

UDK: 674.047.3

Оригинални научни рад

<https://doi.org/10.2298/GSF2124045M>

## СУШЕЊЕ ХРАСТОВИХ ЛАМЕЛА: ДЕО 1. АНАЛИЗА ПРОЦЕСА У КОНДЕНЗАЦИОНОЈ СУШАРИ<sup>1</sup>

Др Горан Милић, редовни професор, Универзитет у Београду, Шумарски факултет (goran.milic@sfb.bg.ac.rs)

Др Небојша Тодоровић, ванредни професор, Универзитет у Београду, Шумарски факултет

Маст. инж. Марко Веизовић, асистент, Универзитет у Београду, Шумарски факултет

Др Ранко Попадић, ванредни професор, Универзитет у Београду, Шумарски факултет

**Извод:** У раду је анализирана могућност сушења храстових ламела – танког слоја масивног дрвета у вишеслојном поду. Фокус првог дела рада је на кондензационим сушарама које су за сушење храстових ламела алтернатива конвенционалним сушарама. Праћена су два циклуса сушења у индустријској сушари и параметри сушења поређени са архивом циклуса сушења ламела у конвенционалној сушари. Истовремено, сушење ламела је спроведено у клима комори где је примењена виша почетна температура. Показано је да се храстове ламеле дебљине 5 mm могу успешно сушити у кондензационим сушарама, уз релативно кратко време сушења и висок квалитет. Са примењеним режимом (почетна температура 36°C, коначна 46°C) очекивано је да циклус сушења траје од 2 до 5 дана, у зависности од количине ламела и почетне влажности. Због велике брзине испаравања воде и немогућности сушаре да је одстрани довољно брзо, сушење ламела се и у кондензационим и у конвенционалним сушарама одвија при равнотежној влажности која је виша од задатих вредности.

**Кључне речи:** храстова ламела, вишеслојни подови од дрвета, сушење, кондензациона сушара

## УВОД

Сушење резане грађе храста, једне од најзначајнијих, а свакако најскупље европске врсте дрвета, је комплексан задатак. Храстова грађа је склона настанку грешака сушења (првенствено пукотина), а сам процес веома дуго траје. Осим за израду намештаја као најважнијег типа производа од храстовине, ова врста је неприкосновена и на тржишту подова од дрвета – више од 80% подова од дрвета у Европи је израђено од храста (FEP 2021).

<sup>1</sup> Део овог рада је презентован на 5. конференцији „Wood Technology & Product Design“, Охрид, Северна Македонија.

Трајност ове врсте, одлична механичка својства и карактеристичан изглед су разлози због којих је храстовина толико тражена. Ова потражња, као и недовољне количине сировине, су довели до сталног раста цена храстових трупца и резане грађе. Првенствено због тога у последњих двадесет година учешће на тржишту повећавају вишеслојни подови, тако да су 2013. представљали 50% укупне продаје подова од дрвета (Infographic Journal, 2013), а 2020. на подручју Европе чак 82% (FEP 2021). Ради се о двослојним или трослојним подовима где је по правилу само (релативно танак) горњи слој пода

израђен од масивног дрвета (најчешће храст, али се користе и јасен, орах, тропске врсте). Уобичајено се за овај слој користи термин ламела и према стандарду SRPS EN 13756 њена минимална дебљина је 2,5 mm. Поред ефикаснијег коришћења сировине, ови подови су и димензионо стабилнији (захваљујући укрштању слојева) у поређењу са класичним подовима од масивног дрвета.

При производњи храстових ламела највећи појединачни трошак је сама сировина – више од 80% укупних трошкова (Orłowski i Walichnowski 2013), што повећава значај избегавања шкарта. Ламеле се у дрвеној индустрији могу израђивати у виду сеченог фурнира тј. фурнирским ножем (што доноси проблеме у виду микропукотина, па је употреба оваквих ламела врло ограничена (Grubić i Johansson 2018) или прерадом резане грађе. Из резане грађе ламеле се израђују на два начина: разрезавањем суве резане грађе (обично се разрезаје грађа дебљине 25 mm) или разрезавањем сирове резане грађе, после чега следи процес вештачког сушења. Овај други начин обезбеђује велику уштеду у времену, јер је сушење ламела храста краће и више од 10 пута у поређењу са сушењем резане грађе 25-30 mm дебљине.

Проблеми који се јављају у индустријској пракси сушења ламела се односе на појаву дисколорација, деформација и неједнаке коначне влажности (Milić *et al.* 2021). На подручју југоисточне Европе се ламеле суше у конвенционалним, а у последње време све више и у кондензационим сушарама. Предност кондензационих сушара је у томе што могу да раде без котла, при чему нема размене ваздуха са спољашњом средином, тј. смањен је ризик од појаве дисколорација. Ове сушаре данас могу постизати температуре до 60°C што је више него довољно за сушење ламела. При томе је потребно око 0,3 kWh електричне енергије за испаравање 1 килограма воде, што их чини економичнијим од конвенционалних сушара (Milić 2019).

Циљ овог дела рада је да се анализира процес сушења ламела храста у индустријској кондензационој сушари и упоређи са конвенционалним сушењем. Практични резултати ће

бити упоређени и са резултатима сушења у лабораторијској клима комори.

## МАТЕРИЈАЛ И МЕТОД

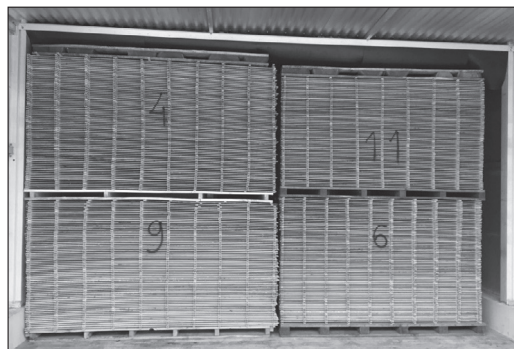
Истраживање је спроведено на храстовим ламелама дебљине 5 mm (ширина 100-170 mm, дужина 700-2100 mm). Ламеле су изрезане на хоризонталној трачној тестери из сирове резане грађе дебљине 29 mm. Из сваке даске је добијено по 5 ламела.

