



UNIVERZA V LJUBLJANI  
BIOTEHNIŠKA FAKULTETA  
ODDELEK ZA LESARSTVO

Dalibor MRŠIČ

**CAE ANALIZA KINETIKE IN PORABE ENERGIJE V  
KONVENCIONALNEM POSTOPKU SUŠENJA LESA**

DIPLOMSKI PROJEKT

Univerzitetni študij - 1. stopnja

Ljubljana, 2010

UNIVERZA V LJUBLJANI  
BIOTEHNIŠKA FAKULTETA  
ODDELEK ZA LESARSTVO

Dalibor MRŠIČ

**CAE ANALIZA KINETIKE IN PORABE ENERGIJE V  
KONVENCIONALNEM POSTOPKU SUŠENJA LESA**

DIPLOMSKI PROJEKT  
Univerzitetni študij - 1. stopnja

**CAE ANALYSIS OF DRYING KINETICS AND ENERGY  
CONSUMPTION IN CONVENTIONAL WOOD DRYING TECHNIQUE**

B. SC. THESIS  
Academic Study Programmes

Ljubljana, 2010

Diplomski projekt je zaključek Univerzitetnega študija Lesarstvo – 1. stopnja. Delo je bilo opravljeno na Katedri za tehnologijo lesa.

Senat Oddelka za lesarstvo je za mentorja diplomskega dela imenoval prof. dr. Željka Goriška, za recenzenta pa doc. dr. Jožeta Kropivška

Komisija za oceno in zagovor:

Predsednik: prof. dr.  
Univerza v Ljubljani, Biotehniška fakulteta, oddelek za lesarstvo

Član: prof. dr.  
Univerza v Ljubljani, Biotehniška fakulteta, oddelek za lesarstvo

Član: prof. dr.  
Univerza v Ljubljani, Biotehniška fakulteta, oddelek za lesarstvo

Datum zagovora:

Diplomski projekt je rezultat lastnega dela. Podpisani se strinjam z objavo svojega diplomskega projekta na spletni strani Digitalne knjižnice Biotehniške fakultete. Izjavljam, da je delo, ki sem ga oddal v elektronski obliki, identično tiskani verziji.

Dalibor Mršić

## KLJUČNA DOKUMENTACIJSKA INFORMACIJA

ŠD	Du1
DK	UDK 630*847.2
KG	les/sušenje/tehnično sušenje/poraba energije/kinetika/simulacija
AV	MRŠIČ, Dalibor
SA	GORIŠEK, Željko (mentor)/KROPIVŠEK, Jože (recenzent)
KZ	SI-1000 Ljubljana, Rožna dolina, c. VIII/34
ZA	Univerza v Ljubljani, Biotehniška fakulteta, Oddelek za lesarstvo
LI	2010
IN	CAE ANALIZA KINETIKE IN PORABE ENERGIJE V KONVENCIONALNEM POSTOPKU SUŠENJA LESA
TD	Diplomsko delo (Univerzitetni študij - 1. stopnja)
OP	V, 26 str., 14 sl., 2 pril., 16 vir.
IJ	sl
JI	sl/en
AI	Potreben čas in porabljena energija pri sušenju lesa, s tem pa tudi stroški sušenja, so med najvišjimi v postopku predelave lesa. Analiza postopka je zato kompleksna in zahteva poznavanje in upoštevanje številnih dejavnikov. Izdelali smo simulacijski model, ki omogoča analizo konvencionalnega sušilnega postopka z vidika izbire ustreznega sušilnega programa, izračunavanja časa sušenja, porabe energije in stroškovno vrednotenje glede na variabilne vhodne podatke: lesna vrsta, debelina lesa, začetna in končna vlažnost, klimatske razmere ter konstrukcija komore. Model omogoča primerjave in analize energijske učinkovitosti postopkov, primerjavo različnih tehnik sušenja in pomaga pri odločitvah o investicijah v opremo.

### KEY WORDS DOCUMENTATION

- DN Du1
- DC UDC 630\*847.2
- CX wood/drying/kiln/energy consumption/kinetics/simulation
- AU Mršič, Dalibor
- AA GORIŠEK, Željko (supervisor)/KROPIVŠEK, Jože (co-advisor)
- PP SI-1000 Ljubljana, Rožna dolina, c. VIII/34
- PB University of Ljubljana, Biotechnical Faculty, Department of Wood Science
- PY 2010
- TI CAE ANALYSIS OF DRYING KINETICS AND ENERGY CONSUMPTION IN  
CONVENTIONAL WOOD DRYING TECHNIQUE
- DT B. Sc. Thesis (Academic Study Programmes)
- NO V, 26 p., 14 fig., 2 ann., 16 ref.
- LA sl
- AL sl/en
- AB Needed time, energy consumption and referring wood drying costs are among the highest in wood product manufacturing. Analysis of the drying process is very complex as you need to know a lot of different elements influencing drying process. A model that can simulate and analyse conventional drying process by selecting the right drying schedule was prepared. Drying time and energy consumption were calculated. Costs analysis depending on different elements: wood species, wood thickness, initial and final moisture content, climate and construction of drying chamber was done. The model can help us compare and analyse energy efficiency of drying, comparing different drying techniques, and help us with decisions about new investments in our equipment.

## KAZALO VSEBINE

KLJUČNA DOKUMENTACIJSKA INFORMACIJA.....	II
KEY WORDS DOCUMENTATION .....	III
KAZALO VSEBINE.....	IV
KAZALO SLIK.....	V
<b>1 UVOD.....</b>	<b>1</b>
1.1 PROBLEM.....	1
1.2 PREDPOSTAVKA .....	1
1.3 CILJI.....	2
<b>2 PREGLED LITERATURE (SPLOŠNI DEL).....</b>	<b>3</b>
2.1 ORGANIZACIJA IN NAČRTOVANJE SUŠILNEGA PROCESA.....	3
2.2 TRAJANJE SUŠENJA IN SUŠILNI PROGRAMI .....	6
2.3 PORABA ENERGIJE.....	10
<b>3 METODA DELA .....</b>	<b>12</b>
3.1 PRISTOP K IZDELAVI ALGORITMA .....	12
3.2 PREGLEDNICE S PODATKI .....	14
3.3 ALGORITEM KINETIKE SUŠENJA IN PORABE ENERGIJE .....	15
3.4 OPTIMIZACIJA SUŠENJA.....	18
<b>4 REZULTATI IN RAZPRAVA .....</b>	<b>20</b>
4.1 IMPLEMENTACIJA ALGORITMA V MS EXCELU .....	20
4.2 KINETIKA SUŠENJA .....	22
4.3 PORABA ENERGIJE.....	24
<b>5 SKLEPI.....</b>	<b>26</b>
<b>6 VIRI .....</b>	<b>27</b>
<b>ZAHVALA</b>	

## KAZALO SLIK

Slika 1: Shematski prikaz predelave lesa od hlodovine do kakovostno osušenega žaganega lesa .....	5
Slika 2: Diagram poteka algoritma .....	13
Slika 3: Osnovni podatki za simulacijo sušilnega postopka .....	15
Slika 4: Z algoritmom pridobljeni rezultati kinetike sušenja in porabe energije.....	15
Slika 5: Optimizacija postopka – analiza z različnih vidikov .....	18
Slika 6: Prikaz možne primerjave kinetike sušenja in pridobljenih rezultatov o porabljeni energiji iz Excel datoteke z vrednostmi drugih načinov sušenja .....	19
Slika 7: Algoritem za izračunavanje časov sušenja in porabljene energije implementiran v Excelu .....	20
Slika 8: Prikaz načina vnosa različnih osnovnih podatkov v Excel datoteko .....	21
Slika 9: Prikaz režima sušenja s sivimi celicami za ročni vnos, ter izračuni v Excel datoteki .....	22
Slika 10: Prikaz izračunov porabe energije, časov sušenja, ter kinetike sušenja v izdelani Excel datoteki .....	22
Slika 11: Prikaz rezultatov krivulje hitrosti sušenja lesa (sprememba vlažnosti lesa v odvisnosti od časa).....	23
Slika 12: Grafični prikaz rezultatov časov sušenja lesa z vidnim razmerjem med posameznimi fazami v Excel datoteki .....	23
Slika 13: Prikaz porabljene energije glede na namen porabljene energije .....	24
Slika 14: Deleži porabljene energije po fazah, kjer delež za uparjevanje vode predstavlja tudi energijsko učinkovitost.....	25

## 1 UVOD

### 1.1 PROBLEM

V industrijski proizvodnji žaganega lesa se v današnjem času vsi trudijo, kako in kje bi lahko prihranili oz. znižali stroške obratovanja. Med celotnim postopkom obdelave lesa, sodi sušenje med najbolj dolgotrajne in energijsko potratne faze predelave lesa. Zato je zelo pomembno, da je faza sušenja skrbno načrtovana in optimizirana, kar nam lahko prihrani veliko časa in energije, ki je potrebna pri procesu sušenja lesa. Prav čas in potrebna energija sta dva najbolj pomembna faktorja pri višini stroškov sušenja lesa. Na postopek sušenja lesa vpliva veliko različnih dejavnikov, ti pa se razlikujejo od primera do primera. Praktično nemogoče je, da bi imeli enake pogoje v dveh različnih podjetjih. Če so dejavniki, kot so drevesna vrsta, komora, začetna in končna vlažnost enaki, lahko ves postopek spremenijo zunanji pogoji v okolici komore. Tako tudi temperatura okolice kot tudi relativna zračna vlažnost vplivata na čas sušenja lesa in porabljeno energijo med samim postopkom. Kot posledica vseh dejavnikov je ekonomski vidik vsakega podjetja povsem edinstven in ga je tako potrebno tudi obravnavati. Ni pomembno ali gre za investicijo v novo opremo ali pa samo za posodobitev obstoječe opreme, saj znižanje stroškov pomeni nižjo lastno ceno proizvoda. Nižja lastna cena nam prinese višji dobiček, s tem pa več denarnih sredstev za nadaljnje investicije in razvoj. Poleg energijskega, časovnega in s tem ekonomskega vidika, pa se pojavlja še vprašanje končne kakovosti osušenega lesa. Ta je odvisna od postopka sušenja, ki mora biti skrbno načrtovan in izpeljan. Če pride do nepravilnosti med samim postopkom sušenja lesa, se pojavijo različne oblike napak, ki nam razvrednotijo surovino, to pa privede do manjših prihodkov.

### 1.2 PREDPOSTAVKA

Z implementiranim algoritmom v Excelu, ki bi bil enostaven za uporabo, bi lahko na lažji in hitrejši način načrtovali postopek sušenja lesa. Poleg enostavnosti bi obstajala možnost hitrega prilagajanja posameznemu primeru oz. spreminjanje čim večjega števila dejavnikov, ki vplivajo na sušilni postopek. S tem bi pridobili številne prednosti pred konkurenti na trgu, vzporedno pa bi lahko raziskali načine s katerimi bi naš postopek še izboljšali. Zaradi enostavnosti uporabe, bi bil primeren za vsakega uporabnika, ki bi želel na hiter način pridobiti informacije o časih sušenja in porabljeni energiji med sušilnim procesom. Na enostaven način bi lahko prilagodili in z boljšim načrtovanjem optimizirali



postopek. Natančnejša in hitrejša analiza sušilnega postopka z izdelanim algoritmom pa bi lahko pripomogla k optimizaciji procesa. Z izdelanim bi lahko predvideli čas postopka in ga z optimizacijo skrajšali. Predvideti bi bilo možno tudi porabo energije, kar bi nam posledično pomagalo pri načrtovanju in zmanjševanju stroškov sušilnega postopka. S pomočjo izračunov bi bilo možno predvideti porabo energije po posameznih fazah sušilnega postopka, ter ugotoviti katera izmed njih je energijsko najbolj potratna. Pridobljeni rezultati ne bi bil primerni le za podjetja, ki se ukvarjajo s sušenjem lesa ampak tudi za končne kupce le tega. Kupec bi lahko že vnaprej predvidel potreben čas za sušenje določene lesne vrste, to pa bi mu omogočilo lažje planiranje zalog v lasten podjetju. Na ta način bi lahko predvidel, koliko prej je potrebno naročiti novo zalogo določene lesne vrste ob določenem letnem času, da bi bile le te pravočasno posušene na točno končno vlažnost in dostavljene v podjetje. To bi mu omogočilo uporabo manjših skladiščnih površin, ki bi bile potrebne za zaloge, kar pa ponovno vodi do znižanja stroškov poslovanja.

