

UNIVERZA V LJUBLJANI
BIOTEHNIŠKA FAKULTETA
ODDELEK ZA LESARSTVO

Franc OBRONEK

**ENERGIJSKA UČINKOVITOST SUŠILNEGA POSTOPKA V
RAZLIČNIH TEHNOLOGIJAH PREDELAVE ŽAGANEGA LESA**

DIPLOMSKO DELO
Visokošolski strokovni študij

**ENERGY EFFICIENCY OF DRYING WITH DIFFERENT SAWMILL
TECHNOLOGIES**

GRADUATION THESIS
Higher professional studies

Ljubljana, 2010

Diplomsko delo je zaključek visokošolskega študija lesarstva. Opravljeno je bilo na Katedri za tehnologijo lesa Oddelka za lesarstvo Biotehniške fakultete Univerze v Ljubljani.

Senat Oddelka za lesarstvo je za mentorja diplomskega dela imenoval prof. dr. Željka Goriška in za recenzentko doc.dr. Dominiko Gornik Bučar.

Komisija za oceno in zagovor:

Predsednik:

Član:

Član:

Datum zagovora:

Naloga je rezultat lastnega raziskovalnega dela.

Franc Obronek

KLJUČNA DOKUMENTACIJSKA INFORMACIJA

- ŠD Vs
- DK UDK 630*847.275
- KG bukovina/žagan les/sušenje/trajanje sušenja/poraba energije
- AV OBRONEK, Franc
- SA GORIŠEK, Željko (mentor)/GORNIK BUČAR, Dominika (recenzentka)
- KZ SI-1000 Ljubljana, Rožna dolina, c. VIII/34
- ZA Univerza v Ljubljani, Biotehniška fakulteta, Oddelek za lesarstvo
- LI 2010
- IN ENERGIJSKA UČINKOVITOST SUŠILNEGA POSTOPKA V RAZLIČNIH
TEHNOLOGIJAH PREDELAVE ŽAGANEGA LESA
- TD Diplomsko delo (visokošolski strokovni študij)
- OP IX, 49 str., 20 pregl., 16 sl., 25 vir.
- IJ sl
- JI sl/en
- AI Pri 3 načinih predelave (A – tehnično sušenje svežega žaganega lesa do ciljne vlažnosti 8 %; B – sušenje svežega žaganega lesa na prostem do območja nasičenja vlaken in tehnično dosuševanje elementov do ciljne vlažnosti; C – razžagovanje svežega žaganega lesa v elemente in tehnično sušenje elementov do končne vlažnosti) in nadaljnjim sušenjem žaganega lesa smo primerjali čase sušenja, vso porabo energije, specifično porabo energije, toplotno učinkovitost in energijsko vrednost lesnih ostankov. Izračune smo izvedli z računalniškim programom, ki je omogočal variiranje vhodnih parametrov in proučevanje njihovega vpliva na analizirane vrednosti. Najvišjo toplotno učinkovitost, najkrajše čase sušenja in najmanjšo kapaciteto sušilnih komor dosežemo pri razžagvanju svežega žaganega lesa v elemente (C), vendar pa je tveganje večje, kalorična vrednost ostankov pa nižja. Energijsko najpotratnejše je sušenje žaganega lesa (A), zahteva pa tudi največje kapacitete sušilnih komor. Z izvajanjem predušenja na prostem podaljšamo čas sušenja, bistveno pa se zmanjša vsa poraba energije in potrebne kapacitete komor. S pravilno izbiro tehnologije predelave lesa in sušenja pridobimo oziroma prihranimo energijo (razmerje med porabljeno in pridobljeno energijo je 1 : 7,12).

KEY WORDS DOCUMENTATION

- DN Vs
- DC UDC 630*847.275
- CX beechwood/sawn wood/wood drying/drying time/energy consumption
- AU OBRONEK, Franc
- AA GORIŠEK, Željko (supervisor)/GORNIK BUČAR, Dominika (co-advisor)
- PP SI-1000 Ljubljana, Rožna dolina, c. VIII/34
- PB University of Ljubljana, Biotechnical Faculty, Department of Wood Science and Technology
- PY 2010
- TI ENERGY EFFICIENCY OF DRYING WITH DIFFERENT SAWMILL TECHNOLOGIES
- DT Graduation Thesis (Higher professional studies)
- NO IX, 49 p., 20 tab., 16 fig., 25 ref.
- LA sl
- AL sl/en
- AB Among 3 different methods of sawmill processing and drying of wood (A – technical drying of fresh sawn timber to the target moisture content of 8 %, B – drying of fresh sawn wood in the open area to the fibre saturation and technical drying elements to target moisture content; C – cutting fresh sawn timber elements and technical elements to the final drying moisture content), the drying times, total energy consumption, specific energy consumption, energy efficiency and energy value of wood residues were compared. Using a new computer programme the influence of different outside parametres on examined values was analyzed. Cutting fresh sawn timber into elements (C), the maximum thermal efficiency, the shortest drying times and the minimum capacity of drying chambers are achieved, but the higher risk and lower calorific value of residue. Most energy consumed in drying of sawn wood (A) also requires the maximum capacity of drying chambers. Implementing drying outdoor extends drying time, substantially reduces total energy consumption and necessary capacity chambers. Selecting proper technology, wood processing and drying, we obtained substantial energy savings (relation between consumed and produced energy is 1 : 7,12).

KAZALO VSEBINE

str.

| | |
|--|------------|
| KLJUČNA DOKUMENTACIJSKA INFORMACIJA | III |
| KEY WORDS DOCUMENTATION | IV |
| KAZALO VSEBINE | V |
| KAZALO PREGLEDNIC | VII |
| KAZALO SLIK | IX |
| SEZNAM SIMBOLOV | XI |
| SEZNAM INDEKSOV | XI |
| 1 UVOD | 1 |
| 1.1 HIPOTEZE | 1 |
| 1.2 CILJI NALOGE | 2 |
| 2 SPLOŠNI DEL | 3 |
| 2.1 TEHNIČNE IZVEDBE | 3 |
| 2.2 KONVENCIONALNO SUŠENJE | 4 |
| 2.2.2 Naprave za ogrevanje | 7 |
| 2.2.3 Naprave za prisilno kroženje zraka | 9 |
| 2.2.4 Naprave za uravnavanje relativne zračne vlažnosti | 11 |
| 2.3 PORABA ENERGIJE PRI KONVEKCIJSKEM KOMORSKEM SUŠENJU Z DELNO IZMENJAVO ZRAKA | 12 |
| 2.4 MOŽNOSTI ZMANJŠANJA PORABE ENERGIJE PRI PROCESU SUŠENJA ŽAGANEGA LESA | 14 |
| 2.4.2 Sistem povezanih sušilnic | 16 |
| 2.5 PORABA ENERGIJE V POSTOPKIH SUŠENJA LESA | 16 |
| 2.6 LES KOT GORIVO | 18 |
| 2.6.1 Kaj vpliva na kurilno vrednost lesa | 18 |
| 2.6.2 Uporaba vlažnega goriva | 19 |
| 3 MATERIAL IN METODE | 20 |
| 3.1 MATERIAL | 20 |
| 3.1.1 Sušilni material | 20 |
| 3.1.2 Izbira sušilnih komor | 20 |
| 3.1.3 Karakteristike sušilnih komor | 20 |
| 3.2 METODA | 21 |
| 3.2.1 Predelava lesa | 21 |
| 3.2.2 Analiziranje in primerjava tehnologij predelave lesa | 22 |
| 3.2.3 Sušilni režimi | 22 |
| 3.2.4 Postopek izračuna porabe energije | 24 |
| 3.2.4.1 Toplota za segrevanje sušilne komore in lesa | 24 |
| 3.2.4.2 Toplota za segrevanje zraka | 26 |
| 3.2.4.3 Toplota za izparevanje vode iz lesa | 28 |
| 3.2.4.4 Toplota za nadomeščanja topotnih izgub | 29 |

| | | |
|--------------|--|-----------|
| 3.2.4.5 | Izračun kazalnikov učinka porabe toplote pri sušenju lesa in možnih prihrankov z namestitvijo toplotnega prenosnika..... | 30 |
| 3.2.5 | Vpliv vlažnosti na kurilno vrednost..... | 31 |
| 4 | REZULTATI..... | 33 |
| 4.1 | ALGORITERM ZA IZRAČUNAVANJE ENERGIJSKE UČINKOVITOSTI..... | 33 |
| 4.2 | PRIMERJAVA ČASA SUŠENJA IN PORABE ENERGIJE GLEDE NA TEHNOLOGIJO PREDELAVE LESA..... | 35 |
| 4.2.1 | Časi sušenja in potrebne kapacitete sušilnih komor..... | 35 |
| 4.2.2 | Poraba energije..... | 36 |
| 4.2.3 | Struktura porabljene energije..... | 37 |
| 4.3 | PRIDOBLENJA ENERGIJA..... | 39 |
| 4.3.1 | Količina pridobljene energije iz ostankov lesa..... | 39 |
| 4.3.2 | Prihranek energije z namestitvijo toplotnega prenosnika..... | 40 |
| 4.4 | PRIMERJAVA MED TEHNOLOGIJAMI..... | 40 |
| 4.4.1 | Primerjava potrebne in pridobljene energije pri različnih načinih predelave..... | 40 |
| 5 | RAZPRAVA..... | 42 |
| 6 | SKLEPI..... | 46 |
| 7 | POVZETEK..... | 47 |
| 8 | LITERATURA..... | 48 |

| KAZALO PREGLEDNIC | | str. |
|-------------------|---|------|
| Preglednica 1 | Potrebna instalirana moč grelnih naprav za različne hitrosti sušenja in vrste lesa (Gorišek, 2004). | 9 |
| Preglednica 2 | Deleži porabe toplote pri konvekcijskem sušenju lesa po različnih avtorjih (Rosen, 1980, Corder, 1980 in Miller, 1977). | 13 |
| Preglednica 3 | Možne izboljšave pri komorski sušilnici (po Brunnerju, 1997). | 15 |
| Preglednica 4 | Primerjava sušilnih stroškov glede na stroške sušenja hrastovine debeline 50 mm z različnimi drevesnimi vrstami in debelinami glede na padec lesne vlažnosti iz 90 % na 8 % ter iz 30 % na 8 % (Guzenda, 2000). | 17 |
| Preglednica 5 | Gostota lesa v absultnem suhem stanju (ρ_0), volumski skrček (β_v) in koeficient lesne vrste (α) (Wagenführ, Scheiber, 1989). | 20 |
| Preglednica 6 | Tehnične karakteristike sušilnih komor (privzeto po »Brunner-Hildebrand«). | 20 |
| Preglednica 7 | Strukturni prerez kovinske izvedbe sušilne komore, materiali, koeficienti toplotne prevodnosti in toplotna prehodnost (Brunner, 1987). | 21 |
| Preglednica 8 | Sušilni režim za bukovino debeline 25 mm, začetne vlažnosti 80 %, na osnovi ameriškega režima. | 23 |
| Preglednica 9 | Sušilni režim za bukovino debeline 50 mm, začetne vlažnosti 80 %, na osnovi ameriškega režima. | 23 |
| Preglednica 10 | Parametri za izračunavanje potrebne toplote za segrevanje sušilne komore in lesa (Brunner, 1987). | 24 |
| Preglednica 11 | Prikaz kurilne vrednosti pri različni lesni vlažnosti za les bukovine in prikaz padca kurilne vrednosti glede absolutno suhega lesa (Kraut, 1981). | 31 |
| Preglednica 12 | Čas (h) sušenja enega cikla bukovine, debeline 25 mm pri padcu vlažnosti z 80 na 8 % lesne vlažnosti. | 35 |
| Preglednica 13 | Čas (h) sušenja enega cikla bukovine, debeline 50 mm pri padcu vlažnosti z 80 na 8 % lesne vlažnosti. | 35 |

| | | |
|----------------|--|----|
| Preglednica 14 | Količina letno predelane bukovine (m^3) debelin 25 in 50 mm pri različnih načinih predelave. | 36 |
| Preglednica 15 | Poraba energije (v TJ) v procesu sušenja bukovih žaganic, debeline 25 in 50 mm iz vlažnosti 80 % na ciljno končno vlažnost 8 %. | 36 |
| Preglednica 16 | Struktura porabljene energije pri sušenju bukovih žaganic pri treh načinih predelave: A) sušenje svežega žaganega lesa, B) dosuševanje elementov od TNCS do ciljne vlažnosti in C) sušenje svežih elementov do končne vlažnosti. | 38 |
| Preglednica 17 | Pridobljena energija (TJ) iz količine ostankov lesa različne vlažnosti, kateri so nastali v procesu predelave lesa pred in po sušenju. | 39 |
| Preglednica 18 | Relativno zmanjšanje porabe toplote z namestitvijo toplotnega prenosnika (r) v procesu sušenja bukovih žaganic, debeline 25 mm ($15.000 m^3$) in 50 mm ($5.000 m^3$) iz vlažnosti 80 % na ciljno končno vlažnost 8 %. | 40 |
| Preglednica 19 | Razlike med pridobljeno in porabljeno energijo pri različnih načinih predelave žaganega lesa v procesu sušenja lesa. | 42 |
| Preglednica 20 | Primerjava toplotne učinkovitosti $\eta(\%)$, specifična poraba toplote q na časovno enoto in maso izločene vode, pri sušenju lesa različnih načinih predelave. | 45 |

| | KAZALO SLIK | str. |
|----------|---|------|
| Slika 1 | Različne zmogljivosti sušilnih komor: zgoraj levo – velikokapacitivna komora; zgoraj desno – »industrijska« komora; spodaj levo – dopolnilna komora in spodaj desno – obrtniška komora (Gorišek, 2004). | 5 |
| Slika 2 | Nevarnost toplotnih mostov pri montažni izvedbi sušilnih komor (Gorišek, 2004). | 7 |
| Slika 3 | Sistem ogrevanja: zgoraj levo – kotlovnica; zgoraj desno – razdelilnik toplotnega medija; spodaj levo – grelni register cevi z navitjem in spodaj desno – cev z navojem pločevine (Gorišek, 2004). | 8 |
| Slika 4 | Najpogostejše vrste ventilatorjev: zgoraj levo – osni (aksialni); spodaj levo – radialni in desno – veliki »bočni« ventilatorji (Gorišek, 2004). | 10 |
| Slika 5 | Delež stroškov energije glede na padec vlažnosti pri različnih drevesnih vrstah (Guzenda, 2000). | 17 |
| Slika 6 | Prikaz načina predelave lesa, kjer sušimo svež žagan les do končne vlažnosti in ga osušenega razrežemo v elemente. | 21 |
| Slika 7 | Prikaz načina predelave lesa, kjer žagan les sušimo na prostem do točke nasičenja celičnih sten, ga razžagamo v elemente in elemente dosušimo do končne vlažnosti. | 21 |
| Slika 8 | Prikaz načina predelave lesa, kjer svež žagan les razžagamo v elemente in elemente iz svežega stanja sušimo do končne vlažnosti. | 22 |
| Slika 9 | Vpliv lesne vlažnosti na kurilno vrednost pri bukovini (Kraut, 1981). | 32 |
| Slika 10 | Algoritem izračunavanja pridobljene in porabljene energije v različnih tehnologijah kombinacije predelave in sušenja žaganega lesa. | 34 |

- Slika 11 Skupna poraba energije (TJ) pri sušenju bukovih žaganic debeline 25 mm (15.000 m³) in 50 mm (5.000 m³) pri treh načinih predelave: A) sušenje svežega žaganega lesa, B) dosuševanje elementov od TNCS do ciljne vlažnosti in C) sušenje svežih elementov do končne vlažnosti (povprečna temperatura okolice $T_{ok} = 10 \text{ }^{\circ}\text{C}$ in povprečna relativna zračna vlažnost okolice $\varphi_{ok} = 70 \text{ } \%$). 37
- Slika 12 Deleži porabljene energije (%) v različnih fazah sušenja pri sušenju bukovih žaganic debelin 25 mm (15.000 m³) in 50 mm (5.000 m³) pri treh načinih obdelave: A) sušenje svežega žaganega lesa, B) dosuševanje elementov od TNCS do ciljne vlažnosti in C) sušenje svežih elementov do ciljne vlažnosti (povprečna temperatura okolice $T_{ok} = 10 \text{ }^{\circ}\text{C}$ in povprečna relativna zračna vlažnost okolice $\varphi_{ok} = 70 \text{ } \%$). 38
- Slika 13 Primerjava količin potrebne energije v procesu sušenja bukovih žaganic debelin 25 mm (15.000 m³) in 50 mm (5.000 m³) pri treh načinih obdelave: A) sušenje svežega žaganega lesa, B) dosuševanje elementov od TNCS do ciljne vlažnosti in C) sušenje svežih elementov do ciljne vlažnosti (povprečna temperatura okolice $T_{ok} = 10 \text{ }^{\circ}\text{C}$ in povprečna relativna zračna vlažnost okolice $\varphi_{ok} = 70 \text{ } \%$) in pridobljene. 41
- Slika 14 Specifična poraba toplote na časovno enoto (MJ/h) pri sušenju bukovih žaganic debelin 25 mm (15.000 m³) in 50 mm (5.000 m³) pri treh načinih obdelave: A) sušenje svežega žaganega lesa, B) dosuševanje elementov od TNCS do ciljne vlažnosti in C) sušenje svežih elementov do končne vlažnosti (povprečna temperatura okolice $T_{ok} = 10 \text{ }^{\circ}\text{C}$ in povprečna relativna zračna vlažnost okolice $\varphi_{ok} = 70 \text{ } \%$). 43
- Slika 15 Specifična poraba toplote na maso izpodrinjene vode (MJ/kg vode) pri sušenju bukovih žaganic debelin 25 mm (15.000 m³) in 50 mm (5.000 m³) pri treh načinih obdelave: A) sušenje svežega žaganega lesa, B) dosuševanje elementov od TNCS do ciljne vlažnosti in C) sušenje svežih elementov do končne vlažnosti (povprečna temperatura okolice $T_{ok} = 10 \text{ }^{\circ}\text{C}$ in povprečna relativna zračna vlažnost okolice $\varphi_{ok} = 70 \text{ } \%$). 44
- Slika 16 Toplotna učinkovitost sušilne komore pri sušenju bukovih žaganic debelin 25 mm (15.000 m³) in 50 mm (5.000 m³) pri treh načinih obdelave: A) sušenje svežega žaganega lesa, B) dosuševanje elementov od TNCS do ciljne vlažnosti in C) sušenje svežih elementov do končne vlažnosti (povprečna temperatura okolice $T_{ok} = 10 \text{ }^{\circ}\text{C}$ in povprečna relativna zračna vlažnost okolice $\varphi_{ok} = 70 \text{ } \%$). 45

SEZNAM SIMBOLOV

| | |
|-----------------|---|
| t..... | čas (s) |
| Q..... | toplota (J) |
| q..... | specifična poraba toplote (KJ/kg), (KJ/h) |
| ρ | gostota (kg/m^3) |
| β | skrček (%) |
| λ | toplotna prevodnost (W m/K) |
| α | koeficient lesne vrste |
| φ | relativna zračna vlažnost (%) |
| A..... | površina (m^2) |
| T..... | temperatura (K), ($^{\circ}\text{C}$) |
| k..... | toplotna prehodnost ($\text{W/m}^2 \text{K}$) |
| u..... | relativna lesna vlažnost (%) |
| a..... | specifična površina (m^2/m^3) |
| m..... | masa (kg) |
| TNCS..... | točka nasičenja celičnih sten (%) |
| P..... | tlak (Pa) |
| c..... | specifična toplota (kJ/kg K) |
| V..... | volumen (m^3) |
| η | toplotna učinkovitost |
| y..... | absolutna vlažnost zraka (kg/kg) |
| I..... | entalpija (kJ/kg) |

SEZNAM INDEKSOV

| | |
|-----------|----------------------|
| izp..... | izparilna |
| cel..... | celotna |
| kom..... | komore |
| ok..... | okolice |
| zr..... | zraka |
| o..... | absolutno suhe snovi |
| sorp..... | sorpcije |
| k..... | končna |
| z..... | začetna |
| prim..... | primarna |
| v..... | volumenski |
| l..... | lesa |

1 UVOD

Svež les po poseku vsebuje velike količine vode. Ta voda omejuje oziroma preprečuje nadaljnjo predelavo in obdelavo lesa. Sušenje lesa je zato nujno potrebna faza v predelavi lesa.