Ламеле су по изрезавању слагане на пластичне летвице Н профила (слика 1) како би се смањило ризик од појаве дисколорација. У кондензационој сушари (максималан капацитет око 1600 m<sup>2</sup> сирових ламела) је слагано 2 реда слоја по дубини сушаре (могуће је три реда), и 2 слоја по висини (слика 2).

Сушење је спроведено по режиму који је препоручен од произвођача сушаре (табела 1). Овај режим узима у обзир ограничења кондензационе сушаре у погледу висине почетне температуре (како би се омогућио рад кондензаци-



Слика 1. Слагање храстових ламела на пластичне летвице (Н профила)



Слика 2. Слојаји ламела у кондензационој сушари

**Табела 1.** Режим сушења храстове ламеле – кондензациона сушара

<b>u (%)</b>	>60	50	40	30	27	24	21	18	15	12	9	6
<b>T (°C)</b>	35	36	36	36	36	37	38	40	42	44	46	46
<b>u<sub>r</sub> (%)</b>	20	19	17.5	15.5	14.2	12.8	11.2	10.0	8.5	6.5	4.5	3.8
<b>Brzina ventil. (%)</b>	94	94	94	94	94	92	90	88	86	84	84	84

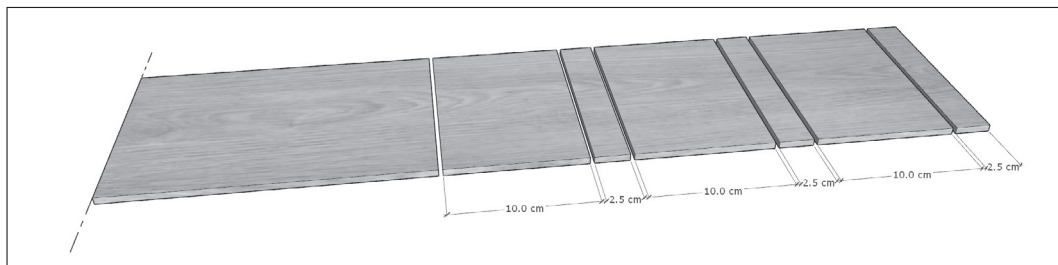
оног агрегата). Иако је фаза кондиционирања врло корисна при сушењу резане грађе (Milić i Kolin 2008, Salin 2001), извршени су прелиминарни експерименти како би се утврдило да ли ова фаза има утицај на коначни квалитет храстових ламела. У ту сврху, у прелиминарном истраживању су поређене коначне влажности ламела између шарже са фазом кондиционирања (у трајању од 3 часа) и шарже без ове фазе. Утврђено је да не постоји статистички значајна разлика у коначној влажности, нити је квалитет сушења бољи. Због наведеног, у овом истраживању на крају процеса нису спровођење фазе изједначавања и кондиционирања.

Режим је заснован на праћењу влажности ламела што је омогућено кроз мерења 4 сонде у сушари. Праћена су два циклуса сушења, а циљана коначна влажност ламела је износила 7%. Почетна и коначна влажност ламела су одређене гравиметријским методом (слика 3) и то на по 8 ламела. Четири ламеле су изабране из реда ламела које су изрезане из површинског слоја резане грађе, а четири из слоја до тог. Достицање жељених параметара током овог режима у кондензационој сушари је поређено са архивама процеса сушења ламела у конвенционалној сушари. Поређење је вршено само у смислу достигања задатих параметара и анализе режима.

Поред испитивања у индустријској кондензационој сушари, спроведена су и три циклуса сушења у програмибилној клима комори. Циљ ових тестова је био испитати утицај виших примењених температура на квалитет сушења. У првом тесту примењена је константна температура 45°C (табела 2), док је равнотежна влажност фазно снижавана са 19% на 8%. Укупно време сушења је износило 60 часова. Сушено је 15 ламела распоређених у 7 редова. Почетна и коначна влажност ламела су одређивани гравиметријским методом и резултати поређени са резултатима добијеним у индустрији. После првог, спроведена су још два циклуса сушења (са још вишим температурама), а сви детаљи и резултати ових циклуса дати су у другом делу рада (Део 2).

**Табела 2.** Режим сушења храстове ламеле – клима комора

<b>Фаза</b>	<b>I</b>	<b>II</b>	<b>III</b>
<b>Време (h)</b>	12	24	24
<b>T (°C)</b>	45	45	45
<b>u<sub>r</sub> (%)</b>	19	13	8

**Слика 3.** Шема изрезивања ламела за гравиметријско одређивање влажности

## РЕЗУЛТАТИ И ДИСКУСИЈА

Почетна влажност ламела за сушење у индустријској кондензационој сушари је износила између 44% и 60%. Због нетачности мерења влажности сировог дрвета сонде у сушари су показивале ниже вредности (31-49%, просечно 39%). Варијација почетне влажности је очекивана из неколико разлога. Прво, постоји варијација влажности између дасака из којих се израђују ламеле (различити трупци, положај у трупу). Потом, очекивана је и разлика у влажности између ламела изрезаних из исте даске, због присутног градијента влажности по дебљини грађе. Коначно, нарочито током летњег периода, различит временски период који протекне од прорезивања трупаца до израде ламела је значајан узрок варијације почетне влажности. Летњи период у ком је истраживање рађено је узрок релативно ниске просечне почетне влажности ламела.

Просечна коначна влажност ламела је износила 6,8% уз релативно мала одступања појединачних вредности (стандардна варијација 0,41%).