### 1.3 CILJI

Primarni cilj naloge je izdelava računalniško podprtega algoritma za sušenje lesa, ki bi bil prilagojen uporabniku za enostavno in hitro uporabo. Predvidevamo, da bo z modelom mogoče predvideti vrednosti porabe energije med sušilnim postopkom in čas trajanje le tega, ter analizo deleža porabljene toplotne in električne energije. Algoritme bomo zasnovali na osnovi izračunov, ki bodo upoštevali več dejavnikov (npr. lesna vrsta, dimenzije sortimentov, začetna in končna vlažnost, velikost zložaja, velikost komore, tip komore, zunanji klimatski pogoji). Z implementiranim algoritmom v Excelu, ki bo poenostavil in skrajšal čas analize vpliva proučevanih dejavnikov na hitrost sušenja, hkrati pa bo omogočil simulacijo porabo energije, ter oceno kakovosti osušenega lesa.

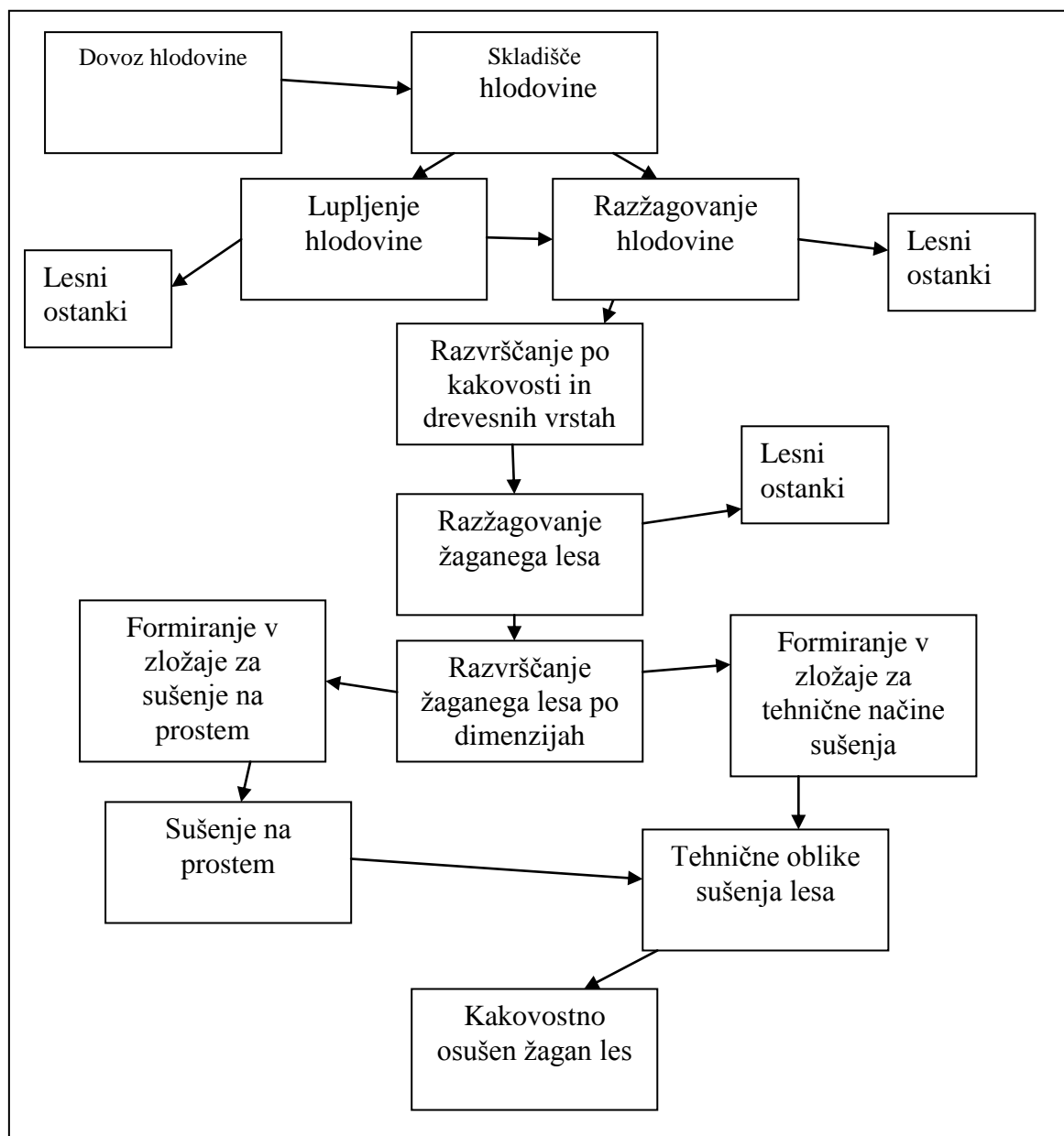
## 2 PREGLED LITERATURE (SPLOŠNI DEL)

### 2.1 ORGANIZACIJA IN NAČRTOVANJE SUŠILNEGA PROCESA

Sušenje lesa je kompleksen postopek in zahteva poznavanje velikega števila korelacij med številnimi vzroki in posledicami med samim postopkom. Vzroki, ki vplivajo na postopek sušenja so povezani z dejavniki, kot so temperatura sušenja, relativna vlažnost, medij sušenja (zrak, vodna para,...), hitrost in konvekcija zraka, debelina sortimentov, kot tudi mehanske, fizikalne in kemijske lastnosti posamezne drevesne vrste. Zato je organizacija postopka sušenja lesa zelo pomembna, saj v lesnopredelovalni industriji sušenje pomeni časovno dolgotrajen in energijsko potraten proces. Prilagojen mora biti vsakemu posameznemu primeru. Naloga sušenja lesa je, da dosežemo ciljno vlažnost oz. končno vlažnost lesa, ki je bila zahtevana in je prilagojena nadaljnji uporabi oz. predevali in obdelavi. V postopku sušenja lesa vedno stremimo k temu, da najdemo pravo ravnovesje med časom, ceno in kvaliteto sušenja. Ravno ti trije dejavniki, ki so neodvisni en od drugega predstavljajo kompleksnost procesa (Perré, 2007). Vsi trije dejavniki morajo biti prilagojeni med seboj za optimizacijo procesa sušenja lesa v praksi. Čas sušenja lesa je najlažje prilagoditi, vendar pa ima nekatere omejitve kot so fiksni kapital, zahteve naročnika ali pa sušilne in skladiščne kapacitete. Kakovost sušenja je odločilnega pomena pri vrednosti osušenega lesa in najpomembnejši dejavniki so dosežena želena končna vlažnost lesa (enakomerna vlažnost v vseh sortimentih in po celotnem sortimentu), mehanska kvaliteta (trdnost, stabilnost) in les brez napak (obarvanost, satavast, zaskorjenje,...) Naslednji dejavnik pa predstavlja cena sušilnega procesa, ki je odvisna predvsem od sušilne naprave in njene kakovosti, hkrati pa je odvisna tudi od kompromisa med časom in kakovostjo sušenja lesa.

Osnovni pomen načrtovanja sušilnega procesa je skrajšanje časov sušenja in zmanjšanje porabe toplotne in električne energije, to pa nam omogoči do boljše ekonomske učinkovitosti postopka. Načrtovanje sušilnega procesa se začne že v primarni obdelavi lesa, kjer dobimo hlodovino, ki jo je potrebno sortirati po različnih kriterijih kot so npr. kakovost, drevesna vrsta, debelina ipd. Hlodovino je nato potrebno razvrstiti glede na namen uporabe in želje o velikosti sortimentov žaganega lesa preko ustrezne tehnologije razžagati ali pa jo pred razžaganjem tudi olupiti. Tako pri lupljenju kot tudi pri razžaganju hlodovine se pojavlja precejšnja količina lesnih ostankov (ostanki skorje,

sekanci, krajniki, žagovina), ki jih lahko za boljši izkoristek in s tem manjšo porabo energije uporabimo kot medij za ogrevanje bodisi delovnih prostorov ali pa za pridobivanje dodatne toplotne energije, ki je potrebna pri tehničnem sušenju lesa. Ko je hlodovina razžagana na sortimente, je tudi te potrebno sortirati po določenih kriterijih (drevesna vrsta, kvaliteta, robljeno, nerobljeno, debelina, ipd...). Sortirane žagane elemente lahko nato letvičimo in jih pripravimo za sušenje na prostem, lahko pa jih razžagamo na končne velikosti elementov (z ustrezno nadmero). Te elemente lahko nato sušimo na prostem ali pa jih pošljemo direktno na tehnično sušenje (temperaturno konvekcijsko komorsko sušenje, kondenzacijsko sušenje, vakumsko sušenje, visokofrekvenčno sušenje, solarno sušenje). Največkrat je sušilni proces kombinacija sušenja na prostem in temperaturno konvekcijskega komorskega sušenja, vendar pa se lahko odločimo tudi za druge kombinacije sušenja z različnimi tehnikami. Po končanem postopku sušenja smo lahko zadovoljni le, če smo kakovostno osušili vse sortimente (slika 1).



Slika 1: Shematski prikaz predelave lesa od hlovovine do kakovostno osušenega žaganega lesa

Tehnološki postopek sušenja lesa in s tem načrtovanje lahko razdelimo na več faz. Prva faza je priprava zložajev, kjer je potrebno prizmo zložaja poravnati na obeh čelih, stranice zložaja pa morajo biti ravne. Tu so pomembne predvsem dimenzije sortimentov in s tem posledično tudi dimenzije zložaja. Poskrbeti moramo za transportna sredstva zložaja do same komore in potem tudi vnos le tega v samo komoro. Elementi v zložaju morajo imeti kolikor se da enake sušilne karakteristike, tu pa mislimo predvsem na isto drevesno vrsto enake debeline. V skrajnih primerih je možno sušiti tudi podobne drevesne vrste po

sušilnih karakteristikah istočasno kot sta npr. javor in bukev (Gorišek, 2004). Že pred sušenjem pa je potrebno izvesti tudi sortiranje žaganega lesa po kakovosti in sušiti podobno kakovostne elemente skupaj. V zložaju moramo tudi pravilno izbrati distančne letvice, ki so po navadi  $\frac{1}{2}$  do  $\frac{1}{4}$  debeline sortimenta, ki ga sušimo. Paziti moramo seveda na dimenzije komore in način polnjenja, kjer moramo zagotoviti enakomeren horizontalen pretok sušilnega medija (v našem primeru zraka). To pa zagotovimo tudi s postavitvijo naprav, tu mislimo predvsem na naprave za kroženje zraka. Učinkovitost komorskega sušenja popravimo z aerodinamiko sušilne komore, na katero pa vplivajo formiranje zložaja, pravilno polnjenje komore, aerodinamiko sušilnice in enakomernost preprihovanja, to nam omogoči bolj enakomerno sušenje, kar pa pomeni manj možnosti za napake med sušilnim procesom. Ko komoro napolnimo, jo zapremo in preverimo tesnjenje zaradi morebitnih toplotnih izgub med procesom sušenja lesa. Ko poteka proces sušenja lesa, ga spremljamo in upravljamo preko računalniškega sistema, ki ga ima vsaka sušilna komora prilagojenega za svoje delovanje. Uporabljajo se številni režimi sušenja kot so Ameriški, Angleški, Ruski, Nemški, kjer ima vsak režim svoje značilnosti. Ko se postopek komorskega sušenja zaključi izpraznimo komoro in preverimo kakovost osušenega lesa.