Sušenje lesa je časovno dolgotrajen in energijsko potraten postopek. Kar 60 do 70 % celotno porabljene energije v lesnopredelovalni proizvodnji odpade na sušenje lesa.

Na porabo energije v postopku sušenja lesa vpliva tudi tehnologija predelave žaganega lesa v elemente. Razžagovanje žaganega lesa v elemente, ki jih potrebujemo v nadaljnji predelavi lahko izvajamo v:

- svežem stanju,
- po delni osušitvi pri vlažnosti okrog točke nasičenja celičnih sten ali pa
- razžagujemo žagan les osušen že na končno vlažnost.

V postopku izvajanja sušenja lesa se zato srečujemo z več spremenljivimi dejavniki:

- spreminja se velikost in kapaciteta sušilnih komor,
- različni so časi sušenja,
- poraba energije v procesu sušenja je odvisna od izbrane tehnologije ter
- spreminja se kurilna vrednost lesnih ostankov, ki jih najpogosteje uporabimo za pridobivanje toplotne energije.

1.1 HIPOTEZE

V zadnjih letih se sušenje lesa na prostem vse bolj umika najrazličnejšim tehničnim postopkom. Tehnično sušenje lesa je v lesarski proizvodnji nujni postopek, s katerim želimo skrajšati časovno dolgotrajen postopek odstranjevanja vode iz lesa. V zadnjih desetletjih se vse bolj uveljavlja konvencionalno komorsko sušenje. Kljub uvajanju novih tehnik pa ostaja normalnotemperaturno konvekcijsko komorsko sušenje z delno izmenjavo zraka postopek, po katerem danes sušimo daleč največje količine lesa – in bomo verjetno tudi v prihodnje. Zaradi prednosti z vidika porabe energije, izenačevanja vlažnosti v šarži in relaksacije napetosti pa še vedno ostaja sušenje na prostem v uporabi pri sušenju svežega lesa.

V sušilni praksi smo pogosto pred odločitvijo o pravilni oziroma optimalni izbiri tehnologije predelave žaganega lesa in sušenja. Tako sušenje svežega žaganega lesa in na drugi strani takojšnje razžagovanje v elemente imata svoje prednosti in slabosti, ki so navadno za posamezno industrijsko podjetje specifični, zato je končna odločitev lahko od primera do primera različna. Pri določanju razporeda razžagovanja žaganega lesa v elemente pa nikakor ne smemo zanemariti tudi v praksi dokaj uveljavljeno t.i. predušenje žaganega lesa na prostem, razžagovanje in nato dosuševanje elementov do ciljne končne vlažnosti.

Predpostavljamo, da med tremi primerjalnimi tehnologijami predelave bukovine

- sušenje sveže žaganega lesa do ciljne vlažnosti in razžagovanje že osušenega lesa v elemente;
- sušenje žaganega lesa na prostem do točke nasičenja celičnih sten, nato razžagovanje v elemente in dosuševanje elementov do ciljne vlažnosti;
- razžagovanje svežega žaganega lesa v elemente in sušenje le teh iz svežega stanja do končne vlažnosti;

obstajajo značilne razlike v času procesa in porabi energij, ki sta odločilna parametra za končno izbiro optimalne tehnologije.

V predelavi lesa pred sušenjem lesa nastane veliko materiala, katera opredeljujemo kot ostanek. Ta material se v večini primerov uporablja kot kurivo za pridobivanje energije v proizvodnji.

Pri različnih tehnologijah predelave nastane različna količina ostankov. Še večji poudarek pri ostankih je v njihovih različnih vlažnostih, ker vemo, da vlažnost lesa odločilno vpliva na kurilno vrednost. S tem pa vplivamo na količino pridobljene energije.

1.2 CILJI NALOGE

Odločitev o izbiri najprimernejše tehnologije temelji tudi na energetske učinkovitosti, ki jo s posamezno tehnologijo lahko dosežemo, saj je sušenje med energijsko najpotratnejšimi operacijami v procesu predelave lesa. Na specifičnem primeru lesnoindustrijskega obrata bomo ovrednotili porabo energije v treh različnih hipotetično predpostavljenih tehnologijah predelave žaganega lesa in sušenja. Primerjava energijske učinkovitosti naj bi predstavljala bistveni argument pri končni odločitvi pri izbiri najprimernejše tehnologije.

Pravilna izbira najprimernejše tehnologije predelave žaganega lesa in sušenja pripomore k zmanjševanju časovno in energijsko potratnega procesa.

Za lažjo ponazoritev rezultatov si bomo hipotetično predpostavili, da obravnavamo podjetje, ki na leto porabi 20.000 m³ sveže žaganega lesa bukovine. Pri tehnologiji razžagovanja bomo upoštevali, da podjetje za proizvodnjo potrebuje 15.000 m³ suhega bukovega lesa debeline 25 mm in 5.000 m³ suhe bukovine debeline 50 mm.

Na hipotetično izbranem primeru lesnoindustrijskega podjetja bomo ugotavljali:

- kakšen vpliv ima izbira tehnologije predelave lesa na porabo energije v procesu sušenja lesa,
- primerjali bomo energijsko učinkovitost sušilnega postopka med posameznimi tehnologijami predelave žaganega lesa,
- ocenili bomo energijsko vrednost lesnih ostankov pri posameznih tehnologijah predelave in
- ovrednotili prihranke pri optimalnem izboru energije.

2 SPLOŠNI DEL

2.1 TEHNIČNE IZVEDBE

Sušenje lesa je v industriji predelave lesa nujen in več ali manj poznan postopek. Poznamo različne izvedbe tehničnega sušenja: konvekcijsko sušenje z delno izmenjavo zraka, vakuumsko, kondenzacijsko sušenje in podobno. Tehnike sušenja dobro poznamo, manj znani pa so podatki o porabi energije pri postopku sušenja lesa.

Tudi struktura novih zmogljivosti v zadnjih letih pri nas in v Evropi kaže na še vedno največje zanimanje za konvencionalno sušenje, saj se tako suši približno 90 odstotkov vsega žaganega lesa. V zadnjem času se nekoliko povečuje delež osušenega lesa v kondenzacijskih komorah, prav tako pa se vakuumsko sušilna tehnika zelo uveljavlja za namensko sušenje določenih lesnih sortimentov in je vse manj zgolj tržna niša proizvajalcev tovrstne opreme.

V zadnjih letih se sušenje lesa na prostem vse bolj umika najrazličnejšim tehničnim postopkom. Kljub uvajanju novih tehnik pa ostaja normalnotemperaturno konvekcijsko komorsko sušenje z delno izmenjavo zraka postopek, po katerem danes sušimo daleč največje količine lesa – in bomo verjetno tudi v prihodnje. V praksi imenujemo takšno sušenje klasično oziroma konvencionalno. Drugi postopki tehničnega sušenja ne pomenijo večje alternative, so pa pomembni kot specialni in uveljavljeni za natančno določene namene. Vendar tudi s konvencionalnim sušenjem s čedalje bolj izpopolnjeno opremo dosegamo vse večjo kakovost osušenega lesa, krajše čase sušenja in manjšo porabo energije.

Sodobna in kakovostna komorska sušilnica mora biti izdelana iz nekorozivnih materialov in mora imeti dobro toplotno izolativnost, brez toplotnih mostov in možnosti kondenzacije vodne pare na notranjih površinah komore. Konstrukcija mora biti parotesna in mora omogočati tudi izločanje kondenzata, ki bi denimo lahko nastajal v primeru navlaževanja. Kapaciteta grelcev in ventilatorjev mora ustrezati velikosti polnitve komore in sušilnim lastnostim lesa, kjer je še posebej pomembno zagotavljanje enakih pogojev v celotni komori.

Prevlada normalnotemperaturnega konvekcijskega komorskega sušenja z delno izmenjavo zraka temelji na prednostih, ki jih ima v veliki izbiri velikosti in izvedbi naprav. Komore omogočajo poljubno in vselej najugodnejšo nastavitvev in vzdrževanje razmer sušenja glede na vrsto lesa, njegovo debelino ter začetno ali končno vlažnost. Izkoriščanje poceni energije iz lesnih ostankov in najrazličnejše možnosti priključka toplotnih medijev prevesijo odločitev o vlaganjih v nove sušilne naprave v korist konvencionalnim sušilnicam.

Na trgu je veliko število oblik in velikosti konvekcijskih komorskih sušilnic in jih je nemogoče razvrstiti po njihovi učinkovitosti ali po doseganju končne kakovosti posušenega lesa. Ključno vprašanje pri teh napravah ni: »Katera izvedba je najboljša?«, ampak: »Katera konstrukcija najbolj ustreza zahtevam uporabnika, z vidika učinkovitosti

in fleksibilnosti?«. Torej mora biti izbira učinkovite sušilne komore natančno prilagojena potrebam končnega uporabnika naprave, t. j. lesno predelovalnemu podjetju.

2.2 KONVENCIONALNO SUŠENJE

Ko govorimo o sušenju v komorskih sušilnicah (angl. kiln drying, nem. Kammertrocknung), imamo v mislih konvencionalno sušenje, ki ga širše imenujemo normalnotemperaturno konveksijsko komorsko sušenje z delno izmenjavo zraka. Drugi tehnični postopki sušenja se uporabljajo izjemoma in so bolj namenjeni posebnim zahtevam uporabnikov.

Prednosti konveksionalnega sušenja so vsekakor v poljubni in v vsakem trenutku optimalni nastavitvi pogojev sušenja oziroma sušilne klime ne glede na drevesno vrsto, njegovo debelino, začetno ali končno vlažnost. Časi sušenja so dolgi, katere pa lahko s povišanjem temperature znižamo. Najrazličnejše možnosti priključka toplotnih medijev in izkoriščenja cenene energije iz lesnih ostankov pa največkrat prevesijo v njeno korist, ko se odločamo o načinih 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 prej posuši. Da bi zagotovili kontinuirano proizvodnjo in visoko kakovost, les po sušenju še »temperiramo« in »umirimo« v prostoru z nadzorovano klimo.

Temperature v konveksionalnih sušilnicah so glede na sušečo se lesno vrsto, debelino in vlažnost od 40 do 100 °C, relativna zračna vlažnost je med 20 in 100 %, hitrost zraka pa navadno od 1,5 do 4 m/s. Izraz konveksijski 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) in v sušilnem prostoru segreje les, od njega pa sprejme oddano vodo.

Komorske sušilnice se razlikujejo po velikosti, izvedbi (zidane, kovinske), dimenzijah zložajev lesa ali sortimentov, načinu polnjenja in praznjenja, vrsti grelnega medija oziroma grelnih naprav, po napravah za kroženje zraka ter po vrsti merilnih in regulacijskih naprav.

Neto zmogljivost »klasičnih« sušilnih komor je od nekaj do več sto kubičnih metrov, kar omogoča primerno izbiro tako za manjšo obrtniško proizvodnjo kot tudi za visokoproduktivne industrijske obrate (sl. 1).



Slika 1 Različne zmogljivosti sušilnih komor: zgoraj levo – velikokapacitivna komora; zgoraj desno – »industrijska« komora; spodaj levo – dopolnilna komora in spodaj desno – obrtniška komora (Gorišek, 2004).

Komore nimajo standardnih dimenzij, ampak so narejene po željah naročnikov, torej je vsaka praktično izdelana sušilna komora unikat. Največkrat se sicer dimenzionirajo na podlagi zložajev standardnih dimenzij 4 x 1,2 x 1,2m. Na podlagi teh podatkov imajo komore dimenzije:

- Dolžina
 - 4,5m (1 zložaj po dolžini)
 - 9m (2 zložaja po dolžini)
 - 12,5 m (3 zložaji po dolžini)
- Širina/globina - 2 zložaja po globini (2 x (1,2 + 0,25m) prostor med zložajema + 2m bočni prazen prostor) = 4,65m
 - 3 zložaji po globini = 6,1m
 - 4 zložaji po globini = 7,55m
 - 5 zložajev po globini = 9m
 - 6 zložajev po globini = 10,45m
 - 7 zložajev po globini = 11,9m
 - 8 zložajev po globini = 13,35m
 - 9 zložajev po globini = 14,8m
 - 10 zložajev po globini = 16,25m
 - 11 zložajev po globini = 17,7m
- Višina
 - 3 zložaja po višini (3 x 1,2 + 0,4m prazen prostor) = 4m

Pred odločitvijo o izbiri sušilne komore moramo ustrezno pripraviti tudi prostor, kjer nameravamo komoro postaviti.

Zagotovljene morajo biti:

- ustrezna infrastruktura (toplota, elektrika ...),
- zadostna nosilnost in
- urejenost in dostopnost prostora.

Po konstrukcijski izvedbi so komore zidane ali montažne izvedbe. Zidane so toplotno stabilnejše in korozivno odpornejše, medtem ko je gradnja montažnih hitrejša, lažje jih nadgradimo (modularna gradnja) in tudi segrevanje je hitrejše.

Ne glede na izvedbo morajo sušilne komore zadostiti strogim zahtevam:

- toplotne izoliranosti,
- tesnosti oziroma nepropustnosti za paro, kondenzirajočo vodo ali druge kondenzate,
- korozijske odpornosti in
- nosilnosti.

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.

Nevarnostim negativnega vpliva kondenzata se izognemo z:

- odstranitvijo toplotnih mostov (zračniki, vrata, dovodi grelnega medija in vode za navlaževanje, nosilni konstrukcijski elementi, spojni elementi ...)(sl. 2),
- drenažnimi jaški zunaj sušilne komore,
- s preprečevanjem poškodb na konstrukciji in
- učinkovitimi premazi.

Dobro izolirane sušilne komore povečajo tudi energijsko učinkovitost sistema in zmanjšujejo emisije. Koeficient toplotne prehodnosti naj ne bi presegel vrednosti $0,8 \text{ W/m}^2\text{K}$, boljši proizvajalci pa že zagotavljajo konstrukcijo s toplotno prehodnostjo pod $0,4 \text{ W/m}^2 \text{ K}$.

Dovodni in odvodni zračniki ter ostale napeljave



Slika 2 Nevarnost toplotnih mostov pri montažni izvedbi sušilnih komor (Gorišek, 2004).

V ogrodje sušilne komore so vgrajena vrata, ki morajo ustrezati transportu lesa in lokaciji. Vrata naj bi imela čim manjšo površino, vendar morajo biti enako toplotno izolirana kot stene sušilne komore. Sistemi zapiranja morajo zagotavljati hitro, varno in tesno zapiranje. Tesnilo vrat mora biti odporno proti visoki temperaturi in kondenzatu; poškodovano je treba zamenjati. V okolici vrat najpogosteje pride do kondenzacije, zato je potrebna dobra zaščita vseh delov vrat pred korozijo.

2.2.2 Naprave za ogrevanje

Sušenje lesa uvrščamo med termodifuzijske postopke, zato je za učinkovito sušenje treba les in naprave v komori segreti oziroma pregreti na temperaturo sušenja ter jo med postopkom vzdrževati na optimalni ravni. Največ toplote se porabi na začetku pri segrevanju in v zimskih mesecih.

Najpomembnejši del naprav za ogrevanje so grelniki, ki delujejo kot toplotni izmenjevalci in so nameščeni tako, da zagotavljajo enakomerno segrevanje celotne komore. Prenos toplote z grelnih medijev je učinkovitejši od segrevanja zraka v komori, zato toplotni tok povečamo z večjo površino (šopi rebrastih cevi, pločevinasta jeklena ali bimetalna navitja ...) (sl. 3).



Slika 3 Sistem ogrevanja: zgoraj levo – kotlovnica; zgoraj desno – razdelilnik toplotnega medija; spodaj levo – grelni register cevi z navitjem in spodaj desno – cev z navojem pločevine (Gorišek, 2004).

Instalirana moč grelnih naprav je odvisna od velikosti sušilne komore, želene temperature in hitrosti sušenja, to pa predvsem od lesne vrste, vlažnosti lesa in kakovosti sušenja. Moč ogrevalnega sistema določimo glede na porabo energije za izločanje vode iz lesa, toplotne izgube zaradi prehoda skozi stene in vrata z upoštevanjem klimatske cone ter izgubo toplote zaradi izmenjave zraka med sušenjem in pri zamenjavi lesa (pregl. 1).

Najrazličnejše izvedbe grelnikov omogočajo izkoriščanje različnih grelnih medijev, za to se lahko prilagodimo toplotnim postrojenjem. Kot grelni mediji se uporabljajo nizko in visokotlačna para, vroča voda ali termična olja.

Preglednica 1 Potrebna instalirana moč grelnih naprav za različne hitrosti sušenja in vrste lesa (Gorišek, 2004).

| Hitrost sušenja in vrste lesa | kW/m ³ | MJ/hm ³ |
|--|-------------------|--------------------|
| Gosti, počasi sušeči se lesovi | 3,0 | 10,8 |
| Srednje težko sušeči se listavci | 6,0 | 21,6 |
| Hitro sušenje srednje težko sušečih se listavcev | 8,0 | 28,8 |

Električno segrevanje se v konvencionalnih sušilnih komorah uporablja le izjemoma. V preteklosti se je uporabljalo tudi neposredno segrevanje lesa z zgorevalnimi plini, vendar so ga zaradi spremembe barve in vonja lesa ter nevarnosti vžiga opustili, nekoliko spremenjen postopek pa se danes uporablja pri zadimljenju lesa.