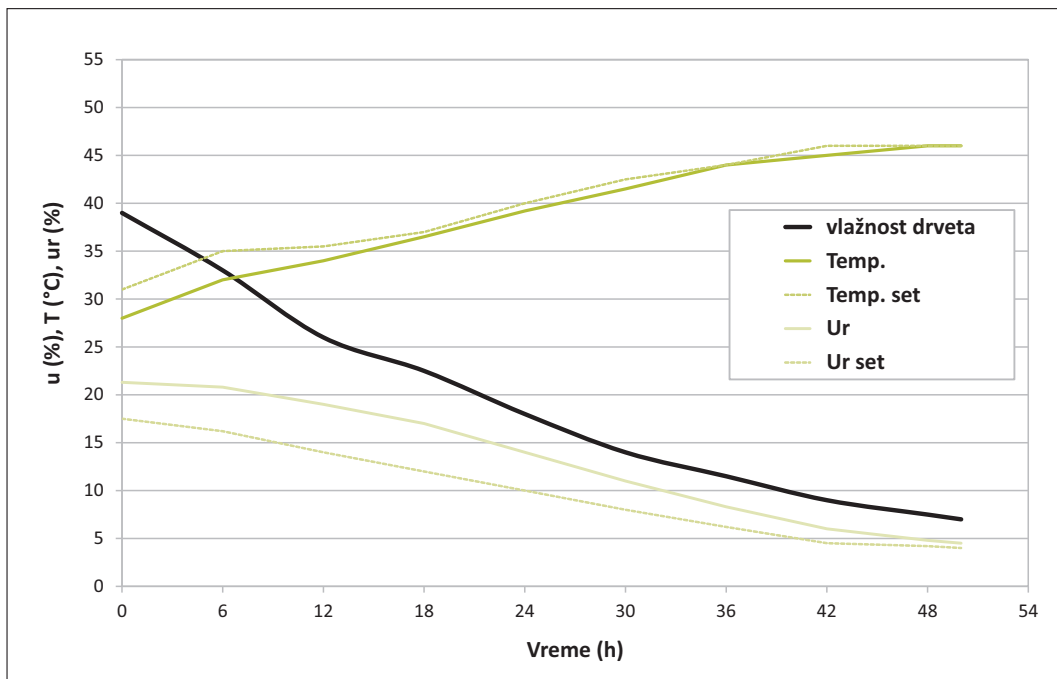
Просечно време сушења у кондензационој сушари је износило 50 часова. Ово је вероватно и најкраће могуће време сушења, достигну једино у случају релативно мале количине ламела у сушари. Овде је то и био случај, јер су пуњена само два реда слојаја по дубини коморе, а бочни размак између ламела у слојају је био релативно велики (слика 1).

### Анализа процеса у кондензационој и конвенционалној сушари

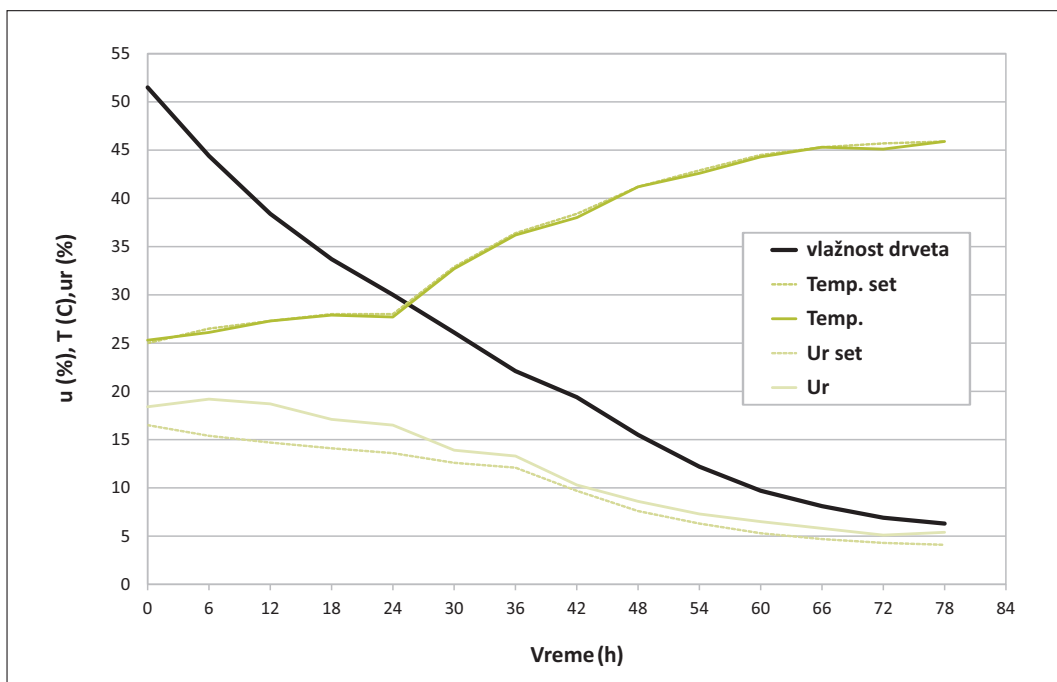
На слици 4 је приказан један циклус кондензационог сушења, а на слици 5 циклус конвенционалног сушења ламела. Са слике 4 се види да температура при кондензационом сушењу не достиже задате вредности (нарочито на почетку процеса). У каснијим фазама сушења су разлике између задате и измерене температуре мале. Разлог одступања је што кондензациона сушара није користила топлотну енергију из котла, већ је сва топлотна енергија добијана радом кондензационог агрегата, а то у неким

фазама није било довољно. Очекивано, при сушењу у конвенционалној сушари нема проблема у достизању температуре (слика 5) с тим што је важно нагласити да су на почетку процеса температуре знатно ниже него у кондензационој сушари. При конвенционалном сушењу почетна температура је свега 25°C и тек када влажност ламела падне испод 30% примењују се температуре изнад 30°C. Ниже температуре за сушење ламела у конвенционалним сушарама су уобичајене, са циљем смањивања ризика од потенцијалних дисколорација и других грешака. У овом случају је процес сушења у конвенционалној сушари трајао 78 часова, а дуже време је резултат више почетне влажности ламела (изнад 50% мерено електровлагомерима у сушари), нижих температура у првом делу процеса и веће количине ламела у самој сушари.