## 2.2 TRAJANJE SUŠENJA IN SUŠILNI PROGRAMI

Trajanje konvencionalnega procesa sušenja lesa je sestavljeno iz organizacijskega časa, to je časa, ki ga potrebujemo za polnjenje in praznjenje komore, ter od tehnološkega časa, ki je določen s sušilnimi fazami med samim postopkom sušenja lesa (Kolin, 2000). Postopek sušenja lesa je razdeljen v več faz sušenja, ki imajo različen čas trajanja. Prva faza se imenuje faza segrevanja, nato sledi faza dejanskega sušenja lesa ali aktivna faza, ter faze izenačevanja, kondicioniranja in ohlajanja. Celoten čas sušenja lesa izračunamo po naslednji formuli:

$$t = t_{pol} + t_{seg} + t_{suš} + t_{i+k} + t_{ohl} + t_{pr} \quad \dots(1)$$

kjer so:

- $t$  = celoten čas
- $t_{pol}$  = čas polnjenja komore
- $t_{seg}$  = čas segrevanja
- $t_{suš}$  = čas sušenja (aktivna faza sušenja)
- $t_{i+k}$  = čas izenačevanja in kondicioniranja

- $t_{ohl}$  = čas ohlajanja
- $t_{pr}$  = čas praznjenja

Na hitrost sušenja lesa vplivajo različni dejavniki. Debelina sortimentov je zelo pomemben dejavnik, saj se z večjo debelino čas sušenja podaljšuje, poleg tega so zelo pomembni dejavniki transportnih lastnosti posamezne lesne vrste (difuzivnost, permeabilnost, toplotna prevodnost,...), vendar pa na te dejavnike nimamo vpliva. Pri konvencionalnem postopku sušenja lesa sta kontrolna dejavnika suhi in mokri termometer, ki določata sušilno klimo s psihrometersko razliko, ob njima pa še hitrost sušilnega zraka oz. sušilnega medija. Ko seštejemo vse čase polnjenja, praznjenja in dejanskega postopka sušenja lesa pridemo do skupnega časa, ki je potreben za 1 celoten cikel sušenja. Na čase polnjenja in praznjenja lahko vplivamo z boljšo organizacijo dela. Ta postopek lahko skrajšamo do minimuma s pravilno razporeditvijo dela in s pravilno uporabo strojev za polnjenje in praznjenje. Manjše komore uporabljajo ture z vagoni (avtomatične ali ročne), med tem ko se za komore večjih kapacitet uporabljajo čelni in bočni viličarji. Časi polnjenja in praznjenja se pri manjših komorah gibljejo od 2 do 4 ure, med tem ko se za komore večjih kapacitet potrebuje tudi do 12 ur (Kolin, 2000), seveda so tu vštet še časi zlaganja zložajev z distančnimi letvami.

Nato sledi faza segrevanje, kjer je potrebno segreti celotno komoro, vse njene komponente in les, ki ga sušimo. V fazi segrevanja je temperatura konstantna in je odvisna od posamezne drevesne vrste. Dolžina te faze je izračunana glede na izkustvene normative in je predvidena glede na letni čas, odvisna pa je od  $T$  okolice in  $T$  lesa, moči grelnih naprav in debeline sortimentov.. Za letni del sezone (marec – oktober) so predvideni časi segrevanja za listavce 1,5 h na cm debeline sortimenta, za iglavce pa 1,0 h na cm debeline sortimenta. Za zimski del sezone (november – februar) pa se predhodni podatki povečajo za 30 do 50 % časa (Kolin, 2000). Pri konvekcijskem sušenju lesa poteka postopek pri povišani temperaturi in hitrejšemu pretoku zraka, prav s temperaturo in hitrostjo zraka pa uravnavamo hitrost sušenja lesa in ga znatno skrajšamo. Zato lahko hitrost sušenja najlažje prilagajamo s temperaturo in hitrostjo pretoka sušilnega medija v našem primeru zraka. Temperature v konvencionalnih sušilnicah se glede na sušečo drevesno vrsto in njeno debelino gibljejo od 40 do 100 °C, relativna zračna vlažnost je med 20 in 100 %, hitrosti

zraka pa med 1,5 in 4 m/s. Vlažen zrak lahko ob določenem tlaku segrevamo, ohlajamo, navlažujemo, razvlažujemo ali pa mešamo z vlažnim zrakom, ki ima drugačne parametre. S poznavanjem termodinamike zraka lahko torej uravnavamo zrak v sušilni komori, z dovajanje novega zraka ali pa z recikliranje obstoječega zraka.

Po segrevanju sledi »glavna faza« oz. aktivna faza sušenja lesa, kjer nam trajanje te faze določa največji delež celotnega sušenja lesa. Pomen načrtovanja in posledično tudi optimizacije sušilnega procesa je skrajšanje časov sušenja in s tem zmanjšanje stroškov z ekonomskega vidika. Pri izračunavanju trajanja aktivne faze sušenja lesa si lahko pomagamo z različnimi metodami kot so: metoda po Kollmann-u, metoda s koeficienti in metoda s tabelami (Kolin, 2000).

Najbolj običajna in natančna je metoda po Kollmann-u, ki jo bomo uporabili tudi pri naši izdelani Excel datoteki za načrtovanje sušilnega procesa. Po tej metodi se upoštevajo različne karakteristike posamezne drevesne vrste, ter lastnosti izbranega režima. Trajanje aktivne faze sušenja lesa po Kollmann-u lahko izračunamo po formuli:

$$t = \frac{1}{\alpha} \cdot (\ln u_z - \ln u_k) \cdot \left(\frac{d}{25}\right)^{1,5} \cdot \frac{65}{T} \quad \dots(2)$$

kjer predstavljajo:

- $t$  = čas sušenja
- $\alpha$  = koeficient, ki je odvisen od vsake drevesne vrste
- $u_z$  = začetna vlažnost sortimenta
- $u_k$  = končna vlažnost sortimenta
- $d$  = debelina sortimenta (mm)
- $T$  = temperatura sušenja (°C)

Iz enačbe je razvidno, da je referenčna debelina sortimenta za izračunavanje po tej metodi izbrana na 25 mm, temperatura pa 65 °C. Če je dejanska debelina sortimenta 25 mm, je ta del enačbe v vrednosti 1 in nima vpliva na končen rezultat, ob večanju debeline pa se tudi koeficient ustrezno povečuje:

$$d = 40 \text{ mm} \rightarrow k = 2,0$$

$$d = 50 \text{ mm} \rightarrow k = 2,8$$

$$d = 60 \text{ mm} \rightarrow k = 4,2$$

Začetna in končna vlažnost sta v Kollmannovi enačbi uporabljeni v členu  $(\ln u_x - \ln u_k)$ . Obstajajo pa še korekcijski faktorji, ki v enačbi niso upoštevani in jih upoštevamo naknadno. Priv faktor je faktor, ki upošteva gostoto posamezne drevesne vrste in ga izračunamo po naslednji enačbi:

Listavci:

$$f_1 = \left(\frac{t_0}{650}\right)^{1.5}$$

Iglavci:

$$f_1 = \left(\frac{t_0}{450}\right)^{1.5} \quad \dots(3,4)$$

kjer je:

- $f_1$  = faktor gostote
- $t_0$  = gostota drevesne vrste

Poznamo pa še korekcijske faktorje, ki so odvisni od tipa sušilne komore in so pri sušilnicah s centrifugalnimi ventilatorji  $f_2 = 1.5$ , pri komorah z aksialnimi ventilatorji in s prečnim prehodom zraka pa ta faktor znaša  $f_2 = 1.003$ . Prav tako uporabimo faktor  $f_3 = 1.0$ , če sušilnica obratuje 12 ur in faktor  $f_3 = 0.5$ , če sušilnica obratuje 24 ur na dan (Kolin, 2000). Za te namene so izdelali krožni računalnik in žepni računalnik, ki omogočata odčitavanje približnega trajanja sušenja kar na terenu.

Po fazi sušenja sledita fazi izenačevanja in kondicioniranja. Naloga faze izenačevanja je, da izenačimo vlažnosti v celotni sušilni komori. Začetek te faze pa se začne, ko najbolj suh sledilni vzorec doseže za 2 % nižjo vlažnost od želene končne vlažnosti (dejansko smo sortimente presušili), konec pa jo je takrat, ko najbolj vlažen sledilni delec doseže želeno končno vlažnost (Gorišek, 2004). V tej fazi ostane temperatura enaka kot je bila v zadnji fazi sušenja, zračna vlažnost pa se uravnava tako, da je ravnovesna vlažnost za 2 % nižja od želene končne vlažnosti.

Sledi faza kondicioniranja, kjer je naša glavna naloga izenačiti vlažnosti po preseku celotnih sortimentov in doseči relaksacijo morebitnih notranjih napetosti v samim sortimentih. Ta faza se prične takoj, ko se zaključi faza izenačevanja, torej, ko najbolj vlažen sledilni delec doseže želeno končno vlažnost, ter traja okoli 5 % časa sušenja lesa. Med to fazo sortimente dodatno navlažujemo po površini. Kondicioniranje se zaključi, ko se izenači vlažnost vseh sortimentov po celotnem preseku in traja okoli 10 % časa sušenja lesa. Pri kondicioniranju ostane temperatura enaka kot pri zadnji fazi sušenja lesa, zračno



vlažnost pa uravnavamo tako, da ravnovesno vlažnost nastavimo za 3 do 4 % višjo kot je naša zelena končna vlažnost sortimentov.

Zadnja faza pred zaključkom sušilnega procesa je faza ohlajanja, kjer je naša naloga, da ohladimo les, ki smo ga sušili na temperaturo enako zunanji ter pri tem ne povzročimo poškodb na lesu. Med ohlajanjem ne sme priti do preostrih klimatskih pogojev niti do kondenzacije. Ohlajanje poteka postopoma s priprtimi loputami na zračnikih in z delovanjem ventilatorjev, le te pa izključimo, ko je izmerjena temperatura v komori še približno 20 °C višja od temperature okolice. Trajanje faze ohlajanja je po času približno enako trajanju faze segrevanja. Po koncu ohlajanja pa sledi le še praznjenje komore.