2.2.3 Naprave za prisilno kroženje zraka

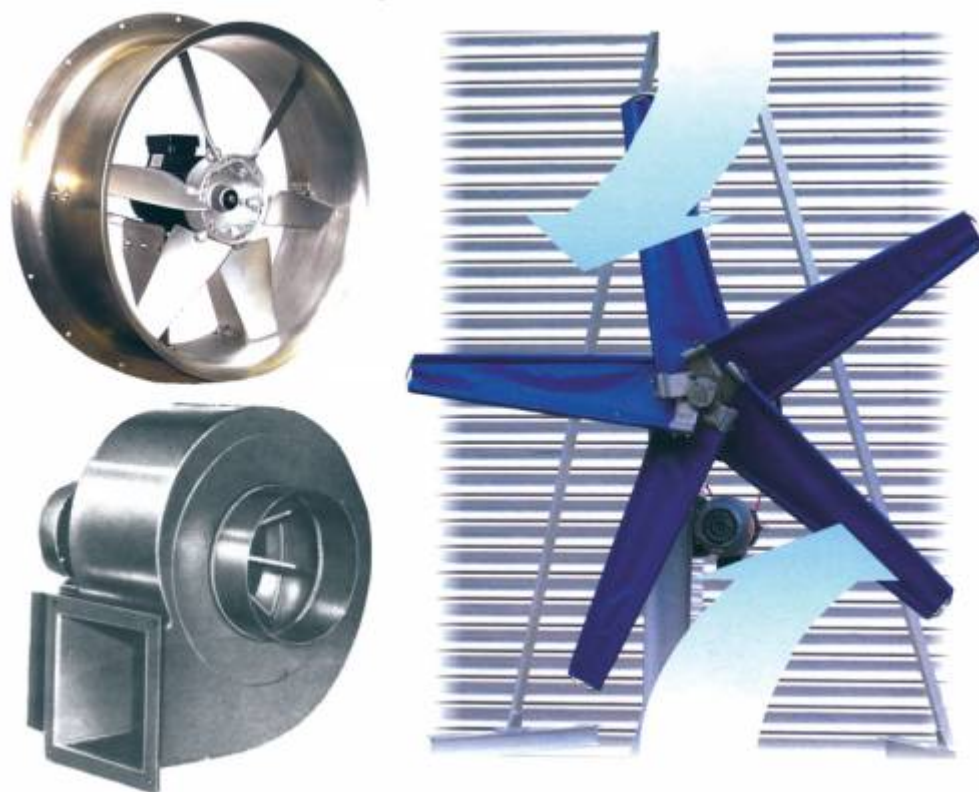
Še pomembnejše kot grelne naprave so v konvekcijskih komorah naprave za prisilno kroženje zraka. Najpogosteje uporabljamo ventilatorje, ki morajo zagotoviti:

- prenos toplote z grelnikov na površino lesa,
- odstranjevanje uparjene vode s površine lesa ter
- mešanje zračnih tokov pri izmenjavi zraka.

Učinkovito izvajanje sušilnega postopka je odvisno od:

- enakomernega prepihanja,
- pravilnega formiranja zložaja,
- pravilnega polnjenja komore in
- aerodinamike celotne sušilne komore.

V trenutni ponudbi lahko najpogosteje izbiramo med tremi sistemi prepihanja. Najpogostejši so »stropni« osni (aksialni) ventilatorji, za njimi bočno postavljeni ventilatorji, ki so prav tako osni, vendar praviloma večjih premerov, vse manj pogosta pa je uporaba radialnih ventilatorjev (sl. 4).



Slika 4 Najpogostejše vrste ventilatorjev: zgoraj levo – osni (aksialni); spodaj levo – radialni in desno – veliki »bočni« ventilatorji (Gorišek, 2004).

Najprimernejše naprave za prisilno gibanje zraka izberemo za vsak primer posebej po natančni proučitvi zagotavljanja naslednjih razmer:

- gibanje zadostnih količin zraka,
- čim manjše izgube tlaka,
- ustrezna hitrost gibanja zraka,
- enakomerno prepihanje,
- majhna poraba energije,
- čim manj vibracij in hrupa,
- preprosta izvedba in
- dostopnost za redna vzdrževalna dela in popravila.

Velika prevlada osnih ventilatorjev temelji na:

- omogočanju toka velikih količin zraka ob majhnih tlačnih izgubah, zato je potrebna manjša moč,
- možnosti spreminjanja smeri vrtenja in s tem smeri kroženja zraka (reverziranje) – tako se ustvarja turbulentno gibanje, sušenje predvsem v širokih sušilnih komorah pa je enakomernejše in
- preprostih in cenejših izvedbah ter preprosti vgradnji.

Kljub bistvenim prednostim aksialnih ventilatorjev moramo upoštevati tudi njihove pomanjkljivosti:

- večji padec tlaka, kar močno zmanjša zmogljivost in enakomernost sušenja, priprava zložaja mora biti zato skrbnejša,
- posebno pri reverzibilnih izvedbah se dosegajo nekoliko manjše hitrosti ter
- reverzibilni ventilatorji imajo tudi slabše izkoristke ($\eta = 0,6$).

Prednosti radialnih ventilatorjev:

- doseganje večjih hitrosti zraka in s tem primernosti uporabe v komorah za sušenje iglavcev in
- manjša občutljivost za tlačne razlike – dodatni upor še ne vpliva izrazito na hitrost sušenja.

Velike pomanjkljivosti radialnih ventilatorjev pa so:

- neenakomerno prepihanje,
- zahtevnejša izvedba ter
- uporaba v sušilnih komorah manjših širin, ker ventilatorji niso reverzibilni.

V sušilnih komorah lahko zagotovimo učinkovito kroženje zraka tudi s postavitvijo ventilatorjev tik ob zložajih. Prednosti bočno postavljenih ventilatorjev so:

- postavljeni so na optimalnem kraju,
- velik pretok zraka,
- zračni tok ni občutljiv za neprizmatično zlaganje,
- ventilatorji so pritrjeni na tleh – manj vibracij in hrupa ter
- lažje vzdrževanje.

Bočno postavljeni ventilatorji se niso bolj uveljavili zaradi neenakomernega sušenja, saj je razlika v hitrosti zraka na vstopu in izstopu iz zložaja velika, to pa omejuje širino oziroma velikost komore. Velika težava je tudi »kratko« kroženje, zato je potrebno veliko pozornosti pri pripravi zložajev in polnjenju komore.

Najmanjša, še sprejemljiva hitrost zraka, ki še zagotavlja izenačene razmere sušenja pri zelo počasi sušičih se lesovih, je 1,3 m/s, za sušenje gostejših listavcev pa se priporočajo hitrosti od 1,5 do 2,5 m/s (kar pomeni od 0,15 do 0,3 kW instalirane moči na m³) in za iglavce od 3 do 4 m/s (od 0,25 do 0,4 kW instalirane moči na m³). V komorah z vzdolžnim prepihanjem morajo biti hitrosti od 4 do 8 m/s. Novejše komore imajo tudi možnost regulacije hitrosti kroženja zraka, ki mora biti pri sušenju svežega lesa največja in se zmanjšuje pri sušenju lesa pod točko nasičenja celičnih sten. Treba je poudariti tudi zahtevo po večjih hitrostih zraka pri sušenju svetlih lesov, ki jim želimo ohraniti barvo.

2.2.4 Naprave za uravnavanje relativne zračne vlažnosti

Poleg uravnavanja ustrezne temperature je v sušilnem postopku še pomembnejše zagotavljanje predpisane relativne zračne vlažnosti, ki neposredno določa tudi ostrino sušenja. Zaradi izločanja velikih količin vode se ostrina nenehno zmanjšuje, zato je zrak med procesom sušenja treba razvlaževati oziroma sušiti. Zrak lahko osušimo s

segrevanjem, kondenzacijo in delno izmenjavo. Zadnje je pri normalnotemperaturnem komorskem konvekcijskem sušenju najobičajnejše. Za izmenjavo se uporabljajo odprtine z zračniki in loputami za uravnavanje količine vstopnega in izstopnega zraka. Število in dimenzije zračnikov priredimo enakomerni izmenjavi zraka v komori. Pri milejših režimih je treba zagotoviti dobro tesnjenje, pri sušenju svežega lesa pa zadostno količino izmenjavajočega se zraka.

Zračnike tudi izoliramo, da ni kondenzacije in kapljanja vode na les. Ker z izmenjavo zraka nastanejo toplotne izgube, med izstopajoče in vstopajoče zračnike namestimo rekuperatorje toplote in tako povečamo toplotno učinkovitost sistema.

Zaradi izločanja velikih količin vode iz lesa je treba navlaževati zrak v sušilni komori le izjemoma:

- pri segrevanju,
- pri sanaciji kolapsa – rekondicioniranje,
- pri odpravljanju zaskorjenja,
- na koncu sušenja med izenačevanjem in kondicioniranjem,
- za obarvanje (parjenje) in
- za sterilizacijo.

2.3 PORABA ENERGIJE PRI KONVEKCIJSKEM KOMORSKEM SUŠENJU Z DELNO IZMENJAVO ZRAKA

Optimalno sušenje lesa v komori pomeni osušiti les na odgovarjajoči odstotek vlažnosti z minimalno porabo energije in s čim manjšimi napakami. Poznavanje celotne porabe energije in energijskih tokov je temeljni pogoj za presojo ekonomičnosti naprave oziroma procesa sušenja in razmišljanja za racionalizacijo rabe energije.

Konvekcijsko sušenje lesa je postopek sušenja pri povišani temperaturi in hitrejšemu gibanju zraka. S tem je čas sušenja lesa do zahtevane vlažnosti v primerjavi s sušenjem na prostem znatno skrajšan. V ta namen je potrebna ustrezna tehnična oprema: grelne naprave, ventilatorji, naprave za uravnavanje klime (vlažilniki zraka, zračniki za izmenjavo zraka) in ustrezne naprave za krmiljenje poteka sušenja.

Pri konvekcijskem komorskem sušenju z delno izmenjavo zraka so zahteve po toploti naslednje:

1. Poraba toplote za segrevanje in pregrevanje komore ter lesa do temperature, ki nastopi v prvem intervalu sušenja.
2. Potrebna toplota za segrevanje dovedenega hladnega zraka do delovne temperature.
3. Potrebna toplota za izparevanje vode iz lesa (latentna toplota izparevanja) ter toplot, ki je potrebna za odstranitev vezane vode iz lesa.
4. Potrebna toplota za nadomeščanje toplotnih izgub s kondukcijo, konvekcijo in radiacijo skozi stene, tla in strop komore ter izgub zaradi netesnosti.

Zaradi vpliva različnih dejavnikov na porabo energije, se tudi spreminja tudi njihov delež (pregl. 2).

Preglednica 2 Deleži porabe toplote pri konvekcijskem sušenju lesa po različnih avtorjih (Rosen, 1980, Corder, 1980 in Miller, 1977).

| Referenca | Rosen (1980) | Corder (1980) | Miller(1977) |
|---|---------------------|---------------------------|------------------------|
| Vrsta lesa | <i>Pinus rigida</i> | <i>Tsuga heterophylla</i> | <i>Pinus ponderosa</i> |
| Začetna vlažnost lesa (%) | 105,0 | 100,0 | 105,0 |
| Končna vlažnost lesa (%) | 10,0 | 15,0 | 10,0 |
| Prostornina lesa v komori (m ³) | 59,0 | 59,0 | 60,0 |
| Deleži porabe toplote | | | |
| Segrevanje komore in lesa (%) | 11,0 | 5,0 | 10,6 |
| Segrevanje zraka (%) | 8,0 | 8,0 | 8,2 |
| Izparevanje vode (%) | 64,0 | 70,0 | 64,3 |
| Toplotne izgube (%) | 17,0 | 17,0 | 16,8 |

Celotna poraba energije v postopku komorskega sušenja ni najprimernejšo merilo za vrednotenje učinka porabe energije. Za oceno učinkovitosti procesa sušenja žaganega lesa uporabljamo toplotno (energijsko) učinkovitost oziroma specifično porabo energije.

Eden glavnih parametrov, kateri vplivajo na energijsko učinkovitost pri procesu sušenja lesa, je poraba toplote. Če so v samem procesu izgube toplote minimalne, je energijska učinkovitost visoka, prav tako pa toplotna.

Učinek porabe toplote pri komorskem sušenju izražen s toplotno učinkovitostjo (h), je definiran kot razmerje med toploto potrebno za izparevanje vode iz lesa in celotno dovedeno toploto v sušilno komoro (Miller, 1977):

$$h = Q_{izp} / Q_{cel} \quad \dots (1)$$

kjer je:

Q_{izp} potrebna toplota za izparevanje vode iz lesa (MJ) in

Q_{cel} celotna dovedena toplota v sušilno komoro (MJ).

Toplotna učinkovitost za določen postopek sušenja ni konstantna vrednost, temveč je odvisna od:

- vrste lesa,
- debeline lesa,
- začetne in končne vlažnosti,
- časa sušenja (kvalitete),
- okoliških pogojev (temperatura in relativna zračna vlažnost),
- toplotnih izgub v sušilnici in
- velikosti sušilnice.

Pri sušenju hrastovine ali drugih nepermabilnih lesov, z dolgimi časi sušenja ter tako visokimi toplotnimi izgubami v okolje, je toplotna učinkovitost od 0,3 do 0,5 (Miller, 1977).

Specifično porabo energije za sušenje žaganega lesa lahko izrazimo na časovno enoto, kot tudi na kilogram izparjene vode.

Specifični porabi toplote (q) na časovno enoto in maso izparjene vode sta podani z enačbami (Russel, 1987):

$$q = Q_{cel} / t \quad (kJ/h) \quad \dots (2)$$

$$q = Q_{cel} / m_{vode} \quad (kJ/kg) \quad \dots (3)$$

kjer je:

m_{vode}masa izparevane vode iz lesa (kg),

Q_{cel} celotna dovedena toplota v sušilno komoro (kJ) in

t čas v katerem je bila porabljena toplota oziroma čas sušenja (h).

Kot orientacija o porabi energije pri sušenju lesa lahko služi podatek, ki ga navajata Militzer in Vogel (1990). Za osušitev 1 m^3 žaganega lesa porabimo v povprečju 1,3 GJ toplotne energije in 120 kWh električne energije.

2.4 MOŽNOSTI ZMANJŠANJA PORABE ENERGIJE PRI PROCESU SUŠENJA ŽAGANEGA LESA

Porabo energije pri sušenju žaganega lesa je mogoče znižati z racionalizacijo obstoječega postopka oziroma z uporabo novih postopkov in pripadajočih naprav ter s tehnično – organizacijskimi ukrepi.

Velika poraba energije gotovo zahteva tudi razmislek o učinkovitih tehnoloških ukrepih za njeno zmanjšanje. Skrb za dobro vzdrževanje sušilnih tehnik je eden osnovnih ukrepov za zagotavljanje minimalnih energijskih izgub, izkoristke lahko povečamo z zadostno izolativnostjo in tesnjenjem komore ali z uporabo sistemov za rekuperacijo toplotne energije, smotrnejšo izrabo električne energije pa dosežemo z nadzorovanjem kroženja zraka v komori.

Pri sodobnih sušilnih komorah znaša nazivna toplotna prehodnost sten manj kot $0,7 \text{ W/m}^2\text{K}$, ki pa lahko zaradi lokalne netesnosti naraste tudi na $2 \text{ W/m}^2\text{K}$ (Lippold, 1987) oziroma pri napačnih konstrukcijskih rešitvah s toplotnimi mostovi celo do 3-krat (Laytner in Arganbright, 1984). Varčevanje toplotne energije z namestitvijo toplotnih izmenjevalcev v prezračevalne sisteme omogoča v povprečju do 50 % prihranka toplote za segrevanje vstopajočega hladnega zraka, s čimer se, odvisno od trajanja sušilnega postopka, toplotna učinkovitost procesa poveča za 1 do 3 %, celotna porabljena energija pa se zmanjša za 5 do 10 % (Lippold, 1987, Müller, 1987, Zdešar, 1998). Znatno del toplotne energije je mogoče privarčevati tudi s povezavo sistemov v več sušilnih komorah.

Pri varčevanju z električno energijo je racionalna rešitev uporaba frekvenčnih regulatorjev vrtljajev elektromotorjev za pogon ventilatorjev. Lippold (1987) navaja, da je s tem načinom pod točko nasičenja lesnih vlaken možen tudi do 45 % energijski prihranek.

Komorskim sušilnicam lahko z dodatnimi izboljšavami zagotovimo boljšo kakovost osušenega lesa in zmanjšamo porabo toplotne in električne energije (pregl. 3).

Preglednica 3 Možne izboljšave pri komorski sušilnici (po Brunnerju, 1997).

| Uresničljivi cilji pri sodobni komori z delno izmenjavo zraka | Potrebni ukrepi: Izhodišče: sodobna sušilna tehnika in najgospodarnejše vodenje postopka sušenja s strani uporabnika |
|--|---|
| Skrajšanje časa sušenja | Vgradnja ventilatorjev z višjo kapaciteto, uvedba več sušilnih področij znotraj komore z neodvisno nastavljivo klimo zraka, klimatsko optimalna geometrija sušilnika |
| Zmanjšanje porabe toplote | Boljša izolacija, toplotna izmenjava v sistemu povezanih sušilnic, topotni prenosnik, natančno merjenje ravnovesne vlažnosti in vlažnostnih gradientov |
| Odpravljanje kritičnih sušilnih področij znotraj komore | Uvedba večjih sušilnih področij znotraj komore z neodvisno nastavljivo klimo zraka, klimatsko optimalna geometrija sušilnika, aerodinamičnost komore |
| Zmanjšanje porabe električne energije | Gibljive vodilne pločevine za usmerjanje zračnega toka, skrajšanje časa sušenja (glej zgoraj) |
| Zmanjšanje tveganja sušenja | Programska oprema, vključeno uravnavanje temperature lesa, uvedba večjih sušilnih področij znotraj komore z neodvisno nastavljivo klimo zraka, klimatsko optimalna geometrija sušilnika |
| Pravilno merjenje vlažnosti lesa | Boljši merilni sistem / programska oprema - posebno za merjenje lesne vlažnosti in vlažnostih gradientov |
| Zmanjšanje obarvanj | Uvedba večjih sušilnih področij znotraj komore z neodvisno nastavljivo klimo zraka, klimatsko optimalna geometrija sušilnika |
| Zmanjšanje deformacij | Uvedba večjih sušilnih področij znotraj komore z neodvisno nastavljivo klimo zraka, klimatsko optimalna geometrija sušilnika |
| Zmanjšanje končnih sušilnih napetosti po prerezu žaganice | Uvedba večjih sušilnih področij znotraj komore z neodvisno nastavljivo klimo zraka, klimatsko optimalna geometrija sušilnika |
| Zmanjšanje razlike v vlažnosti po prerezu (vl. gradienta) | Uvedba večjih sušilnih področij znotraj komore z neodvisno nastavljivo klimo zraka, klimatsko optimalna geometrija sušilnika |

Lippold (1987) navaja, da je mogoče pri obstoječih sušilnih komorah z uvajanjem ukrepov pri uporabniku znižati porabo toplotne in električne energije za približno 20 %. Z

uvajanjem novih sušilnic pa lahko porabo toplotne energije znižamo dodatno za 10 % ter porabo električne energije za 30 %.

