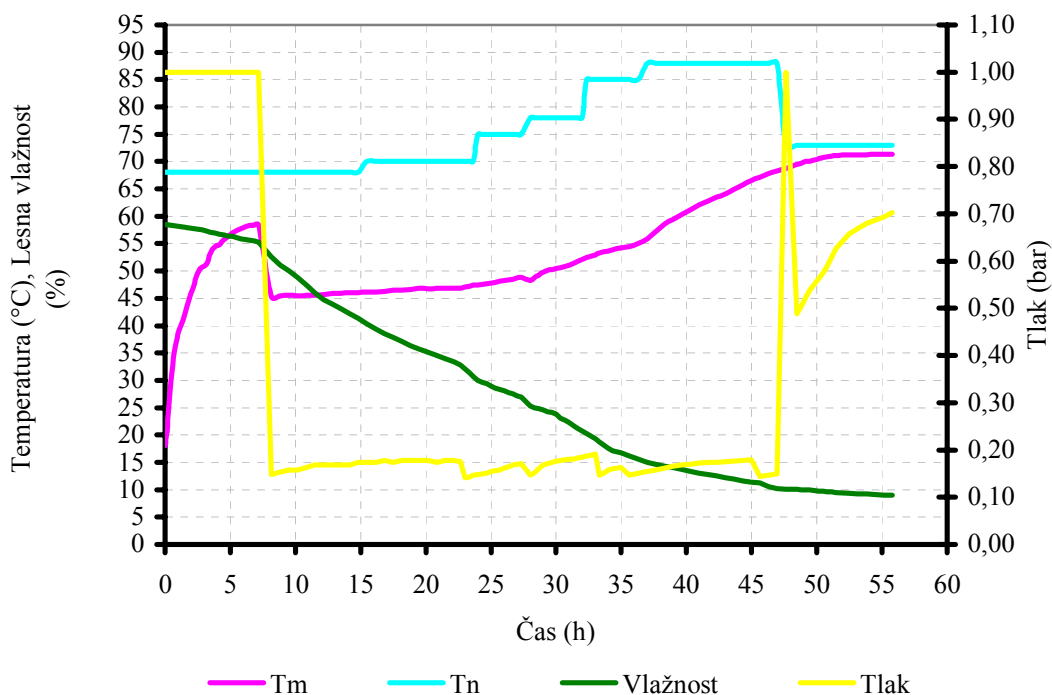
Pred sušenjem je bila povprečna vlažnost preizkušancev 58,4 %, po končanem sušenju pa so imeli preizkušanci povprečno vlažnost 9,8 %, med postopkom sušenja so preizkušanci izgubili 48,6 % vlažnosti.

Končna vlažnost je bila nekoliko višja od želene, vendar še vedno v mejah sprejemljivosti. Čas sušenja je bilo potrebno podaljšati, da bi dosegli ustrezno vlažnost 8 %±1 %.

V času segrevanja je bila dosežena temperatura lesa v sredini ( $T_m$ ) 58,5 °C. V času vakuumiranja je temperatura v sredini lesa naraščala, saj je bila komora ves čas vakuumiranja ogrevana. V začetku vakuumiranja je temperatura v sredini lesa ( $T_m$ ) znašala 45,1°C na koncu vakuumiranja pa 68,6°C. Dogrevanje lesa se je vršilo pri nižjih tlakih, zato se je les tudi počasneje segreval.

Temperatura lesa v sredini ( $T_m$ ) je bila na začetku vakuumiranja za 22,9°C in na koncu za 19,9°C nižja glede na program.

Segrevanje je trajalo 7 ur in 20minut. Čas vakuumiranja in dogrevanja pa je bil 39 ur in 58 minut. Čas izenačevanja in kondicioniranja pa je bil 8 ur in 30 minut.



**Slika 4.9:** Sušilna krivulja in pogoji sušenja bukovine med kontinuiranim vakuumskim sušenjem (  $T_k$  - temperatura komore,  $T_m$  - temperatura lesa,  $T_n$  - nastavljena temperatura)

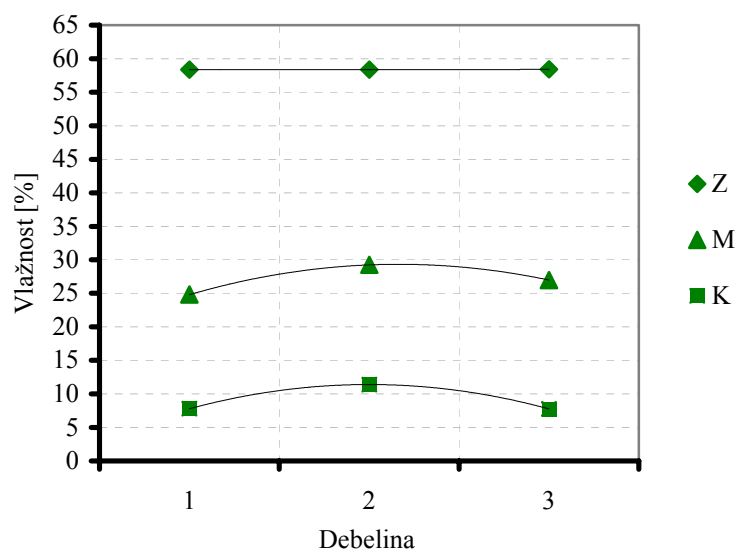
## 4.1.3.1 Hitrost sušenja in kakovost preizkušancev pri postopku vakuumskega sušenja

Vlažnostni gradient smo določali v območju nad TNCS (Z), v območju TNCS (M) in v območju pod TNCS (K) (sl. 4.10 in pril. G). Vzorci so bili v območju nad TNCS (Z) popolnoma brez vlažnostnega gradienta. V območju TNCS (M) se je vlažnostni gradient nekoliko povečal in je v povprečju znašal 2,42 %/cm. V območju vlažnosti pod TNCS je vlažnostni gradient v povprečju znašal 2,61 %/cm (pregl. 4.6).

Vlažnostni gradient je po končanem sušenju dokaj visok, za zmanjšanje le-tega pa bi bilo potrebno podaljšati čas kondicioniranja.

**Preglednica 4.5:** Porazdelitev vlažnosti v treh vlažnostnih območjih ( $u_{\text{zač.}} - u_{\text{TNCS}}$  (Z),  $u_{\text{TNCS}}$  (M),  $u_{\text{TNCS}} - u_{\text{kon.}}$  (K)) pri postopku kontinuiranega vakuumskega sušenja, na zunanjih (1,3) in notranjem (2) sloju preizkušanca ter osnovna statistika

| Oddaljenost od površine: | Kontrola stanja | n   | $\bar{u}$ | $u_{\text{max}}$ | $u_{\text{min}}$ | $\sigma$ | KV    |
|--------------------------|-----------------|-----|-----------|------------------|------------------|----------|-------|
|                          |                 | [ ] | [%]       | [%]              | [%]              | [ ]      | [%]   |
| 1                        | Z               | 7   | 58,4      | 76,11            | 44,08            | 10,63    | 18,21 |
|                          | M               | 7   | 24,8      | 29,72            | 15,46            | 5,07     | 20,43 |
|                          | K               | 7   | 7,8       | 8,21             | 7,05             | 0,41     | 5,26  |
| 2                        | Z               | 7   | 58,4      | 69,65            | 46,02            | 7,18     | 12,30 |
|                          | M               | 7   | 29,2      | 35,32            | 16,42            | 5,98     | 20,45 |
|                          | K               | 7   | 11,4      | 11,78            | 11,06            | 0,23     | 2,00  |
| 3                        | Z               | 7   | 58,4      | 73,63            | 43,97            | 9,83     | 16,84 |
|                          | M               | 7   | 27,0      | 34,13            | 20,52            | 4,67     | 17,31 |
|                          | K               | 7   | 7,8       | 8,20             | 7,54             | 0,20     | 2,52  |

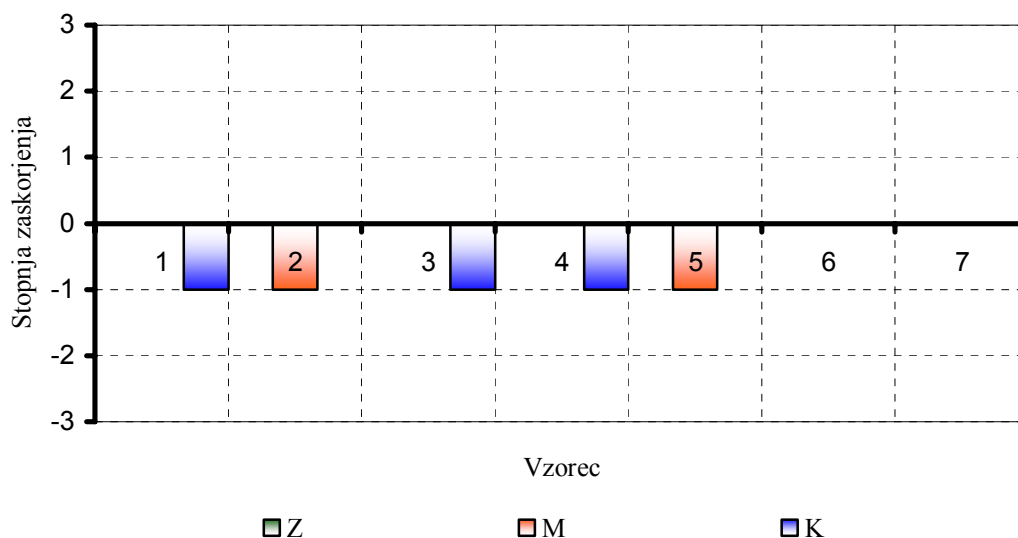


**Slika 4.10:** Vlažnostni gradient pri kontinuiranem vakuumskem postopku sušenja v treh vlažnostnih območjih ( $u_{\text{zač.}} - u_{\text{TNCS}}$  (Z),  $u_{\text{TNCS}}$  (M),  $u_{\text{TNCS}} - u_{\text{kon.}}$  (K))

Iz grafa (sl. 4.11) je razvidno, da so bili vzorci pred sušenjem oz. v območju nad TNCS (Z) popolnoma brez napetosti. Pri kontroli med sušenjem oz. v območju TNCS se zaskorjenost ni pojavila pri 71,4 % preizkušancev. Obratna zaskorjenost do prve stopnje se je pojavila na 28,6 % preizkušancev. Povprečna stopnja zaskorjenosti v območju TNCS je bila -0,29.

Na koncu sušenja oz. v območju pod TNCS (K) se zaskorjenost ni pojavila pri 57,1 % preizkušancev. Obratna zaskorjenost do prve stopnje se je pojavila na 42,9 % preizkušancev. Povprečna stopnja zaskorjenosti v območju pod TNCS je bila -0,43.

Skozi celoten postopek sušenja je bilo 28,6 % preizkušancev popolnoma brez napetosti (sl. 4.11).

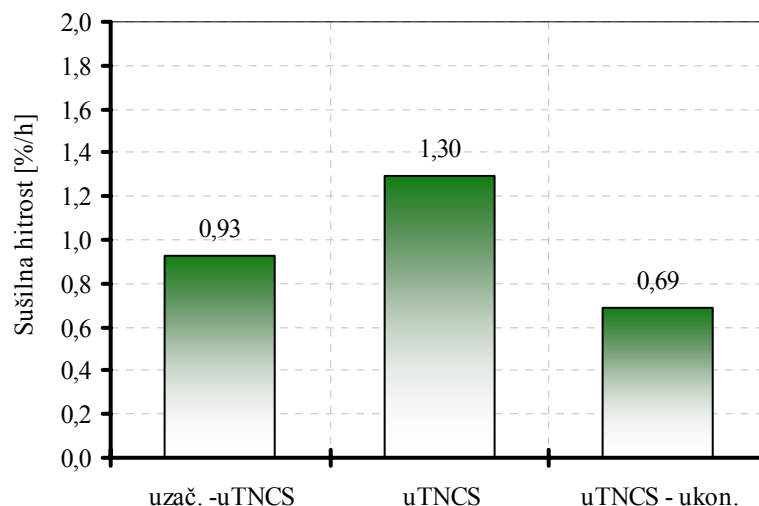


**Slika 4.11:** Stopnja zaskorjenosti pri kontinuiranem vakuumskem postopku sušenja v treh vlažnostnih območjih ( $u_{\text{zač.}} - u_{\text{TNCS}}$  (Z),  $u_{\text{TNCS}}$  (M),  $u_{\text{TNCS}} - u_{\text{kon.}}$  (K))

**Preglednica 4.6:** Sušilna hitrost ( $\Delta u / \Delta t$ ), vlažnostni gradient ( $\Delta u / \Delta x$ ) in stopnja zaskorjenja (S.Z.) z osnovno statistiko v treh vlažnostnih območjih pri vakuumskem postopku sušenja

|                                         | $\Delta u / \Delta t$ [%/h] | $\Delta u / \Delta x$ [%/cm] | S.Z.:   |
|-----------------------------------------|-----------------------------|------------------------------|---------|
| $u_{\text{zač.}} - u_{\text{TNCS}}$ (Z) | 0,93                        | 0,00                         | 0,00    |
| $u_{\text{TNCS}}$ (M)                   | 1,30                        | 2,42                         | -0,29   |
| $u_{\text{TNCS}} - u_{\text{kon.}}$ (K) | 0,69                        | 2,61                         | -0,43   |
|                                         |                             |                              |         |
| Min:                                    | 0,00                        | -3,72                        | -1,00   |
| Max:                                    | 2,70                        | 4,69                         | 0,00    |
| Povprečje:                              | 0,87                        | 1,68                         | -0,24   |
| $\sigma$ [ ]                            | 0,63                        | 2,22                         | 0,43    |
| KV [%]                                  | 72,50                       | 132,50                       | -178,89 |

Pri vakuumskem sušenju se je les nad TNCS sušil s hitrostjo 0,93 %/h, v območju TNCS se je sušilna hitrost nekoliko povešala in je v povprečju znašala 1,3 %/h, od TNCS pa do konca sušenja se je les v povprečju sušil z hitrostjo 0,69 %/h. Skozi celoten postopek pa se je les v povprečju sušil s hitrostjo 0,87 %/h (pregl. 4.4 in sl. 4.12).