### 2.3 PORABA ENERGIJE

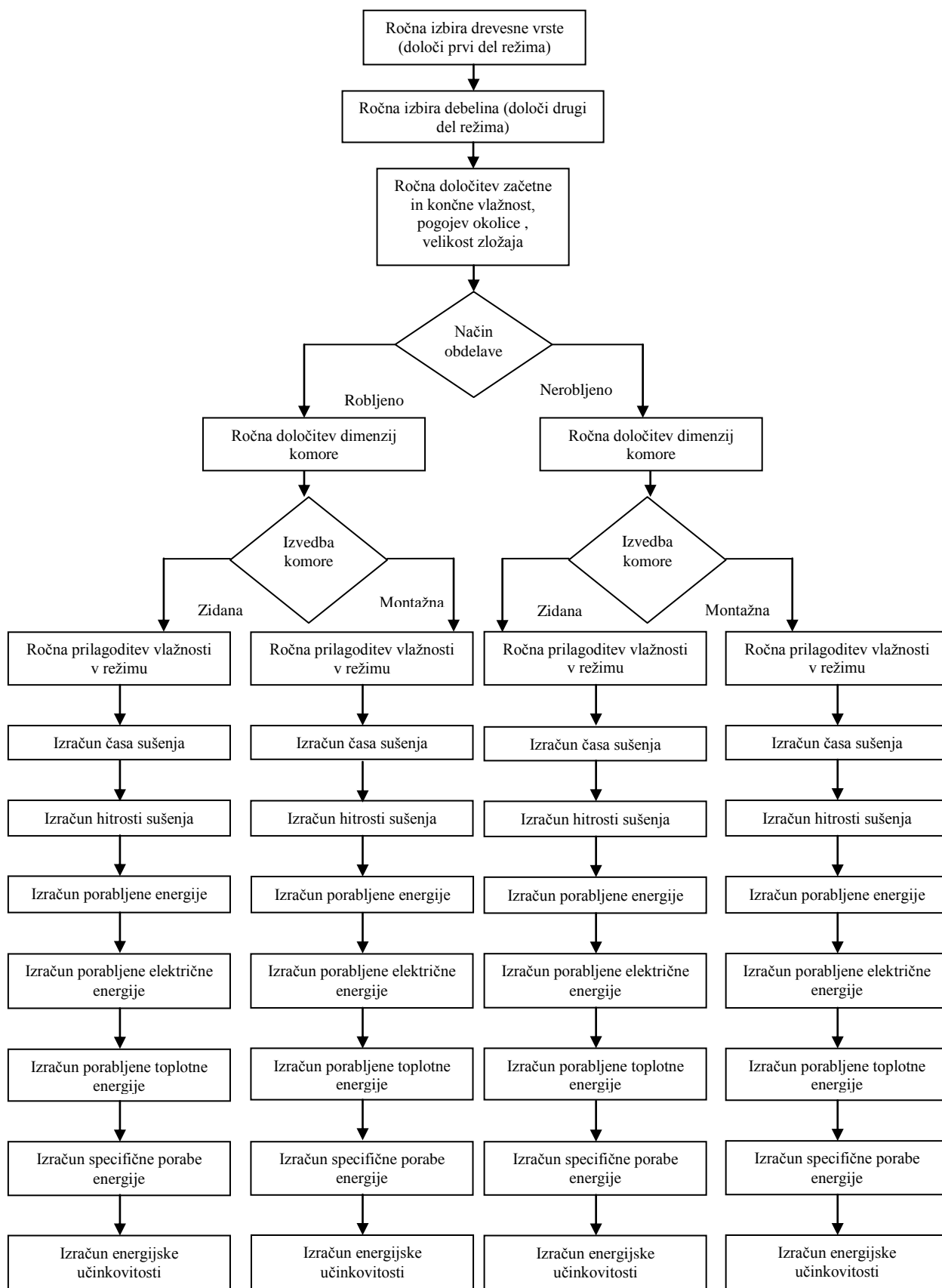
Ker je sušenje lesa energijsko najbolj potraten postopek v predelavi lesa, je zelo pomembno, da porabo energije znižamo na minimum. Večina porabljene energije je uporabljena za proizvodnjo toplote, električna energija pa se uporablja predvsem za pogon ventilatorjev, manjši delež le te pa gre za krmiljenje in regulacijo. Razmerje med porabljenimi toplotno in električno energijo pa se seveda zelo spreminja in je odvisno od številnih dejavnikov, kot so vrsta lesa, debelina sortimentov, začetna in končna vlažnost, ter seveda od programa sušenja. Številni avtorji (c.f. Torelli s sod., 1989) menijo, da delež porabljene električne energije med postopkom sušenja lesa sega med 15 in 20 % celotne porabljene energije, med tem, ko lahko zasledimo podatke o deležu električne energije tudi samo okoli 6 % (Ilič, 1984). Pri nekaterih modificiranih programih pa lahko delež električne energije celo preseže delež toplotne energije (»bela« bukovina). Med postopkom sušenja lesa pa lahko celotna potrebna energija zelo varira. Če pogledamo podatke Seegerja (1989), je lahko celo od 140 do 1260 kWh na m<sup>3</sup> osušenega lesa. Če bi želeli primerjati različne tehnike sušenja lesa z energijskega vidika je najbolj primeren podatek za primerjavo specifična poraba, ki nam pove koliko je bilo potrebne energije za izločitev 1 kg vode. Ta se seveda razlikuje tudi med samim postopkom, saj je poraba energije, ko je vlažnost lesa nad točko nasičenja celičnih sten (TNCS), nižja kot takrat, ko se vlažnost lesa že spusti pod TNCS. Po podatkih številnih avtorjev (Villier 1982, Brunner 1987, Guzenda in Olek 2000) je poraba nad TNCS pri redkejših lesovih med 3,4 in 4,55 MJ/kg in gostejših med 4,55 in 7,07 MJ/kg, med tem ko je pri vlažnosti pod TNCS pri redkejših

vrstah nad 6,23 in gostejših nad 10,5 MJ/kg. Ker je poraba energije med samim postopkom velika, nas samo po sebi vodi k temu, da bi to porabo zmanjšali. To lahko dosežemo s tehnološkimi izboljšavami, sodobno tehnologijo in uporabo novih in boljših materialov. Skrb in vzdrževanje sušilne opreme nam zagotavlja minimaliziranje stroškov. Preprečiti moramo predvsem toplotne mostove, zaradi katerih lahko pride do večjih izgub energije, prav tako pa moramo zagotoviti tesnjenje komore, ter boljšo izolativnost. Izboljšamo lahko rekuperacijo toplotne energije, ter izkoristek električne energije. Varčevanje toplotne energije lahko povečamo s toplotnimi izmenjevalci v prezračevalnih sistemih, kjer ta sistem omogoča do 50 % prihranka energije pri segrevanju vstopajočega hladnega zraka. To nam omogoča v odvisnosti od trajanja celotnega postopka povečano toplotno učinkovitost za 1 do 3 %, celotno porabljeno energijo pa zmanjša za 5 do 10 % (Lippold 1987, Müller 1987, Zdešar 1998). Veliko toplotne energije pa tudi privarčujemo, če povežemo prezračevalne sisteme več komor med seboj. Eden od načinov je tudi izraba lastnih lesnih ostankov (če jih imamo) za pridobivanje toplotne energije, kar nam zmanjša stroške za proizvodnjo le te in hkrati poveča izkoristek izrabe lesa. Lippold (1987) meni, da je z uporabo frekvenčnih regulatorjev možno privarčevati tudi do 45 % električne energije pod točko nasičenja celičnih sten, med tem ko Müller (1989) pravi, da lahko pri nizkih vlažnostih tudi z izmeničnih izklapljanjem ventilatorjev zmanjšamo porabo električne energije do 30 %. Porabo energije pa nam lahko zmanjšajo tudi organizacijski ukrepi, kot so neprekinjeno delovanje sušilnih naprav, optimalno zloženi zložaji, ter pravilna polnitev komore z optimalnih izkoristkom njenih kapacitet. Če imamo na voljo zunanje skladiščne površine, pa lahko s predušenjem na prostem znižamo začetno vlažnost lesa in s tem močno zmanjšamo porabo energije med sušilnim postopkom, ter skrajšamo čas sušenja lesa. Od začetne vlažnosti sta čas trajanja postopka in porabljene energije zelo odvisna. Najprej je potrebno z dovedeno toploto zagotoviti, da se ogreje komora, tla in les do temperature, ko se sušenje lesa dejansko začne. Nato potrebujemo toploto za segrevanje na novo dovedenega hladnega zraka v komoro, ter toploto, ki nadomesti toplotne izgube s kondukcijo, konvekcijo in radiacijo skozi stene, tla in strop. Toplotna energija je v veliki večini potrebna za izparevanje vode iz lesa, ter za odstranitev vezane vode iz lesa, kar je tudi naš glavni cilj sušenja lesa. Potrebna toplotna se seveda spreminja glede na številne dejavnike, ki vplivajo na proces, kot so vrsta lesa, že omenjena začetna in končna vlažnost, ter drugi.

### **3 METODA DELA**

#### **3.1 PRISTOP K IZDELAVI ALGORITMA**

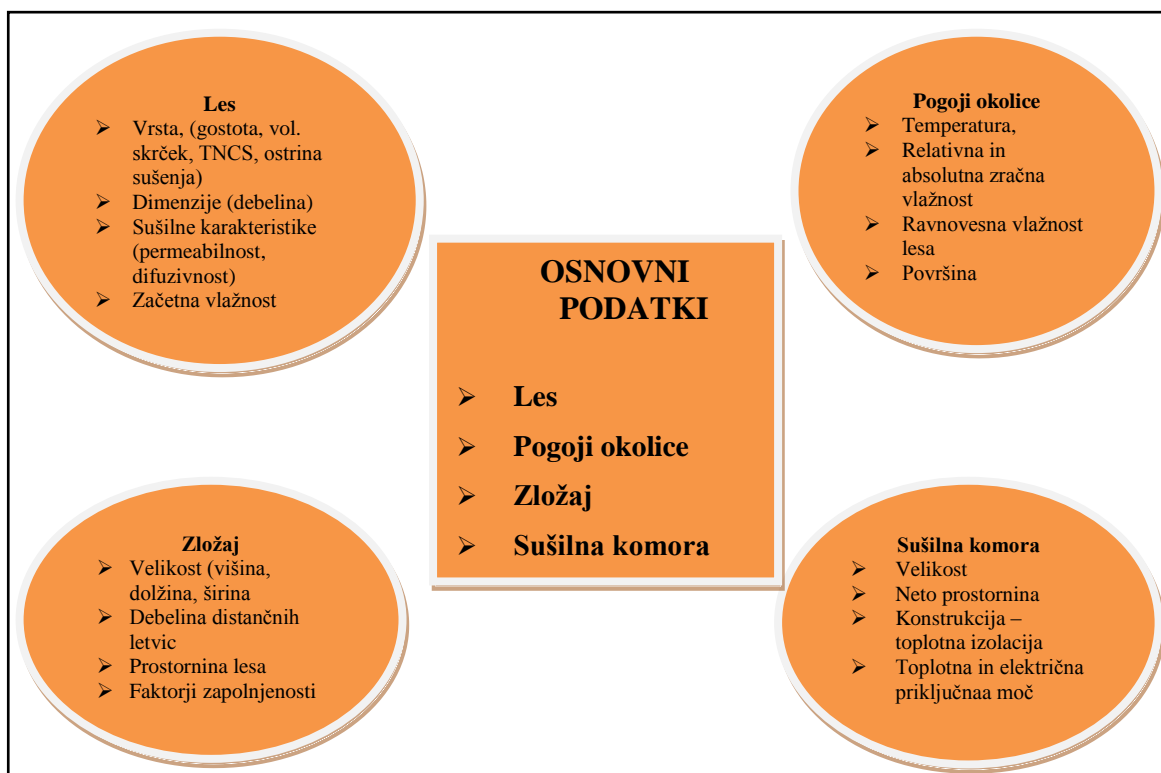
Izdelave algoritma smo se lotili po fazah, kjer smo celotno metodo razdelili na tri ključne elemente, ki omogočajo končno uporabo datoteke v Excelu. V prvi del smo vključili osnovne podatke, drugi del prikazuje kinetiko sušilnega postopka in porabo energije, nato pa sledi še del optimizacija postopka oz. poročilo o dobljenih rezultatih. Zbrali smo informacije o lesu, pogojih okolice, zložajih in sušilni komori. Poleg osnovnih podatkov smo za izračune kinetike postopka in porabljeni energiji v algoritmu uporabili oster Ameriški režim sušenja. Tretji del pa so poročila o dobljenih vrednostih, ki jih pridobimo s pomočjo izdelanega implementiranega algoritma v Excelu. Algoritem nam s hitro simulacijo postopka, izračuni in enostavnostjo omogoči prilagajanje dejavnikov in s tem optimizacijo postopka. Tu gre v največji meri za vplive začetne in končne vlažnosti in primerjave porabljene energije med konvencionalnim načinom sušenja in drugimi tehničnimi načini ali pa s sušenjem na prostem. Optimizacija lahko pripomore k večji energijski učinkovitosti, manjši porabi energije, krajših časih sušenja ali pa k povečanju sušilnih kapacitet. Z optimizacijo postopka pridobimo hitro in enostavno analizo časovnih in energijskih bilanc.