2.4.2 Sistem povezanih sušilnic

Pri konvektivnem sušenju odpade približno 13 do 16 % porabljene energije na toploto za segrevanje zraka. Prav tako porabimo za segrevanje in uparjevanje vode za navlaževanje površine lesa v fazi kondicioniranja približno 5 % celotne porabljene toplote. Na tej osnovi je postavljen razvoj povezanih sušilnic. S tem postopkom je z optimirano izrabo v uporabljenem zraku vsebovane energije izboljšana ekonomičnost sušenja žaganega lesa.

Značilno za sistem povezanih sušilnic je posebno razvit, v stropu nameščen toplotni prenosnik v velikosti celotne toplotne površine sušilnice. Toplotni prenosnik je sestavljen iz vodoravno razdeljenega dvojnega kanala. Zračne lopute povezujejo toplotni prenosnik z okolico in s komoro. Skozi ločeni površini dvojnega kanala poteka prehod toplote med dovedenim in odvedenim zrakom. Pri tem lahko prihaja do kondenzacije vlage iz odvedenega zraka. Kondenzirana vlaga je z ustrezno obliko toplotnega prenosnika odvedena iz sušilne komore. Pregrevanje zraka in vpliv nadzorovane kondenzacije znatno zmanjša količino svežega zraka, ki je potreben za sušenje.

Sistem zračnikov povezuje dve ali več sušilnih komor. Te so lahko nadzorovane skupno, kot sestavljen sistem ali pa obratujejo ločeno in neodvisno.

Izmenjava zraka, ki sedaj ni več potrebna neposredno z okolico, temveč z drugo komoro, uravnava zmogljiv računalniški sistem z nenehnim upoštevanjem procesnih parametrov vsake posamezne sušilne komore.

2.5 PORABA ENERGIJE V POSTOPKIH SUŠENJA LESA

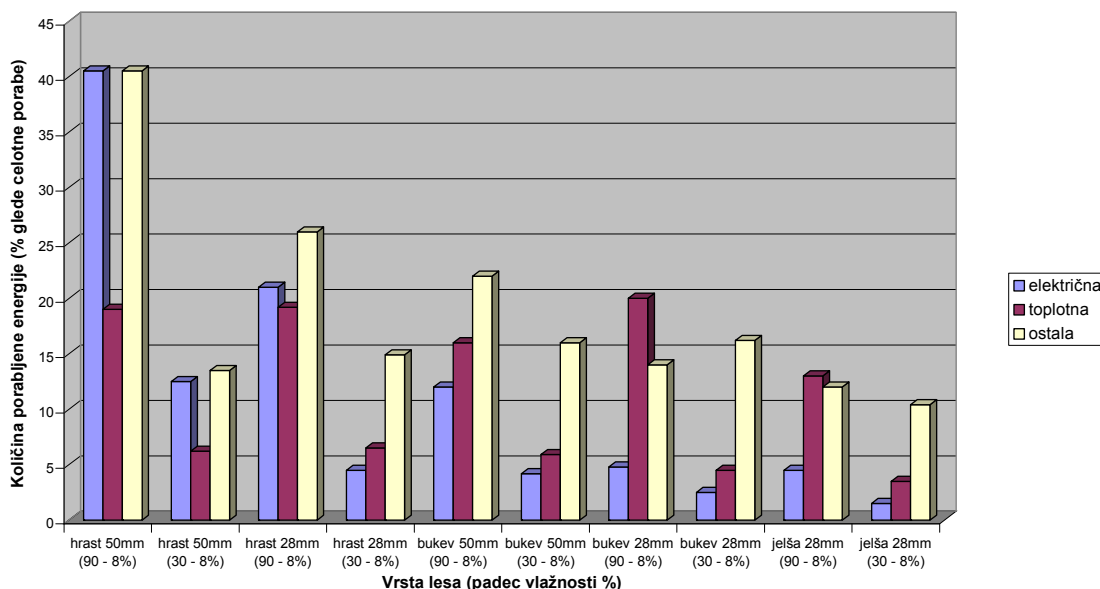
Razmerja porabljene toplotne in električne energije je zelo raznolika, saj je odvisno od lesne vrste, debeline sortimentov, začetne in končne vlažnosti lesa ter od samega programa sušenja. Avtorji (Torelli in sod., 1989) prepisujejo najpogosteje porabi električne energije 15 do 20 % celotne, zasledimo pa tudi 6 % delež (Ilič, 1984), pri modificiranih sušilnih programih (npr. za sušenje »bele« bukovine) pa lahko delež električne energije preseže delež toplotne energije.

Pri proučevanju na Poljskem (Guzenda in sod. 2000) so bile opazne razlike porabe energije glede na različno začetno vlažnost pri sušenju hrasta, bukve in jelše. Potreba energijskih zahtev pri izhajanju proste vode (nad točko nasičenja celičnih sten) se pozimi povečajo za 20 do 25 % glede na poletne klimatske razmere. Zanimivo pa je, da je bilo pri hrastovini in bukovini opaziti, da je pri sušenju pod točko nasičenja celičnih sten poraba toplotne energije poleti večja kot pozimi. Pri lesovih jelše tega ni bilo opaziti (pregl. 4).

Izkušnje in proučevanja kažejo na veliko potrebno po zagotovitvi energije za izhajanje proste vode. To energijo lahko prihranimo z naravnim sušenjem. Vedeti pa moramo, da kljub prihrankom energije nastanejo pri naravnem sušenju ostali stroški, kateri so lahko večji od samih energijskih stroškov (sl. 5).

Preglednica 4 Primerjava sušilnih stroškov glede na stroške sušenja hrastovine debeline 50 mm z različnimi drevesnimi vrstami in debelinami glede na padec lesne vlažnosti iz 90 % na 8 % ter iz 30 % na 8 % (Guzenda, 2000).

| LES | Padec vlažnosti glede na drevesno vrsto | |
|------------|---|----------|
| | 90 - 8 % | 30 - 8 % |
| hrast 50mm | 100,0 | 32,2 |
| hrast 28mm | 66,2 | 25,9 |
| bukev 50mm | 50,0 | 26,1 |
| bukev 28mm | 38,8 | 23,1 |
| jelša 28mm | 28,8 | 15,4 |



Slika 5 Delež stroškov energije glede na padec vlažnosti pri različnih drevesnih vrstah (Guzenda, 2000).

Opaziti je veliko razliko pri porabi celotne energije pri procesu sušenja glede na različne vlažnosti. Iz tega lahko sklepamo, da bi prihranili veliko energije, če bi predhodno naravno sušili. Res pa je, da bi pri tem morali upoštevati, koliko stroškov nam tak način sušenja nadomesti. Največji problem pa nastane pri dolgotrajnem postopku takšnega načina sušenja.

2.6 LES KOT GORIVO

Bistvena podatka o lesu kot gorivu sta njegova vlažnost in poroznost. Osnovne organske spojine, ki tvorijo les, so: celuloza, hemiceluloze in lignin. Za zgorevanje pa je predvsem pomembno poznati elementno kemično sestavo goriva, ki nam služi za izračun teoretično potrebnega zgorevalnega zraka na osnovi stehiometrije. Les se sestoji predvsem iz ogljika, vodika in kisika. Vsebnost dušika in drugih elementov je tako majhna, da jih lahko zanemarimo. Masni delež posameznih elementov za povprečno sestavo lesa, ki je popolnoma suh (vlažnost $u = 0 \%$), so (Torelli, 1989):

- ogljik 50 %,
- vodik 6 % in
- kisik 44 %.

2.6.1 Kaj vpliva na kurilno vrednost lesa

Pomemben podatek, ki okarakterizira les kot gorivo, je njegova vlažnost. V odvisnosti od vsebnosti vode v enem kilogramu goriva se spreminja njegova kurilnost, količina zgorevalnega zraka in dimnih plinov ter teoretična temperatura zgorevanja. V procesu zgorevanja lesa voda izhlapeva, pri tem pa se porablja energija. Za izhlapevanje 1 kg vode potrebujemo 0,68 kWh energije. Torej: več kot je vode v lesu, več energije se porabi za njeno izhlapevanje in manj je ostane za ogrevanje.

Vsebnost vode v lesu je močno spremenljiva fizikalna lastnost lesa, saj nanjo vpliva vrsta dejavnikov:

- drevesna vrsta,
- rastišče, na katerem je drevo raslo,
- starost drevesa,
- letni čas poseka,
- vitalnost in zdravost drevesa,
- del drevesa (narašča proti krošnji in koreninam,) in
- različna je v jedrovini in beljavi ter v ranem in kasnem lesu.

Glede na vsebnost vode v lesu ločimo:

- svež les – les takoj po poseku, ki ima vlažnost nad 40 %,
- gozdno suh les – les približno pol leta po poseku v primeru zimske sečnje oziroma približno 4 mesece po poseku v primeru poletne sečnje, ki ima vlažnost od 20 do 40 %,
- zračno suh les – les, ki se je sušil vsaj 6 mesecev na zračnem in pokritem mestu in ima vlažnost do 20 % in
- tehnično suh les, ki ima vlažnost od 6 do 15 %.

Osnovna lastnost goriv je kurilnost. Kurilnost lesa je količina toplote, ki nastane pri popolnem zgorevanju enote goriva, pri čemer se produkti zgorevanja ne ohladijo pod temperaturo rosišča vodne pare. Izražamo jo v kWh/kg, MJ/kg ali kWh/m³.

2.6.2 Uporaba vlažnega goriva

Posledice rabe vlažnega goriva so:

- večja poraba goriva, kar povečuje letne stroške ogrevanja in zmanjšuje učinkovitost rabe goriva,
- večja nevarnost hitre biološko in kemične razgradnje lesa med skladiščenjem (trohnoba, gniloba, napad žuželk in gliv); kurilna vrednost lesa se pri tem zmanjšuje,
- slabša vnetljivost kuriva; moten je potek vseh ostalih faz procesa zgorevanja lesa,
- večja kondenzacija vodne pare v kurišču in dimovodnih napravah,
- večje poškodbe kurilnih in dimovodnih naprav (korozija, katranske obloge),
- zmanjšana je njihova življenjska doba, večji so stroški vzdrževanja,
- večji transportni stroški (zaradi večje mase tovora pri prevozu kuriva),
- povečane emisije škodljivih produktov zgorevanja (prašni delci).

Povečanje vlažnosti lesa za 10 % zmanjša kurilno vrednost lesa za 12 % (do 1790 kJ/kg). Če kurimo gozdno suh les, porabimo 1/4 energije, uskladiščene v lesu, za izhlapevanje vode (Kopše in Kranjc, 2005).

3 MATERIAL IN METODE

3.1 MATERIAL

3.1.1 Sušilni material

Za izračune potrebne energije smo uporabili les bukve (*Fagus sylvatica* L.) (pregl. 5). Hipotetično smo predpostavili, da obravnavamo podjetje, kateri letno porabi 20.000 m³ žaganega bukovega lesa. Od tega potrebuje 15.000 m³ debeline 25 mm, ostalo pa debeline 50 mm. Les ima pri dobavi vlažnost 80 %. Ciljna končna vlažnost je 8 %. Izkoristek žaganja žaganega lesa v decimirane elemente je 61,5 %.

Preglednica 5 Gostota lesa v absolutnem suhem stanju (ρ_o), volumski skrček (β_v) in koeficient lesne vrste (α) (Wagenführ, Scheiber, 1989).

| Drevesna vrsta | ρ_o (kg/m ³) | β_v (%) | α |
|----------------|-------------------------------|--------------------|----------|
| Bukev | 490...680...880 | 14,0...17,9...21,0 | 0,021 |

3.1.2 Izbira sušilnih komor

Za simulacijo smo izbrali komorsko sušilnico s predelnim stropom z zgornjimi ventilatorji in prečnim kroženjem zraka (zrak preveva lesni zložaj vodoravno v prečni smeri zložaja – vzporedno z distančnimi letvicami). V zgornjem delu so ventilatorji in druga oprema, v spodnjem delu pa zložaji lesa. Ventilatorji so aksialni, hitrost zraka pa 2,5 m/s. Na odvodnem zračniku skozi katerega izpuščamo iz komore uporabljen zrak, je nameščen ploščni rekuperator. Predpostavili smo, da je povprečni izkoristek vračanja toplote ploščnega rekuperatorja $\eta = 60$ %.

3.1.3 Karakteristike sušilnih komor

Zaradi različnih dimenzij in obdelave žaganega lesa in elementov smo za izračun porabe energije izbrali 3 komore različnih dimenzij in karakteristik.


Podatke o notranjih dimenzijah in kapacitetah komore smo prevzeli iz kataloga ponudbe »Brunner-Hildebrand«. Izbrali smo tri različne dimenzije sušilnih komor. Osnovni tip sušilne komore je HEB (pregl. 6).

Preglednica 6 Tehnične karakteristike sušilnih komor (privzeto po »Brunner-Hildebrand«).

| | tip sušilnice | | | | | |
|-------------------------------------|---------------|------|------|------|------|-------|
| | 1 | | 2 | | 3 | |
| debeline elementov (mm) | 25 | 50 | 25 | 50 | 25 | 50 |
| dolžina (m) | 12 | 12 | 12 | 12 | 12 | 12 |
| višina do predelnega stropa (m) | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 |
| širina (m) | 9 | 9 | 11,9 | 11,9 | 14,8 | 14,8 |
| kapaciteta komore (m ³) | 130 | 166 | 181 | 233 | 285 | 366,6 |
| faktor zapolnitve | 0,5 | 0,64 | 0,5 | 0,64 | 0,5 | 0,64 |
| koeficient poljenja sušilnic | 0,36 | 0,46 | 0,34 | 0,41 | 0,34 | 0,44 |

Pri izračunavanju porabe toplote za segrevanje sušilne komore in izračunu toplotnih izgub smo uporabili enostavno izvedbo sušilnih komor (pregl. 7):

Preglednica 7 Strukturni prerez kovinske izvedbe sušilne komore, materiali, koeficienti toplotne prevodnosti in toplotna prehodnost (Brunner, 1987).



| Material | Debelina [cm] | Toplotna prevodnost λ [W/m K] | Toplotna prehodnost | |
|-----------------|---------------|---------------------------------------|---------------------|----------------------------|
| | | | k_i | k_a [W/m ² K] |
| alu - pločevina | $d_1 = 0,13$ | 173 | | |
| steklena volna | $d_2 = 9,8$ | 0,04 | 0,38 | 0,39 |
| alu - pločevina | $d_3 = 0,13$ | 173 | | |

k_i = vrednost toplotne prehodnosti, kadar stoji sušilna komora v zaprtem prostoru.
 k_a = vrednost toplotne prehodnosti, kadar stoji sušilna komora na prostem.

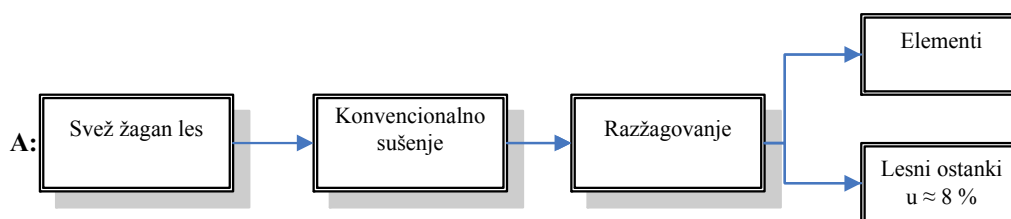
3.2 METODA

3.2.1 Predelava lesa

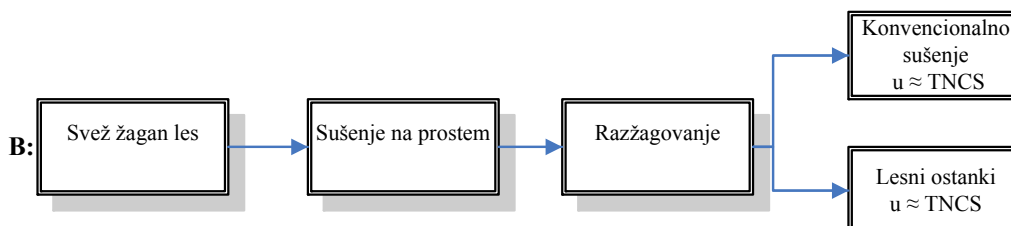
Les kot surovina se lahko predeluje na različne načine. Le ta pa je odvisna od nadaljnje obdelave oziroma za kaj se les prvotno uporablja. Naša naloga je temeljila na tem, da pridobimo iz žaganega lesa že osušene elemente za nadaljnjo predelavo.

Predpostavili smo, da imamo tri različne načine predelave žaganega lesa:

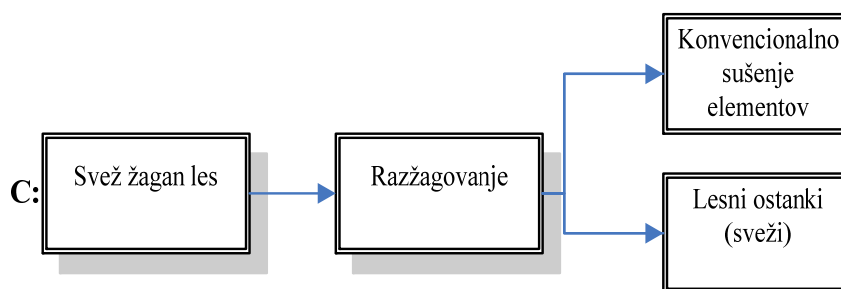
- A. sušimo svež žagan les do končne vlažnosti in ga osušenega razrežemo v elemente,
- B. žagan les sušimo na prostem do točke nasičenja celičnih sten, ga razžagamo v elemente in elemente dosušimo do končne vlažnosti in
- C. svež žagan les razžagamo v elemente in elemente iz svežega stanja sušimo do končne vlažnosti.



Slika 6 Prikaz načina predelave lesa, kjer sušimo svež žagan les do končne vlažnosti in ga osušenega razrežemo v elemente.



Slika 7 Prikaz načina predelave lesa, kjer žagan les sušimo na prostem do točke nasičenja celičnih sten, ga razžagamo v elemente in elemente dosušimo do končne vlažnosti.



Slika 8 Prikaz načina predelave lesa, kjer svež žagan les razžagamo v elemente in elemente iz svežega stanja sušimo do končne vlažnosti.

