

**АНАЛИЗА РАЗЛИЧИТИХ МЕТОДА СУШЕЊА ДРВЕТА СА СТАНОВИШТА
КОРИШЋЕЊА ЕНЕРГИЈЕ****ANALYSIS OF DIFFERENT WOOD DRYING METHODS FROM ENERGY USAGE
POINT OF VIEW**

Вук Маровић, Дамир Ђаковић, Факултет техничких наука, Нови Сад

**Област – ЕНЕРГЕТИКА И ПРОЦЕСНА
ТЕХНИКА**

Кратак садржај – Циљ рада јесте представљање неколико различитих метода сушења дрвета и анализа њихових перформанси на примеру две врсте дрвета (букви и бору). Посебан акценат анализе је на енергетским перформансама уз урађену економску анализу. Упоредно је анализирано сушење обе врсте дрвета у конвенционалној сушари коришћењем три различите врсте горива за погон котла и у сушари са топлотном пумпом, са претходним природним сушењем и без њега. Резултати су показали да методе сушења које имају боље перформансе са енергетског аспекта не морају нужно бити профитабилније.

Кључне речи: сушење дрвета, топлотна пумпа, техно-економска анализа

Abstract – The goal of work is to present several different methods of wood drying and to analyse their performance on the example of two wood species (beech and pine). The emphasis of the analysis is energy aspect of performance, along with economy analysis also done. Comparatively is analysed drying of both wood species using: conventional kiln with 3 different fuel types, heat-pump assisted kiln, with and without natural pre-drying. The results have shown that better energy usage performance of drying does not necessary imply more profitable drying.

Keywords: Wood drying, Heat pump, Techno-economic analysis

1. УВОД

Од самог настанка човечанства, човек користи дрво и производе од дрвета. У почетку дрво је имало примену као огревно гориво и за израду оруђа и оружја. Са напретком човечанства проширивала се и област примене производа од дрвета (грађевинарство, друмска превозна средства, авијација, бродоградња, итд...). Данас се дрво најчешће користи у грађевинарству, индустрији намештаја и као огрев..

НАПОМЕНА:

Овај рад је проистекао из мастер рада чији ментор је био др Дамир Ђаковић, ред. проф.

Влага у дрвету дефинише се као влажност по сувој основи, која представља однос масе воде према маси суве материје, а представља се преко израза:

$$u = w^s = \frac{W}{G_{SM}} = \frac{W}{(W - G)} \left[\frac{kg_{vlage}}{kg_{suve\ materije}} \right] \quad (1)$$

где су:

u – влажност по сувој основи

W - маса воде у дрвету [kg]

G_{SM} - маса суве материје [kg]

G - укупна маса материјала за сушење.

2. СУШЕЊЕ ДРВЕТА

У дрвету влага може постојати као слободна влага и као везана влага. Променом садржаја слободне воде се мења укупна маса дрвета, али осим тога нема утицаја на особине дрвета [1].

Везана влага се знатно теже уклања из дрвета јер је са скелетом дрвета везана међумолекуларним силама. Из дрвета се везана влага може уклонити једино испаравањем.

**2.1. Сушење дрвета у атмосферским условима
(природно сушење)**

Као агенс код природног сушења учествује спољашњи ваздух. Када се дрво наслаже у слојаје, поставља се на такав начин да омогући струјање, спољашњег ваздуха кроз слојај, узроковано ветровима који су најчешћи на том подручју, остварујући на тај начин процес сушења. Минимални садржај воде који је, у највећем броју случајева могуће достићи природним сушењем јесте 20% до 30%, а након тога, уколико је потребан нижи садржај воде, дрво се прослеђује у сушару на вештачко сушење.