Slika 2: Diagram poteka algoritma

### 3.2 PREGLEDNICE S PODATKI

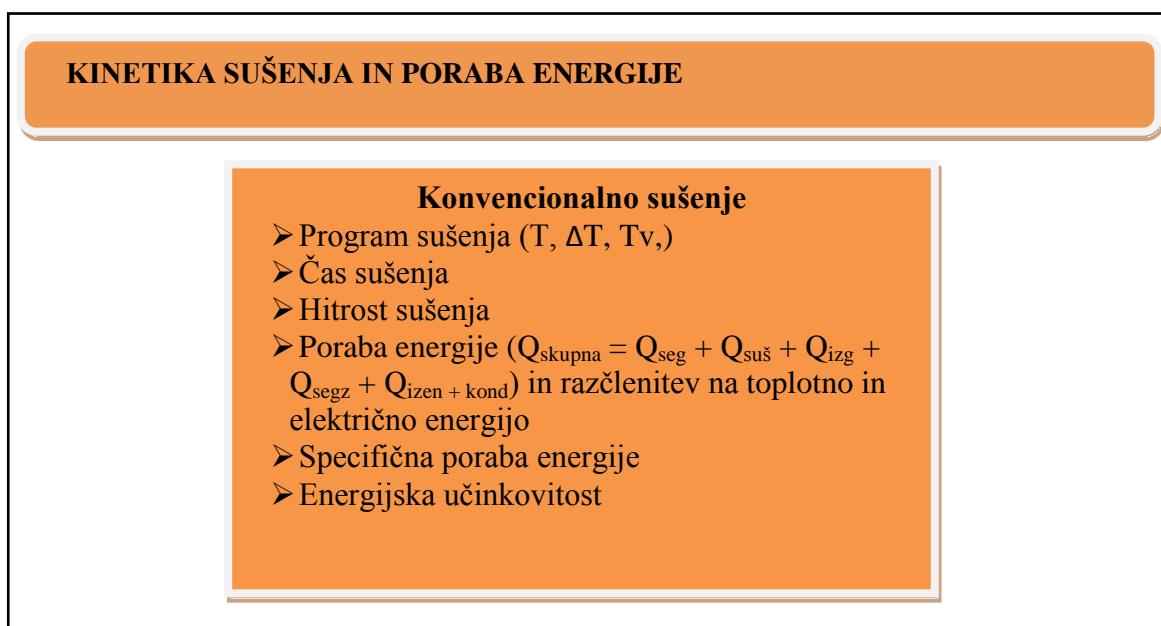
Pogoj za delovanje vseh algoritmov, so osnovni podatki. Osnovni podatki so sestavljeni iz različnih podskupin, le te pa je mogoče brati, spreminjati in dopolnjevati. Prva podskupina so lastnosti lesa, kjer so na voljo številne drevesne vrste, ki jih je kasneje mogoče dodajati ali odstranjevati. Ob izbiri lesne vrste so prikazani podatki o gostoti lesa, volumenski skrček in faktor  $\alpha$ . Poleg teh mora uporabnik ročno definirati dimenzije lesa, začetno vlažnost in želeno končno vlažnost. Drugi del osnovnih podatkov so pogoji okolice, kjer se podatki vnašajo ročno in pomembne dejavnike predstavljajo podatki o temperaturi, relativni in absolutni zračni vlažnosti, ravnovesni vlažnosti lesa in o potrebni površini. Ti podatki se prilagajajo posameznemu uporabniku in jih le ta vnaša ročno glede na dejanske trenutne pogoje, ki jih je potrebno izmeriti. V naslednji podskupini smo vključili podatke o zložajih, kjer je poleg ročnega vnosa dimenzij zelo pomembna tudi debelina distančnih letvic saj smo na ta način z algoritmom množenja izračunali faktorje zapolnjenosti. Algoritem vsebuje podatke o dimenzijah lesa, distančnih letvic in načina obdelave lesa (robljeno ali nerobljeno). Ko določimo način obdelave nam celica izračuna skupni faktor zapolnjenosti in na ta način omogoči pridobitev rezultatov, ki so potrebni za nadaljnji izračun volumna lesa v enem zložaju. Ta je izračunan z enačbo množenja vseh treh stranic zložaja in skupnega faktorja zapolnjenosti. Naslednjo podskupino podatkov pa predstavljajo karakteristike sušilne komore, kjer smo v model vključili dimenzije komore, neto površino, priključne električne in toplotne moči, ter tip konstrukcije (zidana, montažna). Dobljene rezultate smo kasneje vključili v izračunih o porabljeni energiji v simulaciji postopka. V modelu uporabnik ročno izbere izvedbo komore, ter nato nastavi dimenzije komore, to pa nam omogoči izračun letne kapacitete komore in volumen lesa, ki ga je možno osušiti v enem ciklu, kjer algoritem upošteva dimenzije 1 zložaja in neto površino komore. Volumen lesa v komori v enem ciklu smo izračunali z množenjem volumna lesa v enem zložaju in maksimalnim številom zložajev v komori. Nato smo volumen lesa v komori pomnožili s številom opravljenih sušilnih ciklov v enem letu (odvisno od nastavljenega št. obratovalnih dni, ki jih nastavimo ročno in izračunanega časa enega cikla) in dobili letno sušilno kapaciteto komore.



Slika 3: Osnovni podatki za simulacijo sušilnega postopka.

### 3.3 ALGORITEM KINETIKE SUŠENJA IN PORABE ENERGIJE

Algoritem vključuje izračune o programu sušenja, časih in hitrosti sušenja, porabljeni toplotni, električni in specifični energiji, ter energijski učinkovitosti. Za izračune smo v Excelu datoteki uporabili standardne funkcije.



Slika 4: Z algoritmom pridobljeni rezultati kinetike sušenja in porabe energije

Za program sušenja, ki ga avtomatično določa izbrana drevesna vrsta v Excel datoteki s pomočjo nastavljenega Ameriškega režima sušenja smo izbrali standardne podatke iz literature (Simpson, 1991), kjer je določen celoten program sušenja za vse uporabljene drevesne vrste s pripadajočimi temperaturami v komori, psihrometrsko razliko in temperaturo vlažnega termometra.

Čas sušenja je sestavljen iz različnih faz sušilnega postopka. Gre za faze segrevanja, sušenja, izenačevanja, kondicioniranja in ohlajanja. Faza segrevanja smo izračunali po enačbi: na vsak centimeter debeline sortimenta 2,5 h. Faza ohlajanja je izračunana po enaki enačbi in je zato časovno enaka fazi segrevanja. Faza sušenja oz. aktivna faza, je del postopka, kjer dejansko prihaja do izločanja vode iz lesa. Kot enačbo za algoritem, ki izračunava dolžino te faze smo uporabili enačbo po Kollmann-u, ki je zapisana in razložena v splošnem delu diplomskega projekta (2). Sledi čas faze izenačevanja, ki smo jo v naši nalogi izračunali tako, da smo čas aktivne faze pomnožili z 0,05 (5% časa aktivne faze) in dobili rezultat. Na isti način smo izračunali tudi trajanje faze kondicioniranja, le, da smo tu čas aktivne faze pomnožili z 0,1 (10% časa aktivne faze). Hitrost sušenja je definirana kot sprememba vlažnosti glede na čas, ki je potreben za to spremembo ( $du/dt$ ). Rezultat tega izračuna v Excel datoteki je uporabljen na isti način, odvisnost pa je prikazana tudi grafično.

Metoda izračunavanja porabe energije v izdelanem algoritmu po posameznih fazah:

$$Q_{\text{skupna}} = Q_{\text{seg}} + Q_{\text{suš}} + Q_{\text{izg}} + Q_{\text{segz}} + Q_{\text{izen + kond}} \quad \dots(5)$$

$$Q_{\text{seg}} = \text{segrevanje vlažnega lesa} = m_0 \cdot \Delta T \cdot (c_1 + c_v) \quad \dots(6)$$

$m_0$  = masa suhega lesa

$\Delta T$  = temperaturna razlika

$c_1$  = specifična toplota lesa

$c_v$  = specifična toplota vode

$$Q_{\text{suš}} = \text{sušenje} = m_{\text{vode}} \cdot q_{\text{izp}} = m_{\text{vode}} \cdot q_{\text{izp}} \cdot 0,1 \text{ (sorpcija)} \quad \dots(7)$$

$m_{\text{vode}}$  = masa vode

$q_{\text{izp}}$  = izparilna toplota

$$Q_{izg} = \text{izgube} = A \cdot k \cdot t \cdot \Delta T \quad \dots(8)$$

A = površina komore

k = koeficient toplotne prehodnosti

t = čas sušenja

$\Delta T$  = temperaturna razlika med temperaturo okolico in temperaturo v komori

$$Q_{segz} = \text{segrevanje zraka} = m_{vode}/\Delta Y \cdot (c_z \cdot \Delta T + c_{vp} \cdot \Delta T \cdot Y) \quad \dots(9)$$

$m_{vode}$  = masa vode

$\Delta Y$  = sprememba vlažnosti zraka

$c_z$  = specifična toplota zraka

$c_{vp}$  = specifična toplota vodne pare

$\Delta T$  = temperaturna razlika zraka

Y = vlažnost zraka

$$Q_{izen+kond} = \text{izenačevanje in kondicioniranje} = A \cdot k \cdot t_{izen+kond} \cdot \Delta T \quad \dots(10)$$

A = površina komore

k = koeficient toplotne prehodnosti

$t_{izen+kond}$  = čas faz izenačevanja in kondicioniranja

$\Delta T$  = temperaturna razlika med temperaturo okolico in temperaturo v komori

$$\Sigma Q = \text{celotna energija} = \text{toplotna energija} + \text{električna energija} = Q_t + Q_{el} \dots(11)$$

$$Q_{el} = P_{vent} \cdot (0,2 \text{ do } 0,4 \text{ kW na } 1 \text{ m}^3 - \text{odvisno od drevesne vrste}) \cdot t$$

$P_{vent}$  = moč ventilatorja

t = čas sušenja

$$Q_t = \Sigma Q - Q_{el}$$

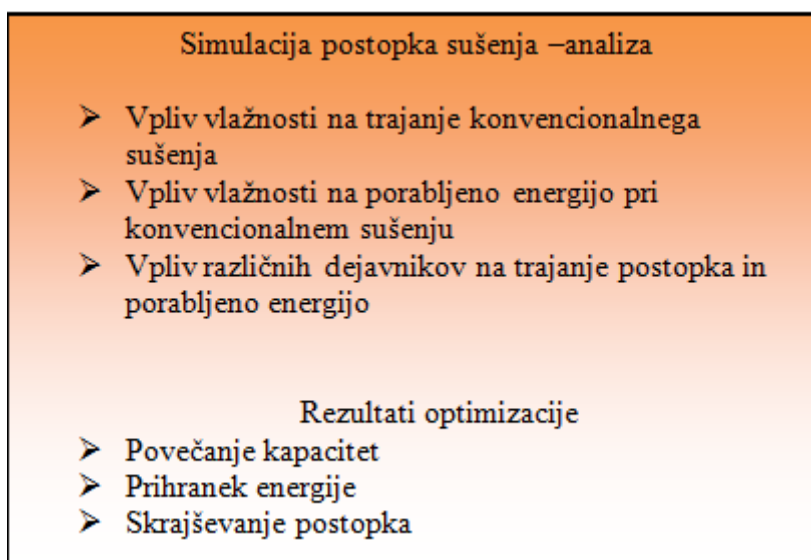
$$q_{sp} = \text{specifična poraba energije} = \Sigma Q / m_{vode} \quad \dots(12)$$

$$\varepsilon = \text{energijska učinkovitost} = Q_{suš} / \Sigma Q = (m_{vode} \cdot q_{izp} \cdot 0,1 (\text{sorpcija})) / \Sigma Q \dots(13)$$