3.2.2 Analiziranje in primerjava tehnologij predelave lesa

Prvi korak pri analiziranju in primerjavi treh tehnologij predelave je bilo načrtovanje algoritma in računalniška obdelava celotnega postopka. V algoritem smo vključili tri metodološka področja:

1. kinetiko sušenja, ki smo jo zajeli s pripravo in izbiro standardnih sušilnih programov (režimov) za sušenje bukovine.
2. masnih in energijskih bilanc in
3. ocena pridobljene toplotne energije iz lesnih ostankov.

3.2.3 Sušilni režimi

Za sušenje lesa smo uporabili ameriški režim. Ameriški režimi so zasnovani na merjenju temperature suhega termometra in psihrometerske razlike. Temperaturnih režimov je 14 in so razvrščeni od najblažjega, z začetno temperaturo 38 °C do najostrejšega, z začetno temperaturo 80 °C. Temperatura suhega termometra se ne spreminja, dokler lesna vlažnost ne pade pod 30 % (pod točko nasičenja celičnih sten). Končna temperatura se doseže v petih stopnjah. Režimi psihrometerske razlike so razdeljeni v šest oddelkov odvisno od lesne vlažnosti pa na osem stopenj.

V primerjavi z angleškimi režimi je začetna temperatura višja, sušilni gradient pa je visok zlasti v zadnji fazi sušenja. Čas sušenja je zato krajši, nujno je pa izenačevanje in kondicioniranje.

3.2.4 Postopek izračuna porabe energije

Pri izračunu porabe toplotne energije pri konvektivnem sušenju žaganega lesa smo upoštevali vse snovne in energijske tokove. Določili smo tudi tehnične karakteristike sušilne naprave in specifične lastnosti lesa.

Izračun za sušenje žaganega lesa potrebne toplotne energije smo povzeli po Krpanu (1965).

Porabo toplotne energije za sušenje lesa smo razdelili na štiri dele, in sicer:

1. Potrebne toplota za segrevanje in pregrevanje komore ter svežega lesa do temperature, ki nastopi v prvem intervalu sušenja.
2. Potrebna toplota za segrevanje dovodnega hladnega zraka do delovne temperature sušenja načrtovane po režimu.
3. Potrebna toplota za izparevanje vode iz lesa (latentna toplota uparjevanja), ter toplota, ki je potrebna za odstranitev vezane vode iz lesa.
4. Potrebna toplota za nadomeščanje toplotnih izgub s konvekcijo skozi steno komore.

V nadaljevanju smo za vsak delež posebej izračunali potrebno energijo. To nam je omogočilo spremljanje odvisnosti posameznega deleža porabe toplote do vhodnih spremenljivk (lesne vrste, debeline žaganic, začetne in končne vlažnosti lesa ter okoliških pogojev).

3.2.4.1 Toplota za segrevanje sušilne komore in lesa

Pri izračunu porabe energije za segrevanje smo upoštevali porabe za segrevanje sten, stropa, tal, opreme v sušilnici in lesa od temperature okolice do temperature, ki nastopi v prvem intervalu sušenja. Osnovne toplotne vrednosti, ki smo jih pri izračunu upoštevali so navedene v preglednici 10.

Preglednica 10 Parametri za izračunavanje potrebne toplote za segrevanje sušilne komore in lesa (Brunner, 1987).

| Konstrukcijska izvedba sušilnice | Debelina (m) | top.prevod. (W/mK) | Toplotna prehodnost | | Gostota (kg/m ³) | Specifična toplota (kJ/kgK) |
|----------------------------------|--------------|--------------------|-------------------------------------|-------------------------------------|------------------------------|-----------------------------|
| | | | k _i (W/m ² K) | k _a (W/m ² K) | | |
| alu-pločevina | 0,0013 | 173 | 0,37787 | 0,39 | 2700 | 0,88 |
| steklena volna | 0,098 | 0,041 | | | 200 | 0,6699 |
| alu-pločevina | 0,0013 | 173 | | | 2700 | 0,88 |
| beton | 0,1 | | | | 2200 | 0,8793 |
| suha lesna substanca | | | | | 680 | 1,3565 |
| voda | | | | | 1000 | 4,1868 |
| zrak | | | | | | 1,006 |
| vodna para | | | | | | 1,86 |

Na začetku smo izračunali maso posameznih delov komore, ki jih je bilo treba segreti, maso lesa ter maso vode v njem. Podatke o sestavi in dimenzijah sušilnice smo pridobili iz preglednice 6, podatke o gostoti materialov pa iz preglednice 5.

Zaradi temperaturnega gradienta med notranjo in zunanjo steno sušilnice, smo domnevali, da je srednja temperatura, na katero moramo segreti stene sušilnice, povprečje notranje in zunanje temperature:

$$t_s = (t_1 - t_{ok}) / 2 \quad \dots (4)$$

kjer je:

t_s srednja temperatura stene komore (°C),
 t_1 temperatura komore v prvem intervalu sušenja (°C) in
 t_{ok} temperatura okolice (°C).

Toploto za segrevanje komore smo izračunali z enačbo:

$$Q = m \times c \times (t_1 - t_{ok}) \quad \dots (5)$$

kjer je:

Q toplota za segrevanje (kJ),
 m masa (kg),
 c specifična toplota (kJ/kg K) in
 t temperatura (°C).

Celotno toploto za segrevanje komore smo dobili s seštevanjem toplot za segrevanje posameznih gradbenih delov komore.

Specifične toplote posameznih materialov, ki sestavljajo sušilno komoro, so navedene v preglednici 10, specifično toploto vlažnega lesa pa smo izrazili z naslednjo zvezo:

$$c_1 = (c_o + u_z \times c_{vode}) / (1 + u_z) \quad \dots (6)$$

kjer je:

c_1 specifična toplota vlažnega lesa (kJ/kg K),
 c_o specifična toplota suhe lesne snovi (kJ/kg K),
 c_{vode} specifična toplota vode (kJ/kg K) in
 u_z začetna vlažnost lesa (%).

Količino toplote za segrevanje lesa smo izračunali iz enačbe:

$$Q_1 = \rho_o \times V_1 \times (1 - \beta_v) \times (c_1 + u_z \times c_{vode}) \times \Delta T \quad \dots (7)$$

kjer je:

Q_1 toplota potrebna za segrevanje vlažnega (svežega) lesa (kJ),
 ρ_0 gostota absolutno suhega lesa (kg/m^3),
 V_1 volumen lesa v sušilni komori (m^3),
 β_v volumski skrčec lesa (%),
 c_1 specifična toplota suhe lesne snovi (kJ/kg K),
 c_{vode} specifična toplota vode (kJ/kg K),
 u_z začetna vlažnost lesa (%) in
 ΔT razlika temperatur ($^{\circ}\text{C}$).

Ker je količina opreme v sušilni komori in letvic za letvičenje lesa težko določljiva, del porabljene temperature za segrevanje le tega pa znaša manj kot 0,5 % celotne porabe toplotne energije, smo ta del toplote zanemarili.

Ravno tako smo toploto, ki je potrebna za nadomeščanje toplotnih izgub skozi stene komore, v tej fazi zanemarili, ker faza segrevanja traja sorazmerno kratko v primerjavi s celotnim časom sušenja.

3.2.4.2 Toplota za segrevanje zraka

Da smo lahko izračunali toploto za segrevanje zraka, ki je potreben za sušenje, smo morali najprej ugotoviti maso izločene vode iz lesa. Maso izločene vode iz lesa v vsakem posameznem intervalu sušenja, med katerimi so pogoji v sušilnici nespremenjeni, smo zapisali z enačbo:

$$\Delta m_{\text{vode } i} = \rho_0 \times V_1 \times (1 - \beta_v) \times \Delta u_i \quad \dots (8)$$

kjer je:

$\Delta m_{\text{vode } i}$ količina vode, ki se izloči v posameznem intervalu sušenja (kg),
 ρ_0 gostota absolutno suhega lesa (kg/m^3),
 V_1 volumen lesa v sušilnici (m^3),
 β_v volumski skrčec lesa (%) in
 Δu_i sprememba relativne vlažnosti lesa v posameznem intervalu (kg/kg).

Volumski skrčec za drevesno vrsto smo upoštevali zaradi natančnejšega izračuna količine izločene vode. Les se namreč pri sušenju pod vlažnostjo točke nasičenja celičnih sten skrči, tako da je volumen lesa po zaključenem sušenju manjši kot volumen lesa pred začetkom sušenja.

Pri nadaljnjih izračunih smo iz tabel poiskali podatke o ravnovesni vlažnosti lesa in relativni zračni vlažnosti v komori v posameznih intervalih.

Tlak nasičenje vodne pare za posamezno fazo, ki jo potrebujemo za izračun absolutne vlažnosti okoliškega in komorskega zraka smo izrazili z naslednjo zvezo:

$$p_v^o i = e^{53,421 - 6516,7/T - 4,125 \times \ln T} \quad \dots (9)$$

kjer je:

p_v^o tlak nasičenja vodne pare v posameznem intervalu sušenja (Pa) in
T..... temperatura v komori (°C).

Absolutno vlažnost okoliškega in zraka v komori smo izračunali po enačbi:

$$y = 0,622 \times \left(\varphi \times p_v^o / (P - \varphi \times p_v^o) \right) \quad \dots (10)$$

kjer je:

y..... absolutna vlažnost zraka (kg/kg),
 φ relativna vlažnost zraka (%),
 p_v^o tlak nasičenja vodne pare (Pa) in
P..... celotni (zunanji) tlak (Pa).

Nakar smo izračunali razlike v absolutnih vlažnostih med okoliškim in komorskim zrakom (količina vlage, ki jo sprejme okoliški zrak med svojim delovanjem v komori na kg suhega zraka):

$$\Delta y = y_{kom} - y_{ok} \quad \dots (11)$$

kjer je:

Δy razlika v absolutni vlažnosti med okoliškim in komorskim zrakom (kg/kg),
 y_{kom} absolutna vlažnost komorskega zraka (kg/kg) in
 y_{ok} absolutna vlažnost okoliškega zraka(kg/kg).

Količina zraka, ki je potrebna za odstranitev količine vlage iz lesa v posameznem intervalu je podana z enačbo:

$$m_{zi} = \Delta m_i / \Delta y_i \quad \dots (12)$$

kjer je:

m_{zi} masa izmenjanega zraka (kg),
 Δm_i masa vode, ki je odstranjena iz lesa v posameznem intervalu (kg) in
 Δy_irazlika absolutnih vlažnosti med komorskim in okoliškim zrakom (kg/kg).

Entalpijo okoliškega zraka po prehodu skozi grelne naprave, kjer ga segrejemo na temperaturo sušenja, smo izračunali po enačbi:

$$I_Z = c_{pz} \times t + y \times (h_{izp} + c_{pv} \times t) \quad \dots (13)$$

kjer je:

- I_z entalpija vlažnega zraka (kJ/kg),
- c_{pz}specifična toplota zraka (kJ/kg K), ($c_{pz}=1,006$ kJ/kg K),
- t temperatura zraka (°C),
- y absolutna vlažnost zraka (kg/kg),
- h_{izp} izparilna toplota vode (kJ/kg) in
- c_{pv} specifična toplota vodne pare (kJ/kg K), ($c_{pv}=1,864$ kJ/kg K).

Nato smo za posamezen sušilni interval izračunali za koliko se spremeni entalpija okoliškega zraka pri segrevanju na temperaturo sušenja:

$$\Delta I_{zi} = I_{kom i} - I_{ok} \quad \dots (14)$$

kjer je:

- ΔI_{zi} razlika entalpij med komorskim in okoliškim zrakom v posameznem intervalu (kJ/kg),
- $I_{kom i}$entalpija komorskega zraka v posameznem intervalu (kJ/kg) in
- I_{ok} temperatura okoliškega zraka (°C).

Celotno toploto za segrevanje zraka smo izračunali s seštevanjem toplote za segrevanje zraka v posameznih intervalih, ko so pogoji nespremenjeni:

$$Q_{zr} = \Delta m_{zr i} \times \Delta I_{zr i} \quad \dots (15)$$

kjer je:

- Q_{zr} celotna količina toplote za segrevanje zraka (kJ),
- $\Delta m_{zr i}$ količina zraka za odstranitev vode iz lesa v posameznem intervalu (kg) in
- $\Delta I_{zr i}$ sprememba entalpije zraka v posameznem sušilnem intervalu (kJ/kg).

3.2.4.3 Toplota za izparevanje vode iz lesa

Največji delež porabe toplote za sušenje lesa v večini primerov odpade na toploto potrebno za izparevanje vode iz lesa in premagovanje sorpcijskih vezi. Količina toplote za izparevanje vode iz lesa v vsakem posameznem intervalu smo izrazili z enačbo:

$$Q_{izp i} = \rho_o \times V_1 \times (1 - \beta_v) \times \Delta u_i \times h_{izp} \quad \dots (16)$$

kjer je:

- $Q_{iz i}$ toplota za izparevanje vode iz lesa (kJ),
- h_{izp} izparilna entalpija vode (kJ/kg),
- V_1 volumen lesa (m³),
- β_v volumski skrčec (%),
- Δu_i sprememba vlažnosti in
- ρ_o gostota absolutno suhega lesa (kg/m³).

Temperatura zraka v komori se s časom spreminja, zato smo zaradi natančnejših izračunov podali funkcijsko zvezo izparilne entalpije vode do temperature po modificirani Clausius – Clapeyronovi enačbi:

$$h_{izp} = -2,433 \times T + 2500 \quad \dots (17)$$

Za izračun toplote za premagovanje sorpcijskih vezi (entalpije) smo uporabili naslednjo enačbo:

$$Q_{sorp} = 0,1 \times m_{vode} \times h_{izp} \quad \dots (18)$$

kjer je:

Q_{sorp} toplota za premagovanje sorpcijskih vezi (kJ),
 m_{vode} količina vode, ki se izloči iz lesa pri sušenju od vlažnosti TNCS do končne vlažnosti (kg) in
 h_{izp} izparilna entalpija za vodo (kJ/kg).

Celotno toploto za izparevanje vode iz lesa smo dobili z vsoto toplot za izparevanje v posameznih intervalih sušenja in toplote za premagovanje sorpcijske entalpije.

3.2.4.4 Toplota za nadomeščanja toplotnih izgub

Zaradi nepopolne izolacije sušilne komore v procesu sušenja nastajajo toplotne izgube. Količino toplote za nadomeščanje teh toplotnih izgub smo izračunali po enačbi:

$$Q_{izg} = \Sigma A_i \times k_i \times \Delta T \times t \quad \dots (19)$$

kjer je:

Q_{izg} potrebna toplota za nadomeščanje toplotnih izgub (kJ),
 k_i koficjent toplotne prehodnosti za posamezne dele komore (W/m²K),
 A_i notranja površina gradbenih delov komore (m²),
 ΔT temperaturna razlika med komoro in okolico (°C) in
 t čas posamezne faze sušenja pri nespremenjenih pogojih v komori (h).

Za izračun toplotnih izgub smo vzeli površino sten, stropa in vrat komore. Površine tal nismo upoštevali, zaradi tega ker so toplotne izgube skozi tla veliko manjše kot skozi stene, strop in vrata, ter tako ne prispevajo k natančnosti izračunov.

Vednosti koeficienta toplotne prehodnosti za stene naše izvedbe sušilnice so navedene v preglednici 7.

Čas sušenja, ko so pogoji v komori nespremenjeni, smo izračunali po Kollmann – ovi formuli, ki je še danes uporabna za približno izračunavanje časa sušenja. Enačba je empirična, dobljena iz velikega števila meritev. Slaba stran te enačbe je, da je hitrost zraka prav tako pomemben sušilni parameter, ki pa ni upoštevan:

$$t_i = 1 / \alpha \times \ln(u_z / u_k) \times (d / 25)^{1,5} \times 65 / \delta \quad \dots (20)$$

kjer je:

- t_i čas sušenja v posameznem sušilnem intervalu (h),
- α koficjent lesne vrste,
- u_z začetna vlažnost lesa v posameznem intervalu (%),
- u_k končna vlažnost lesa v posameznem intervalu (%) in
- δ temperatura v komori v posameznem intervalu (°C).

V praksi je prehod toplote skozi stene sušilnic pogosto večji kot to prikazujejo izračunani rezultati. To pa nastane zaradi površine s povišano toplotno prehodnostjo: kovinski deli konstrukcije, zračniki za izmenjavo zraka, tvorjenje mokrih con (prehajanje pare v izolacijski material) ter netesnost sušilne komore.

3.2.4.5 Izračun kazalnikov učinka porabe toplote pri sušenju lesa in možnih prihrankov z namestitvijo toplotnega prenosnika

Prav tako je smiselno učinek porabljene toplote v procesu sušenja lesa primerjati s specifično porabo toplote na časovno enoto ter na maso izločene vode iz lesa.

Specifični porabi toplote na časovno enoto ter na maso izločene vode iz lesa sta podani z enačbami (Ressel, 1987):

$$q = Q_{cel} / t \quad \dots (21)$$

$$q = Q_{cel} / m_{vode} \quad \dots (22)$$

kjer je:

- Q_{cel} celotna poraba toplote (MJ),
- t čas (h) in
- m_{vode} masa izločene vode iz lesa (kg).

Pri izračunavanju za koliko se zmanjša poraba toplote pri sušenju lesa, če namestimo v komoro toplotni prenosnik, smo predpostavili, da je izkoristek prenosnika $\eta = 0,6$. Prav tako smo predpostavili, da pri delovanju toplotnega prenosnika ne prihaja do kondenzacije vodne pare iz uporabljenega zraka. Toplotni prenosnik lahko vrača v komoro le del toplote, ki je v procesu sušenja porabi za segrevanje sušilnega zraka:

$$Q_{zr} = Q_{prim} + 0,6 \times Q_{prim} \quad \dots (23)$$

$$Q_{prim} = 0,625 \times Q_{zr}$$

kjer je:

- Q_{zr} toplota za segrevanje sušilnega zraka (MJ) in
- Q_{prim} primarna toplota za segrevanje sušilnega zraka (MJ).

Vidimo, da z rekuperacijo toplote uporabljenega zraka porabimo za segrevanje sušilnega zraka le 62,5 % primarne energije, ki bi jo uporabili v primerjavi s komoro, kjer toplotni prenosnik ni nameščen. Preostali delež energije za segrevanje sušilnega zraka (37,5 %) pa vrnemo v proces sušenja s toplotnim prenosnikom. Vrnjena toplota tako predstavlja razliko v celotni porabi energije v komori z nameščenim in ne nameščenim toplotnim prenosnikom oziroma za koliko se zmanjša poraba toplote v procesu sušenja z namestitvijo toplotnega prenosnika:

$$r = 0,375 \times Q_{zr} / Q_{cel} \quad \dots (24)$$

kjer je:

- r..... relativno zmanjšanje porabe toplote pri sušenju lesa,
- Q_{zr} potrebna toplota za segrevanje sušilnega zraka (MJ) in
- Q_{prim} Celotna porabljen toplota v procesu sušenja lesa (MJ).