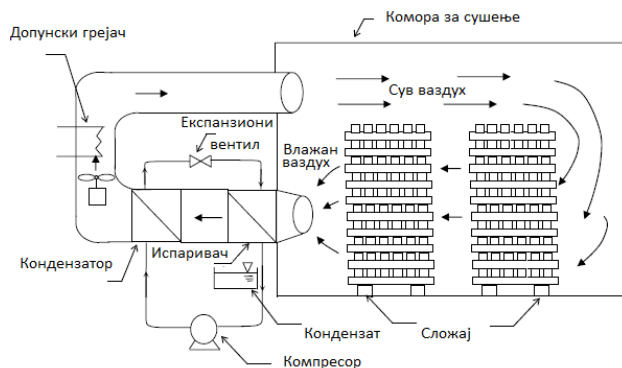
Слика 1. Сушење дрвета у атмосферским условима [2]

2.2. Сушење дрвета у контролисаним условима (вештачко сушење)

Вештачко сушење подразумева сушење у сушарама. Сушаре су затворене просторије у којима је могуће контролисати све релевантне параметре ваздуха за сушење (температуру, релативну влажност и брзину струјања) [1].

Најчешћи тип сушара у употреби су конвенционалне сушаре. У оваквој сушари око слоја и кроз слоја опструјава загрејан ваздух. Ваздух може бити загрејан непосредно (помоћу пећи, електричног грејача), или помоћу цевних грејача кроз које струји вода загрејана у котлу.

Код сушара са топлотном пумпом се, уместо грејача ваздуха путем котла или пећи користи топлотна пумпа за постизање жељених параметара ваздуха. Ваздух (агенс сушења) улази у комору за сушење у којој апсорбује влагу из дрвета. Затим ваздух велике релативне влажности напушта комору и одлази према испаривачу топлотне пумпе. Ваздух на испаривачу се охлади тако да се влага из њега кондензује и одведе као водени ток ван сушаре. На тај начин, латентна топлота коју носи влага у парној фази је искоришћена за кључање и испаравање расхладног средства. Затим улази у кондензатор топлотне пумпе где му се предаје латентна топлота одузета од влаге на испаривачу, односно ваздух се загрева. Након изласка из кондензатора, ваздух је високе температуре и ниског садржаја влаге, спреман за улазак у комору за сушење. Затим се циклус понавља [3]. На слици 2 налази се шематски приказ сушаре са топлотном пумпом.



Слика 2. Шематски приказ сушаре са топлотном пумпом [3]

Показатељ перформанси система за сушење је коефицијент под називом SMER (енг. *Specific Moisture Extraction Rate*), који представља однос одведене влаге према количини енергије уложене у процес, односно:

$$SMER = \frac{\text{Количина издвојене влаге [kg]}}{\text{Уложена енергија у процес [kWh]}} \quad (2)$$

3. ТЕХНОЕКОНОМСКА АНАЛИЗА СУШЕЊА

У раду је поређено сушења сортимената од бора и букве. За сваку врсту дрвета упоредни параметри су: дебелина сортимената (24mm и 50mm) и почетни садржај влаге – први случај, почетни садржај влаге од 64% (сирово дрво), други случај – природно осушено дрво на ваздуху, почетни садржај влаге 25% до 30%. Крајњи садржај влаге у сваком случају износи 10%.

Направљена је упоредна анализа сушења грађе са наведеним параметрима у конвенционалној сушари и то применом неколико различитих врста горива (природни гас, огревно дрво и пелет) и у сушари са топлотном пумпом.

Извршена је анализа сушења у конвенционалној сушари произвођача „Nigos” тип сушаре „VKS-60”, а као референтна сушара са топлотном пумпом је одабрана сушара тип „Nigolux-60K2” од истог произвођача .

3.2. Одређивање параметара сушења у конвенционалној сушари

Даске намењене за сушење су димензија: дужине 2 m, ширине 10 cm и дебљине 24 mm. У једну шаржу намењену за сушење стаје укупно 13 144 комада дасака и заузимају укупну запремину од 63,09 m³.

Сушење грађе се одвија у 3 главне фазе и то редоследом: фаза загревања, фаза активног сушења и на крају фаза завршне обраде (изједначавање и кондиционирање).