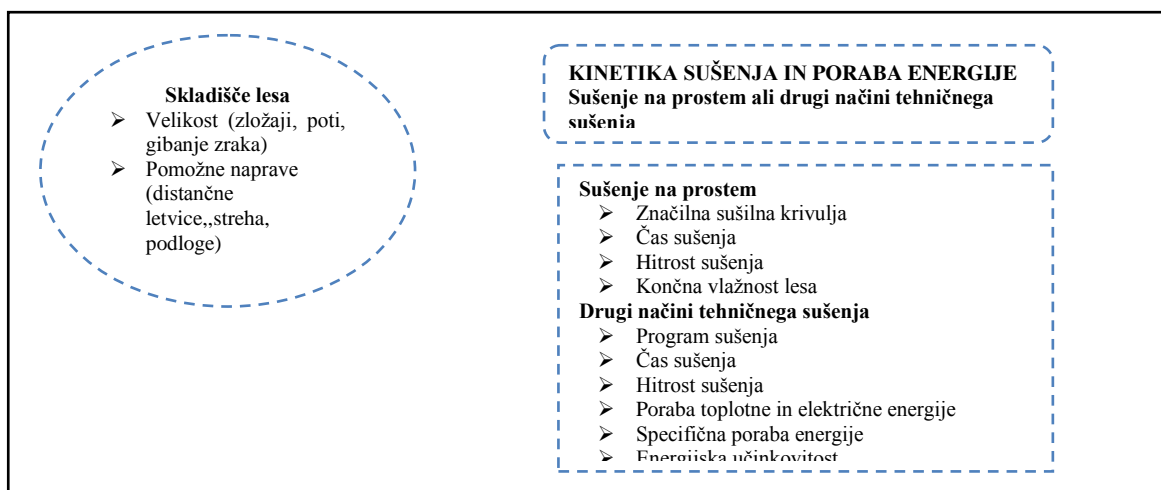


### 3.4 OPTIMIZACIJA SUŠENJA

Optimizacija procesa in njegova analiza je z dobljenimi rezultati možna z različnih vidikov (slika 5). Največji vpliv na čase sušenja in porabljeno energijo med postopkom sušenja lesa ima vlažnost lesa. Tu mislimo predvsem na začetno vlažnost, poleg te pa je pomembna tudi končna vlažnost. Različno začetno vlažnost pred konvencionalnim komorskim sušenjem lesa lahko dosežemo na več načinov. Les lahko delno osušimo oz. predsušimo z drugimi postopki tehničnega sušenja lesa, ali pa to izvedemo z enostavno obliko sušenja lesa na prostem. V modelu lahko s spreminjanjem začetne vlažnosti pridobimo ključne podatke o porabljeni energiji in potrebnim časom za doseganje želene končne vlažnosti ob prav tako zahtevani kvaliteti osušenega žaganega lesa. Predsušenje nam s skrajšanjem časov sušenja omogoča večje število sušilnih ciklov v komori in s tem višje letne kapacitete in izkoriščenost komore. Poleg krajših časov sušenja pa nam predsušenje zaradi nižje začetne vlažnosti zmanjša porabo energije. S podrobnim analiziranjem procesa in rezultatov lahko pridemo do pomembnim izhodišč, s katerimi lahko primerjamo čase sušenja in porabljeno energije med konvencionalnim načinom sušenja lesa in drugimi tehničnimi oblikami (slika 6).



Slika 5: Optimizacija postopka – analiza z različnih vidikov

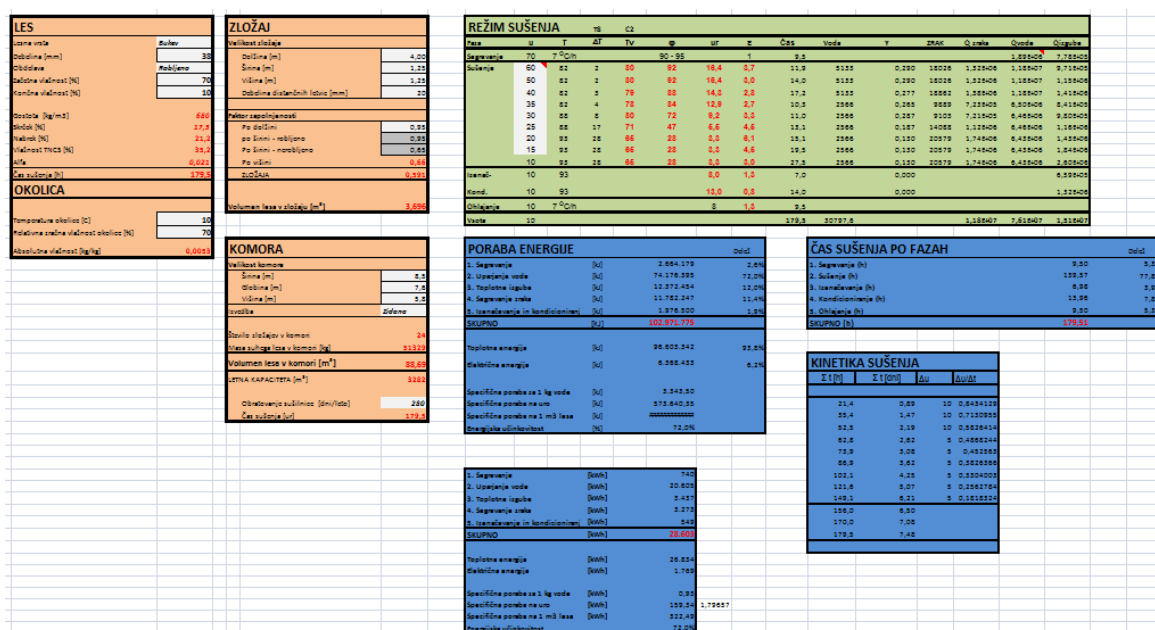


Slika 6: Prikaz možne primerjave kinetike sušenja in pridobljenih rezultatov o porabljeni energiji iz Excel datoteke z vrednostmi drugih načinov sušenja

## 4 REZULTATI IN RAZPRAVA

### 4.1 IMPLEMENTACIJA ALGORITMA V MS EXCELU

Implementacijo algoritma, ki s simulacijo sušilnega postopka izračunava predvidene čase sušenja in porabo energije za izbrano drevesno vrsto, smo izdelali v Excelu. Izdelana datoteka vsebuje osnovne podatke velikega števila dejavnikov, ki vplivajo na postopek sušenja lesa, čase in porabljeno energijo med samim postopkom. Z izbiranjem in spreminjanjem le teh je možno predvideti spremembe ključnih elementov sušenja lesa.



Slika 7: Algoritem za izračunavanje časov sušenja in porabljene energije implementiran v Excelu

Datoteka je izdelana tako, da omogoča spremljanje kinetike sušenja lesa. Tu mislimo predvsem na hitrost sušenja, ki je prikazana tako glede na celoten postopek, kot tudi izključno po posameznih fazah sušenja. Na podoben način prikaže simulacijo časov sušenja lesa po fazah in glede na celoten postopek, prikaz v modelu pa kaže rezultate v odstotni obliki po posameznih fazah. Vsi rezultati so prikazani tako s preglednicami, kot tudi v grafični obliki. Prikazuje nam rezultate porabljene energije, ki naj bi se glede na našo simulacijo porabila skozi celoten postopek sušenja ali pa izključno po posameznih fazah. Porabo energije smo ločili tudi glede na njen namen (toplotna energija, električna energija), rezultati pa nam prikažejo njihov odstotni delež. Osnovni in glavni del programa je na voljo v prvem zavihku, ki se imenuje »Račun«. Tu so prikazane tri svetlo oranžne preglednice, ki prikazujejo lastnosti o drevesni vrsti, okolici, zložaju in komori (slika 8).

Največja preglednica je zelene barve in prikazuje režim sušenja (slika 9). Svetlo sive celice predstavljajo podatke, ki jih je potrebno vnesti ročno, temnejše celice pa prikazujejo izračune, ki so rezultati algoritma.

<b>LES</b>		<b>ZLOŽAJ</b>	
Lesna vrsta	<i>Bukev</i>	<b>Velikost zložaja</b>	
Debelina [mm]	<b>38</b>	Dolžina [m]	4,00
Obdelava	<i>Robljeno</i>	Širina [m]	1,25
Začetna vlažnost [%]	<b>70</b>	Višina [m]	1,25
Končna vlažnost [%]	<b>10</b>	Debelina distančnih letvic [mm]	20
Gostota [kg/m <sup>3</sup> ]	<b>680</b>	<b>Faktor zapoljenosti</b>	
Skrček [%]	<b>17,5</b>	Po dolžini	0,95
Nabrek [%]	<b>21,2</b>	po širini - robljeno	0,95
Vlažnost TNCS [%]	<b>35,2</b>	po širini - nerobljeno	0,65
Alfa	<b>0,021</b>	Po višini	<b>0,66</b>
Čas sušenja [h]	<b>179,5</b>	ZLOŽAJA	<b>0,591</b>
<b>OKOLICA</b>		<b>Volumen lesa v zložaju [m<sup>3</sup>]</b>	
Temperatura okolice [C]	<b>10</b>	<b>3,696</b>	
Relativna zračna vlažnost okolice [%]	<b>70</b>		
Absolutna vlažnost [kg/kg]	<b>0,0053</b>	<b>KOMORA</b>	
		<b>Velikost komore</b>	
		Širina [m]	8,5
		Globina [m]	7,6
		Višina [m]	5,8
		Izvedba	<i>Zidana</i>
		Število zložajev v komori	<b>24</b>
		Masa suhega lesa v komori [kg]	<b>51329</b>
		<b>Volumen lesa v komori [m<sup>3</sup>]</b>	<b>88,69</b>
		<b>LETNA KAPACITETA [m<sup>3</sup>]</b>	<b>3282</b>
		Obratovanje sušilnice [dni/leto]	<b>280</b>
		Čas sušenja [ur]	<b>179,5</b>

Slika 8: Prikaz načina vnosa različnih osnovnih podatkov v Excel datoteko

REŽIM SUŠENJA														
Faza	u	T	ΔT	Tv	φ	ur	ε	Čas	Voda	Y	ZRAK	Q zraka	Qvode	Qizgube
Segrevanje	70	7 °C/h			90 - 95		1	9,5					1,89E+06	7,78E+05
Sušenje	60	82	2	80	92	16,4	3,7	11,9	5133	0,290	18026	1,32E+06	1,18E+07	9,71E+05
	50	82	2	80	92	16,4	3,0	14,0	5133	0,290	18026	1,32E+06	1,18E+07	1,15E+06
	40	82	3	79	88	14,3	2,8	17,2	5133	0,277	18862	1,38E+06	1,18E+07	1,41E+06
	35	82	4	78	84	12,9	2,7	10,3	2566	0,265	9889	7,23E+05	6,50E+06	8,41E+05
	30	88	8	80	72	9,2	3,3	11,0	2566	0,287	9103	7,21E+05	6,46E+06	9,80E+05
	25	88	17	71	47	5,5	4,5	13,1	2566	0,187	14088	1,12E+06	6,46E+06	1,16E+06
	20	93	28	65	28	3,3	6,1	15,1	2566	0,130	20579	1,74E+06	6,43E+06	1,43E+06
	15	93	28	65	28	3,3	4,5	19,5	2566	0,130	20579	1,74E+06	6,43E+06	1,84E+06
10	93	28	65	28	3,3	3,0	27,5	2566	0,130	20579	1,74E+06	6,43E+06	2,60E+06	
Izenač-	10	93				8,0	1,3	7,0		0,000				6,59E+05
Kond.	10	93				13,0	0,8	14,0		0,000				1,32E+06
Ohlajanje	10	7 °C/h				8	1,3	9,5						
Vsota	10							179,5	30797,6			1,18E+07	7,61E+07	1,51E+07

Slika 9: Prikaz režima sušenja s sivimi celicami za ročni vnos, ter izračuni v Excel datoteki

Najpomembnejši izračuni, ki jih uporabnik programa potrebuje in so hkrati njegov namen uporabe izdelanega algoritma so rezultati porabe energije, časov sušenja, ter kinetike postopka sušenja. Ti rezultati so prikazani v modro obarvanih preglednicah v izdelani Excel datoteki z implementiranim algoritmom za izračunavanje (slika 10).