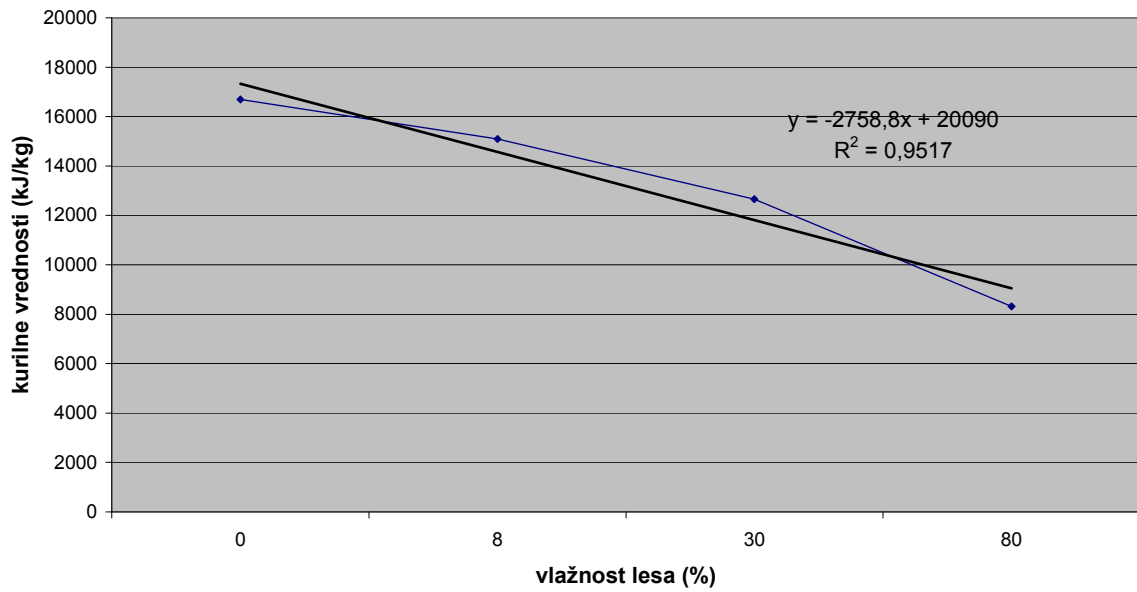
3.2.5 Vpliv vlažnosti na kurilno vrednost

Pri izračunavanju pridobljene energije iz lesnih ostankov smo upoštevali tri različne lesne vlažnosti (8, 30 oziroma TNCS in 80 %), za katere smo določili kurilne vrednosti bukovine. Te vrednosti se gibljejo od 14.700 do 16.700 kJ/kg suhe lesne mase (Kraut, 1981)(pregl. 11).

Preglednica 11 Prikaz kurilne vrednosti pri različni lesni vlažnosti za les bukovine in prikaz padca kurilne vrednosti glede absolutno suhega lesa (Kraut, 1981).

| lesna vlažnost (%) | kurilna vrednost (kJ/kg) | padec kurilne vrednosti (%) |
|--------------------|--------------------------|-----------------------------|
| 0 | 16.700 | 0,0 |
| 8 | 15.097 | 9,6 |
| 30 | 12.659 | 26,2 |
| 80 | 8.317 | 49,2 |

Pri bukovini z vlažnostjo 80 % pridobimo polovico manj energije, kot pri absolutno suhem lesu.



Slika 9 Vpliv lesne vlažnosti na kurilno vrednost pri bukovini (Kraut, 1981).

Pri izračunavanju smo upoštevali vlažnosti lesa glede na tehnologijo predelave. Kot je videti (sl. 9) vlažnost lesa drastično vpliva na kurilno vrednost.

4 REZULTATI

4.1 ALGORITERM ZA IZRAČUNAVANJE ENERGIJSKE UČINKOVITOSTI

Na osnovi postavljenega modela za izračunavanje porabe energije v postopku konveksijskega sušenja lesa smo pripravili odprt algoritem s široko možnostjo izpopolnjevanja in dopolnjevanja. Rezultati naj bi nudili čim več informacij, ki so potrebni za sprejemanje končnih odločitev pri načrtovanju sušilnih procesov, pri izbiri različnih tehnologij predelave ali pri odločitvah o razširjenju kapacitet. S programom naj bi bilo možno ocenjevati tudi vpliv čim večjega števila parametrov na energijsko učinkovitost sušilnega postopka.

Kot variabilne dejavnike smo v algoritmu upoštevali naslednje vhodne parametre:

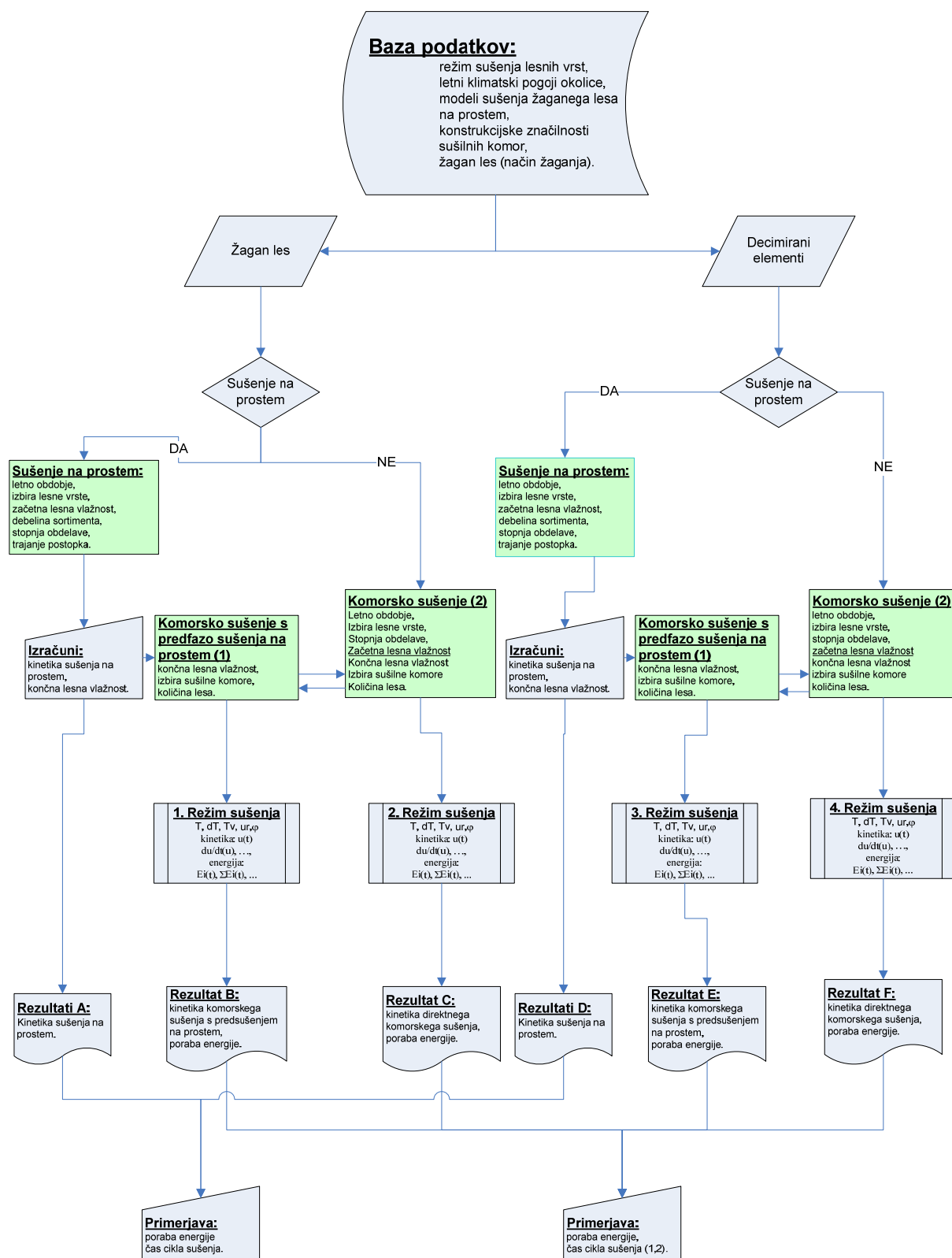
- karakteristike sušilne komore (dimenzije, kapaciteta, konstrukcija),
- vrsta lesa in njegove značilnosti (gostota, volumenski skrček, točka nasičenja celičnih sten),
- debelino žaganic,
- začetno in končno vlažnost lesa,
- temperaturo okolice in
- relativno zračno vlažnost okolice.

Glavna predpostavka strategije zmanjšanja porabe energije pri procesu sušenja lesa je temeljila na treh različnih načinih obdelave žaganega lesa za nadaljnjo obdelavo:

- svež žagan les sušimo do ciljne vlažnosti in ga osušenega razžagamo v elemente,
- žagan les sušimo na prostem do točke nasičenja celičnih sten, ga razžagamo v elemente in elemente dosušimo do ciljne vlažnosti in
- svež žagan les razžagamo v elemente in elemente iz svežega stanja sušimo do ciljne vlažnosti.

Hipotetično smo predpostavili, da obravnavamo podjetje, ki letno porabi 20.000 m³ svežega žaganega bukovega lesa, od katerega potrebuje letno 15.000 m³ debeline 25 mm, ostalih 5.000 m³ pa debeline 50 mm. Vlažnost sveže bukovine je 80 %, les posušimo do 8 %.

Ko smo pridobili vse potrebne predpostavke za analiziranje problema, smo izdelali algoritem, kateri ponazori način in postopek našega dela (sl. 10). V algoritmu smo omogočili medfazne izbire različnih tehnoloških postopkov, tako da smo lahko izvedli primerjavo energetskega vrednotenja različnih predpostavljenih tehnologij predelave.



Slika 10 Algoritem izračunavanja pridobljene in porabljene energije v različnih tehnologijah kombinacije predelave in sušenja žaganega lesa.

4.2 PRIMERJAVA ČASA SUŠENJA IN PORABE ENERGIJE GLEDE NA TEHNOLOGIJO PREDELAVE LESA

Na osnovi pripravljenega algoritma smo izdelali računalniški program. Z uporabo programa smo si zagotovili lažji potek dela. Z njim smo prišli do hitrih rezultatov, kar posledično vpliva na tehtnejše odločitve pri izbiri primerne tehnologije obdelave lesa. Program kot pomoč pri odločitvi izbire tehnologije nudi naslednje možnosti:

- Izbira ustreznega režima sušenja;
- Izračun posameznih intervalov in skupnega časa sušenja;
- Poraba toplotne in električne energije;
- Določanje strukturnih deležev porabljene energije;
- Izračun energijske in toplotne učinkovitosti...

4.2.1 Časi sušenja in potrebne kapacitete sušilnih komor

Z vidika različnih tehnologij predelave smo primerjali le čase tehničnega sušenja, saj je sušenje na prostem precej daljše. Čas tehničnega sušenja se nekoliko zmanjša le pri sušenju zračno suhega lesa, saj tam les sušimo od TNCS do ciljne vlažnosti in ne celoten cikel od začetne do ciljne vlažnosti (pregl. 12 in 13).

Preglednica 12 Čas (h) sušenja enega cikla bukovine, debeline 25 mm pri padcu vlažnosti z 80 na 8 % lesne vlažnosti.

| Načini predelave | Poraba časa (h) za en cikel | | |
|--|-----------------------------|----------|--------|
| | 25 mm | | Skupaj |
| | nad TNCS | pod TNCS | |
| sušenje svežega žaganega lesa do ciljne vlažnosti | 62,5 | 84,80 | 147,30 |
| sušenje zračno suhega lesa (od TNCS) do ciljne vlažnosti | / | 90,50 | 90,50 |
| sušenje svežih elementov do ciljne vlažnosti | 62,5 | 84,80 | 147,30 |

Preglednica 13 Čas (h) sušenja enega cikla bukovine, debeline 50 pri padcu vlažnosti z 80 na 8 % lesne vlažnosti.

| Načini predelave | Poraba časa (h) za en cikel | | |
|--|-----------------------------|----------|--------|
| | 50 mm | | Skupaj |
| | nad TNCS | pod TNCS | |
| sušenje svežega žaganega lesa do ciljne vlažnosti | 171,5 | 234,90 | 406,40 |
| sušenje zračno suhega lesa (od TNCS) do ciljne vlažnosti | / | 245,50 | 245,50 |
| sušenje svežih elementov do ciljne vlažnosti | 171,8 | 234,90 | 406,70 |

Za predpostavljeno količino predelane bukovine, bi glede na izbrano tehnologijo potrebovali naslednje kapacitete sušilnih komor:

Preglednica 14 Količina letno predelane bukovine (m³) debelin 25 in 50 mm pri različnih načinih predelave.

| Načini predelave | Količina letno predelane bukovine (m ³) | | |
|--|---|-------|--------|
| | Debelina | | Skupaj |
| | 25 mm | 50 mm | |
| sušenje svežega žaganega lesa do ciljne vlažnosti | 12.315 | 4.105 | 16.420 |
| sušenje zračno suhega lesa (od TNCS) do ciljne vlažnosti | 9.225 | 3.075 | 12.300 |
| sušenje svežih elementov do ciljne vlažnosti | 9.225 | 3.075 | 12.300 |

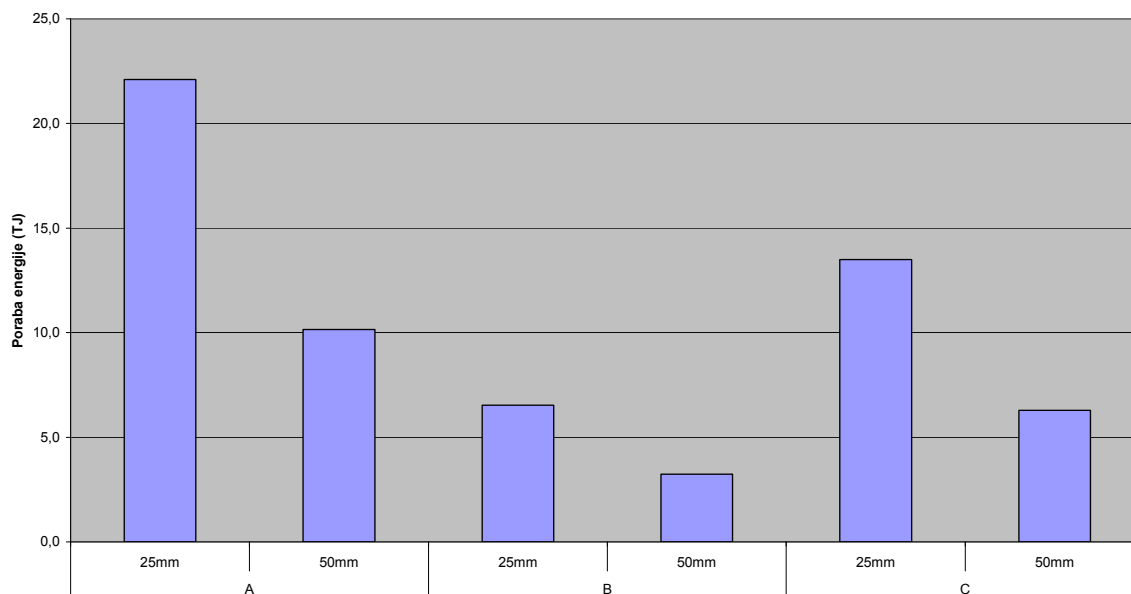
4.2.2 Poraba energije

Poraba energije je pri procesu sušenja lesa velika. Porabljena energija je v veliki meri odvisna tudi od kombinacije razžagovanja žaganega lesa v elemente in vključevanja sušilnega postopka. Izračun je pokazal pričakovano manjšo porabo energije v primeru izkoriščanja sušenja na prostem, saj je bila poraba energije le pri dosuševanju elementov (od TNCS do ciljne vlažnosti) bistveno manjša (pregl. 15 in sl. 11), kot pri ostalih dveh postopkih (sušenje svežega žaganega lesa in sušenje sveže žaganih elementov do ciljne vlažnosti).

Preglednica 15 Poraba energije (v TJ) v procesu sušenja bukovih žaganic, debeline 25 in 50 mm iz vlažnosti 80 % na ciljno končno vlažnost 8 % .

| Načini predelave | Masa izločene vode (ton) | | Količina lesa (m ³) | | Potrebna energija (TJ) | | |
|--|--------------------------|---------|---------------------------------|---------|------------------------|-------|--------|
| | 25 mm | 50 mm | 25 mm | 50 mm | 25 mm | 50 mm | Skupaj |
| sušenje svežega žaganega lesa do ciljne vlažnosti | 6.142,2 | 2.796,9 | 11.680,3 | 4.217,5 | 22,10 | 10,15 | 32,25 |
| sušenje zračno suhega lesa (od TNCS) do ciljne vlažnosti | 2.035,8 | 948,8 | 10.726,6 | 3.952,4 | 6,54 | 3,23 | 9,77 |
| sušenje svežih elementov do ciljne vlažnosti | 3.908,7 | 1.779,8 | 9.127,1 | 3.245,6 | 13,49 | 4,59 | 18,08 |

Na porabo energije v procesu sušenja vpliva veliko dejavnikov, ki jih je pri primerjavah treba upoštevati. Iz izračuna sklepamo, da bi bilo sušenje svežega žaganega lesa primerno le ob razpolaganju z viški cenejše energije (npr. s kurjenjem lastnih lesnih ostankov). Izvajanje predsušenja na prostem tudi bistveno zmanjša potrebno energijo za tehnično sušenje, vendar moramo razpolagati z ustreznim skladiščnim prostorom, kjer lahko izvajamo dolgotrajnejše naravno sušenje. Pri izvajanju kombinacije sušenja žaganega lesa in dosuševanje elementov zahteva dodatno manipulacijo, ki je v določenih praktičnih okoliščinah organizacijsko zahtevnejša ali celo neizvedljiva.



Slika 11 Skupna poraba energije (TJ) pri sušenju bukovih žaganic debeline 25 mm (15.000 m^3) in 50 mm (5.000 m^3) pri treh načinih predelave: A) sušenje svežega žaganega lesa, B) dosuševanje elementov od TNCS do ciljne vlažnosti in C) sušenje svežih elementov do končne vlažnosti (povprečna temperatura okolice $T_{ok} = 10 \text{ }^\circ\text{C}$ in povprečna relativna zračna vlažnosti okolice $\varphi_{ok} = 70 \%$).

Poraba toplote se spreminja glede na različno tehnologijo žaganega lesa (sl. 11). Največje razlike nastajajo zaradi različnih količin sušičnega materiala (15.000 m^3 je debeline 25 mm, 5.000 m^3 pa je debeline 50 mm).