Користећи израз:

$$Q_z = \zeta \cdot c_d \cdot m_{vd} \cdot (t_{F1} - t_0) = 7\,625\,695 \text{ kJ} \quad (3)$$

може се обрачунати укупна топлотна енергија потребна за фазу загревања, где су:

ζ – коефицијент губитака,

c_d – специфични топлотни капацитет дрвета [kJ/kg],

m_{vd} – маса влажног дрвета [kg],

t_{F1} – температура прве етапе фазе активног сушења [°C],

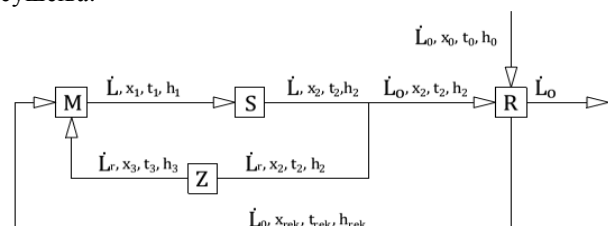
t_0 – температура околине [°C].

За одређивање параметара фазе активног сушења најпре се одређују режими сушења. Режији подразумевају параметре ваздуха као агенса сушења (температуру и релативну влажност), број етапа, и време трајања сваке етапе. Набројани параметри се одређују користећи низ таблица и дијаграма из литературе [4]. У таб.1 приказани су параметри фазе активног сушења.

Табела 1. Режији и трајање активне фазе сушења

Етапа	Разред влаге [%]	Темп. Ваздуха [°C]	Рел. влажност ваздуха [%]	Трајање етапе [h]
1	64 - 40	60	91	105
2	40 - 35	60	86	22
3	35 - 30	60	78	22
4	30 - 25	65	67	21
5	25 - 20	70	51	22
6	20 - 10	80	30	44

На слици 3 налази се шематски приказ фазе активног сушења:



Слика 3. Шематски приказ процеса сушења

Позиција „S” означава комору за сушења, позиција „R” означава рекуператор, позиција „Z” загрејач ваздуха, а позиција „M” место мешања загрејаног рециркулисаног ваздуха и свежег ваздуха предгрејаног у рекуператору. За одређивање укупно искоришћене топлоте у првој етапи користи се израз:

$$\dot{Q}_1 = \tau_1 \cdot \zeta \cdot \dot{L}_r \cdot (h_3 - h_2) [kW] \quad (4)$$

где су:

- τ_1 – трајање етапе [h]
- ζ – коефицијент губитака [-],
- \dot{L}_r – масени проток рециркулисаног ваздуха [kg/s],
- h_3 – специфична енталпија ваздуха на излазу из загрејача [kJ/kg],
- h_2 – специфична енталпија ваздуха на улазу у загрејач [kJ/kg].

Применом претходног рачуна може се одредити искоришћена топлотна енергија у свакој од етапа активног сушења.

Фазе завршне обраде: изједначавања влаге (уједначавање средње влажности свих дасака) и кондиционирања (смањење градијента влажности по пресеку даске) се одвијају без размене ваздуха са околином. Топлотни губици су обрачунати употребом литературе [5] и износе:

$$Q_{iz(kWh)} = 193 kWh \quad (5)$$

за фазу изједначавања влаге и

$$Q_{kond(kWh)} = 179,30 kWh \quad (6)$$

за фазу кондиционирања.

- η_k – степен корисности котла [-],
- E_{el} – искоришћена електрична енергија [kWh].