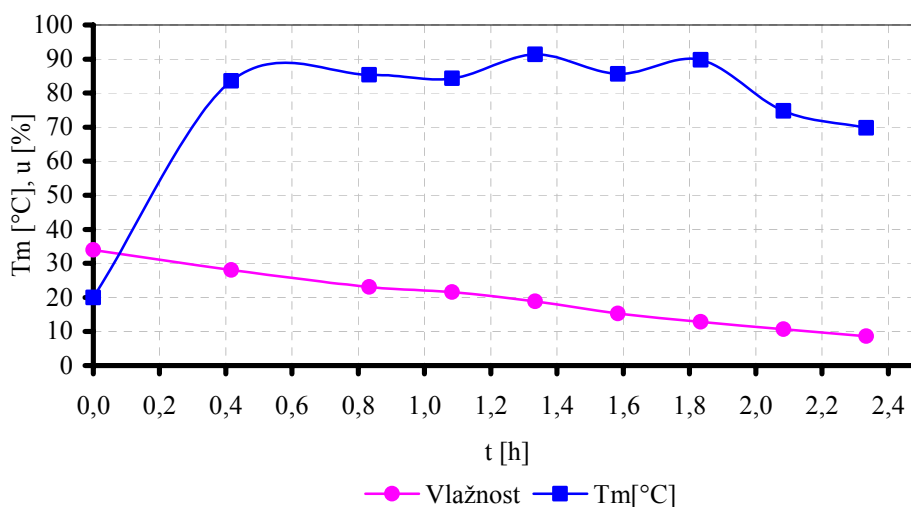


**Slika 4.12:** Sušilna hitrost v treh vlažnostnih območjih ( $u_{\text{zač.}} - u_{\text{TNCS}}$  (Z),  $u_{\text{TNCS}}$  (M),  $u_{\text{TNCS}} - u_{\text{kon.}}$  (K)) med vakuumskim postopkom sušenja bukovine

#### 4.1.4 Sušenje v polju visoke frekvence

Pred samim postopkom visoko frekvenčnega sušenja je bila povprečna vlažnost preizkušancev 34,0 %, po končanem sušenju je bila povprečna vlažnost preizkušancev 8,7%. Iz tega je razvidno, da so preizkušanci med samim postopkom izgubili 25,3 % vlažnosti. Ciljna vlažnost osušenega lesa je bila 8 % z odstopanjem  $\pm 1$  %, kar smo tudi dosegli (sl. 4.13 in pril. D).

V času sušenja lesa z visokofrekvenčnim generatorjem je bila dosežena temperatura lesa v sredini od 20,0 do 91,4°C



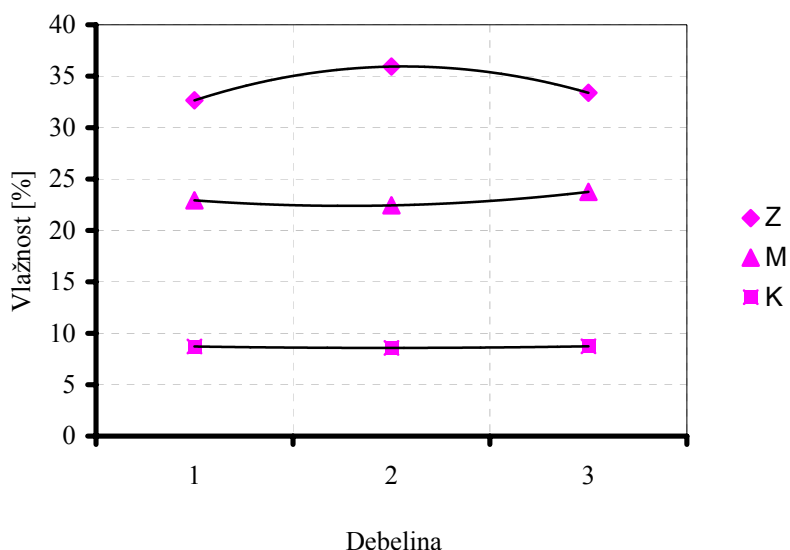
**Slika 4.13:** Potek sušenja v polju visoke frekvence (Lesna vlažnost -  $u$  [%], Temperatura materiala -  $T_m$  [°C], Čas sušenja -  $t$  [h])

## 4.1.4.1 Hitrost sušenja in kakovost preizkušancev pri postopku sušenja z visoko frekvenco

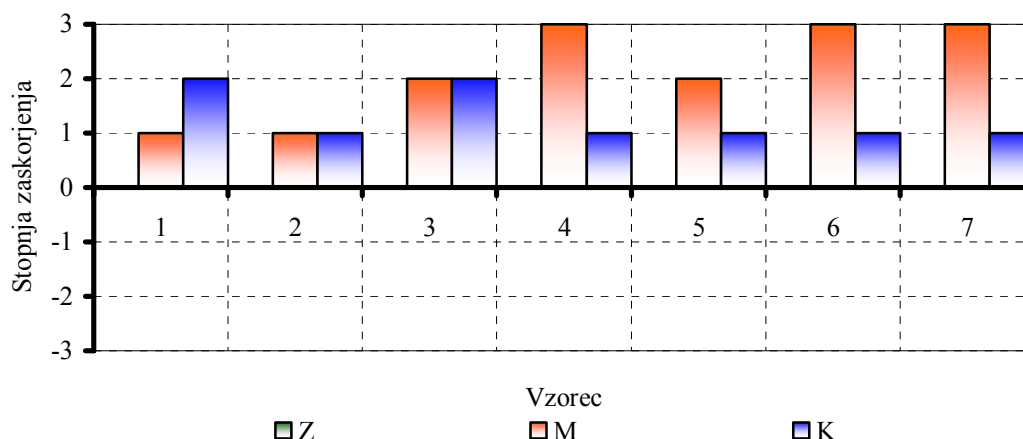
Vlažnostni gradient smo določali v območju nad TNCS (Z), v območju TNCS (M) in v območju pod TNCS (K) (pregl. 4.7, sl. 4.14 in pril. H). V območju nad TNCS (Z) se je vlažnostni gradient v povprečju znašal 1,9 %/cm. V območju TNCS (M) se je vlažnostni gradient nekoliko zmanjšal in je v povprečju znašal -0,21 %/cm. V območju vlažnosti pod TNCS je vlažnostni gradient v povprečju znašal -0,07 %/cm (pregl. 4.8).

**Preglednica 4.7:** Porazdelitev vlažnosti v treh vlažnostnih območjih ( $u_{\text{zač.}} - u_{\text{TNCS}}$  (Z),  $u_{\text{TNCS}}$  (M),  $u_{\text{TNCS}} - u_{\text{kon.}}$  (K)) pri postopku visokofrekvenčnega sušenja na zunanjih slojih(1,3) in notranjem (2) sloju preizkušanca ter osnovna statistika

| Oddaljenost od površine: | Kontrola stanja | n   | $\bar{u}$ | $u_{\text{max}}$ | $u_{\text{min}}$ | $\sigma$ | KV    |
|--------------------------|-----------------|-----|-----------|------------------|------------------|----------|-------|
|                          |                 | [ ] | [%]       | [%]              | [%]              | [ ]      | [%]   |
| 1                        | Z               | 7   | 32,6      | 39,31            | 29,60            | 3,07     | 9,39  |
|                          | M               | 7   | 22,9      | 28,09            | 14,98            | 4,53     | 19,76 |
|                          | K               | 7   | 8,7       | 13,08            | 6,96             | 2,03     | 23,32 |
| 2                        | Z               | 7   | 35,9      | 39,32            | 33,02            | 1,94     | 5,39  |
|                          | M               | 7   | 22,4      | 33,57            | 12,18            | 8,90     | 39,67 |
|                          | K               | 7   | 8,6       | 11,48            | 6,21             | 1,98     | 23,09 |
| 3                        | Z               | 7   | 33,4      | 37,10            | 30,79            | 1,83     | 5,47  |
|                          | M               | 7   | 23,7      | 27,38            | 19,01            | 2,96     | 12,48 |
|                          | K               | 7   | 8,7       | 11,79            | 6,97             | 1,67     | 19,16 |



**Slika 4.14:** Porazdelitev povprečne vlažnosti po debelini med sušenjem v polju visoke frekvence v treh vlažnostnih območjih ( $u_{\text{zač.}} - u_{\text{TNCS}}$  (Z),  $u_{\text{TNCS}}$  (M),  $u_{\text{TNCS}} - u_{\text{kon.}}$  (K))



**Slika 4.15:** Stopnja zaskorjenosti v treh vlažnostnih območjih ( $u_{\text{zač.}} - u_{\text{TNCS}}$  (Z),  $u_{\text{TNCS}}$  (M),  $u_{\text{TNCS}} - u_{\text{kon.}}$  (K)) pri postopku visokofrekvenčnega sušenja bukovine

Pri visokofrekvenčnem sušenju so se pojavile notranje napetosti, ki so posledica pospešenega sušenja lesa.

Iz grafa (sl. 4.15) je razvidno, da so bili vzorci pred sušenjem oz. v območju nad TNCS (Z) popolnoma brez napetosti. Pri kontroli med sušenjem oz. v območju TNCS se je zaskorjenost pojavila pri 100 % preizkušancev. Zaskorjenost do prve stopnje se je pojavila na 28,6 % preizkušancev, na 28,6 % preizkušancev je bila zaskorjenost do druge stopnje in pri 42,9 % preizkušancev se je pojavilo zaskorjenje tretje stopnje. Povprečna stopnja zaskorjenosti v tem območju je bila 2,14.

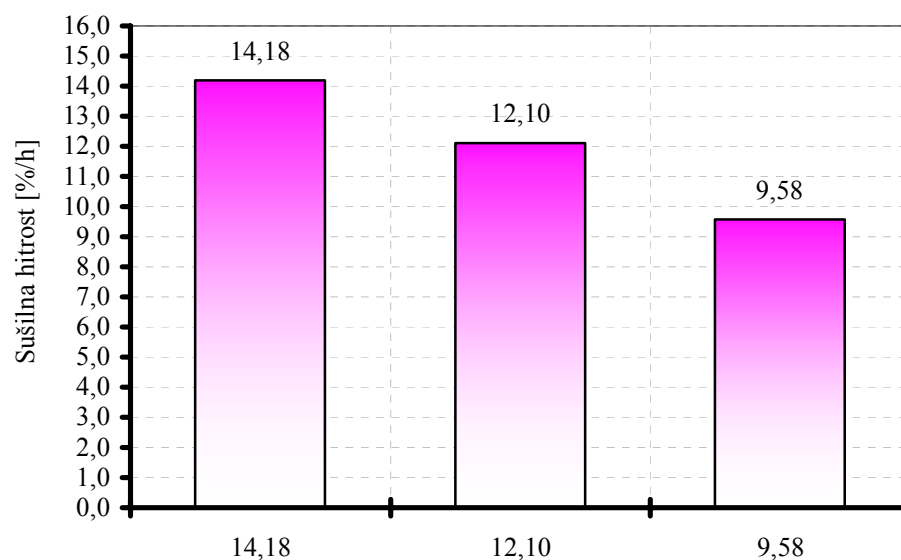
Pri odvzemanju vzorcev za določevanje vlažnosti, vlažnostnega gradienta in stopnje zaskorjenosti je bila opažena ena notranja razpoka ki je najverjetneje posledica velikih notranjih napetosti.

Na koncu sušenja oz. v območju pod TNCS (K) je bila zaskorjenost prisotna pri 100 % preizkušancev, od tega je bila zaskorjenost do prve stopnje na 71,4 % preizkušancev in na 28,6 % preizkušancev je bila zaskorjenost druge stopnje. Povprečna stopnja zaskorjenosti v območju pod TNCS je bila 1,29

**Preglednica 4.8:** Sušilna hitrost ( $\Delta u / \Delta t$ ), vlažnostni gradient ( $\Delta u / \Delta x$ ) in stopnja zaskorjenosti (S.Z.) z osnovno statistiko v treh vlažnostnih območjih pri postopku visoko frekvenčnega sušenja bukovine

|                                     | $\Delta u / \Delta t$ [%/h] | $\Delta u / \Delta x$ [%/cm] | S.Z.: |
|-------------------------------------|-----------------------------|------------------------------|-------|
| $u_{\text{zač.}} - u_{\text{TNCS}}$ | 14,18                       | 1,90                         | 0,00  |
| $u_{\text{TNCS}}$                   | 12,10                       | -0,21                        | 2,14  |
| $u_{\text{TNCS}} - u_{\text{kon.}}$ | 9,58                        | -0,07                        | 1,29  |
|                                     |                             |                              |       |
| Min:                                | 5,92                        | -5,71                        | 0,00  |
| Max:                                | 14,24                       | 4,54                         | 3,00  |
| Povprečje:                          | 10,47                       | 0,54                         | 1,14  |
| $\sigma$ [ ]                        | 2,78                        | 2,54                         | 1,04  |
| KV [%]                              | 26,53                       | 469,55                       | 90,71 |

Pri sušenju z visoko frekvenco se je les nad TNCS sušil s hitrostjo 14,18 %/h, v območju TNCS je sušilna hitrost nekoliko nižala in je v povprečju znašala 12,10 %/h, od TNCS pa do konca sušenja se je les v povprečju sušil z hitrostjo 9,58 %/h. Skozi celoten postopek pa se je les v povprečju sušil s hitrostjo 10,47 %/h. Iz grafa (sl. 4.16) in iz preglednice (preg. 4.8) je razvidno, da je s padanjem vlažnosti padala tudi sušilna hitrost.