4.2.3 Struktura porabljene energije

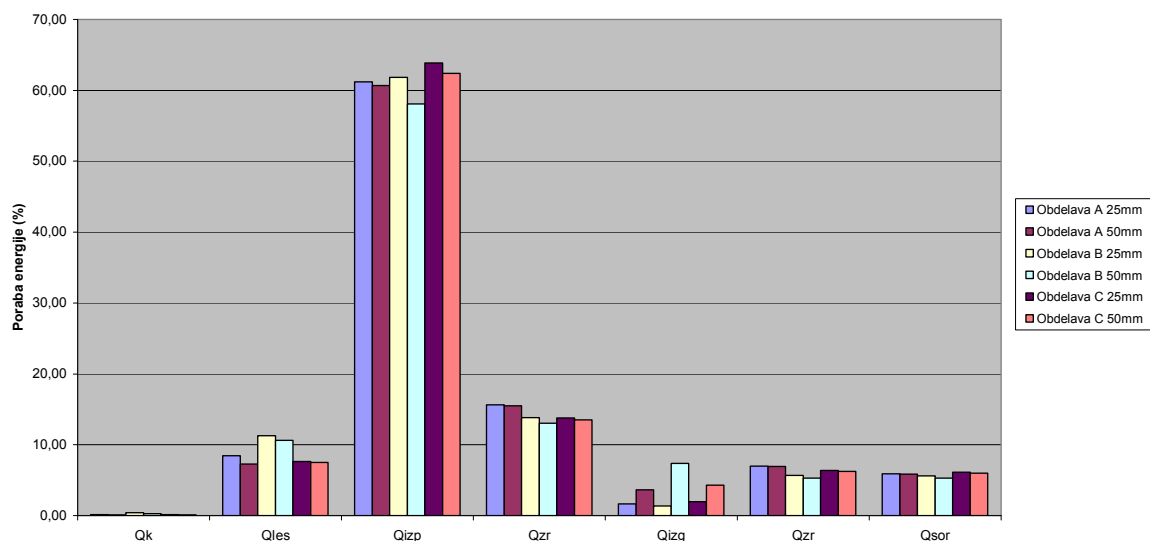
Strukturo porabljene energije v procesu sušenja smo razdelili na:

- energija za uparjenje vode Q_{izp} ,
- energija za segrevanje komore Q_k ,
- energija za segrevanje lesa Q_{les} ,
- energija za segrevanje zraka Q_{zr} ,
- energija za nadomeščanje toplotnih izgub Q_{izg} ,
- energija potrebna za premagovanje sorpcijskih vezi Q_{sor} in
- energija potrebna za izenačevanje in kondicioniranje Q_{zrak} .

Preglednica 16 Struktura porabljene energije pri sušenju bukovih žaganic pri treh načinih predelave: A) sušenje svežega žaganega lesa, B) dosuševanje elementov od TNCS do ciljne vlažnosti in C) sušenje svežih elementov do končne vlažnosti .

| Toplota | A | | B | | C | |
|-----------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| | 25 mm | 50 mm | 25 mm | 50 mm | 25 mm | 50 mm |
| Q_k | 0,13 | 0,10 | 0,41 | 0,30 | 0,15 | 0,12 |
| Q_{les} | 8,44 | 7,29 | 11,30 | 10,62 | 7,67 | 7,50 |
| Q_{izp} | 61,22 | 60,68 | 61,82 | 58,11 | 63,85 | 62,37 |
| Q_{zr} | 15,63 | 15,49 | 13,86 | 13,03 | 13,81 | 13,49 |
| Q_{izg} | 1,68 | 3,66 | 1,35 | 7,35 | 2,00 | 4,29 |
| Q_{zr} | 7,01 | 6,94 | 5,65 | 5,31 | 6,37 | 6,22 |
| Q_{sor} | 5,89 | 5,84 | 5,61 | 5,27 | 6,15 | 6,00 |

Največji delež energije se v postopku sušenja porabi za uparjanje vode (toplota za izparevanje vode iz lesa) in predstavlja od 58 % do 64 % vse potrebne energije; delež je večji pri sušenju tanjših žaganic (25 mm) (sl. 9), predvsem zaradi večje količine sušičnega materiala. Pri sušenju debelejših žaganic (50 mm) predstavlja večji problem poraba energije za kritje toplotnih izgub. Razlog je v bistveno daljšem sušenju debelejših sortimentov, na kar so vezane tudi transmisijske izgube.



Slika 12 Deleži porabljene energije (%) v različnih fazah sušenja pri sušenju bukovih žaganic debelin 25 mm (15.000 m^3) in 50 mm (5.000 m^3) pri treh načinih obdelave: A) sušenje svežega žaganega lesa, B) dosuševanje elementov od TNCS do ciljne vlažnosti in C) sušenje svežih elementov do ciljne vlažnosti (povprečna temperatura okolice $T_{ok} = 10 \text{ }^\circ\text{C}$ in povprečna relativna zračna vlažnost okolice $\varphi_{ok} = 70 \text{ } \%$).

Za toplotno energijo za segrevanje komore in lesa porabimo 10 % celotne energije, pri tem je toplota potrebna za segrevanje komore minimalna (do 0,5 %). Na toploto za segrevanje zraka, toploto za nadomeščanje toplotnih izgub, toploto za izenačevanje in kondicioniranje

in na toploto, potrebno za premagovanje sorpcijskih vezi pa odpade 30 % celotne energije (sl. 12).

4.3 PRIDOBLJENA ENERGIJA

V lesnopredelovalni industriji se večinoma lesni ostanki uporabijo za pridobivanje toplotne energije. V našem primeru smo upoštevali, da nam ostane 35% lesnih ostankov. Pri izračunavanju količine pridobljene energije je bilo potrebno paziti predvsem na količino vode v lesni masi. Voda v lesu bistveno vpliva na kurilno vrednost. Kurilna vrednost se pri dvigu 10 % lesne vlažnosti zniža za 12 % (Kopše in Kranjc, 2005).

4.3.1 Količina pridobljene energije iz ostankov lesa

V procesu sušenja lesa potrebujemo velike količine energije. Da bi zagotovili potrebno energijo, pa v večini proizvodnjah, kjer opravljajo proces sušenja lesa, pridobijo to energijo iz ostankov lesa.

Pri ocenah smo upoštevali, da je gostota svežega bukovega lesa (pregl. 5) 880 kg/m^3 , zračno suhega lesa (do točke nasičenja celičnih sten) 780 kg/m^3 , absolutno suh les pa ima gostoto 680 kg/m^3 . Kurilna vrednost za absolutno suh les je 16.700 KJ/kg , pri zračno suhem lesu (upoštevali smo padec kurilnosti za 24 %) je 12.659 KJ/kg in pri svežem lesu (padec kurilnosti za 48 %) je 8.317 KJ/kg (pregl. 11).

Energijska vrednost ostankov je glede na način predelave različna. Vidno je, da prihaja pri izstopu energije iz energijskega sistema do razlik. Med tremi različnimi načini predelave lesa prihaja do več kot 10 TJ razlik v pridobljeni energiji (pregl. 17).

Preglednica 17 Pridobljena energija (TJ) iz količine ostankov lesa različne vlažnosti, kateri so nastali v procesu predelave lesa pred in po sušenju.

| | Količina (kg) | | | Pridobljena energija (MJ) | | | Skupaj (TJ) |
|--|-------------------|-----------|-----------|---------------------------|------------|------------|-------------|
| | vlažnost ostankov | | | vlažnost ostankov | | | |
| Načini predelave | 80 % | 30 % | 8 % | 80 % | 30 % | 8 % | |
| sušenje svežega žaganega lesa do ciljne vlažnosti | 0 | 0 | 3.933.548 | 0 | 0 | 59.384.780 | 59,4 |
| sušenje zračno suhega lesa (od TNCS) do ciljne vlažnosti | 0 | 5.495.490 | 0 | 0 | 69.567.408 | 0 | 69,6 |
| sušenje svežih elementov do ciljne vlažnosti | 6.200.040 | 0 | 0 | 51.565.733 | 0 | 0 | 51,6 |

Količina vode, katera je prisotna pri izgorevanju lesa, drastično vpliva na končne rezultate pridobivanja energije. Les z višjo vlažnostjo ima nižjo kurilno vrednost, kar posledično vpliva na končni rezultat.

Pri takšnih načinih predelave lesa je najbolj smiselno, da predhodno les sušimo na prostem. Pri tem se ostanek lesa delno osuši, kar pomeni, da pridobimo višjo kurilno vrednost in s tem pridobimo več energije.

Vedeti pa moramo, da so to ocene, katera je pridobljena iz predpostavk. Te ocene pa lahko v praktičnem primeru privedejo do odstopanj.

4.3.2 Prihranek energije z namestitvijo toplotnega prenosnika

Z namestitvijo toplotnega prenosnika v komoro za sušenje lesa, smo v našem primeru prihranili od 4,9 do 5,9 % celotne porabljene toplotne energije (pregl. 18), kar je še posebej zanimivo, če vemo, da vsi v lesni industriji strmijo k temu, kako prihraniti energijo.

Preglednica 18 Relativno zmanjšanje porabe toplote z namestitvijo toplotnega prenosnika (r) v procesu sušenja bukovih žaganic, debeline 25 mm (15.000 m³) in 50 mm (5.000 m³) iz vlažnosti 80 % na ciljno končno vlažnost 8 %.

| Načini predelave | debelina (mm) | r (%) |
|--|---------------|---------|
| sušenje svežega žaganega lesa do ciljne vlažnosti | 25,0 | 5,92 |
| | 50,0 | 5,81 |
| sušenje zračno suhega lesa (od TNCS) do ciljne vlažnosti | 25,0 | 5,08 |
| | 50,0 | 4,88 |
| sušenje svežih elementov do ciljne vlažnosti | 25,0 | 5,18 |
| | 50,0 | 5,06 |

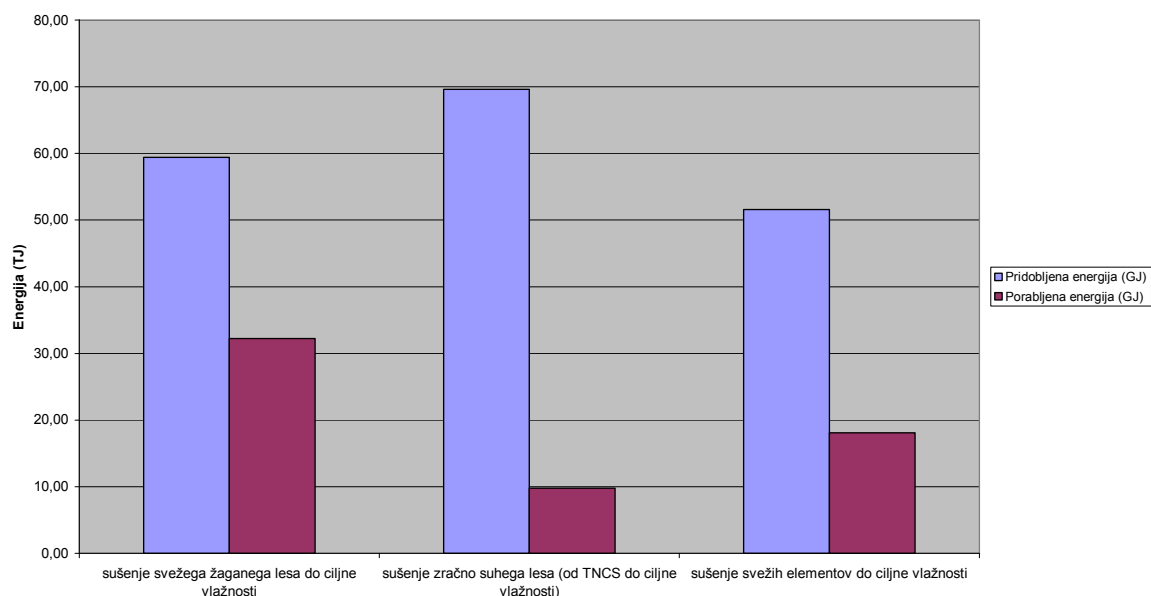
Z namestitvijo toplotnega prenosnika v procesu sušenja lesa se zniža poraba energija. Predvsem je to vidno pri sušenju sveže žaganega lesa, saj je potrebno izmenjati večje količine sušilnega zraka, s tem pa je višja tudi količina vrnjene toplote. Nekoliko manjši je prihranek energije pri sušenju zračno suhega lesa in pri sušenju svežih elementov.

4.4 PRIMERJAVA MED TEHNOLOGIJAMI

4.4.1 Primerjava potrebne in pridobljene energije pri različnih načinih predelave

S poznavanjem procesa sušenja lesa, lahko veliko prihranimo pri energiji, katero potrebujemo. Znano je, da je največji porabnik energije v lesni proizvodnji prav sušenje lesa. S pravnimi izbirami načinov predelave lesa in postopkov pri sušenju lesa lahko veliko pripomoremo k temu, da je za nas ta proces stroškovno ugodnejši.

Poraba energije je glede na različno tehnologijo obdelave zelo različna (sl. 13). Sklepamo lahko, da je v našem primeru izbira tehnologije s predhodnim naravnim sušenjem najboljša.



Slika 13 Primerjava količin potrebne energije v procesu sušenja bukovih žaganic debelin 25 mm (15.000 m³) in 50 mm (5.000 m³) pri treh načinih obdelave: A) sušenje svežega žaganega lesa, B) dosuševanje elementov od TNCS do ciljne vlažnosti in C) sušenje svežih elementov do ciljne vlažnosti (povprečna temperatura okolice $T_{ok} = 10$ °C in povprečna relativna zračna vlažnost okolice $\varphi_{ok} = 70$ %) in pridobljene energije iz lesnih ostankov.

Razlike v potrebni energiji za sušenje so, glede na izbrano tehnologijo, veliko večje kot pa so razlike med možno pridobljeno toploto iz lesnih ostankov. Zato se tudi razmerje in pokritja energijskih potreb v različnih načinih predelave med seboj bistveno razlikujejo. Največje presežke energije dosežemo s predhodnim sušenjem lesa na prostem (1 : 7,12), saj v tem primeru izkoristimo naravne klimatske pogoje. Tudi pri sušenju svežih žaganic je z ostanki mogoče pokriti vse energijske zahteve v postopku sušenja (1 : 1,84). Pri sušenju svežih elementov do ciljne vlažnosti je delež pokritja energije (1 : 2,85) (sl. 10).

Pri izbiri tehnologij je zatorej potrebna velika pazljivost in preudarnost, saj je lahko prihranek energije ogromen oziroma majhen, če izbira ni pravilna.

5 RAZPRAVA

Z analiziranjem rezultatov smo ugotovili, da tehnologija predelave lesa pred začetkom sušenja drastično vpliva na porabo energije. Sam vpliv različnih tehnologij obdelave lesa je opazen pri vseh končnih rezultatih. Poraba energije je pri sušenju svežega lesa kar do 3,3 krat večja kot, če les presušimo na prostem in nato dosušimo samo elemente (pregl. 19).

Preglednica 19 Razlike med pridobljeno in porabljeno energijo pri različnih načinih predelave žaganega lesa v procesu sušenja lesa.

| Načini predelave | Pridobljena energija (TJ) | Porabljena energija (TJ) | Razlika (TJ) |
|--|---------------------------|--------------------------|--------------|
| | Skupaj | Skupaj | |
| sušenje svežega žaganega lesa do ciljne vlažnosti | 59,40 | 32,25 | 27,15 |
| sušenje zračno suhega lesa (od TNCS) do ciljne vlažnosti | 69,60 | 9,77 | 59,83 |
| sušenje svežih elementov do ciljne vlažnosti | 51,60 | 18,08 | 33,52 |

Največ energije porabimo v primeru sušenja svežega žaganega lesa do ciljne vlažnosti, prav tako je razlika med porabljeno in pridobljeno energijo najnižja (razmerje med pridobljeno in porabljeno energijo je 1 : 1,84). Pri sušenju zračno suhega lesa pa je ta ostanek energije mnogo večji (razmerje med pridobljeno in porabljeno energijo 1 : 7,12)

Iz rezultatov je vidno, da najlažje prihranimo energijo, če les predhodno sušimo na prostem. Iz tega lahko sklepamo, da je najboljša tehnologija predelave lesa ta, da žagan les sušimo na prostem do točke nasičenja celičnih sten, ga razžagamo v elemente in elemente dosušimo do končne vlažnosti.

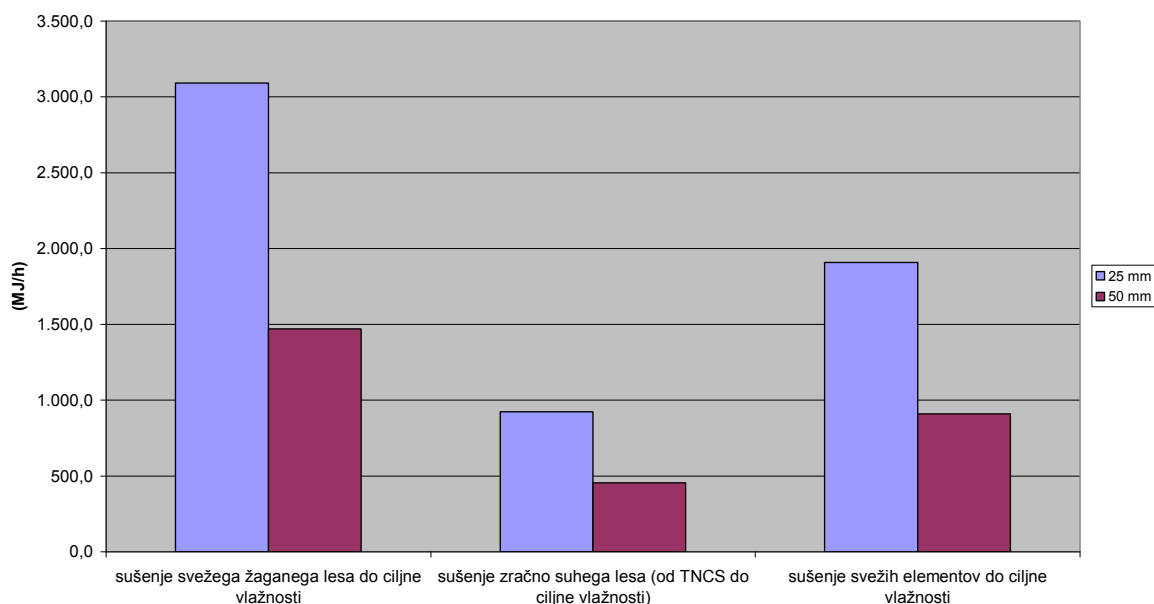
Prihranek energije v procesu sušenja je eden glavnih kazalnikov uspešnosti delovanja načrtanega procesa. Pri sušenju zračno suhega lesa (od TNCS do ciljne vlažnosti) prihranimo veliko energije. Zaradi tega je bil namen dokazovanja prihrankov energija, katero pridobimo iz izgorevanja ostankov smiseln.