За разлику од температура, равнотежне влажности показују сличан тренд – у оба типа сушара је равнотежна влажност изнад задатих вредности. На почетку процеса је разлика израженија (код кондензационе максимално 5% изнад задате вредности, а код конвенционалне 4%), а с временом се постепено смањује. Јасно је да је – без обзира на тип сушаре – основни проблем уклањање велике количине водене паре која се јавља на почетку процеса. Наиме, с обзиром да се ради о танком материјалу (обично до 6 mm), укупна површина дрвета са које вода испарава је вишеструко већа него при сушењу резане грађе. Истовремено, доминантна компонента процеса сушења је управо испаравање воде са површине дрвета, док је значај дифузије далеко мањи него при сушењу резане грађе. У случају конвенционалне сушаре размена ваздуха са спољашњом средином није довољно ефикасна да би снизила релативну влажност ваздуха у сушари, док у случају кондензационе сушаре није довољно ефикасан кондензациони агрегат. Евентуалне више температуре у режиму конвенционалних сушара би омогућиле да равнотежна влажност у сушари буде ближа задатој вредности, јер топлији ваздух може да прими већу количину водене паре (нпр. ваздух температуре 25°C може да садржи максимално 23 g водене паре по m<sup>3</sup>, док је при 36°C та вредност 39,6 g/m<sup>3</sup>). Међутим, више



Слика 4. Влажност дрвета, температура и равнотежна влажност током кондензационог сушења



Слика 5. Влажност дрвета, температура и равнотежна влажност током конвенционалног сушења

температуре би значиле и брже испаравање воде и већи ризик од појаве грешака сушења.

Тренд снижавања влажности ламела у оба типа сушара директно зависи од снижавања равнотежне влажности. С обзиром да је равнотежна влажност на крају процеса и даље виша од задате вредности (дакле минимално могућа), реална могућност је сушити ламеле и без мерења влажности самих ламела, тј. само на основу вредности равнотежне влажности. Ово би додатно поједноставило процес, па и потребну опрему сушаре.

### Потенцијалне грешке сушења

Квалитет сушења након циклуса кондензационог сушења је био врло висок. Због недостатка оптерећења, у горњим редовима сложаја долази до појаве коритавости (слика 6),



Слика 6. Коритавост ламеле из последњег реда сложаја



Слика 7. Чеоне пукотине на храстовој ламели

али значајно мање него што су регистровани Baranski *et al.* (2020) при сушењу неоптерећених храстових ламела у лабораторијским условима.

На малом броју ламела уочена је појава чеоних пукотина (слика 7). Углавном су оне последица иницијалних пукотина које су на ламелама биле присутне пре вештачког сушења. Grubiћ i Johansson (2018) наводе да су управо чеоне пукотине најчешћи разлог (23%) одбацивања ламела у даљој производњи. Поред чеоних, нису уочене никакве неприхватљиве пукотине (подела на прихватљиве и неприхватљиве пукотине према Pahlberg *et al.* 2018).

Уочене су и варијације дебљине ламела, као и варирање дебљине по ширини ламеле, што су грешке које утичу на појаву деформација и генерално смањују искоришћење сировине. Ипак, с обзиром да ове грешке нису резултат вештачког сушења, овде нису анализиране.

### Сушење у клима комори

Сушење у клима комори се одвија без размене ваздуха са спољашњом средином, па је по томе слично кондензационом сушењу. Просечна почетна влажност у испитиваној шаржи износила је 47,2% (стандардна девијација 1,8%), а након сушења од 60 часова (у завршној фази је равнотежна влажност износила 8%) влажност ламела је била 9,3% (ст. дев. 0,2%). Иако је почетна температура била релативно висока (45°C), након сушења нису уочене никакве пукотине. Ово показује да је, због мале дебљине материјала, ризик од појаве напрезања и пукотина вишеструко мањи него при сушењу резане грађе када је температура важан утицајни фактор (Oltean *et al.* 2007). Истовремено, очекивано је да би евентуалне више температуре у каснијим фазама сушења (нарочито испод 12% влажности ламела) убрзале процес (Stražе *et al.* 2020). Са аспекта деформација, забележена је блага коритавост што је последица неоптерећености ламела. Визелна контрола је указала да нема значајне разлике у боји ламела пре и после сушења, као ни у пољењу са ламелама сушеним у индустријској кондензационој сушари (детаљна анализа боје

је урађена у наредна два циклуса сушења и приказана у другом делу рада). Све наведено указује на могућност примене виших почетних температура у односу на тренутно коришћене у индустрији што је сагласно са резултатима других аутора (Skuratov *et al.* 2020).

## ЗАКЉУЧЦИ

У раду је анализирана могућност сушења храстових ламела у кондензационим сушарама и процес је упоређен са конвенционалним сушењем. Једна од основних предности ових сушара – поред боље енергетске ефикасности и могућности рада без котла – је и одсуство увођења свежег ваздуха у комору што је пожељно са аспекта боје дрвета.

Показано је да се, при примени режима препорученог од стране произвођача сушаре, храстова ламела дебљине 5 mm може осушити за 2 до 5 дана (у зависности од количине ламела у сушари и почетне влажности). За разлику од конвенционалне сушаре, током кондензационог процеса се углавном није достигала жељена температура (нарочито на почетку процеса), што је последица рада без екстерне топлотне енергије. У оба типа сушара је равнотежна влажност све време сушења била изнад задате вредности. Ово не утиче значајно на продужетак процеса сушења, а смањује могућност настанка грешака сушења. С обзиром да не постоји опасност да равнотежна влажност у сушари буде нижа од задате вредности, отворена је могућност сушења ламела само на основу вредности равнотежне влажности.

Први циклус сушења у клима комори је показао да се могу примењивати и више почетне температуре (минимално 45°C). Ипак, потребна је пажљива анализа повећања трошкова сушења (додатна енергија из котла) у случају примене виших температура.

**Напомена:** Рад је реализован у оквиру пројеката бр. 451-02-68/2020/14/2000169 (Министарство просвете, науке и технолошког развоја Републике Србије) и бр. 442-01 (Фонд за иновациону делатност).