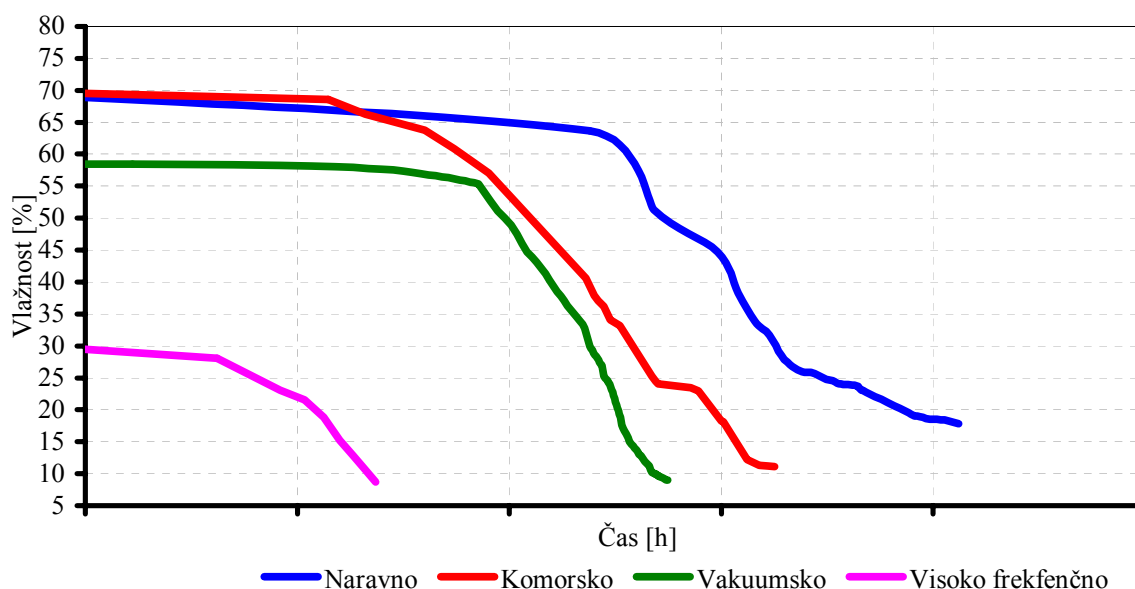
**Slika 4.16:** Sušilna hitrost v treh vlažnostnih območjih ( $u_{\text{zač.}} - u_{\text{TNCS}}$  (Z),  $u_{\text{TNCS}}$  (M),  $u_{\text{TNCS}} - u_{\text{kon.}}$  (K)) med visokofrekvenčnim postopkom sušenja bukovine

## 5 RAZPRAVA

### 5.1 ČASI SUŠENJA:

Rezultati sušenja bukovine so potrdili domnevo, da ima vakuumsko sušenje nekatere prednosti pred ostalimi postopki. Te se najbolj pokažejo v kakovosti osušenega lesa.

Sušenje bukovine je trajalo po naravnem postopku 1320 ur, postopek komorskega sušenja bukovine je trajal 178 ur oz. je bil za 86,5 % krajši od naravnega sušenja. Vakuumsko sušenje je potekalo 55,8 ur oz. je bilo za 95,7 % krajše od naravnega in pa za 68,6 % krajše od komorskega. Postopek visokofrekvenčnega sušenja je potekal 2,33 ur oz. je bil za 99,8 % krajši od naravnega sušenja, za 98,7 % krajši od komorskega postopka in za 95,8 % krajši od vakuumskega sušenja.



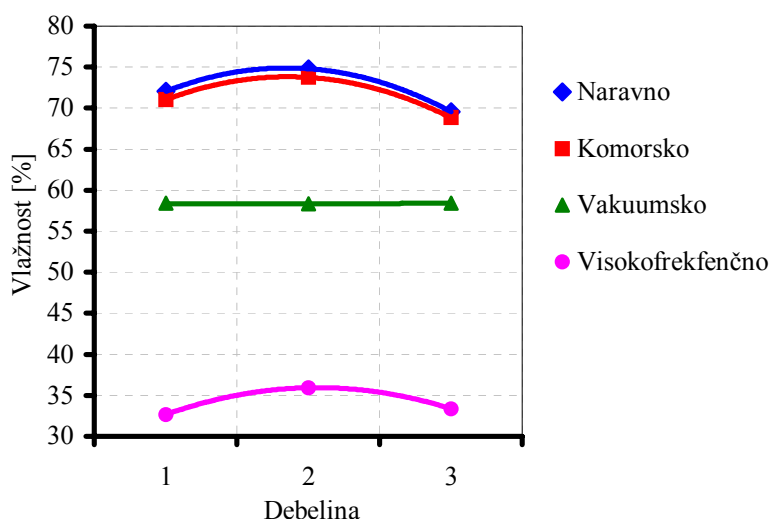
**Slika 5.1:** Primerjava časov sušenja bukovine glede na posamezni postopek

Primerjava časov sušenja bukovine med naravnim, komorskim, vakuumskim in visokofrekvenčnim načinom kaže na učinkovito sušenje v električnem polju visoke frekvence (sl. 5.1). Sušenje lesa v električnem polju visoke frekvence se razlikuje od konvencionalnega sušenja zaradi delovanja elektromagnetnega polja na les. Razliko je moč pripisati predvsem direktnemu in intenzivnemu segrevanju lesa.

## 5.2 KAKOVOST PREIZKUŠANCEV IN HITROST SUŠENJA:

### 5.2.1 Vlažnostni gradient

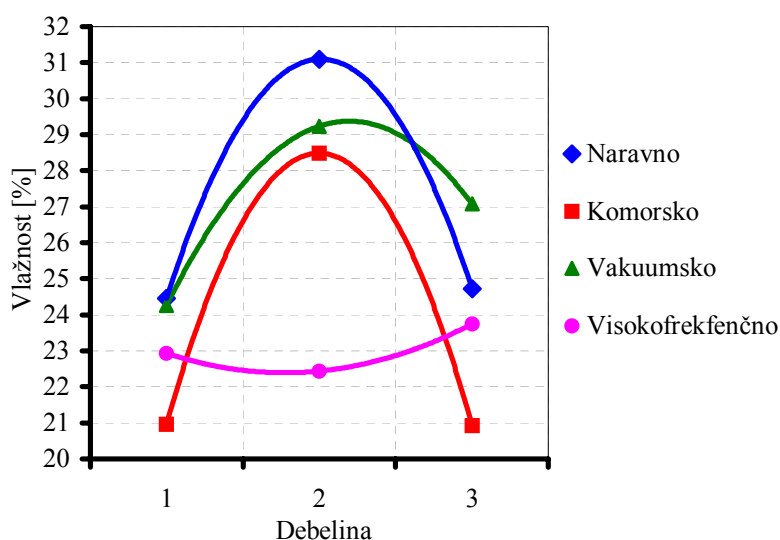
Porazdelitev vlažnosti v območju nad TNCS (Z) (sl. 5.2) je bila pri vseh postopkih približno enaka. Na sredini vzorcev je bila višja vlažnost kot na površini, pri vakuumskem sušenju pa je bila vlažnost enakomerno razporejena po celotnem prerezu.



**Slika 5.2:** Primerjava vlažnostnih gradientov pred postopkom sušenja glede na posamezni sušilni postopek

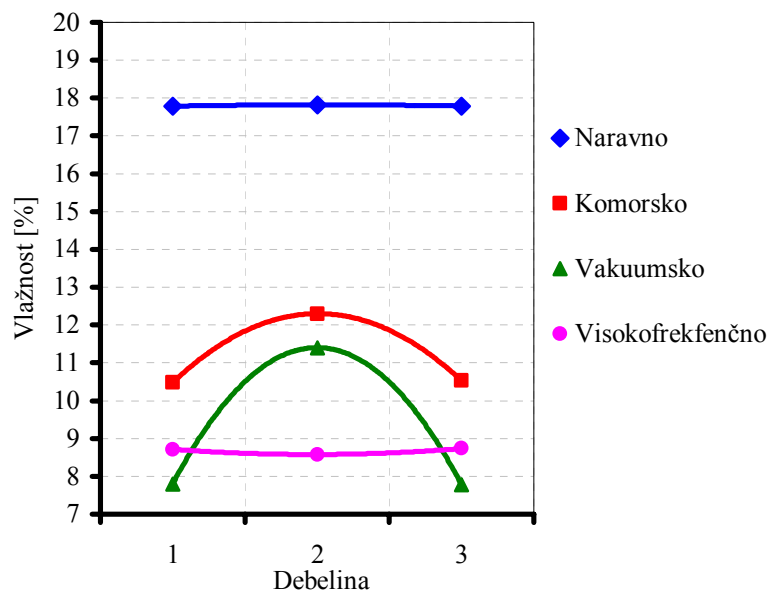
Pri naravnem postopku sušenja je bil povprečni vlažnostni gradient v območju nad TNCS (Z) 2,75 %/cm, pri komorskem 2,62 %/cm, pri vakuumskem sušenju ni bilo vlažnostnega gradienta in pri visoki frekvenci je bil vlažnostni gradient v povprečju 1,90 %/cm.

Vlažnostni gradient med postopkom sušenja (sl. 5.3) se je pri vseh postopkih nekoliko povečal in porazdelitev vlažnosti se je bistveno spremenila.



**Slika 5.3:** Primerjava vlažnostnih gradientov med postopkom sušenja glede na posamezni sušilni postopek

Med postopkom oz. v območju TNCS (M) je bil povprečni vlažnostni gradient pri naravnem postopku 4,63 %/cm, pri komorskem sušenju 5,53 %/cm, pri vakuumskem 2,42 %/cm in pri visoki frekvenci je bil povprečni vlažnostni gradient v območju TNCS -0,21 %/cm.



**Slika 5.4:** Primerjava vlažnostnih gradientov na koncu sušenja glede na posamezni sušilni postopek

Po končanem sušenju oz. v območju pod TNCS (K) je bila porazdelitev vlažnosti pri posameznem postopku različna. Pri postopku sušenja z visoko frekvenco in pri naravnem sušenju je bila vlažnost skoraj enakomerno porazdeljena po celotnem prerezu. Pri komorskem in vakuumskem sušenju pa je bila vlažnost na sredini bistveno višja od vlažnosti na površini, zato bi bilo potrebno podaljšati čas kondicioniranja.

Povprečni vlažnostni gradient v območju pod TNCS (K) (sl. 5.4) je bil pri naravnem postopku 0,02 %/cm, pri komorskem sušenju 1,30 %/cm, pri vakuumskem 2,61 %/cm in pri visoki frekvenci pa -0,07 %/cm

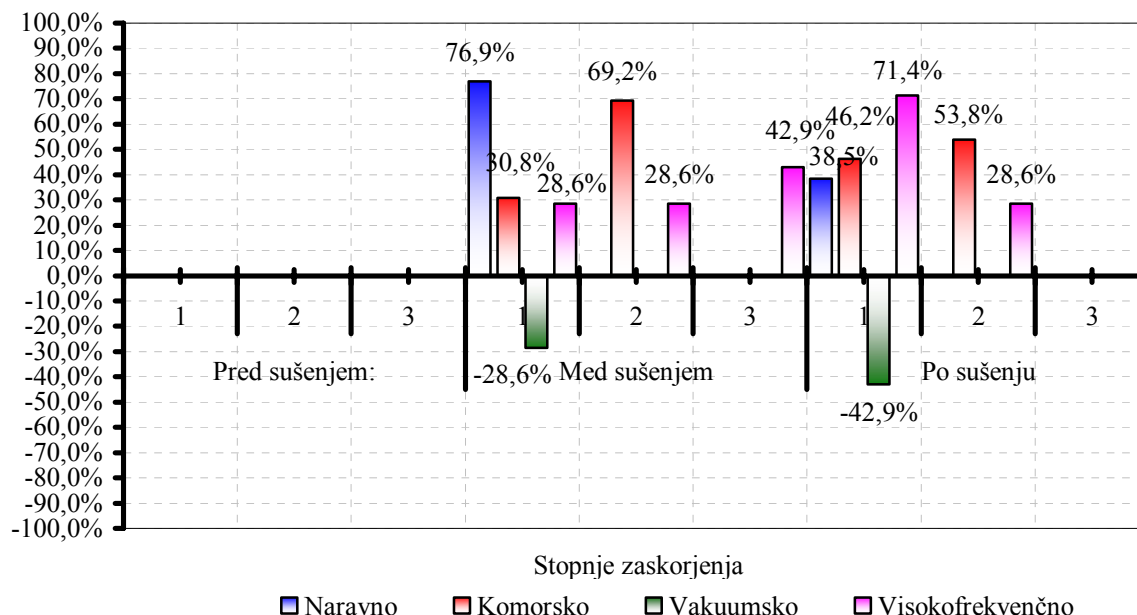
Najnižji povprečni vlažnostni gradient celotnega postopka sušenja je bil pri postopku sušenja z visoko frekvenco, ki je znašal 0,54%/cm, sledil je postopek vakuumskega sušenja, pri katerem je bil povprečni vlažnostni gradient 1,68%/cm, pri naravnem postopku sušenja lesa je povprečni vlažnostni gradient znašal 2,47%/cm. Naj višji povprečni vlažnostni gradient pa se je pojavil pri komorskem sušenju, ki je znašal 3,15%/cm.

Primerjava povprečnih vlažnostnih gradientov in porazdelitve vlažnosti med postopki sušenja, kaže na bolj enakomerno porazdelitev vlažnosti in manjše povprečne vlažnostne gradiente pri sušenju v električnem polju visoke frekvence, sledilo je vakuumsko sušenje potem naravno in najmanj kakovostno se je les sušil z komorskim sušenjem.

Ugodno porazdelitev vlažnosti in majhen vlažnostni gradient pri visokofrekvenčnem sušenju pripisujemo značilnemu načinu segrevanja in s tem enako usmerjenima gradienta vlažnosti in temperature.