Маса укупно издвојене влаге из дрвета током процеса сушења се обрачунава по обрасцу:

$$W_{odv} = \left(\frac{u_{po\check{c}}}{1 + u_{po\check{c}}} \cdot \rho_v + 1 - \frac{u_{po\check{c}}}{1 + u_{po\check{c}}} \right) \cdot \rho_{sd} \cdot V_{tovara} \cdot \frac{u_{po\check{c}} - u_{kr}}{1 + u_{po\check{c}}} [kg] \quad (7)$$

где су:

- $u_{po\check{c}}$ – влажност дрвета пре сушења [-],
- u_{kr} – крајња задата влажност дрвета [-],
- ρ_v – густина воде [kg/m³],
- ρ_{sd} – густина апсолутно сувог дрвета [kg/m³],

Табела 2. SMER коефицијенти и остварене добити у периоду од 1, 2 и 5 година

Врста и дебљина дрвета, метод сушења и гориво	SMER [kg/kWh]	Остварена добит у првој години пословања [€]	Остварена добит у другој години пословања [€]	Остварена добит у петој години пословања [€]
Бук. 24 mm – конв. суш. - од	0,56	505 660	1 061 792	2 730 190
Бук. 24 mm – конв. суш. - пг	0,69	509 247	1 068 966	2 748 126
Бук. 24 mm – конв. суш. - пл	0,68	495 795	1 042 063	2 680 867

V_{tovara} – запремина грађе [m³].

SMER коефицијент се рачуна по обрасцу:

$$SMER = \frac{W_{odv}}{E_u} \left[\frac{kg}{kWh} \right] \quad (8)$$

3.3. Сушење дасака од буковог дрвета дебљине 24mm у сушари са топлотном пумпом

У питању је исти товар дрвета исте почетне и крајње задате влажности, као и исте запремине. Суши се у сушари тип „NIGOLUX – 60K2” која је сушара комбинованог типа, односно поседује и топлотну пумпу и катао. Катао је неопходан у фази загревања грађе, јер електрични грејач сушаре снаге 18 kW није довољан да у најкраће дозвољеном времену загреје грађу.

Кључна разлика у самом процесу активног сушења је што се оно обавља блажим режимима (пре свега нижом температуром) у односу на сушару са топлотном пумпом. Кључни фактор за одређивање перформанси сушења је кондензациона моћ топлотне пумпе која износи: $Q_{kondenz} = 875 \frac{\text{литара влаге}}{24 \text{ часа}}$ (податак добијен лично из компаније Нигос – произвођача сушаре, односи се и на остале наведене параметре опреме: снагу компресора, цену опреме итд.). Када се укупно одведена количина влаге подели са кондензационом моћи, добија се време активног сушења које у овом случају износи: 19,25 дана. За то време раде компресор топлотне пумпе снаге 10 kW и вентилатор снаге 15 kW.

3.4. Упоредно представљање резултата анализе сушења грађе

У наредне две табеле биће приказани упоредни резултати појединачних перформанси сушења грађе на различите начине. У табелама су коришћене следеће скраћенице: Бук. се односи на дрво букве, конв. суш. се односи на конвенционалну сушару, од се односи на огревно дрво, пг се односи на природни гас, пл се односи на пелет, с.т.п. се односи на сушару са топлотном пумпом, а скраћеница ПО на крају означава да је товар претходно природно осушен.

У табели 2 су упоредни прикази SMER коефицијента и остварене добити у периоду од 1,2 и 5 година, у зависности од наведених фактора..

Наставак табеле 2. SMER коефицијенти и остварене добити у периоду од 1, 2 и 5 година