## DRYING OF OAK WOOD LAMELLAS: PART 1. ANALYSIS OF THE PROCESS IN A DEHUMIDIFICATION KILN<sup>1</sup>

Goran Milić, full professor, University of Belgrade, Faculty of Forestry (goran.milic@sfb.bg.ac.rs)

Nebojša Todorović, associate professor, University of Belgrade, Faculty of Forestry

Marko Veizović, teaching assistant, University of Belgrade, Faculty of Forestry

Ranko Popadić, associate professor, University of Belgrade, Faculty of Forestry

**Abstract:** The subject of this paper is to analyse the drying process of oak lamellas, which are the solid wood top layer of engineered wood flooring. The focus of the first part of the paper is on dehumidification kilns. Drying in a dehumidification kiln is an interesting alternative to conventional drying of thin solid oak wood with the aim of reaching high drying quality in a reasonable time. Drying tests were done in an industrial dehumidification kiln, and drying parameters were compared with the drying in the conventional kiln. Simultaneously, a drying test at a higher temperature was done in the programmable climate chamber. It was demonstrated that thin oak lamellas (approx. 5 mm thick) could be successfully dried in a dehumidification kiln in a relatively short time and with high drying quality. With the applied drying schedule (initial temperature of 36 °C, final temperature of 46 °C), the drying cycle will last 2 to 5 days, depending on the amount of wood and the initial MC. Due to the high rate of water evaporation and the inability of the kilns to remove it fast enough, the drying of lamellas in both dehumidification and conventional kilns takes place at a higher equilibrium moisture content than the set values.

**Keywords:** oak lamella, engineered wood flooring, drying, dehumidification kiln

## INTRODUCTION

Drying of oak timber, one of the most important and certainly the most expensive European wood species, is a complex task. Oak timber is prone to drying defects (primarily cracks) and has a low drying rate. Apart from furniture, as the most important oak wood product, this species is the dominant choice in the wood flooring market. More than 80% of wooden floors in Europe are made of oak (FEP 2021). High durability, excellent mechanical properties, and appearance are the reasons for this high demand for oak wood. However, due to the high demand and scarcity of raw materials, the price of oak logs and timber has been steadily rising. Due to that, the market share of engineered (multilayer) floors has increased in the last two decades. In 2013, they represented 50% of total sales of wood floors (Infographic

Journal, 2013), and in 2020 in Europe, as much as 82% (FEP 2021). These are two-layer or three-layer floors where only the (relatively thin) top layer of the floor is made of solid wood (usually oak, but ash, walnut, and tropical species are also used). The term “lamella” is usually used for this layer, and according to the standard SRPS EN 13756, its minimum thickness is 2.5 mm. In addition to the more efficient use of raw materials, these floors have better dimensional stability (thanks to the crossing of layers) compared to solid wood floors.

The cost of raw wood is the highest single cost of lamella production – more than 80% of the total cost (Orłowski and Walichnowski 2013), which increases the importance of avoiding defects in wood. Lamellas in the wood industry can be made in the form of sliced veneer (due to problems with microcracks. The use of such lamellas is limited (Grubić and Johansson 2018)), or if made from sawn timber, two options are possible: sawn from dry timber (usually 25 mm thick timber) or green timber, followed by kiln drying. The second option provides huge savings in drying

<sup>1</sup> A part of this paper was presented and published in the conference proceedings of the 5<sup>th</sup> International Scientific Conference “Wood Technology & Product Design”, Ohrid, the Republic of North Macedonia.



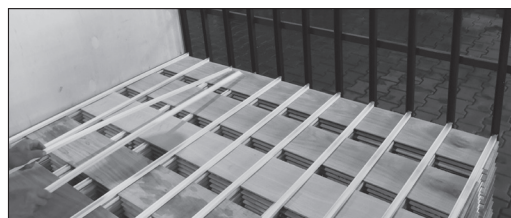
time because the drying of thin oak material is 10 times (and more) shorter as compared to the drying of 25-30 mm thick boards.

Problems occurring in the industrial practice of drying lamellas are related to the appearance of discolourations, deformations, and unequal final moisture content (Milić *et al.* 2021). In the area of Southeast Europe, lamellas are dried in conventional and, lately, more and more in dehumidification kilns. The advantage of dehumidification kilns is that they can work without a boiler while no air exchange with the outside environment is present, i.e., the risk of discolouration is reduced. Nowadays, dehumidification kilns are capable of reaching temperatures of up to 60 °C, which is more than needed for oak lamella drying. About 0.3 kWh of electrical energy is needed to remove a kilogram of water, making them overall more economical than conventional kilns (Milić 2019).

The objective of this part of the study was to analyse the drying process of oak lamellas in an industrial dehumidification kiln and compare it with conventional drying. Results from the industry will also be compared with the results of drying in a laboratory climate chamber.

## MATERIAL AND METHODS

The research was performed on 5 mm thick oak wood lamellas (width 100–170 mm, length 700–2100 mm). The lamellas were produced on a 29 mm thick horizontal band saw from raw timber. Five lamellas were obtained from each board. They were stacked on plastic H-shaped stickers (Fig. 1) to reduce the risk of discolouration. Two rows of stacks (three rows possible) were placed along the depth of the dehumidification kiln (max. capacity of about 1600 m<sup>2</sup> of raw lamellas) and 2 stacks in height (Fig. 2).