## 5.2.2 Stopnja zaskorjenja

Napetostno stanje v območju nad TNCS (Z) je bilo pri vseh postopkih enako. Vsi preizkušanci so bili popolnoma brez napetosti pred sušenjem (sl. 5.5)



Slika 5.5: Primerjava stopnje zaskorjenosti med posameznimi sušilnimi postopki

Pri naravnem sušenju se je v območju TNCS (M) pojavila zaskorjenost do prve stopnje pri 76,9 % preizkušancih, v območju pod TNCS (K) pa se je zaskorjenost do prve stopnje pojavila pri 38,5 % preizkušancev.

Pri sušenju lesa s komorskim postopkom so bili vsi vzorci v območju TNCS(M) in v območju pod TNCS (K) obremenjeni z napetostjo. Porazdeljene so bile tako, da je bila sredina obremenjena na nateg, površina pa na tlak. Zaskorjenost do prve stopnje se je pojavila na 30,8 % preizkušancev. Del 69,2 % preizkušancev pa je bilo obremenjenih z stopnjo zaskorjenosti do druge stopnje. V Območju pod TNCS (K) je bilo 46,2 % preizkušancev obremenjenih z zaskorjenem do prve stopnje in 53,8 % preizkušancev obremenjenih z zaskorjenem do druge stopnje.

Pri postopku vakuumskega sušenja so bile napetosti porazdeljene tako, da je bila sredina obremenjena na tlak, površina pa na nateg. V območju TNCS (M) je bilo 28,6 % preizkušancev obremenjenih z napetostjo do prve stopnje, v območju pod TNCS (K) pa se je zaskorjenost do prve stopnje pojavila pri 42,9 % preizkušancev..

Pri sušenju z visoko frekvenco so se v vseh vzorcih pojavile sušilne napetosti skozi celoten postopek. Zaskorjenost do prve stopnje se je v območju TNCS (M) pojavila na 28,7 % preizkušancev, zaskorjenost do druge stopnje se je pojavila na 18,6 % preizkušancev in 42,9 % preizkušancev pa je bilo obremenjenih z stopnjo zaskorjenosti do tretje stopnje. V območju pod TNCS (K) je bilo 71,4 % preizkušancev obremenjenih z zaskorjenem do prve stopnje in 28,6 % preizkušancev obremenjenih z zaskorjenem do druge stopnje. Pri tem

postopku pa je bila opažena tudi ena sušilna razpoka ki je najverjetneje posledica velikih notranjih napetosti med samim postopkom sušenja.

Pri komorskem in visoko frekvenčnem sušenju je bilo skozi celoten proces v povprečju zaskorjenih 66,8 % preizkušancev, sledilo jim je naravno v katerem je bilo skozi celoten proces zaskorjenih 38, 5% preizkušancev. Pri vakuumskem sušenju pa je bilo skozi celoten proces v povprečju zaskorjenih samo 23, 8% preizkušancev (sl. 5.5).

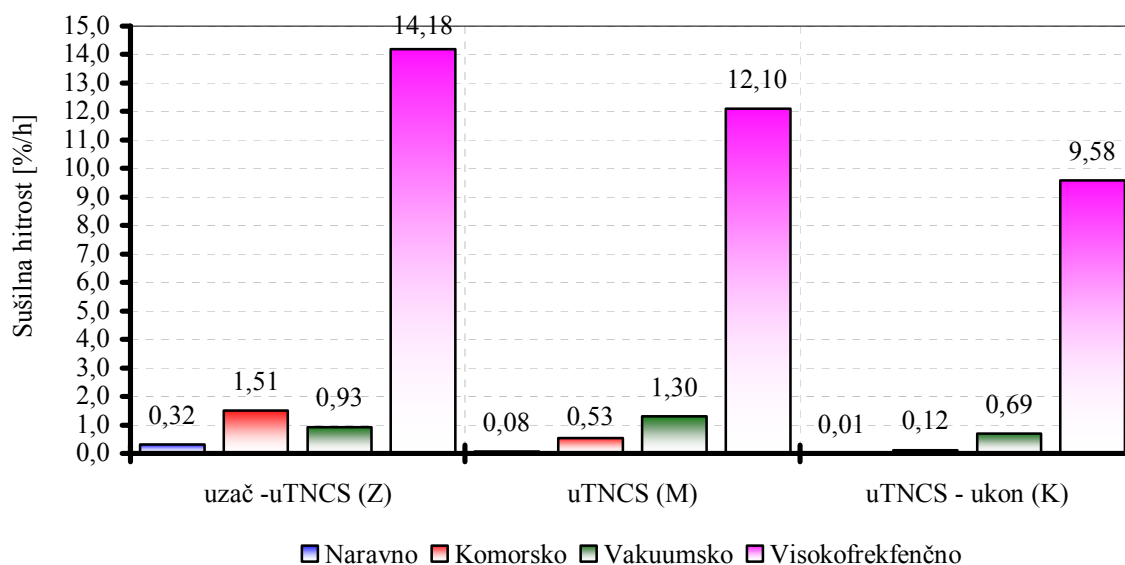
Iz rezultatov je razvidno, da se je z vidika primerjave sušilnih napetosti za najbolj kvalitetno sušenje izkazalo vakuumsko sušenje, to razliko pa je moč pripisati sušenju lesa pri nižjih tlakih in posledično za to potrebnih nižjih temperatur. Voda se pospešeno giblje iz sredine lesa v zunanje plasti, zato so te bolj vlažne kot običajno. Padec vlage je manjši in pripomore tudi k manjšim napetostim v lesu.

### 5.2.3 Hitrost sušenja pri posameznem postopku

Sušilna hitrost je odvisna od posameznega postopka in od lesne vlažnosti. Primerjava povprečne hitrosti sušenja bukovine med naravnim, komorskim, vakuumskim in visokofrekvenčnim načinom kaže na učinkovito sušenje v električnem polju visoke frekvence (sl. 5.6).

Pri sušenju lesa po naravnem postopku se je les v povprečju sušil s hitrostjo 0,08 %/h, pri komorskem sušenju je bila povprečna sušilna hitrost preizkušancev 0,82 %/h, v procesu vakuumskega sušenja je bila povprečna sušilna hitrost preizkušancev 0,87 %/h. Pri visoko frekvenčnem sušenju pa smo dosegli največjo sušilno hitrost, ki je v povprečju znašala 10,47%/h (sl. 5.6).

Sušenje lesa v električnem polju visoke frekvence se razlikuje od konvencionalnega sušenja zaradi delovanja elektromagnetnega polja na les. Razliko je moč pripisati predvsem direktnemu in intenzivnemu segrevanju lesa.



**Slika 5.6:** Primerjava sušilnih hitrosti glede na posamezni sušilni postopek v treh vlažnostnih območjih ( $u_{\text{zač}}$ ,  $u_{\text{TNCS}}$  (Z),  $u_{\text{TNCS}}$  (M),  $u_{\text{TNCS}}$  -  $u_{\text{kon}}$  (K))

## 6 SKLEPI

Rezultate eksperimentalnega dela na osnovi obstoječih pogojev sušenja lahko povzamemo v naslednje sklepe:

1. Bukovino smo sušili s postopkom visokofrekvenčnega sušenja 2 uri in 20min, s postopkom vakuumskega 55ur in 48min, s komorskim postopkom je sušenje trajalo 178ur in s postopkom naravnega sušenja smo bukovino sušili 1320ur. Primerjava časov kaže na učinkovitost sušenja v električnem polju visoke frekvence, saj je neprimerno hitrejše.
2. Vlažnostni gradient je bil pri sušenju bukovine v električnem polju visoke frekvence v povprečju manjši kot pri vseh ostalih sušilnih postopkih. Pri sušenju v električnem polju visoke frekvence je bila tudi sama porazdelitev vlažnosti enakomernejša kot pri ostalih sušilnih postopkih.
3. Pri stopnji zaskorjena je opaziti razliko med posameznimi postopki sušenja. V povprečju je bilo pri vakuumskem postopku sušenja zaskorjenih 23,8% preizkušancev, pri naravnem je bil odstotek nekoliko višji in je v povprečju znašal 38,5%, pri komorskem in pri postopku sušenja v električnem polju visoke frekvence je bil odstotek višji in je v povprečju znašal 66,7%.  
Kakovost sušenja bukovine v vakuumu lahko na splošno ocenimo kot ugodno ali celo boljšo kot pri ostalih postopkih sušenja.
4. Najvišjo hitrost sušenja smo dosegli pri postopku sušenja v električnem polju visoke frekvence, ki je v povprečju znašala 10,5%/h in je bila bistveno višja od vseh ostalih postopkov.
5. Sušenje bukovine v polju visoke frekvence se je z vidika časa sušenja, vlažnostnega gradienta in sušilne hitrosti pokazalo za zelo učinkovito, vendar pa je bila kakovost osušenega lesa zelo slaba in primerljiva z kakovostjo osušenega lesa po komorskem postopku.
6. Vizualna kakovost osušenega lesa je bila načeloma zelo dobra. Pri vseh postopkih je bila barva posušenega podobna barvi lesa pred sušenjem, oz. se med sušilnim postopkom barva ni bistveno spremenila. Pri visoko frekvenčnem postopku sušenja, je bila opažena ena notranja razpoka, ki je bila najverjetneje posledica velikih notranjih napetosti med sušenjem lesa. Pri kontroli vzorcev ostalih postopkov sušenja pred, med in po postopku sušenja ni bilo opaziti nobenih površinskih in notranjih razpok

Z vidika kakovosti in časa sušenja lesa, se je za prednostno pokazalo kontinuirano vakuumsko sušenje, medtem ko sta bila vlažnostni gradient in hitrost osušenega lesa zadovoljiva in primerljiva z naravnim postopkom sušenja lesa.

## 7 POVZETEK

Naloga sušenja lesa je v najkrajšem času in čim kakovostnejše osušiti les do vlažnosti, ki je primerna za nadaljnjo uporabo. Na kakovostno izvajanje sušilnih procesov vplivajo najrazličnejši dejavniki, ki jih nikakor ne moremo obravnavati ločeno.

V raziskavi smo uporabili bukovino (*Fagus sylvatica* L.) prav zaradi njenih specifičnih lastnosti, problematike sušenja in razširjenosti te drevesne vrste v proizvodnji. Primerjalno smo ovrednotili kakovost posameznega sušilnega postopka in posušenega lesa z vidika hitrosti sušenja, doseganja končne vlažnosti in njene porazdelitve. To smo ovrednotili s pomočjo štirih različnih načinov sušenja, t. j. naravno (pri konstantnih sušilnih pogoji), konveksijsko - komorsko, vakuumsko in sušenje v polju visoke frekvence.

Za samo ovrednotenje smo uporabili metode kontrole kakovosti (postopek ocenjevanja vlažnosti in vlažnostnega gradienta ter postopek ocenjevanja zaskorjenja) ter tako med seboj primerjali čase in hitrosti sušenja.

Rezultati raziskave so pokazali prednosti kontinuiranega vakuumskega sušenja. Najkrajši čas sušenja je bil dosežen pri visokofrekvenčnem sušenju, ki je trajalo 2,33 ur, tu je bila tudi dosežena najvišja povprečna hitrost sušenja, ki je znašala 10,47 %/h. Sledilo je vakuumsko, ki je trajalo 55,8 ur in se je v povprečju sušilo s hitrostjo 0,87 %/h. Komorsko sušenje je bilo po času na tretjem mestu in je skupaj trajalo 178 ur, sušilo pa se je s povprečno sušilno hitrostjo 0,76 %/h. Najdaljše sušenje pa je bilo sušenje po naravnem postopku pri konstantnih sušilnih pogojih, ki je trajalo vsega skupaj kar 1320 ur. Tu je bila dosežena tudi najnižja sušilna hitrost, ki je v povprečju znašala 0,08 %/h.

Kakovost posušenega lesa je bila pri nekaterih postopkih bolj, pri nekaterih pa manj zadovoljiva. Pojavili so se tudi vlažnostni gradienti, ki so bili v povprečju od 2,35 %/cm pri vakuumskem sušenju, sledilo je komorsko sušenje z 1,30 %/cm, tretje po vrsti je bilo sušenje v polju visoke frekvence, pri katerem je znašal vlažnostni gradient -0,007 %/cm, kot najboljše pa se je izkazalo naravno sušenje, pri katerem je bil vlažnostni gradient najnižji in je znašal 0,02 %/cm pri visokofrekvenčnem postopku je bila opažena tudi ena notranja razpoka, ki je najverjetneje posledica velikih notranjih napetosti pri tem procesu sušenja. Pri ostalih postopkih pa ni bilo opaziti nobenih razpok oz. napak ki bi nastale med sušilnim postopkom. Barva osušenega lesa pa se med postopkom sušenja ni bistveno spremenila.

Stopnja zaskorjenja je spremljala vse sušilne postopke. Skozi celoten sušilni proces je bilo v povprečju najmanj zaskorjenih vzorcev pri vakuumskem sušenju, teh je bilo 23,8 %, sledilo je sušenje po naravnem postopku pri konstantnih sušilnih pogojih z 38,5 % zaskorjenih vzorcev. Pri komorskem in visokofrekvenčnem sušenjem pa je bilo skozi celoten proces v povprečju zaskorjenih kar 66,8 % vseh preizkušancev.

Z vidika kakovosti in časa sušenja lesa se je za prednostno pokazalo kontinuirano vakuumsko sušenje, medtem ko sta bila vlažnostni gradient in hitrost osušenega lesa zadovoljiva in primerljiva le z naravnim postopkom sušenja lesa. Sušenje lesa v polju visoke frekvence pa se je z vidika kakovosti sušenja izkazalo za manj kvalitetno in ne primerljivo z komorskim postopkom.