PORABA ENERGIJE			Delež
1. Segrevanje	[kJ]	2.664.179	2,6%
2. Uparjanje vode	[kJ]	74.176.395	72,0%
3. Toplotne izgube	[kJ]	12.372.454	12,0%
4. Segrevanje zraka	[kJ]	11.782.247	11,4%
5. Izenačevanje in kondicioniranje	[kJ]	1.976.500	1,9%
<b>SKUPNO</b>	<b>[kJ]</b>	<b>102.971.775</b>	
Toplotna energija	[kJ]	96.603.342	93,8%
Električna energija	[kJ]	6.368.433	6,2%
Specifična poraba za 1 kg vode	[kJ]	3.343,50	
Specifična poraba na uro	[kJ]	573.640,35	
Specifična poraba na 1 m <sup>3</sup> lesa	[kJ]	1.160.978,37	
Energijska učinkovitost	[%]	72,0%	

ČAS SUŠENJA PO FAZAH			Delež
1. Segrevanje (h)		9,50	5,3%
2. Sušenje (h)		139,57	77,8%
3. Izenačevanje (h)		6,98	3,9%
4. Kondicioniranje (h)		13,96	7,8%
5. Ohlajanje (h)		9,50	5,3%
<b>SKUPNO (h)</b>		<b>179,51</b>	

KINETIKA SUŠENJA			
Σ t [h]	Σ t [dni]	Δu	Δu/Δt
21,4	0,89	10	0,8434129
35,4	1,47	10	0,7130955
52,5	2,19	10	0,5826414
62,8	2,62	5	0,4868244
73,9	3,08	5	0,452563
86,9	3,62	5	0,3826366
102,1	4,25	5	0,3304003
121,6	5,07	5	0,2562784
149,1	6,21	5	0,1818324
156,0	6,50		
170,0	7,08		
179,5	7,48		

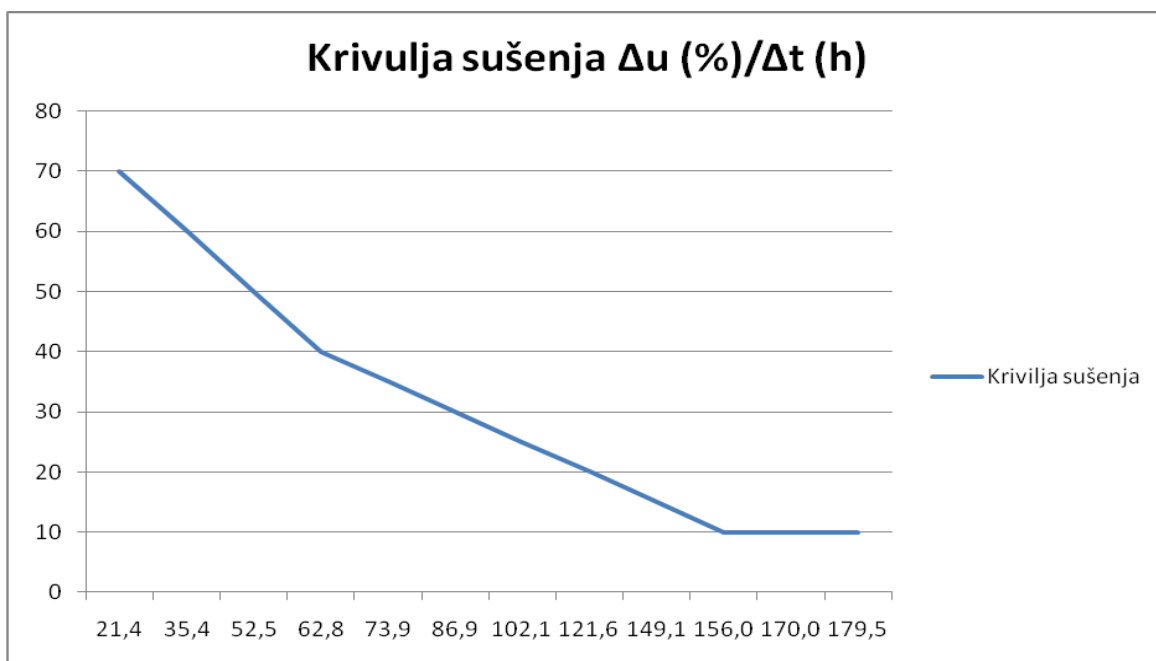
  

1. Segrevanje	[kWh]	740
2. Uparjanje vode	[kWh]	20.605
3. Toplotne izgube	[kWh]	3.437
4. Segrevanje zraka	[kWh]	3.273
5. Izenačevanje in kondicioniranje	[kWh]	549
<b>SKUPNO</b>	<b>[kWh]</b>	<b>28.603</b>
Toplotna energija	[kWh]	26.834
Električna energija	[kWh]	1.769
Specifična poraba za 1 kg vode	[kWh]	0,93
Specifična poraba na uro	[kWh]	159,34
Specifična poraba na 1 m <sup>3</sup> lesa	[kWh]	322,49
Energijska učinkovitost		72,0%

Slika 10: Prikaz izračunov porabe energije, časov sušenja, ter kinetike sušenja v izdelani Excel datoteki

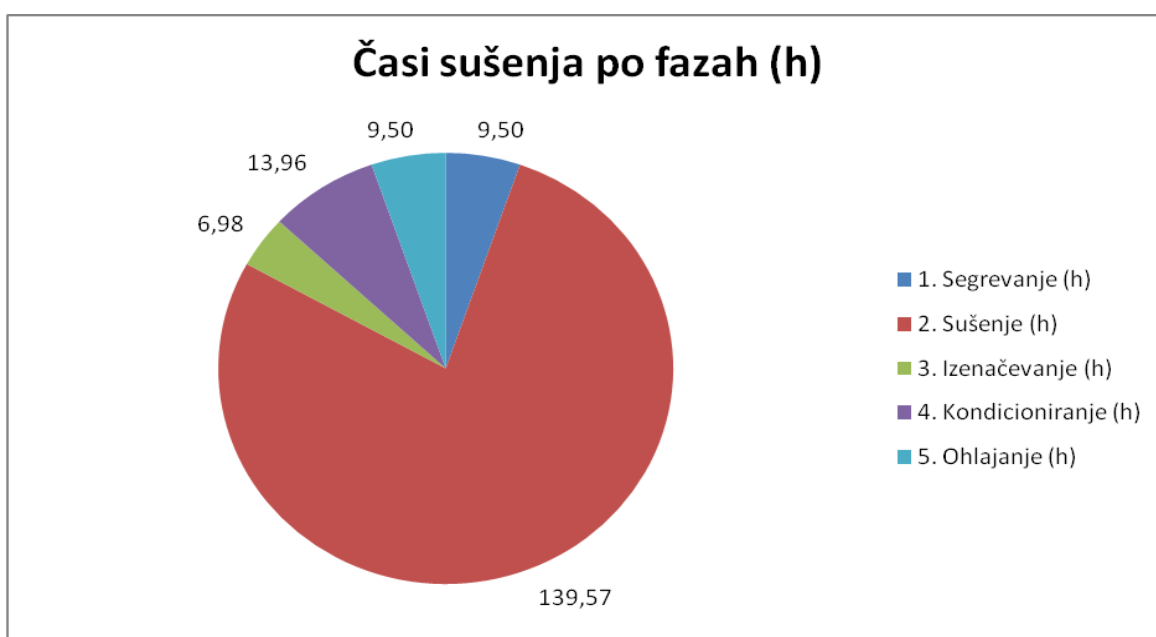
## 4.2 KINETIKA SUŠENJA

Pri kinetiki sušenja so najbolj pomembni rezultati o hitrosti in časih sušenja. Sušilno krivulja prikazuje hitrost sušenja, ki je definirana kot razmerje med spremembo vlažnosti lesa in časovnim obdobjem potrebnim za to spremembo. To razmerje je grafično prikazano na sliki 11, računski prikaz pa je omogočen v izdelanem modelu (slika 10).



Slika 11: Prikaz rezultatov krivulje hitrosti sušenja lesa (sprememba vlažnosti lesa v odvisnosti od časa)

V Excel datoteki se grafi kinetike sušenja nahajajo v zavihku z imenom »grafi«. S spreminjanjem začetnih podatkov in ostalih parametrov, ki so vključeni v naši simulaciji sušenja in imajo vpliv na sušilni proces, se grafi avtomatično izrisujejo z na novo vnesenimi podatki in pogoji.

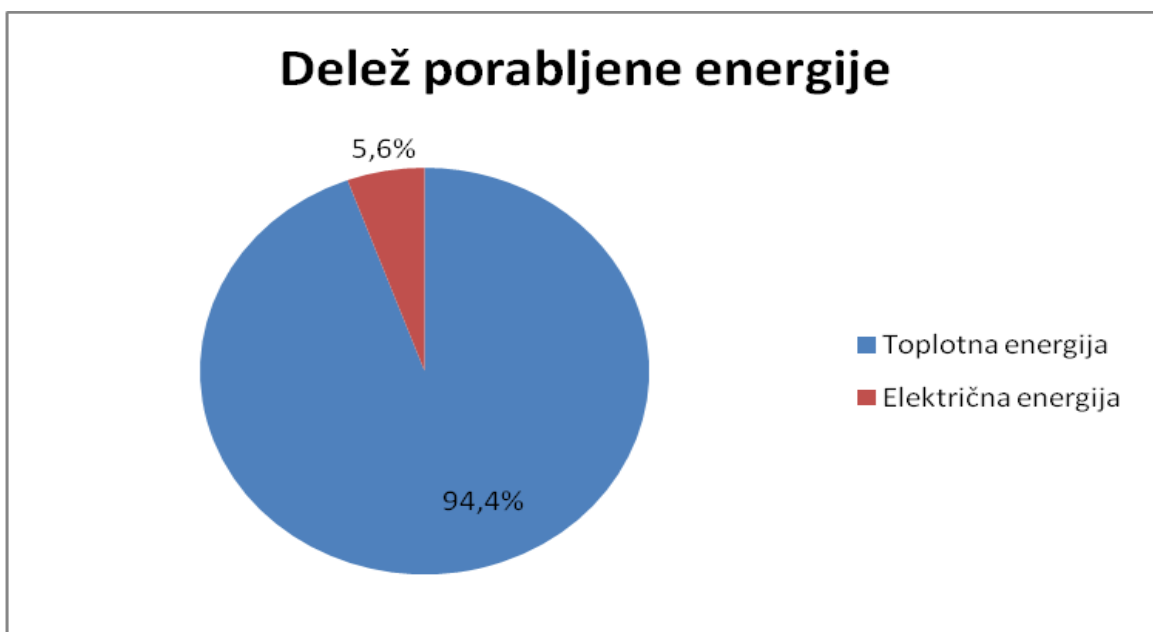


Slika 12: Grafični prikaz rezultatov časov sušenja lesa z vidnim razmerjem med posameznimi fazami v Excel datoteki

Na sliki 11 je viden primer prikaza časov sušenja lesa po fazah v urah v grafični obliki, ki je vključen v Excel datoteki in ponuja uporabniku večjo preglednost in predstavo o dobljenih rezultatih. Zelo pomembna je tudi funkcionalnost, ki omogoča razčlenitev sušilnega postopka po fazah sušenja. V sami Excel datoteki je prikaz istega izračuna prikazan tudi v preglednici (slika 10). Poleg deleža za posamezno fazo v urah pa je izračunan in prikazan tudi delež v odstotkih (v preglednici in na grafu). Seveda sta oba grafa identična glede na odstoten delež posamezne faze glede na celoto, le enote pri prikazu so drugačne (h ali %).