**Figure 1.** Stacking of oak lamellas on H-shaped stickers



**Figure 2.** Stacked lamellas in the dehumidification kiln

The drying schedule recommended by the kiln manufacturer was used (Table 1). It takes into account the limitations of the dehumidification kiln in terms of the minimum initial temperature (to enable the operation of the heat pump system). Although very useful in drying sawn timber (Milić and Kolin 2008, Salin 2001), preliminary experiments have been conducted to determine whether the conditioning phase has an impact on the drying quality of oak lamellas. In a preliminary study, the final moisture content (MC) of the lamellas was compared between the batch with the conditioning phase (lasting 3 hours) and the batch without this phase. No statistically significant difference was found, and the drying quality was similar. That is why no equalization and con-

**Table 1.** Drying schedule (oak lamella) – dehumidification kiln

<b>MC (%)</b>	>60	50	40	30	27	24	21	18	15	12	9	6
<b>T (°C)</b>	35	36	36	36	36	37	38	40	42	44	46	46
<b>EMC (%)</b>	20	19	17.5	15.5	14.2	12.8	11.2	10.0	8.5	6.5	4.5	3.8
<b>Fan speed (%)</b>	94	94	94	94	94	92	90	88	86	84	84	84

ditioning phases were performed at the end of drying.

The drying schedule is MC-based, and the MC was measured by 4 electric probes in the kiln. Two drying cycles were monitored, and the final MC was 7%. The initial and final MCs were determined on 8 lamellas by the oven-dry method (Fig. 3). These lamellas were selected from the group of lamellas cut from the surface layer of sawn timber (4 lamellas) and the layer next to it (4 lamellas). Achieving the set air parameters in the dehumidification kiln was compared with the lamella drying process in a conventional kiln. The comparison was performed only in terms of reaching the set parameters and the drying schedule analysis.

The drying tests were also done in a programmable climate chamber. The aim of these tests was to examine the influence of higher temperatures on drying quality. In the first test, a constant temperature of 45°C was used (Table 2), and the EMC was reduced gradually from 19% to 8%. The total drying time was 60 hours, and 15 lamellas (arranged in 7 rows) were dried. The initial and final MCs were determined by the oven-dry method, and the results were compared with the results obtained in the industry. After the first, two more drying cycles were carried out (with even higher temperatures), and all the details and results of these cycles are given in the second part of the paper (Part 2).

## RESULTS AND DISCUSSION

The initial MC of lamellas at the beginning of dehumidification drying was between 44% and 60%. As expected, the electric probes in the kiln

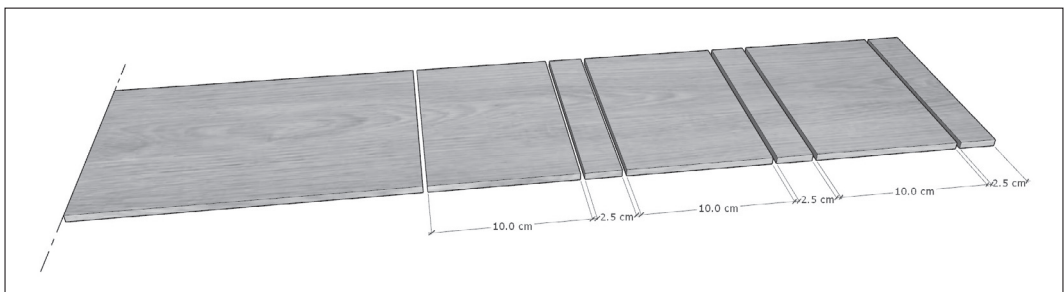
**Table 2.** Drying schedule (oak lamella) – climate chamber

Phase	I	II	III
Time (h)	12	24	24
T (°C)	45	45	45
EMC (%)	19	13	8

showed lower values (31-49%, average 39%). Variation in the initial MC is expected for several reasons. First, there is an MC variation between the boards from which the lamellas are made (different logs, different positions in the log). Then, the difference in the MC between the lamellas cut from the very same board is also expected due to the MC gradient across the thickness. Finally, especially during the summer, the different time that elapses from log sawing to lamella production is a significant cause of variation of the initial MC. This research was conducted during the summer, which is the cause of the relatively low average MC.

The average final MC of lamellas was 6.8%, with relatively small deviations of individual values (stand. dev. 0.41%).

The average drying time in the dehumidification kiln was 50 hours. That is probably the shortest possible drying time, achievable only in the case of a relatively small number of lamellas in the kiln (which was the case here). Moreover, the lateral distance between the lamellas in the stacks was relatively large (Fig. 1), which also reduced the total number of lamellas.



**Figure 3.** Lamella cutting scheme for MC determination by the oven-dry method

### Analysis of the process in the dehumidification and conventional kiln

Fig. 4 illustrates a cycle of dehumidification drying of lamellas, while the cycle of conventional drying is depicted in Fig. 5. It can be seen (Fig. 4) that the temperature during the dehumidification drying does not reach the set values (especially at the beginning of the process). In the later stages of drying, the difference between the set and the measured temperature is small. The reason for the deviation is that the dehumidification kiln did not use the thermal energy from the boiler (all energy was obtained from the heat pump system, and that was not enough in some phases). As expected, when drying in a conventional kiln, there are no problems in reaching the temperature (Fig. 5), but it is important to emphasize that at the beginning of the process, the temperatures are significantly lower than in the dehumidification kiln. In conventional drying, the initial temperature is only 25°C, and it rises above 30°C after the MC of lamellas falls below 30%. Low temperatures in industrial conventional kilns are common, intending

to reduce the risk of potential discolouration and other drying defects.

Unlike temperature, the EMC showed a similar trend in both types of kilns – the EMC is above the set values. At the beginning of the process, the difference is more pronounced (in the dehumidification kiln, a maximum of 5% above the set value, and in the conventional kiln 4%), and it gradually decreases over time. It is clear that, regardless of the kiln type, the basic problem is the removal of a large amount of water vapour that occurs at the beginning of the drying. During the drying of thin wood material (usually up to 6 mm), the total area of wood from which water evaporates is many times larger compared to the drying of sawn timber. At the same time, the dominant component of the lamella drying process is the evaporation of water from the wood surface, while the diffusion is insignificant (again, when compared to the drying of sawn timber). In the case of conventional drying, the exchange of air with the outside environment is inadequate to reduce the EMC in the kiln, while in the case of a dehumidification kiln, the heat pump system is not efficient enough.