## 8 VIRI

- Chen Z., Lamb F. M. 1995a. The concept of boiling front in vacuum drying. V: Vacuum drying of Wood '95, Slovakia: 110-116
- Chen Z., Lamb F. M. 1995b. The internal conditions in vacuum drying of wood. V: Vacuum drying of Wood '95, Slovakia: 45-53
- Geršak M., Velušček V., 2003. Sušenje lesa. Ljubljana, Lesarska založba: 194 str.
- Geršak M., Čop T., Gorišek Ž., Mrak C., Velušček V. 1986. Sušenje lesa. Ljubljana, Zveza društev inženirjev in tehnikov gozdarstva in lesarstva Slovenije: 254 str.
- Gorišek Ž. 1994. Točka nasičenja celičnih sten kot kritična točka v procesu sušenja lesa. Les, 46, 3: 53-58
- Gorišek Ž. 1997. Ocenjevanje kakovosti sušenja lesa. Les, 5: 138-141
- Gorišek Ž. 2004a. Sušenje lesa, 1. del. Korak, 5, 1: 19
- Gorišek Ž. 2004b. Sušenje lesa, 2. del. Korak, 5, 2: 23
- Gorišek Ž. 2005a. Posebni načini tehničnega sušenja, 1. del. Korak, 6, 1: 18-19
- Gorišek Ž. 2005b. Posebni načini tehničnega sušenja, 2. del. Korak, 6, 2: 19-20
- Gorišek Ž., Geršak M., Velušček V., Čop T., Mrak C. 1994. Sušenje lesa. Ljubljana, Lesarska založba: 235 str.
- Gorišek Ž. 1980. Vakuumsko sušenje v teoriji in praksi. Diplomsko delo. Ljubljana, Biotehniška fakulteta, Oddelek za lesarstvo: 92 str.
- Kobayashi Y., Miura I., Kawai Y. 1999. High performance drying using combination of HF and hot air under atmospheric pressure. V: Wood Drying Research & Technology for sustainable Forestry beyond 2000. 6<sup>th</sup> International Wood Drying Conference, Stellenbosch, 25<sup>th</sup>-28<sup>th</sup> January. 1999. Stellenbosch, University in Stellenbosch, Faculty of Forestry, Department of Wood Science: 18-21
- Neumann R., Mielke A., Böhner G. 1992. Comparison of conventional and convective vacuum drying of beech. V: Understanding the Wood Drying Process: A synthesis of theory and practise. 3rd IUFRO international wood drying conference. Vienna: 222-226
- Resnik J., Berčič S., Cikač B. 1995. Visoko frekvenčno segrevanje in lepljenje lesa. Ljubljana, Biotehniška fakulteta, Oddelek za lesarstvo: 109 str.
- Resnik J., Šernek M. 1996. Vpliv gradienta vlažnosti lesa na gradient temperature pri visokofrekvenčnem segrevanju in lepljenju. Les, 48, 7-8: 209-212
- Ressel J. B. 1999. State of the art for vacuum drying in the wood working industry. V: Workshop Edinburgh, Edinburgh, 13-14 okt. 1999, Cost action E15: 24 str.  
[http://www.bfah.de/bibl/pdf/ressel\\_pub1.pdf](http://www.bfah.de/bibl/pdf/ressel_pub1.pdf) (12. 2. 2006)
- Siau J. F. 1995. Wood: Influence of moisture on physical properties. Blacksburg, Virginia Polytechnic Institute and State University: 214 str.
- Welling J. 1993. Spezifikation und Überprüfung der Trocknungsqualität von Schnittholz. Die Holzbearbeitung, 40, 11: 56-62

## **ZAHVALA**

Za pomoč pri izvajanju, oblikovanju in urejanju diplomskega dela se zahvaljujem vsem, ki so mi kakorkoli pomagali pri mojem diplomskem delu.

Posebej se želim zahvaliti mentorju prof.dr. Željku Gorišku in recenzentu prof.dr. Primožu Ovnu ter asistentu mag. Alešu Stražetu, ki mi je bil v veliko pomoč pri vseh izvedenih poizkusih.

Največja zahvala pa gre puncu Nataši in ostali moji družini in vsem sorodnikom, ki so mi nesebično pomagali skozi ves čas študija in mi stali ob strani v težkih trenutkih.

Najlepša hvala vsem.

## PRILOGE:

**Priloga A** Sprememba vlažnosti ( $u$ ) in hitrost sušenja ( $\Delta u/\Delta t$ ) v odvisnosti od časa simulacije naravnega sušenja.

| t [h] | u [%] | $\Delta u/\Delta t$ [%/h] |
|-------|-------|---------------------------|
| 0     | 72,1  |                           |
| 24    | 63,6  | 0,35                      |
| 48    | 51,4  | 0,51                      |
| 96    | 44,7  | 0,14                      |
| 120   | 38,2  | 0,27                      |
| 144   | 33,9  | 0,18                      |
| 168   | 31,7  | 0,09                      |
| 192   | 28,4  | 0,13                      |
| 216   | 26,7  | 0,07                      |
| 240   | 26,0  | 0,03                      |
| 264   | 25,9  | 0,01                      |
| 288   | 25,4  | 0,02                      |
| 312   | 24,7  | 0,03                      |
| 336   | 24,5  | 0,01                      |
| 360   | 24,1  | 0,02                      |
| 432   | 23,7  | 0,01                      |
| 456   | 23,1  | 0,02                      |
| 480   | 22,7  | 0,02                      |
| 768   | 19,6  | 0,01                      |
| 792   | 19,3  | 0,01                      |
| 816   | 19,1  | 0,01                      |
| 840   | 19,1  | 0,01                      |
| 960   | 18,5  | 0,01                      |
| 1128  | 18,4  | 0,01                      |
| 1320  | 17,8  | 0,01                      |

**Priloga B** Sprememba vlažnosti ( $u$ ), temperature sušenja ( $T_s$ ), Relativne začne vlažnosti (RZV) in hitrosti sušenja ( $\Delta u/\Delta t$ ) v odvisnosti od časa komorskega sušenja lesa z delno izmenjavo zraka po Angleškem režimu

| t [h]  | u [%] | $T_s$ [°C] | RZV [%] | $\Delta u/\Delta t$ [%/h] |
|--------|-------|------------|---------|---------------------------|
| 0,00   | 71,2  | 40         | 60      |                           |
| 1,40   | 68,5  | 40         | 75      | 1,91                      |
| 2,10   | 66,3  | 40         | 80      | 3,20                      |
| 4,00   | 63,7  | 40         | 85      | 1,35                      |
| 5,50   | 60,8  | 40         | 87      | 1,92                      |
| 8,00   | 57,1  | 40         | 89      | 1,51                      |
| 23,00  | 40,6  | 40         | 85      | 1,09                      |
| 25,15  | 37,8  | 40         | 84      | 1,30                      |
| 26,30  | 37,1  | 40         | 82      | 0,64                      |
| 28,00  | 35,9  | 40         | 80      | 0,69                      |
| 30,00  | 33,7  | 40         | 85      | 1,14                      |
| 47,00  | 29,1  | 40         | 84      | 0,27                      |
| 49,00  | 27,9  | 40         | 84      | 0,57                      |
| 50,30  | 27,3  | 41         | 83      | 0,51                      |
| 72,00  | 23,5  | 43         | 60      | 0,18                      |
| 78,00  | 23,0  | 45         | 55      | 0,08                      |
| 100,00 | 18,7  | 47         | 50      | 0,19                      |
| 102,00 | 18,1  | 52         | 40      | 0,29                      |
| 132,00 | 12,5  | 60         | 35      | 0,19                      |
| 151,00 | 11,8  | 60         | 30      | 0,03                      |
| 165,00 | 11,7  | 65         | 40      | 0,01                      |
| 178,00 | 11,1  | 65         | 70      | 0,05                      |

**Priloga C** Sprememba vlažnosti (u), temperature (nastavljene temperature ( $T_n$ ) temperatura materiala ( $T_m$ )), tlaka (p) in hitrosti sušenja ( $\Delta u/\Delta t$ ) v odvisnosti od časa vakuumskega sušenja lesa

| t<br>[h] | Temperatura |            | p<br>[bar] | u<br>[%] | $\Delta u/\Delta t$ [%/h] |
|----------|-------------|------------|------------|----------|---------------------------|
|          | $T_n$ [°C]  | $T_m$ [°C] |            |          |                           |
| 0,00     | 68          | 18,0       | 1,000      | 58,4     |                           |
| 0,17     | 68          | 20,6       | 1,000      | 58,4     | 0,00                      |
| 0,50     | 68          | 30,8       | 1,000      | 58,3     | 0,30                      |
| 0,83     | 68          | 36,8       | 1,000      | 58,2     | 0,30                      |
| 1,17     | 68          | 39,8       | 1,000      | 58,1     | 0,30                      |
| 1,50     | 68          | 42,2       | 1,000      | 58,0     | 0,30                      |
| 1,83     | 68          | 44,6       | 1,000      | 57,9     | 0,30                      |
| 2,17     | 68          | 47,0       | 1,000      | 57,7     | 0,60                      |
| 2,50     | 68          | 49,7       | 1,000      | 57,6     | 0,30                      |
| 2,83     | 68          | 50,7       | 1,000      | 57,5     | 0,30                      |
| 3,17     | 68          | 51,3       | 1,000      | 57,3     | 0,60                      |
| 3,50     | 68          | 53,3       | 1,000      | 57,1     | 0,60                      |
| 3,83     | 68          | 54,5       | 1,000      | 56,9     | 0,60                      |
| 4,17     | 68          | 54,9       | 1,000      | 56,7     | 0,60                      |
| 4,50     | 68          | 55,8       | 1,000      | 56,6     | 0,30                      |
| 4,83     | 68          | 56,4       | 1,000      | 56,4     | 0,60                      |
| 5,17     | 68          | 56,9       | 1,000      | 56,3     | 0,30                      |
| 5,50     | 68          | 57,4       | 1,000      | 56,1     | 0,60                      |
| 5,83     | 68          | 57,7       | 1,000      | 55,9     | 0,60                      |
| 6,17     | 68          | 58,1       | 1,000      | 55,8     | 0,30                      |
| 6,50     | 68          | 58,3       | 1,000      | 55,6     | 0,60                      |
| 6,83     | 68          | 58,3       | 1,000      | 55,5     | 0,30                      |
| 7,17     | 68          | 58,5       | 1,000      | 55,3     | 0,60                      |
| 8,17     | 68          | 45,3       | 0,148      | 52,6     | 2,70                      |
| 8,83     | 68          | 45,4       | 0,153      | 51,1     | 2,25                      |
| 9,50     | 68          | 45,6       | 0,158      | 50,0     | 1,65                      |
| 10,17    | 68          | 45,4       | 0,158      | 48,9     | 1,65                      |
| 10,83    | 68          | 45,6       | 0,163      | 47,5     | 2,10                      |
| 11,50    | 68          | 45,6       | 0,168      | 46,0     | 2,25                      |
| 12,17    | 68          | 45,7       | 0,168      | 44,7     | 1,95                      |
| 12,83    | 68          | 45,9       | 0,168      | 43,9     | 1,20                      |
| 13,50    | 68          | 45,9       | 0,168      | 43,1     | 1,20                      |
| 14,17    | 68          | 46,0       | 0,168      | 42,2     | 1,35                      |
| 14,83    | 68          | 46,0       | 0,173      | 41,3     | 1,35                      |
| 15,50    | 70          | 46,1       | 0,173      | 40,3     | 1,50                      |
| 16,17    | 70          | 46,2       | 0,173      | 39,4     | 1,35                      |
| 16,83    | 70          | 46,3       | 0,178      | 38,5     | 1,35                      |
| 17,50    | 70          | 46,5       | 0,173      | 37,8     | 1,05                      |
| 18,17    | 70          | 46,5       | 0,178      | 37,1     | 1,05                      |
| 18,83    | 70          | 46,6       | 0,178      | 36,3     | 1,20                      |
| 19,50    | 70          | 46,8       | 0,178      | 35,7     | 0,90                      |
| 20,17    | 70          | 46,7       | 0,178      | 35,1     | 0,90                      |
| 20,83    | 70          | 46,8       | 0,173      | 34,5     | 0,90                      |