Toplotna učinkovitost η (%) je v našem primeru visoka zaradi upoštevanja idealnih parametrov. Toplotna učinkovitost je pri sušenju debelejših sortimentov slabša in je pri sušenju 50 mm debelega žaganega lesa za 2 do 6 % slabša kot pri sušenju žaganic debeline 25 mm (pregl. 20).

Toplotna učinkovitost sušilne komore je dejanski kazalnik uspešnosti sušenja lesa. Iz pridobljenih rezultatov (pregl. 20 in sl. 16) lahko sklepamo, da je v vseh treh različnih tehnologijah predelave žaganega lesa toplotna učinkovitost dovolj visoka.

Specifična poraba na časovno enoto je višja pri manjši debelini za več kot polovico (pregl. 20), pri specifični toploti na maso izločene vode pa so podatki nekoliko nižji kot jih podajajo avtorji (Villier, 1982, Brunner, 1987, Guzenda in Olek, 2000). Navajajo, da je

specifična poraba pri gostejših lesovih (v našem primeru les bukovine) nad TNCS 5,81 MJ/kg izločene vode, pod točko nasičenja celičnih sten pa je ta vrednost 10,5 MJ/kg.

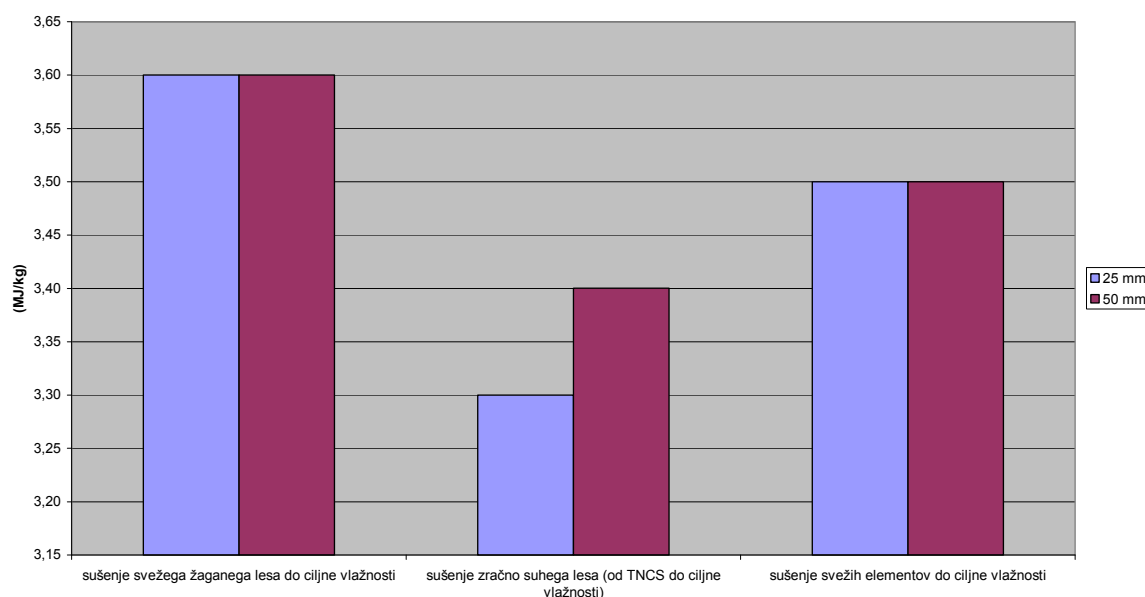


Slika 14 Specifična poraba toplote na časovno enoto (MJ/h) pri sušenju bukovih žaganic debelin 25 mm (15.000 m^3) in 50 mm (5.000 m^3) pri treh načinih obdelave: A) sušenje svežega žaganega lesa, B) dosuševanje elementov od TNCS do ciljne vlažnosti in C) sušenje svežih elementov do končne vlažnosti (povprečna temperatura okolice $T_{ok} = 10 \text{ }^\circ\text{C}$ in povprečna relativna zračna vlažnost okolice $\varphi_{ok} = 70 \%$).

V našem primeru je specifična poraba toplote na kilogram izločene vode nekoliko nižja (3,5 MJ/kg izločene vode). Razlike nastajajo zaradi različnih podajanj vlažnosti. Vpliv na specifično toploto ima tudi začetna vlažnost. Višja kot je začetna vlažnost višja je specifična toplota.

Toplotna učinkovitost je bila v vseh primerih tehnologijah obdelave lesa dokaj visoka. Takšni rezultati so posledica nedoslednosti podajanja začetnih parametrov, kateri vplivajo, da je toplotna učinkovitost visoka.

Celotna poraba energije zelo variira. Po podatkih Seegerja, (1989) celo od 140 do 1260 kWh na m³ osušenega lesa. Za primerjavo energijske učinkovitosti posameznih tehnik sušenja je primerneje uporabiti specifično porabo, ki pove, koliko energije v posamezni fazi sušenja porabimo za izločitev enega kilograma vode. Specifična poraba toplote na maso izpodrinjene vode je bila v našem primeru nizka (sl. 15), kar nam pove, da je energijska učinkovitost visoka.



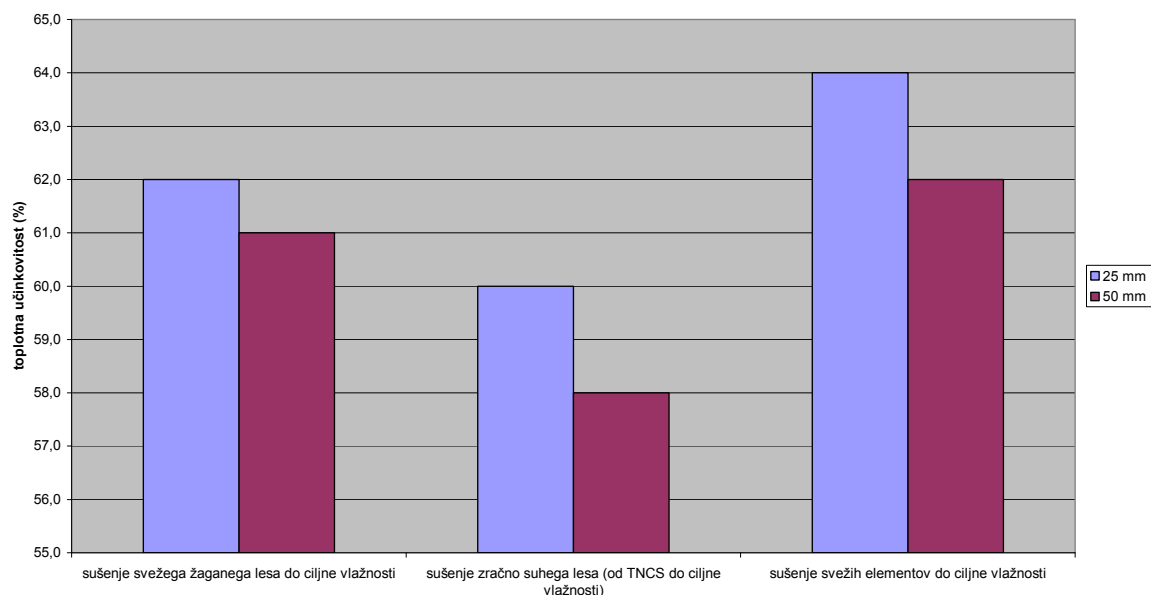
Slika 15 Specifična poraba toplote na maso izpodrinjene vode (MJ/kg vode) pri sušenju bukovih žaganic debelin 25mm (15.000 m³) in 50 mm (5.000 m³) pri treh načinih obdelave: A) sušenje svežega žaganega lesa, B) dosuševanje elementov od TNCS do ciljne vlažnosti in C) sušenje svežih elementov do končne vlažnosti (povprečna temperatura okolice $T_{ok} = 10$ °C in povprečna relativna zračna vlažnost okolice $\varphi_{ok} = 70$ %).

Dejanski rezultati so pokazali, da največ energije prehranimo v primeru, da predhodno les sušimo na prostem, nato les razžagamo v zelene elemente, nakar sušimo do končne vlažnosti.

Z analiziranjem pridobljenih podatkov je bilo razvidno, da s pridobivanjem energije iz ostankov lesa, lahko veliko energije prehranimo. Rešitev se je pokazala v tem, da bi bilo pametno ostanke predhodno sušiti in jih potem uporabiti za pridobivanje energije. Rezultati so pokazali, da lahko pridobimo kar 40,25 % več energije, če so ostanki osušeni.

Rezultati so pokazali, da ima velik vpliv na toplotno učinkovitost debelina sušičnega materiala in lesna vlažnost. S tem, da sušimo debelejši in gostejši les, vplivamo na pretok vode iz notranjosti proti površini lesa. S tem se poveča poraba toplote za izparevanja vode iz lesa, kar posledično vpliva na toplotno učinkovitost sušilnice. Rezultati so pokazali tudi vpliv vlažnosti na toplotno učinkovitost. Z nižanjem vlažnosti oziroma, ko vlažnost pade pod točko nasičenja celičnih sten se toplotna učinkovitost zniža.

Energijska učinkovitost je bila pri vseh načinih predelave dokaj visoka in ne kaže na bistvene prednosti kakšnega od načinov predelave (sl. 16).



Slika 16 Toplotna učinkovitost sušilne komore pri sušenju bukovih žaganic debelin 25 mm (15.000 m³) in 50 mm (5.000 m³) pri treh načinih obdelave: A) sušenje svežega žaganega lesa, B) dosuševanje elementov od TNCS do ciljne vlažnosti in C) sušenje svežih elementov do končne vlažnosti (povprečna temperatura okolice $T_{ok} = 10\text{ }^{\circ}\text{C}$ in povprečna relativna zračna vlažnost okolice $\varphi_{ok} = 70\%$).

Toplotna učinkovitost se v našem primeru razlikuje predvsem zaradi različnih debelin sušičnega materiala. Majhen padec toplotne učinkovitosti je moč zaznati pri sušenju zračno suhega lesa. Ta padec toplotne učinkovitosti nastane zaradi težjega prehoda vode iz notranjosti na površino lesa (vezana voda – sorpcijske vezi).

Preglednica 20 Primerjava toplotne učinkovitosti η (%), specifična poraba toplote q na časovno enoto in maso izločene vode, pri sušenju lesa različnih načinov predelave.

| Načini predelave | debelina (mm) | η (%) | q | |
|--|---------------|------------|---------|-------------|
| | | | MJ/h | MJ/ kg vode |
| sušenje svežega žaganega lesa do ciljne vlažnosti | 25,0 | 62,0 | 3.091,0 | 3,6 |
| | 50,0 | 61,0 | 1.470,0 | 3,6 |
| sušenje zračno suhega lesa (od TNCS) do ciljne vlažnosti | 25,0 | 60,0 | 923,0 | 3,3 |
| | 50,0 | 58,0 | 455,0 | 3,4 |
| sušenje svežih elementov do ciljne vlažnosti | 25,0 | 64,0 | 1.907,0 | 3,5 |
| | 50,0 | 62,0 | 910,0 | 3,5 |

Izračunana specifična poraba energije potrebna za izločitev enega kilograma vode je relativno nizka in tudi ni med postopki značilno različna. Velika odstopanja pa so pri specifični porabi energije na časovno enoto, kar narekuje vgradnjo grelcev z večjimi močmi.

6 SKLEPI

Tehnologija predelave lesa vpliva na porabo energije v procesu sušenja lesa. Primerjava energijske učinkovitosti med različnimi tehnologijami predelave žaganega lesa je pokazala, da je najbolj smiselno predhodno naravno sušiti les, nakar žagan les razžagujemo v zelene elemente in nato les posušimo do ciljne vlažnosti. V tem primeru je poraba energije majhna, pridobljena energija pa ima poleg pokritja potrebne energije najvišji ostanek (razmerje med porabljeno in pridobljeno energijo je 1 : 7,12).

V primeru, da bi izbrali tehnologijo, v kateri žagan les sušimo in nato razžagujemo zelene elemente, je poraba energije za kar trikrat večja kot v primeru predhodnega naravnega sušenja. Razlika med porabljeno in pridobljeno energijo pa je najmanjša (razmerje med porabljeno in pridobljeno energijo je 1 : 1,84).

Prihranek energije je v primeru izbire tehnologije s predhodno naravnim sušenjem tolikšen, da lahko nekatere negativne učinke takšne tehnologije zanemarimo.

Rezultati so pokazali, da lahko z delnimi izboljšavami v procesu sušenja lesa prihranimo veliko energije. S tem dosežemo enega glavnih ciljev, kateri pripomore, da podjetje oziroma proizvodnja teče nemoteno.

Iz analize rezultatov je vidno, da je možno z namestitvijo toplotnega prenosnika v našem primeru prihraniti do 6 % celotne porabljene energije.

7 POVZETEK

Sušenje lesa je časovno dolgotrajen in energijsko potraten predelovalni postopek. Kar 60 do 70 % celotno porabljene energije v lesnopredelovalni proizvodnji odpade na sušenje lesa.

Namen tehničnega sušenja je, da se les osuši na odgovarjajočo lesno vlažnost. Pri tem mora les zagotavljati primerno kvaliteto, pri tem pa mora biti poraba energije takšnega procesa minimalna. Z zagotovitvijo vse teh lastnosti smo opravili vse potrebno, da je proces sušenja lesa uspešen.

V diplomski nalogi smo izračunali porabo energije pri procesu sušenja bukovine v treh različnih primerih tehnologij predelave lesa pred procesom sušenja lesa:

- svežem stanju,
- naravno sušenje do točke nasičenja celičnih sten ali pa
- razžagujemo žagan les osušen že na končno vlažnost.

Želeli smo ugotoviti vpliv tehnologij predelave lesa pred in po procesu sušenja lesa. Vpliv tehnologij smo izrazili s porabo in prihrankom energije v procesu sušenja lesa, toplotno učinkovitost sušilnega procesa, specifično porabo toplote na časovno enoto in specifično porabo toplote na maso izločene vode. V ta namen smo izdelali računalniški program. Z njim prihajamo do hitrih rezultatov in s tem do lažjih odločitev o izbiri primerne tehnologije obdelave lesa.

Rezultati so pokazali, da tehnologija predelave lesa pred začetkom sušenja drastično vpliva na porabo energije. Velik vpliv tehnologije predelave lesa je možno zaslediti pri pridobivanju energije iz ostankov lesa.

Ugotovili smo, da lahko z določenimi izboljšavami in boljšim premislekom, kako se procesa sušenja lotiti, drastično pripomoremo k temu, da proces sušenja lesa ni več energijsko najdražji, oziroma ga stroškovno znižamo do te mere, da je za nas spremenljiv.

8 LITERATURA

1. Brunner R. 1987. Die Schnittholzrocknung. Hannover, GmbH: 322 str.
2. Corder S. E. 1980. Potential for energy recovery from lumber dry kilns. Forest Product Journal, 30, 8: 30 – 35
3. Gorišek Ž. 2004. Enciklopedija lesa – Tehnično sušenje. Korak, 2004, 6: 21 - 22
4. Gorišek Ž., Geršak M., Velušček V., Čop T., Mrak C. 1994. Sušenje lesa. Ljubljana, Zveza društev inženirjev in tehnikov lesarstva Slovenije, Lesarska založba: 235 str.
5. Guzenda R., Olek W. 2000. Computeraided analysis of costs and energy consumption of kiln drying of hardwoods. V: Proceedings of the COST Action E15 Workshop, Advances in drying of wood, Poland.
6. Guzenda R., Olek W., Golebiewska M. 2004. Computer – aided prediction of timber air pre – drying times and cost. V: Proceedings of the COST E15 Workshop, Advances in drying of wood, Athens.
7. Ilič M. 1984. Potrošnja energije pri sušenju drva i možnosti uštede. Drvna industrija, 35, 11 – 12: 265 – 269
8. Juhart A. 1980. Kondenzacijske sušilnice za žagan les. Les, 7-8: 143 – 148
9. Kopše I., Kranjc N. 2005. Ogrevanje z lesom. Ljubljana, Zavod za gozdove, Agencija za učinkovito rabo in obnovljive vire energije, Gozdarski inštitut, Slovenija: 40 str.
10. Kraut B. 1981. Strojniški priročnik. Ljubljana, Tehniška založba: 687 str.
11. Krpan J. 1965. Sušenje i parjenje drva. Zagreb, Šumarski fakultet, Sveučilištva u Zagrebu: 372 str.
12. Laytner F. L., Arganbright D. G. 1984. Within – Kiln variability of transmission losses. Forest Products Journal, 34, 2: 62 – 68
13. Lippold A. 1987. Das Energiesparpotential bei der technischen Schnittholzrocknung in der DDR. Holztechnologie, 28, 1: 17 – 20
14. Militzer K. E., Vogel M. 1990. Energieökonomische Aspekte bei der Holzrocknung. Holztechnologie, 30, 4: 190 – 192

15. Müller H. 1976. Der Einsatz von Großraumtrockner für Schnittholz aus energiewirtschaftlicher und ökonomischer Sich. Holztechnologie, 17, 3: 149 – 154
16. Miller W. 1977. Energy conservation in timber – drying kilns by vapor recompression. Forests Products Journal, 27, 9: 54 – 58
17. Müller H. 1987. Wärmerückgewinnung bie der Schnittholz – und Furnier – trocknung. Hloztechnologie, 28, 1: 21 – 23
18. Müller H. 1989. Senkung des Elektroenergieverbrauches bie der Schnittholztrocknung durch wechselweise Abschaltung von Ventilatoren. Holztehnologie, 30, 4: 195 – 197
19. Ressel J. B. 1987. Untersuchungen über den Energieverbrauch bie der tehnschen Schnittholztrocknung und Möglichkeiten zu dessen Verringerung. Holz als Roh – und Werkstoff, 45, 8: 323 – 328
20. Rosen H.N. 1980. High – temperature inital drying of wood: Potential for energy recovery. Forests Products Journal, 30,1: 29 - 34
21. Seegeer K. 1989. Energietechnik in der Holzverarbeitung. DRW Verlag, Leihfelden. Echterdingen
22. Straže A., Gorišek Ž. 2007. CAE analiza in optimizacija porabe energije pri sušenju žaganega lesa z uvedbo predušenja na prostem. Les, 59, 5-6: 142 - 148
23. Tacer M. 1997. Stopenjsko zgorevanje lesa na nepremič ni rešetki. Magistrsko delo, Ljubljana, Fakulteta za strojništvo, Univerza v Ljubljani: 143 str.
24. Torelli N. 1989. Zgradba in lastnosti lesa : (za interno uporabo). Ljubljana, Biotehniška fakulteta, VTOZD za lesarstvo, Katedra za tehnologijo lesa: 92 str.
25. Zdešar E. 1998. Možnosti zmanjšanja porabe energije pri konvektivnem sušenju lesa. Visokošolska diplomska naloga, Ljubljana, BF, Oddelek za lesarstvo: 80 str.