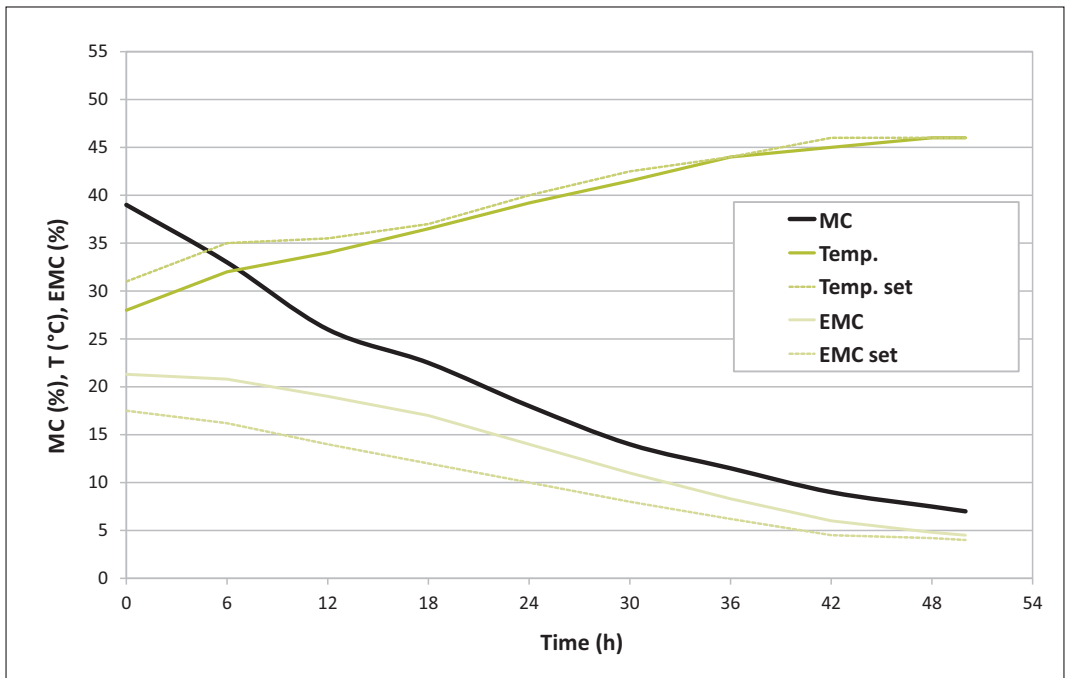


Figure 4. Drying curve, temperature and the EMC during dehumidification drying

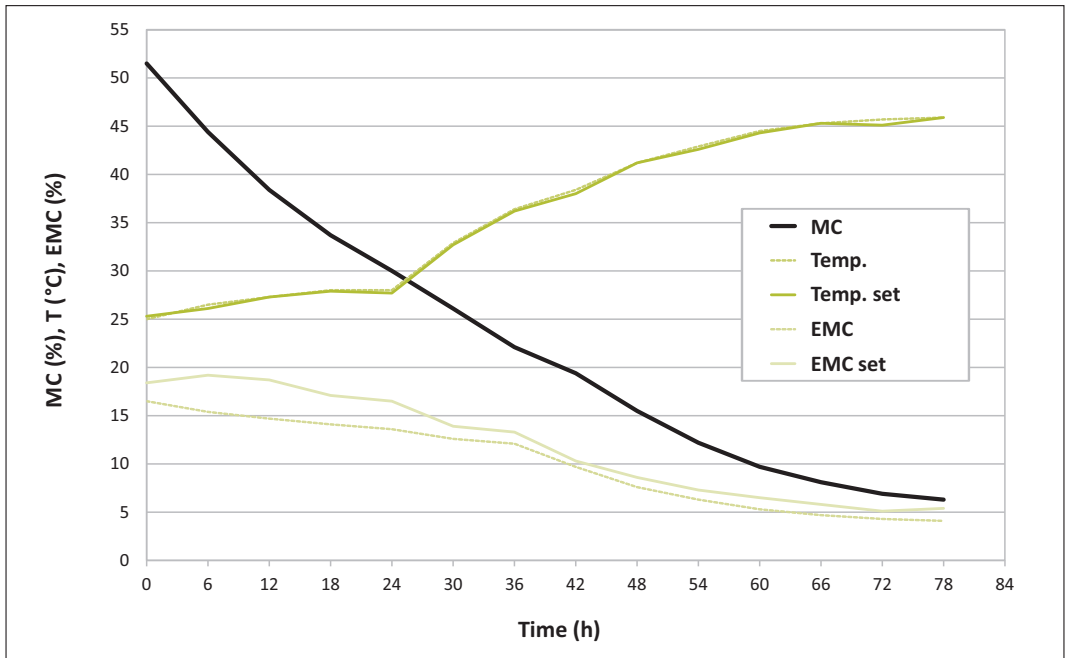


Figure 5. Drying curve, temperature and the EMC during conventional drying

Higher temperatures in the conventional drying schedule would make it possible to have the EMC in the kiln closer to the set value because warmer air can hold a larger amount of water vapour (e.g., moist air at 25°C can hold max. 23 g of water vapour per m<sup>3</sup>, while at 36°C this value is 39.6 g/m<sup>3</sup>). However, higher temperatures would also mean faster evaporation of water and a somewhat higher risk of drying defects.

The trend of decreasing the MC of lamellas in both kiln types depends directly on the EMC decrease. Since the EMC at the end of the process is still higher than the set value (although the minimum possible), there is a possibility of drying lamellas without MC measurement, i.e., only based on the EMC values. That would further simplify the process, as well as the necessary equipment in the kiln.

### Potential drying defects

The drying quality after the dehumidification drying cycle was high. Due to the lack of load, cupping occurred in the upper rows of the stacks

(Fig. 6), but significantly less than reported by Baranski *et al.* (2020) after drying unloaded oak lamellas in laboratory conditions.

The appearance of end checks was observed on a small number of lamellas (Fig. 7). They are mainly a consequence of the initial checks that were present on the lamellas before kiln drying. Grubii and Johansson (2018) stated that end checks are the most common reason (23%) for rejecting lamellas in further production. In addition to the end checks, no unacceptable cracks were observed (division into acceptable and unacceptable cracks according to Pahlberg *et al.* 2018).