- se nadaljuje

**Priloga C** - nadaljevanje

| t     | Temperatura |         | p     | u    | $\Delta u/\Delta t$ [%/h] |
|-------|-------------|---------|-------|------|---------------------------|
| [h]   | Tn [°C]     | Tm [°C] | [bar] | [%]  |                           |
| 21,50 | 70          | 46,9    | 0,178 | 34,0 | 0,75                      |
| 22,17 | 70          | 46,9    | 0,178 | 33,4 | 0,90                      |
| 22,67 | 70          | 46,9    | 0,175 | 32,8 | 1,20                      |
| 23,00 | 70          | 47,1    | 0,141 | 32,1 | 2,10                      |
| 23,33 | 70          | 47,2    | 0,143 | 31,4 | 2,10                      |
| 23,67 | 70          | 47,4    | 0,146 | 30,7 | 2,10                      |
| 24,00 | 75          | 47,4    | 0,148 | 30,0 | 2,10                      |
| 24,33 | 75          | 47,6    | 0,149 | 29,6 | 1,20                      |
| 24,67 | 75          | 47,7    | 0,151 | 29,4 | 0,60                      |
| 25,00 | 75          | 47,8    | 0,154 | 28,9 | 1,50                      |
| 25,33 | 75          | 47,9    | 0,156 | 28,6 | 0,90                      |
| 25,67 | 75          | 48,1    | 0,158 | 28,4 | 0,60                      |
| 26,00 | 75          | 48,3    | 0,161 | 28,1 | 0,90                      |
| 26,33 | 75          | 48,4    | 0,164 | 27,8 | 0,90                      |
| 26,67 | 75          | 48,5    | 0,168 | 27,5 | 0,90                      |
| 27,00 | 75          | 48,7    | 0,170 | 27,2 | 0,90                      |
| 27,33 | 75          | 48,8    | 0,171 | 27,0 | 0,60                      |
| 28,00 | 78          | 48,3    | 0,146 | 25,3 | 2,55                      |
| 28,33 | 78          | 48,8    | 0,152 | 25,0 | 0,90                      |
| 28,67 | 78          | 49,2    | 0,160 | 24,8 | 0,60                      |
| 29,00 | 78          | 49,8    | 0,168 | 24,6 | 0,60                      |
| 29,33 | 78          | 50,1    | 0,171 | 24,3 | 0,90                      |
| 29,67 | 78          | 50,3    | 0,174 | 24,1 | 0,60                      |
| 30,00 | 78          | 50,5    | 0,176 | 23,7 | 1,11                      |
| 30,33 | 78          | 50,6    | 0,178 | 23,1 | 1,89                      |
| 30,67 | 78          | 50,8    | 0,179 | 22,7 | 1,20                      |
| 31,00 | 78          | 51,1    | 0,180 | 22,2 | 1,50                      |
| 31,33 | 78          | 51,4    | 0,181 | 21,7 | 1,50                      |
| 31,67 | 78          | 51,8    | 0,183 | 21,2 | 1,50                      |
| 32,00 | 78          | 52,1    | 0,184 | 20,7 | 1,50                      |
| 32,33 | 85          | 52,5    | 0,187 | 20,3 | 1,20                      |
| 32,67 | 85          | 52,7    | 0,189 | 19,8 | 1,50                      |
| 33,00 | 85          | 53,0    | 0,191 | 19,3 | 1,50                      |
| 33,33 | 85          | 53,3    | 0,147 | 18,8 | 1,50                      |
| 33,67 | 85          | 53,5    | 0,151 | 18,2 | 1,80                      |
| 34,00 | 85          | 53,7    | 0,157 | 17,6 | 1,80                      |
| 34,33 | 85          | 53,9    | 0,160 | 17,1 | 1,50                      |
| 34,97 | 85          | 54,2    | 0,163 | 16,7 | 0,63                      |
| 35,63 | 85          | 54,5    | 0,146 | 16,2 | 0,75                      |
| 36,30 | 85          | 55,0    | 0,150 | 15,6 | 0,90                      |
| 36,97 | 88          | 55,9    | 0,154 | 15,0 | 0,90                      |
| 37,63 | 88          | 57,2    | 0,158 | 14,6 | 0,60                      |
| 38,30 | 88          | 58,6    | 0,161 | 14,3 | 0,45                      |
| 38,97 | 88          | 59,4    | 0,165 | 14,0 | 0,45                      |
| 39,63 | 88          | 60,3    | 0,168 | 13,7 | 0,45                      |
| 40,30 | 88          | 61,1    | 0,170 | 13,4 | 0,45                      |

- se nadaljuje

**Priloga C** – nadaljevanje

| t     | Temperatura |         | p     | u    | $\Delta u / \Delta t$ [%/h] |
|-------|-------------|---------|-------|------|-----------------------------|
| [h]   | Tn [°C]     | Tm [°C] | [bar] | [%]  |                             |
| 40,97 | 88          | 62,1    | 0,172 | 13,0 | 0,60                        |
| 41,63 | 88          | 62,8    | 0,173 | 12,8 | 0,30                        |
| 42,30 | 88          | 63,5    | 0,174 | 12,5 | 0,45                        |
| 42,97 | 88          | 64,1    | 0,175 | 12,2 | 0,45                        |
| 43,63 | 88          | 64,9    | 0,177 | 11,9 | 0,45                        |
| 44,30 | 88          | 65,7    | 0,178 | 11,6 | 0,45                        |
| 44,97 | 88          | 66,5    | 0,179 | 11,4 | 0,30                        |
| 45,63 | 88          | 67,1    | 0,144 | 11,2 | 0,30                        |
| 46,30 | 88          | 67,8    | 0,146 | 10,6 | 0,90                        |
| 46,97 | 88          | 68,3    | 0,149 | 10,2 | 0,60                        |
| 47,63 | 73          | 68,8    | 1,000 | 10,1 | 0,15                        |
| 48,47 | 73          | 69,5    | 0,488 | 10,1 | 0,06                        |
| 48,80 | 73          | 69,7    | 0,504 | 10,0 | 0,15                        |
| 49,13 | 73          | 70,0    | 0,523 | 9,9  | 0,30                        |
| 49,47 | 73          | 70,1    | 0,539 | 9,9  | 0,00                        |
| 50,13 | 73          | 70,5    | 0,563 | 9,7  | 0,30                        |
| 50,47 | 73          | 70,7    | 0,575 | 9,7  | 0,00                        |
| 50,80 | 73          | 70,9    | 0,588 | 9,6  | 0,30                        |
| 51,13 | 73          | 71,0    | 0,608 | 9,6  | 0,00                        |
| 51,47 | 73          | 71,1    | 0,627 | 9,5  | 0,30                        |
| 52,47 | 73          | 71,2    | 0,656 | 9,4  | 0,10                        |
| 53,13 | 73          | 71,2    | 0,669 | 9,3  | 0,15                        |
| 53,80 | 73          | 71,2    | 0,680 | 9,2  | 0,15                        |
| 54,47 | 73          | 71,3    | 0,686 | 9,1  | 0,15                        |
| 55,13 | 73          | 71,3    | 0,693 | 9,0  | 0,15                        |
| 55,80 | 73          | 71,3    | 0,702 | 9,0  | 0,00                        |

**Priloga D** Sprememba vlažnosti ( $u$ ), temperatura materiala ( $T_m$ ), in hitrosti sušenja ( $\Delta u/\Delta t$ ) v odvisnosti od časa sušenja lesa v polju visoke frekvence

| t [h] | $T_m$ [°C] | u [%] | $\Delta u/\Delta t$ [%/h] |
|-------|------------|-------|---------------------------|
| 0,00  | 20,0       | 34,0  |                           |
| 0,42  | 83,6       | 28,1  | 14,18                     |
| 0,83  | 85,3       | 23,1  | 12,10                     |
| 1,08  | 84,3       | 21,6  | 5,92                      |
| 1,33  | 91,4       | 18,8  | 11,00                     |
| 1,58  | 85,6       | 15,2  | 14,24                     |
| 1,83  | 89,7       | 12,8  | 9,76                      |
| 2,08  | 74,8       | 10,7  | 8,36                      |
| 2,33  | 69,8       | 8,7   | 8,20                      |

**Priloga E** Povprečna vlažnost ( $\bar{u}$ ), vlažnostni gradient ( $\Delta u/\Delta x$ ) in stopnja zaskorjenja (S.Z.) pri postopku naravnega sušenja lesa v odvisnosti od časa vzorčenja (začetno, vmesno, končno vzorčenje)

| Čas vzorčenja: 0 h       | Naravno sušenje - Vlažnost, vlažnostni gradient in stopnja zaskorjenja |                    |       |                    |                    |       |                    |                    |       |       |              |       |
|--------------------------|------------------------------------------------------------------------|--------------------|-------|--------------------|--------------------|-------|--------------------|--------------------|-------|-------|--------------|-------|
| Oddaljenost od površine: | 1                                                                      |                    |       | 2                  |                    |       | 3                  |                    |       | ū [%] | Δu/Δx [%/cm] | S.Z.: |
| Vzorec:                  | m <sub>v</sub> [g]                                                     | m <sub>0</sub> [g] | u [%] | m <sub>v</sub> [g] | m <sub>0</sub> [g] | u [%] | m <sub>v</sub> [g] | m <sub>0</sub> [g] | u [%] |       |              |       |
| 1,1                      | 5,621                                                                  | 3,452              | 62,8  | 5,573              | 3,383              | 64,7  | 5,702              | 3,475              | 64,1  | 63,9  | 0,93         | 0     |
| 2,1                      | 6,708                                                                  | 4,160              | 61,3  | 7,288              | 4,452              | 63,7  | 7,818              | 4,970              | 57,3  | 60,8  | 2,62         | 0     |
| 3,1                      | 5,560                                                                  | 3,494              | 59,1  | 6,185              | 3,896              | 58,8  | 5,550              | 3,569              | 55,5  | 57,8  | 1,04         | 0     |
| 4,1                      | 7,144                                                                  | 4,302              | 66,1  | 8,714              | 5,014              | 73,8  | 7,572              | 4,537              | 66,9  | 68,9  | 4,25         | 0     |
| 5,1                      | 6,827                                                                  | 4,130              | 65,3  | 7,908              | 4,707              | 68,0  | 6,933              | 4,153              | 66,9  | 66,7  | 1,12         | 0     |
| 6,1                      | 8,968                                                                  | 5,238              | 71,2  | 8,722              | 4,855              | 79,6  | 8,841              | 4,976              | 77,7  | 76,2  | 3,79         | 0     |
| 7,1                      | 6,865                                                                  | 3,715              | 84,8  | 6,989              | 3,804              | 83,7  | 6,902              | 3,838              | 79,8  | 82,8  | 1,03         | 0     |
| 8,1                      | 6,351                                                                  | 3,951              | 60,7  | 6,979              | 4,403              | 58,5  | 6,256              | 3,928              | 59,3  | 59,5  | -1,07        | 0     |
| 9,1                      | 6,508                                                                  | 3,226              | 101,7 | 7,569              | 3,930              | 92,6  | 6,429              | 3,444              | 86,7  | 93,7  | -1,14        | 0     |
| 10,1                     | 6,536                                                                  | 3,227              | 102,5 | 7,958              | 3,778              | 110,6 | 6,243              | 3,240              | 92,7  | 102,0 | 9,22         | 0     |
| 11,1                     | 6,352                                                                  | 3,758              | 69,0  | 6,639              | 3,628              | 83,0  | 6,405              | 3,731              | 71,7  | 74,6  | 9,19         | 0     |
| 12,1                     | 6,332                                                                  | 3,857              | 64,2  | 6,399              | 3,877              | 65,1  | 6,030              | 3,752              | 60,7  | 63,3  | 1,93         | 0     |
| 13,1                     | 7,378                                                                  | 4,403              | 67,6  | 6,586              | 3,867              | 70,3  | 7,646              | 4,621              | 65,5  | 67,8  | 2,79         | 0     |
| Povprečje vlažnosti      | 72,0                                                                   |                    |       | 74,8               |                    |       | 69,6               |                    |       | 72,1  | 2,75         | 0     |

- se nadaljuje

**Priloga E** Nadaljevanje

| Čas vzorčenja: 216 h                | Naravno sušenje - Vlažnost, vlažnostni gradient in stopnja zaskorjenja |           |         |             |           |         |             |           |         |               |                            |             |
|-------------------------------------|------------------------------------------------------------------------|-----------|---------|-------------|-----------|---------|-------------|-----------|---------|---------------|----------------------------|-------------|
| Oddaljenost od površine:<br>Vzorec: | 1                                                                      |           |         | 2           |           |         | 3           |           |         | $\bar{u}$ [%] | $\Delta u/\Delta x$ [%/cm] | S.Z.:       |
|                                     | $m_v$ [g]                                                              | $m_0$ [g] | $u$ [%] | $m_v$ [g]   | $m_0$ [g] | $u$ [%] | $m_v$ [g]   | $m_0$ [g] | $u$ [%] |               |                            |             |
| 1,1                                 | 2,959                                                                  | 2,349     | 26,0    | 3,210       | 2,386     | 34,5    | 3,259       | 2,575     | 26,6    | 29,0          | 6,40                       | 1           |
| 2,1                                 | 3,729                                                                  | 2,972     | 25,5    | 4,241       | 3,183     | 33,2    | 4,056       | 3,211     | 26,3    | 28,3          | 4,56                       | 0           |
| 3,1                                 | 3,317                                                                  | 2,647     | 25,3    | 3,542       | 2,667     | 32,8    | 2,978       | 2,389     | 24,7    | 27,6          | 6,01                       | 1           |
| 4,1                                 | 3,790                                                                  | 2,987     | 26,9    | 4,651       | 3,452     | 34,7    | 3,975       | 3,132     | 26,9    | 29,5          | 4,74                       | 0           |
| 5,1                                 | 3,627                                                                  | 2,885     | 25,7    | 4,250       | 3,195     | 33,0    | 3,748       | 2,983     | 25,6    | 28,1          | 4,50                       | 1           |
| 6,1                                 | 3,380                                                                  | 2,729     | 23,9    | 4,071       | 3,169     | 28,5    | 3,173       | 2,568     | 23,6    | 25,3          | 3,55                       | 1           |
| 7,1                                 | 3,363                                                                  | 2,698     | 24,6    | 3,782       | 2,896     | 30,6    | 3,047       | 2,426     | 25,6    | 26,9          | 4,12                       | 1           |
| 8,1                                 | 3,221                                                                  | 2,619     | 23,0    | 4,004       | 3,105     | 29,0    | 3,313       | 2,676     | 23,8    | 25,2          | 4,10                       | 0           |
| 9,1                                 | 2,737                                                                  | 2,210     | 23,8    | 3,791       | 2,908     | 30,4    | 2,729       | 2,203     | 23,9    | 26,0          | 4,70                       | 1           |
| 10,1                                | 3,030                                                                  | 2,477     | 22,3    | 3,693       | 2,892     | 27,7    | 2,724       | 2,227     | 22,3    | 24,1          | 3,86                       | 1           |
| 11,1                                | 2,938                                                                  | 2,379     | 23,5    | 3,942       | 3,019     | 30,6    | 3,313       | 2,672     | 24,0    | 26,0          | 5,09                       | 1           |
| 12,1                                | 3,018                                                                  | 2,450     | 23,2    | 4,109       | 3,191     | 28,8    | 3,492       | 2,830     | 23,4    | 25,1          | 4,17                       | 1           |
| 13,1                                | 3,204                                                                  | 2,577     | 24,3    | 3,895       | 2,984     | 30,5    | 3,161       | 2,532     | 24,8    | 26,6          | 4,45                       | 1           |
| <b>Povprečje vlažnosti</b>          | <b>24,5</b>                                                            |           |         | <b>31,1</b> |           |         | <b>24,7</b> |           |         | <b>26,8</b>   | <b>4,63</b>                | <b>0,77</b> |