Бук. 24 mm – с.т.п	1,12	276 128	616 356	1 637 039
Бук. 24 mm – конв. суш. – од - ПО	0,51	- 447037	1 379 029	4 381 346
Бук. 24 mm – конв. суш. – пг - ПО	0,63	- 446 514	1 384 997	4 396 265
Бук. 24 mm – конв. суш. – пл - ПО	0,63	- 448 476	1 362 618	4 340 318
Бук. 24 mm – с.т.п. –ПО	0,90	- 315 710	806 355	2 653 965
Бук. 50 mm – конв. суш. – од	0,45	178 059	406 230	1 090 743
Бук. 50 mm – конв. суш. – пг	0,53	179 567	409 247	1 098 284
Бук. 50 mm – конв. суш. – пл	0,53	173 912	397 935	1 070 006
Бук. 50 mm – с.т.п	1,09	245 780	555 660	1 485 299
Бук. 50 mm – конв. суш. – од - ПО	0,43	- 247 887	649 099	2 123 873
Бук. 50 mm – конв. суш. – пг - ПО	0,50	- 247 630	652 032	2 131 205
Бук. 50 mm – конв. суш. – пл - ПО	0,50	-248 594	641 034	2 103 711
Бук. 50 mm – с.т.п. - ПО	0,84	-306 057	739 283	2 437 573
Бор 24 mm – конв. суш. - од	0,63	1 545 744	3 141 960	7 930 610
Бор 24 mm – конв. суш. - пг	0,80	1 550 711	3 151 895	7 955 447
Бор 24 mm – конв. суш. - пл	0,79	1 524 833	3 100 139	7 826 057
Бор 24 mm – с.т.п	1,12	437 629	939 358	2 444 544
Бор 24 mm – конв. суш. – од - ПО	0,66	1 070 749	4 526 534	11 831 717
Бор 24 mm – конв. суш. – пг - ПО	0,83	1 072 410	4 532 253	11 846 012
Бор 24 mm – конв. суш. – пл - ПО	0,82	1 063 759	4 502 464	11 771 540
Бор 24 mm – с.т.п. –ПО	0,90	377 786	1 758 476	4 665 889
Бор 50 mm – конв. суш. – од	0,58	808 290	1 666 693	4 241 900
Бор 50 mm – конв. суш. – пг	0,71	810 981	1 672 074	4 255 354
Бор 50 mm – конв. суш. – пл	0,71	796 964	1 644 039	4 185 266
Бор 50 mm – с.т.п	1,07	407 807	879 715	2 295 437
Бор 50 mm – конв. суш. – од - ПО	0,61	682 744	2 971 436	7 790 891
Бор 50 mm – конв. суш. – пг - ПО	0,74	683 835	2 975 228	7 800 372
Бор 50 mm – конв. суш. – пл - ПО	0,74	678 152	2 955 472	7 750 982
Бор 50 mm – с.т.п - ПО	0,84	328 285	1 573 699	4 191 219

4. ЗАКЉУЧАК

Може се закључити да врста дрвета мало утиче на „SMER” коефицијент, да је код сушара са топлотном пумпом најповољнији, а да претходно природно сушење негативно утиче на „SMER” коефицијент.

Остварена добит у првој години пословања је негативна у случају претходно природно осушене букве. Са друге стране, претходно природно сушење је профитабилније у периоду од 5 година и дуже у односу на сушење исте грађе без претходног природног сушења. Грађа мање дебљине је профитабилнија за сушење из разлога што је краће време сушења. Бор је профитабилнији за сушење у односу на букву из истог разлога.

5. ЛИТЕРАТУРА

- [1] Томић Б. Сушење дрвета. Београд: Завод за уџбенике и наставна средства, 1981.
- [2] <https://extension.unh.edu/resource/design-considerations-lumber-pile-covers-air-dry-yards> (приступ остварен 01. 06. 2022.)
- [3] Мијумдар А.С. Handbook of Industrial Drying. CRC 2006.
- [4] Колин Б. Хидротермичка обрада дрвета. Београд: Југославијапублик, 2000.
- [5] Рекнагел Х., Шпренгер, Шрамек, Чеперковић З. Грејање и климатизација Врњачка Бања: Интерклима – графика, 2004.

Кратка биографија:



Вук Маровић рођен је у Новом Саду 1987. Мастер рад на Факултету техничких наука из области енергетика и процесна техника – техника сушења одбранио је 2022.

Контакт: vuk.marovic@gmail.com



Дамир Ђаковић рођен је у С. Митровици 1975. Од 2001. запослен на ФТН-у, од 2022. у звању редовног професора. Заинтересован за могућности практичне примене феномена преноса при сушењу, али и у другим областима енергетике и процесне технике, као и проблеме конструисања процесне опреме.