#### 4.3 PORABA ENERGIJE

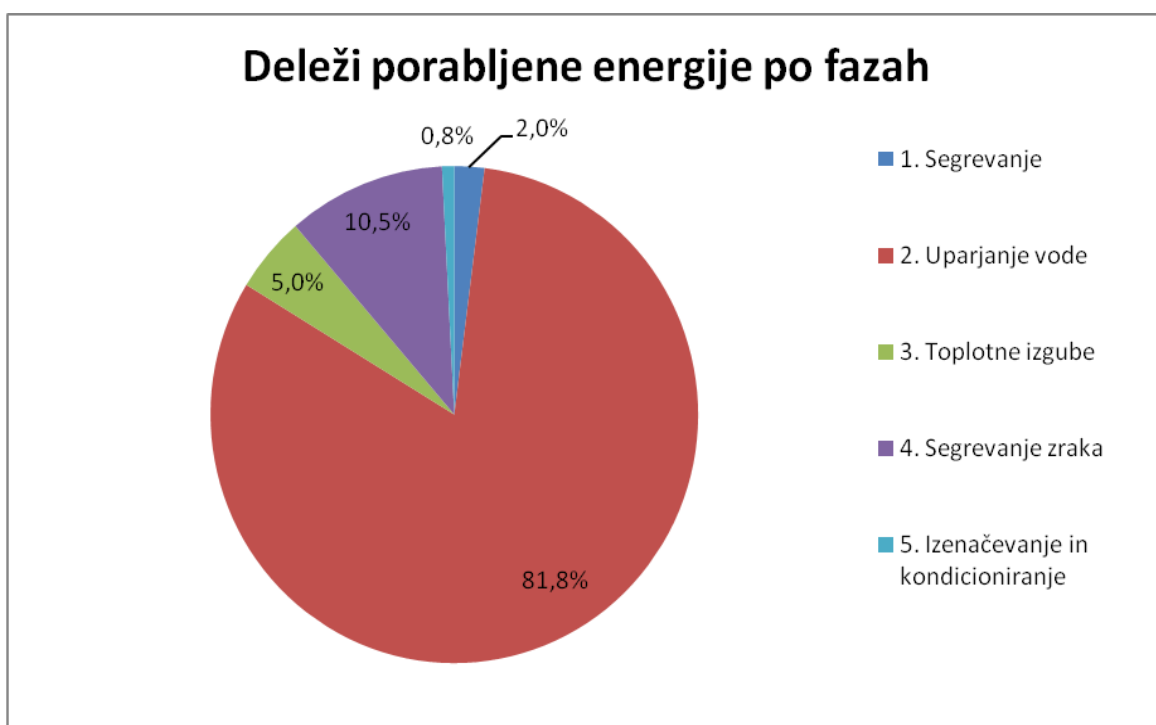
Poleg časov sušenja pa ima na končne stroške sušilnega procesa velik vpliv tudi poraba energije med samim procesom. Izdelana simulacija nam omogoča analizo te porabe s treh različnih vidikov. Prvi vidik porabe energije je glede na namen porabljene energije, kjer mislimo na porabo energije za ustvarjanje toplote in porabo električne energije. Ti rezultati so prikazani v modro obarvani preglednici »poraba energije«, ki se nahaja v izdelani Excel datoteki. Oba deleža porabljene energije pa sta prikazana in vrednostno izražena v kJ in odstotni vrednosti (slika 12), v naslednji preglednici pa v kWh (slika 10).



Slika 13: Prikaz porabljene energije glede na namen porabljene energije

Porabljeno energijo pa lahko s pomočjo izračunov in prikazov analiziramo tudi po posameznih fazah sušilnega procesa (slika 10). Poznavanje porabe energije po različnih

fazah sušenja nam omogoča celovito analizo samega procesa in razčlenitev porabljene energije. Na ta način se lahko posvetimo samo določni fazi, za katero menimo, da je optimizacije le te možna, ter njeno porabo primerjamo z drugimi fazami. Z Excel datoteko lahko na hiter in enostaven način analiziramo postopek in ob spreminjanju dejavnikov v modelu sušenja opazujemo, na kakšen način ima določen dejavnik vpliv na samo porabo energije. Ta analiza nam omogoča v končni fazi tudi izračun energijske učinkovitosti, ki predstavlja delež porabljene energije za uparjanje vode glede na celotno porabo energije. Višji kot je ta delež, večja je energijska učinkovitost sušilnega procesa, ta je razvidna tudi na sliki 14, prikaz pa se prav tako nahajajo v naši datoteki v zavihku z imenom »grafī«, preglednica z rezultati pa v zavihku »račun«.



Slika 14: Deleži porabljene energije po fazah, kjer delež za uparjanje vode predstavlja tudi energijsko učinkovitost

Najpomembnejši podatek, ki nam omogoča primerjavo različnih načinov sušenja lesa, je specifična poraba energije na 1 m<sup>3</sup> lesa. Uporabljeni algoritem izračunava in prikaže rezultate te porabe v kJ in kWh, s tem pa nam omogoča lažje analiziranje našega postopka v primerjavi z drugimi. Z Excel datoteko na hiter način pridemo do zelo pomembnih rezultatov z vidika posameznih dejavnikov, ki vplivajo na trajanje postopka, porabljeno energijo in kakovostno osušen les.



## 5 SKLEPI

Izdelali smo Excel datoteko, ki nam z dobljenimi rezultati omogoča analizo sušenja lesa. Datoteka je uporaben pripomoček, ki na hiter način in z enostavno uporabo omogoča uporabniku pridobitev ključnih informacij o postopku sušenja lesa, kot sta čas in poraba energije. Datoteko smo izdelali tako, da je kasneje možno podatke spreminjati, prilagajati in dopolnjevati, kar nam omogoči veliko fleksibilnost in spekter uporabe. Izdelali smo algoritem, ki v svojih izračunih upošteva številne dejavnike od katerih je postopek sušenja lesa odvisen. Tu smo uporabili dejavnike kot so podatki o drevesni vrsti, zložaju, pogojih okolice, sušilni komori, za simulacijo sušenja pa smo uporabili Ameriški režim. Algoritem omogoča izračunavanje in prikaz rezultatov o trajanju sušenja lesa kot tudi o porabi energije glede na celoten postopek in glede na posamezne faze sušilnega postopka, kar nam omogoča razčlenitev postopka. Prav ta razčlenitev postopka po fazah in s tem tudi rezultatov, nam pripomore k natančnejši analizi, posledično pa tudi k boljšemu načrtovanju sušilnega postopka. Zaradi boljše preglednosti in razumljivosti so rezultati v modelu prikazani tako v preglednicah, kot tudi grafično. Z izdelano Excel datoteko lahko izvajamo hitrejše analize in simulacijo postopka na računalniku s tem pa prihranimo veliko časa in energije, saj postopka zaradi njegove dolgotrajnosti ni potrebno izvajati v praksi.

## 6 VIRI

- Brunner R. 1987. Die Schnittholztrocknung. Hannover. Dipl. Ing. R. Brunner GmbH, 322 str.
- Gorišek Ž. 2004. Sušenje lesa. Zapiski predavanj
- Gorišek Ž., Straže A., Firšt U. 2009. CAE analysis and optimization of energy consumption and costs of wood drying with use of different drying techniques. Cost Action E53 Conference. Lisbona, Portugal. 22 – 23 Oktober 2009
- Gorišek Ž., Straže A. 2007. CAE analiza in optimizacija porabe energije pri sušenju žaganega lesa z uvedbo pre-sušenja na prostem. Les. 2007, 59 (5-6): 142 - 148
- Guzenda R., Olek W., Golebiewska M. 2004. Computer-aided prediction of timber air pre-drying times and costs. COST E15 Conference. Athens: 9 str.
- Ilić M. 1984. Potrošnja energije pri sušenju drva i mogućnost uštede. Drvna industrija. 35 (11/12): 265-269
- Kolin I. 2000. Hidrotermička obrada drveta. Beograd. Jugoslavija Publik: 238 str.
- Lippold A. 1987. Das Energiespotential bei der technischen Schnittholztrocknung in der DDR. Holz-technologie. 28 (1): 17-20
- Müller H. 1987. Wärmerückgewinnung bei der Schnittholz- und Furnier-trocknung. Holztechnologie. 28 (1): 21-23
- Müller H. 1989. Senkung des Elektroenergieverbrauches bei der Schnittholztrocknung durch wechselweise Abschaltung von Ventilatoren. Holztechnologie. 30 (4): 195-197
- Perré P. Julij 2007. Fundamentals of wood drying. Nancy. A.R.BO.LOR. : 366 str.

Seeger K. 1989. Energietechnik in der Holzverarbeitung. DRW Verlag. Leihfelden  
Echterdingen.

Simpson W. T. 1991. Dry Kiln. Operator's manual. Madison, Wisconsin, United States  
Department of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory: 274 str.

Torrel N., Gorišek Ž., Prelesnik T. 1989 Določitev porabe energije pri sušenju žaganega  
lesa. Les. 41 (3-4): 73-79

Villier A. 1982. Besoins en energies termiques et electrique dans les industries du bols.  
Courier de l'Industriel du Boi set de l'Ameublement. 2 s.

Zdešar E. 1998. Možnost zmanjšanja porabe energije pri konvektivnem sušenju lesa.  
Visokošolska diplomska naloga. Oddelek za lesarstvo. Biotehniška fakulteta.  
Ljubljana. 80 str.

## **ZAHVALA**

Zahvaljujem se prof. dr. Željku Gorišku, ker je sprejel mojo prošnjo za mentorstvo in mi nudil vso pomoč ob izdelavi diplomskega projekta, predvsem v zaključnih tednih pred zagovorov.

Zahvaljujem se tudi recenzentu doc. dr. Jožetu Kropivšku za strokovno recenzijo diplomskega projekta in ves prosti čas, ki si ga je vzel v zadnjem tednu, da mi je omogočil pristop k zagovoru.

Zahvaljujem se vsem sošolcem, ki so me kot predstavnika letnika spoštovali in mi pomagali, da je naš lesarski blog služil svojemu namenu.

Zahvaljujem pa se tudi svoji družini, ki mi je vseskozi stala ob strani in mi pomagala, da sem uspešno zaključil študij.