- se nadaljuje

**Priloga E** Nadaljevanje

| Čas vzorčenja: 1320 h               | Naravno sušenje - Vlažnost, vlažnostni gradient in stopnja zaskorjenja |           |         |           |           |         |           |           |         |               |                            |       |
|-------------------------------------|------------------------------------------------------------------------|-----------|---------|-----------|-----------|---------|-----------|-----------|---------|---------------|----------------------------|-------|
| Oddaljenost od površine:<br>Vzorec: | 1                                                                      |           |         | 2         |           |         | 3         |           |         | $\bar{u}$ [%] | $\Delta u/\Delta x$ [%/cm] | S.Z.: |
|                                     | $m_v$ [g]                                                              | $m_0$ [g] | $u$ [%] | $m_v$ [g] | $m_0$ [g] | $u$ [%] | $m_v$ [g] | $m_0$ [g] | $u$ [%] |               |                            |       |
| 1,1                                 | 3,162                                                                  | 2,691     | 17,5    | 2,921     | 2,485     | 17,5    | 3,101     | 2,639     | 17,5    | 17,5          | 0,03                       | 1     |
| 2,1                                 | 2,912                                                                  | 2,464     | 18,2    | 3,123     | 2,642     | 18,2    | 3,421     | 2,895     | 18,2    | 18,2          | 0,02                       | 0     |
| 3,1                                 | 3,211                                                                  | 2,709     | 18,5    | 3,132     | 2,642     | 18,5    | 3,235     | 2,729     | 18,5    | 18,5          | 0,01                       | 1     |
| 4,1                                 | 2,925                                                                  | 2,478     | 18,0    | 3,159     | 2,675     | 18,1    | 3,545     | 3,003     | 18,0    | 18,1          | 0,03                       | 0     |
| 5,1                                 | 2,945                                                                  | 2,493     | 18,1    | 3,256     | 2,756     | 18,1    | 3,126     | 2,646     | 18,1    | 18,1          | 0,00                       | 1     |
| 6,1                                 | 3,201                                                                  | 2,723     | 17,6    | 3,156     | 2,684     | 17,6    | 2,865     | 2,437     | 17,6    | 17,6          | 0,02                       | 0     |
| 7,1                                 | 3,169                                                                  | 2,694     | 17,6    | 3,356     | 2,852     | 17,7    | 3,389     | 2,881     | 17,6    | 17,6          | 0,03                       | 0     |
| 8,1                                 | 3,561                                                                  | 3,033     | 17,4    | 2,989     | 2,545     | 17,4    | 3,121     | 2,658     | 17,4    | 17,4          | 0,02                       | 0     |
| 9,1                                 | 3,036                                                                  | 2,588     | 17,3    | 3,356     | 2,860     | 17,3    | 3,120     | 2,660     | 17,3    | 17,3          | 0,03                       | 1     |
| 10,1                                | 3,123                                                                  | 2,655     | 17,6    | 3,245     | 2,758     | 17,7    | 2,452     | 2,085     | 17,6    | 17,6          | 0,03                       | 1     |
| 11,1                                | 3,316                                                                  | 2,811     | 18,0    | 3,215     | 2,724     | 18,0    | 3,123     | 2,647     | 18,0    | 18,0          | 0,04                       | 0     |
| 12,1                                | 3,321                                                                  | 2,818     | 17,8    | 2,991     | 2,537     | 17,9    | 2,921     | 2,478     | 17,9    | 17,9          | 0,02                       | 0     |
| 13,1                                | 3,305                                                                  | 2,813     | 17,5    | 3,331     | 2,834     | 17,5    | 3,002     | 2,555     | 17,5    | 17,5          | 0,03                       | 0     |
| Povprečje vlažnosti                 | 17,8                                                                   |           |         | 17,8      |           |         | 17,8      |           |         | 17,8          | 0,02                       | 0,38  |

**Priloga F** Povprečna vlažnost ( $\bar{u}$ ), vlažnostni gradient ( $\Delta u/\Delta x$ ) in stopnja zaskorjenja (S.Z.) pri postopku komorskega sušenja lesa z delno izmenjavo zraka v odvisnosti od časa vzorčenja (začetno, vmesno, končno vzorčenje)

| Čas vzorčenja: 0 h         | Komorsko sušenje - Vlažnost, vlažnostni gradient in stopnja zaskorjenja |           |         |             |           |         |             |           |         |               |                            |             |
|----------------------------|-------------------------------------------------------------------------|-----------|---------|-------------|-----------|---------|-------------|-----------|---------|---------------|----------------------------|-------------|
|                            | 1                                                                       |           |         | 2           |           |         | 3           |           |         | $\bar{u}$ [%] | $\Delta u/\Delta x$ [%/cm] | S.Z.:       |
| Vzorec:                    | $m_v$ [g]                                                               | $m_0$ [g] | $u$ [%] | $m_v$ [g]   | $m_0$ [g] | $u$ [%] | $m_v$ [g]   | $m_0$ [g] | $u$ [%] |               |                            |             |
| 1,2                        | 5,231                                                                   | 3,215     | 62,7    | 6,589       | 4,023     | 63,8    | 6,412       | 3,912     | 63,9    | 63,5          | 0,35                       | 0           |
| 2,2                        | 7,898                                                                   | 4,902     | 61,1    | 6,985       | 4,289     | 62,9    | 7,254       | 4,621     | 57,0    | 60,3          | 2,25                       | 0           |
| 3,2                        | 5,231                                                                   | 3,365     | 55,5    | 7,021       | 4,456     | 57,6    | 6,148       | 3,969     | 54,9    | 56,0          | 1,73                       | 0           |
| 4,2                        | 6,852                                                                   | 4,132     | 65,8    | 7,845       | 4,549     | 72,5    | 7,123       | 4,315     | 65,1    | 67,8          | 4,06                       | 0           |
| 5,2                        | 5,894                                                                   | 3,569     | 65,1    | 7,564       | 4,512     | 67,6    | 7,645       | 4,612     | 65,8    | 66,2          | 1,29                       | 0           |
| 6,2                        | 7,891                                                                   | 4,638     | 70,1    | 8,247       | 4,615     | 78,7    | 7,986       | 4,511     | 77,0    | 75,3          | 3,72                       | 0           |
| 7,2                        | 7,356                                                                   | 3,989     | 84,4    | 7,145       | 3,912     | 82,6    | 6,746       | 3,784     | 78,3    | 81,8          | 0,95                       | 0           |
| 8,2                        | 6,423                                                                   | 3,999     | 60,6    | 7,632       | 4,861     | 57,0    | 7,545       | 4,764     | 58,4    | 58,7          | -1,79                      | 0           |
| 9,2                        | 7,841                                                                   | 3,912     | 100,4   | 7,389       | 3,843     | 92,3    | 6,914       | 3,712     | 86,3    | 93,0          | -0,77                      | 0           |
| 10,2                       | 6,536                                                                   | 3,259     | 100,6   | 7,389       | 3,564     | 107,3   | 7,561       | 3,943     | 91,8    | 99,9          | 7,92                       | 0           |
| 11,2                       | 6,921                                                                   | 4,128     | 67,7    | 7,192       | 3,946     | 82,3    | 6,219       | 3,632     | 71,2    | 73,7          | 9,32                       | 0           |
| 12,2                       | 6,246                                                                   | 3,812     | 63,9    | 6,945       | 4,219     | 64,6    | 6,081       | 3,798     | 60,1    | 62,9          | 1,94                       | 0           |
| 13,2                       | 6,540                                                                   | 3,954     | 65,4    | 6,384       | 3,765     | 69,6    | 7,864       | 4,756     | 65,3    | 66,8          | 3,10                       | 0           |
| <b>Povprečje vlažnosti</b> | <b>71,0</b>                                                             |           |         | <b>73,7</b> |           |         | <b>68,8</b> |           |         | <b>71,2</b>   | <b>2,62</b>                | <b>0,00</b> |

- se nadaljuje

**Priloga F** Nadaljevanje

| Čas vzorčenja: 72 h        | Komorsko sušenje - Vlažnost, vlažnostni gradient in stopnja zaskorjenja |           |         |             |           |         |             |           |         |               |                            |             |
|----------------------------|-------------------------------------------------------------------------|-----------|---------|-------------|-----------|---------|-------------|-----------|---------|---------------|----------------------------|-------------|
| Oddaljenost od površine:   | 1                                                                       |           |         | 2           |           |         | 3           |           |         | $\bar{u}$ [%] | $\Delta u/\Delta x$ [%/cm] | S.Z.:       |
| Vzorec:                    | $m_v$ [g]                                                               | $m_0$ [g] | $u$ [%] | $m_v$ [g]   | $m_0$ [g] | $u$ [%] | $m_v$ [g]   | $m_0$ [g] | $u$ [%] |               |                            |             |
| 1,2                        | 3,460                                                                   | 2,844     | 21,7    | 2,371       | 1,805     | 31,4    | 3,227       | 2,671     | 20,8    | 24,6          | 7,99                       | 2           |
| 2,2                        | 3,662                                                                   | 2,918     | 25,5    | 4,573       | 3,733     | 22,5    | 3,724       | 2,974     | 25,2    | 24,4          | -1,78                      | 1           |
| 3,2                        | 3,321                                                                   | 2,723     | 22,0    | 2,615       | 2,015     | 29,8    | 3,250       | 2,697     | 20,5    | 24,1          | 6,76                       | 2           |
| 4,2                        | 3,637                                                                   | 2,968     | 22,5    | 4,558       | 3,429     | 32,9    | 3,601       | 2,938     | 22,6    | 26,0          | 6,41                       | 2           |
| 5,2                        | 3,568                                                                   | 2,871     | 24,3    | 4,322       | 3,203     | 34,9    | 3,642       | 2,899     | 25,6    | 28,3          | 6,22                       | 1           |
| 6,2                        | 3,300                                                                   | 2,732     | 20,8    | 3,185       | 2,495     | 27,7    | 3,506       | 2,885     | 21,5    | 23,3          | 4,90                       | 2           |
| 7,2                        | 3,157                                                                   | 2,651     | 19,1    | 2,868       | 2,273     | 26,2    | 3,150       | 2,637     | 19,5    | 21,6          | 5,25                       | 2           |
| 8,2                        | 3,025                                                                   | 2,556     | 18,3    | 3,319       | 2,641     | 25,7    | 3,120       | 2,660     | 17,3    | 20,4          | 5,81                       | 2           |
| 9,2                        | 2,390                                                                   | 1,994     | 19,9    | 3,367       | 2,612     | 28,9    | 2,584       | 2,140     | 20,7    | 23,2          | 6,28                       | 2           |
| 10,2                       | 2,725                                                                   | 2,262     | 20,5    | 2,856       | 2,214     | 29,0    | 2,901       | 2,406     | 20,6    | 23,3          | 6,12                       | 2           |
| 11,2                       | 3,234                                                                   | 2,698     | 19,9    | 3,066       | 2,387     | 28,4    | 3,184       | 2,645     | 20,4    | 22,9          | 6,28                       | 2           |
| 12,2                       | 3,068                                                                   | 2,577     | 19,1    | 2,849       | 2,254     | 26,4    | 3,522       | 2,960     | 19,0    | 21,5          | 5,63                       | 1           |
| 13,2                       | 3,459                                                                   | 2,905     | 19,1    | 2,779       | 2,196     | 26,5    | 3,271       | 2,763     | 18,4    | 21,3          | 5,97                       | 1           |
| <b>Povprečje vlažnosti</b> | <b>21,0</b>                                                             |           |         | <b>28,5</b> |           |         | <b>20,9</b> |           |         | <b>23,5</b>   | <b>5,53</b>                | <b>1,69</b> |

- se nadaljuje

**Priloga F** Nadaljevanje

| <b>Čas vzorčenja: 178 h</b>         | <b>Komorsko sušenje - Vlažnost, vlažnostni gradient in stopnja zaskorjenja</b> |           |         |             |           |         |             |           |         |               |                            |             |
|-------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------|-----------|---------|-------------|-----------|---------|-------------|-----------|---------|---------------|----------------------------|-------------|
| Oddaljenost od površine:<br>Vzorec: | 1                                                                              |           |         | 2           |           |         | 3           |           |         | $\bar{u}$ [%] | $\Delta u/\Delta x$ [%/cm] | S.Z.:       |
|                                     | $m_v$ [g]                                                                      | $m_0$ [g] | $u$ [%] | $m_v$ [g]   | $m_0$ [g] | $u$ [%] | $m_v$ [g]   | $m_0$ [g] | $u$ [%] |               |                            |             |
| 1,2                                 | 3,014                                                                          | 2,720     | 10,8    | 2,582       | 2,294     | 12,6    | 2,952       | 2,663     | 10,9    | 11,4          | 1,42                       | 1           |
| 2,2                                 | 3,416                                                                          | 3,018     | 13,2    | 3,823       | 3,278     | 16,6    | 3,392       | 2,994     | 13,3    | 14,4          | 2,21                       | 2           |
| 3,2                                 | 3,025                                                                          | 2,720     | 11,2    | 2,785       | 2,478     | 12,4    | 2,698       | 2,426     | 11,2    | 11,6          | 0,95                       | 2           |
| 4,2                                 | 3,280                                                                          | 2,915     | 12,5    | 3,842       | 3,330     | 15,4    | 3,369       | 2,991     | 12,6    | 13,5          | 1,80                       | 1           |
| 5,2                                 | 3,194                                                                          | 2,851     | 12,0    | 3,667       | 3,183     | 15,2    | 3,381       | 3,011     | 12,3    | 13,2          | 1,97                       | 2           |
| 6,2                                 | 3,670                                                                          | 3,366     | 9,0     | 3,324       | 3,011     | 10,4    | 2,828       | 2,587     | 9,3     | 9,6           | 0,94                       | 2           |
| 7,2                                 | 2,797                                                                          | 2,547     | 9,8     | 2,709       | 2,429     | 11,5    | 2,883       | 2,630     | 9,6     | 10,3          | 1,39                       | 1           |
| 8,2                                 | 2,973                                                                          | 2,703     | 10,0    | 3,053       | 2,737     | 11,5    | 2,689       | 2,457     | 9,4     | 10,3          | 1,38                       | 2           |
| 9,2                                 | 1,997                                                                          | 1,829     | 9,2     | 3,194       | 2,886     | 10,7    | 2,238       | 2,039     | 9,8     | 9,9           | 0,88                       | 1           |
| 10,2                                | 2,369                                                                          | 2,181     | 8,6     | 2,802       | 2,558     | 9,5     | 2,132       | 1,954     | 9,1     | 9,1           | 0,50                       | 2           |
| 11,2                                | 2,871                                                                          | 2,597     | 10,6    | 3,111       | 2,770     | 12,3    | 2,793       | 2,527     | 10,5    | 11,1          | 1,36                       | 2           |
| 12,2                                | 3,067                                                                          | 2,783     | 10,2    | 2,845       | 2,554     | 11,4    | 2,788       | 2,538     | 9,9     | 10,5          | 1,08                       | 1           |
| 13,2                                | 2,748                                                                          | 2,520     | 9,0     | 2,833       | 2,567     | 10,4    | 2,977       | 2,733     | 8,9     | 9,4           | 1,07                       | 1           |
| <b>Povprečje vlažnosti</b>          | <b>10,5</b>                                                                    |           |         | <b>12,3</b> |           |         | <b>10,5</b> |           |         | <b>11,1</b>   | <b>1,30</b>                | <b>1,54</b> |