Figure 6. Cupping of a lamella from the highest row of the stack



**Figure 7.** End checks on an oak lamella

Deviations in the thickness of the lamellas were also observed, as well as deviations in the thickness along the width of the lamellas, and these are the defects that cause deformations and generally reduce the utilization of raw materials. However, since these defects are not the result of kiln drying, they are not further analysed.

### Drying in the climate chamber

Drying in the climate chamber takes place without air exchange with the outside environment, so it is similar to dehumidification drying. The average initial MC in the tested batch was 47.2% (st. dev. 1.8%), and after 60 hours of drying (in the final phase EMC was 8%), the lamellas MC was 9.3% (st. dev. 0.2%). Although the initial temperature was relatively high (45°C), no cracks were observed after drying. This demonstrates that, due to the small thickness of the material, the risk of developing stresses and cracks is many times lower than in the case of drying sawn timber (when the temperature is an important factor in stress development – Oltean *et al.* 2007). At the same time, it can be expected that higher temperatures in the later stages of drying (especially below 12% MC) would accelerate the process (Straže *et al.* 2020). Regarding deformations, slight cupping

occurred, which is a consequence of drying the unloaded lamellas. Visual control indicated that there was no significant difference in the colour of the lamellas before and after drying, as well as in comparison with the lamellas dried in an industrial dehumidification kiln (detailed colour measurements and analysis were done for the next two drying cycles and presented in Part II of the paper). All of the above indicates the possibility of applying higher initial temperatures compared to those currently used in the industry, which is in agreement with the results of other authors (Skuratov *et al.* 2020).

### CONCLUSIONS

In this part of the paper, the possibility of drying oak lamellas in a dehumidification kiln was analysed and compared with the process of conventional drying. One of the main advantages of these kilns, in addition to better energy efficiency and the ability to work without a boiler, is the absence of fresh air entering into the kiln, which is favourable from the aspect of wood colour.

It has been shown that, when applying the drying schedule recommended by the kiln manufacturer, 5 mm thick oak lamellas can be dried in 2 to 5 days (depending on the amount of wood in the kiln and the initial MC). Unlike during the conventional process, in the dehumidification kiln, the desired temperature was generally not reached (especially at the beginning of drying), which is a consequence of working without external thermal energy. In both kiln types, the EMC was above the set values throughout the drying process. This did not significantly affect the prolongation of the drying process, but it reduced the possibility of drying defects. Since there is no risk of the EMC in the kiln being lower than the set value, there is potential for drying the lamellas without the MC measuring, i.e., based only on the EMC values.

The first drying cycle in the climate chamber showed that higher initial temperatures (minimum 45°C) could be applied. However, a careful analysis of the increase in drying costs (additional thermal energy from the boiler) is required in the case of higher temperatures.

**Note:** This research was realized within the projects 451-02-68/2020/14/2000169 (Ministry of Education, Science and Technological Development, Republic of Serbia) and 442-01 (Innovation Fund, Republic of Serbia).

## ЛИТЕРАТУРА / REFERENCES

- Barański, J., Konopka, A., Vilkovska, T., Klement, I., and Vilkovsky, P. (2020): Deformation and surface color changes of beech and oak wood lamellas resulting from the drying process. *BioResources*, 15(4):8965-8980.
- SRPS EN 13756:2019. Drveni podovi i parket – Terminologija.
- FEP/GFA (2021) FEP 2020 Statistics (accessed 10.10.2021.)
- Grubić, V., Johansson, J. (2018): Occurrence of shake in oak (*Quercus* spp.) and its effect on flooring top-layer quality. 8th Hardwood Conference. Sopron, Hungary, 59-60.
- Grubić, V., Johansson, J. (2019): Performance of Multi-Layered Wood Flooring Elements Produced with Sliced and Sawn Lamellas. *Pro Ligno*, 15(4):166-172.
- Infographic Journal (2013): The Rise of Engineered Wood Flooring by Irma Wallace (accessed 10.10.2021).
- Milić, G. (2019): Drying of hardwood timber – science and industry. 4<sup>th</sup> International Scientific Conference „Wood Technology & Product Design“, Ohrid, Republic of North Macedonia, 126-130.
- Milić, G., Todorović, N., Veizović, M., Popadić, R. (2021): Possibility of drying oak lamellas in dehumidification kilns. 5<sup>th</sup> International Scientific Conference „Wood Technology & Product Design“, Ohrid, Republic of North Macedonia, 1-6.
- Milić, G., Kolin, B. (2008): Influence of duration of the conditioning process on the reduction of case-hardening level in kiln-dried beech and oak lumber. *Drying Technology*, 26:1225-1231.
- Oltean, L., Teischinger, A., Hansmann, C. (2007): Influence of temperature on cracking and mechanical properties of wood during wood drying—a review. *BioResources* 2(4):789–811.
- Orłowski K.A., Walichnowski A. (2013): Economic analysis of upper layer production of engineered floorings (in Polish). *Drewno* 56 (189): 115-126.
- Pahlberg, T., Thurley, M., Popović, Đ., Hagman, O. (2018): Crack detection in oak flooring lamellae using ultrasound-excited thermography. *Infrared Physics & Technology* 88:57-69.
- Salin, J-G. (2001): Analysis and optimization of the conditioning phase in timber drying. *Drying Technology*, 19 (8):1711-1724.
- Skuratov, N., Gorbacheva, G., Sapozhnikov, I., Samoilenko, D. (2020): Drying schedules for thin oak boards and blanks. 9<sup>th</sup> Hardwood Conference, Sopron, pp. 252-255.
- Straže, A., Klarić, M., Budrović, Z., Pervan, S. (2020). Characterisation and Modelling of Drying Kinetics of Thin Ash and Oak Wood Lamellas Dried with Infrared Radiation and Hot Air. *Drvna industrija*, 71 (2):171-177. <https://doi.org/10.5552/drvind.2020.1965>