**Priloga G** Povprečna vlažnost ( $\bar{u}$ ), vlažnostni gradient ( $\Delta u/\Delta x$ ) in stopnja zaskorjenja (S.Z.) pri postopku vakuumskega sušenja lesa v odvisnosti od časa vzorčenja (začetno, vmesno, končno vzorčenje)

| Čas vzorčenja: 0 h       | Vakuumsko sušenje - Vlažnost, vlažnostni gradient in stopnja zaskorjenja |                    |       |                    |                    |       |                    |                    |       |       |              |       |
|--------------------------|--------------------------------------------------------------------------|--------------------|-------|--------------------|--------------------|-------|--------------------|--------------------|-------|-------|--------------|-------|
| Oddaljenost od površine: | 1                                                                        |                    |       | 2                  |                    |       | 3                  |                    |       | ū [%] | Δu/Δx [%/cm] | S.Z.: |
| Vzorec:                  | m <sub>v</sub> [g]                                                       | m <sub>0</sub> [g] | u [%] | m <sub>v</sub> [g] | m <sub>0</sub> [g] | u [%] | m <sub>v</sub> [g] | m <sub>0</sub> [g] | u [%] |       |              |       |
| 1,3                      | 3,601                                                                    | 2,199              | 63,8  | 4,465              | 2,781              | 60,6  | 3,568              | 2,164              | 64,9  | 63,1  | -2,69        | 0     |
| 2,3                      | 3,390                                                                    | 2,126              | 59,5  | 4,707              | 2,993              | 57,3  | 3,445              | 2,174              | 58,5  | 58,4  | -1,20        | 0     |
| 3,3                      | 3,916                                                                    | 2,718              | 44,1  | 4,314              | 2,849              | 51,4  | 3,657              | 2,508              | 45,8  | 47,1  | 4,69         | 0     |
| 4,3                      | 3,971                                                                    | 2,533              | 56,8  | 4,684              | 2,916              | 60,6  | 4,014              | 2,545              | 57,7  | 58,4  | 2,45         | 0     |
| 5,3                      | 4,298                                                                    | 2,614              | 64,4  | 4,972              | 3,050              | 63,0  | 4,148              | 2,523              | 64,4  | 63,9  | -1,02        | 0     |
| 6,3                      | 3,844                                                                    | 2,667              | 44,1  | 3,966              | 2,716              | 46,0  | 3,546              | 2,463              | 44,0  | 44,7  | 1,47         | 0     |
| 7,3                      | 3,760                                                                    | 2,135              | 76,1  | 4,338              | 2,557              | 69,7  | 3,983              | 2,294              | 73,6  | 73,1  | -3,72        | 0     |
| Povprečje vlažnosti      | 58,4                                                                     |                    |       | 58,4               |                    |       | 58,4               |                    |       | 58,4  | -0,0023      | 0,00  |
| Čas vzorčenja: 27,33 h   |                                                                          |                    |       |                    |                    |       |                    |                    |       |       |              |       |
| 1,3                      | 2,421                                                                    | 1,876              | 29,1  | 3,679              | 2,777              | 32,5  | 2,532              | 1,989              | 27,3  | 29,6  | 3,07         | 0     |
| 2,3                      | 2,251                                                                    | 1,833              | 22,8  | 3,628              | 2,834              | 28,0  | 2,318              | 1,886              | 22,9  | 24,6  | 3,67         | -1    |
| 3,3                      | 2,800                                                                    | 2,425              | 15,5  | 2,978              | 2,558              | 16,4  | 2,479              | 2,057              | 20,5  | 17,5  | -1,14        | 0     |
| 4,3                      | 3,038                                                                    | 2,342              | 29,7  | 3,407              | 2,646              | 28,8  | 2,722              | 2,215              | 22,9  | 27,1  | 1,78         | 0     |
| 5,3                      | 3,155                                                                    | 2,463              | 28,1  | 3,796              | 2,807              | 35,2  | 2,849              | 2,124              | 34,1  | 32,5  | 3,01         | -1    |
| 6,3                      | 2,977                                                                    | 2,318              | 28,4  | 3,663              | 2,707              | 35,3  | 2,945              | 2,264              | 30,1  | 31,3  | 4,51         | 0     |
| 7,3                      | 2,207                                                                    | 1,838              | 20,1  | 3,366              | 2,621              | 28,4  | 2,591              | 1,977              | 31,1  | 26,5  | 2,04         | 0     |
| Povprečje vlažnosti:     | 24,8                                                                     |                    |       | 29,2               |                    |       | 27,0               |                    |       | 27,0  | 2,42         | -0,29 |
| Čas vzorčenja: 55,80 h   |                                                                          |                    |       |                    |                    |       |                    |                    |       |       |              |       |
| 1,3                      | 2,345                                                                    | 2,185              | 7,3   | 3,012              | 2,712              | 11,1  | 2,211              | 2,052              | 7,7   | 8,7   | 2,52         | -1    |
| 2,3                      | 2,187                                                                    | 2,028              | 7,8   | 3,356              | 3,020              | 11,1  | 2,324              | 2,161              | 7,5   | 8,8   | 2,44         | 0     |
| 3,3                      | 2,621                                                                    | 2,423              | 8,2   | 3,214              | 2,881              | 11,6  | 2,921              | 2,711              | 7,7   | 9,2   | 2,61         | -1    |
| 4,3                      | 2,912                                                                    | 2,695              | 8,1   | 3,302              | 2,954              | 11,8  | 2,612              | 2,424              | 7,8   | 9,2   | 2,81         | -1    |
| 5,3                      | 2,804                                                                    | 2,598              | 7,9   | 3,178              | 2,852              | 11,4  | 2,668              | 2,474              | 7,8   | 9,1   | 2,59         | 0     |
| 6,3                      | 2,635                                                                    | 2,435              | 8,2   | 3,042              | 2,731              | 11,4  | 2,614              | 2,416              | 8,2   | 9,3   | 2,37         | 0     |
| 7,3                      | 2,368                                                                    | 2,212              | 7,1   | 3,013              | 2,703              | 11,5  | 2,068              | 1,922              | 7,6   | 8,7   | 2,95         | 0     |
| Povprečje vlažnosti      | 7,8                                                                      |                    |       | 11,4               |                    |       | 7,8                |                    |       | 9,0   | 2,61         | -0,43 |

**Priloga H** Povprečna vlažnost ( $\bar{u}$ ), vlažnostni gradient ( $\Delta u/\Delta x$ ) in stopnja zaskorjenja (S.Z.) pri postopku visokofrekvenčno sušenja lesa v odvisnosti od časa vzorčenja (začetno, vmesno, končno vzorčenje)

| Čas vzorčenja: 0 h       | Visokofrekvenčno sušenje - Vlažnost, vlažnostni gradient in stopnja zaskorjenja |                    |       |                    |                    |       |                    |                    |       |       |              |       |
|--------------------------|---------------------------------------------------------------------------------|--------------------|-------|--------------------|--------------------|-------|--------------------|--------------------|-------|-------|--------------|-------|
| Oddaljenost od površine: | 1                                                                               |                    |       | 2                  |                    |       | 3                  |                    |       | ū [%] | Δu/Δx [%/cm] | S.Z.: |
| Vzorec:                  | m <sub>v</sub> [g]                                                              | m <sub>0</sub> [g] | u [%] | m <sub>v</sub> [g] | m <sub>0</sub> [g] | u [%] | m <sub>v</sub> [g] | m <sub>0</sub> [g] | u [%] |       |              |       |
| 1,4                      | 3,082                                                                           | 2,378              | 29,6  | 3,658              | 2,750              | 33,0  | 3,381              | 2,585              | 30,8  | 31,1  | 2,04         | 0     |
| 2,4                      | 4,060                                                                           | 3,036              | 33,7  | 5,266              | 3,821              | 37,8  | 3,820              | 2,857              | 33,7  | 35,1  | 2,42         | 0     |
| 3,4                      | 3,950                                                                           | 2,980              | 32,6  | 5,391              | 3,957              | 36,2  | 3,866              | 2,900              | 33,3  | 34,0  | 1,92         | 0     |
| 4,4                      | 3,231                                                                           | 2,485              | 30,0  | 4,398              | 3,264              | 34,7  | 3,408              | 2,587              | 31,7  | 32,2  | 2,81         | 0     |
| 5,4                      | 2,690                                                                           | 1,931              | 39,3  | 3,791              | 2,721              | 39,3  | 2,768              | 2,019              | 37,1  | 38,6  | 0,80         | 0     |
| 6,4                      | 3,404                                                                           | 2,565              | 32,7  | 4,286              | 3,177              | 34,9  | 3,360              | 2,515              | 33,6  | 33,7  | 1,27         | 0     |
| 7,4                      | 3,715                                                                           | 2,844              | 30,6  | 5,176              | 3,820              | 35,5  | 3,896              | 2,920              | 33,4  | 33,2  | 2,05         | 0     |
| Povprečje vlažnosti:     | 32,6                                                                            |                    |       | 35,9               |                    |       | 33,4               |                    |       | 34,0  | 1,90         | 0,00  |
| Čas vzorčenja: 27,33 h   |                                                                                 |                    |       |                    |                    |       |                    |                    |       |       |              |       |
| 1,4                      | 3,018                                                                           | 2,368              | 27,4  | 3,636              | 2,876              | 26,4  | 3,434              | 2,755              | 24,6  | 26,2  | 0,27         | 1     |
| 2,4                      | 4,140                                                                           | 3,429              | 20,7  | 4,246              | 3,783              | 12,2  | 3,469              | 2,915              | 19,0  | 17,3  | -4,50        | 1     |
| 3,4                      | 3,619                                                                           | 3,045              | 18,9  | 4,251              | 3,767              | 12,8  | 3,489              | 2,757              | 26,6  | 19,4  | -5,71        | 2     |
| 4,4                      | 3,279                                                                           | 2,600              | 26,1  | 4,290              | 3,277              | 30,9  | 3,170              | 2,573              | 23,2  | 26,7  | 4,54         | 3     |
| 5,4                      | 2,485                                                                           | 1,940              | 28,1  | 3,525              | 2,639              | 33,6  | 2,489              | 1,954              | 27,4  | 29,7  | 4,15         | 2     |
| 6,4                      | 3,399                                                                           | 2,735              | 24,3  | 4,177              | 3,241              | 28,9  | 3,160              | 2,519              | 25,4  | 26,2  | 2,92         | 3     |
| 7,4                      | 3,500                                                                           | 3,044              | 15,0  | 4,044              | 3,605              | 12,2  | 3,736              | 3,113              | 20,0  | 15,7  | -3,13        | 3     |
| Povprečje vlažnosti:     | 22,9                                                                            |                    |       | 22,4               |                    |       | 23,7               |                    |       | 23,0  | -0,21        | 2,14  |
| Čas vzorčenja: 55,80 h   |                                                                                 |                    |       |                    |                    |       |                    |                    |       |       |              |       |
| 1,4                      | 2,853                                                                           | 2,632              | 8,4   | 1,868              | 1,734              | 7,7   | 3,237              | 2,997              | 8,0   | 8,0   | -0,34        | 2     |
| 2,4                      | 3,459                                                                           | 3,222              | 7,4   | 2,931              | 2,746              | 6,7   | 3,257              | 3,036              | 7,3   | 7,1   | -0,34        | 1     |
| 3,4                      | 3,221                                                                           | 2,985              | 7,9   | 3,324              | 3,105              | 7,1   | 3,252              | 3,040              | 7,0   | 7,3   | -0,22        | 2     |
| 4,4                      | 2,900                                                                           | 2,705              | 7,2   | 4,755              | 4,321              | 10,0  | 3,128              | 2,864              | 9,2   | 8,8   | 1,33         | 1     |
| 5,4                      | 2,006                                                                           | 1,822              | 10,1  | 3,264              | 2,928              | 11,5  | 2,041              | 1,849              | 10,4  | 10,7  | 0,88         | 1     |
| 6,4                      | 2,698                                                                           | 2,386              | 13,1  | 3,297              | 2,976              | 10,8  | 3,006              | 2,689              | 11,8  | 11,9  | -1,20        | 1     |
| 7,4                      | 3,119                                                                           | 2,916              | 7,0   | 3,470              | 3,267              | 6,2   | 3,348              | 3,115              | 7,5   | 6,9   | -0,59        | 1     |
| Povprečje vlažnosti:     | 8,7                                                                             |                    |       | 8,6                |                    |       | 8,7                |                    |       | 8,7   | -0,07        | 1,29  |