

ПРОВИДНО ДРВО – ОД ИДЕЈЕ ДО ПРИМЕНЕ

Јасмина Ј. ПОПОВИЋ

Миланка Р. МОМЧИЛОВИЋ-ЂИПОРОВИЋ

Млађан М. ПОПОВИЋ

Универзитет у Београду, Шумарски факултет

– Одсек за Технологије дрвета, Београд

Милица М. ГАЈИЋ

Београд

<https://doi.org/10.18485/smartart.2022.2.2.ch20>

Апстракт: Иако је дрво један од најстаријих материјала у историји људске цивилизације, још увек се изналазе нови начини његове примене и разматрају могућности преобликовања одређених својстава. Последњих година јавља се интересовање истраживача за модификацију оптичких својстава дрвета. Наиме, мењањем полазне хемијске структуре која је праћена импрегнацијом полимера одговарајућих својстава, може се постићи смањење апсорпције и расејања светлости приликом интеракције са дрветом. На тај начин настаје нови производ – провидно дрво (*TW – transparent wood*). Поред очуване текстуре својствене дрвету, провидно дрво у великој мери задржава бројна повољна својства природног дрвета. Провидно дрво одликују висока оптичка пропустљивост (преко 80%) и замућење (преко 70%), ниска густина (око $1,2 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$), добра механичка својства и ниска топлотна проводљивост. Могућности примене провидног дрвета интензивно се разматрају. Због добрих механичких, топлотних и оптичких својстава, провидно дрво има велики потенцијал примене као енергетски ефикасан грађевински материјал. Висока оптичка пропустљивост уз истовремено расејање светлости и ниска топлотна проводљивост, добра су препорука овог материјала за израду термоизолационих прозора. Феномен расејања светлости, својствен провидном дрвету, чини га погодним за побољшање ефикасности соларних ћелија. Провидно дрво нарочито је интересантно и представља велики изазов у области опремања ентеријера и дизајна намештаја, али и израде украсних предмета. Поред тога, порозна структура омогућава да се у фази импрегнације полимером у провидно дрво уграде различите функционалне нано-честице (магнетне, луминисцентне, електропроводљиве и слично), чиме се проширује поље примене овог материјала. У овом раду је дат је приказ досадашњих истраживања у сфери добијања и могућности примене провидног дрвета очуване структуре, али и изазова који се намећу истраживачима у овој области.

Кључне речи: провидно дрво, делигнификација, импрегнација, примена провидног дрвета

УВОД

Дрво је један од најстаријих и најчешће коришћених материјала у историји људске цивилизације. Захваљујући природном пореклу и обновљивости, лакој обрадивости, одличним механичким својствима у комбинацији са ниском густином, и данас је један од основних инжењерских материјала, са значајном улогом у грађевинарству, где се традиционално користи као конструкциони материјал^{1,2,3}. У свакодневном животу дрво такође има широко поље примене, од производње топлотне енергије, до израде кухињске галантерије, играчака, уметничких, украсних и других предмета. Јединствена естетска својства, текстура и топлина, чине га незаобилазним материјалом за израду намештаја и осталих елемената за опремање ентеријера⁴. Због хемијске структуре, која укључује бројна биополимерна и друга једињења различите хемијске природе, сматра се великим природним и обновљивим резервоаром органске материје, што дрво сврстава у важну сировину хемијске индустрије⁵. Поред тога, разноврсност у погледу једињења и функционалних група присутних у биополимерним конституентима дрвета, пружа бројне могућности за различите хемијске модификације и развијање нових производа измењених својстава⁶. Један од новијих производа модификације дрвета је провидно дрво (*transparent wood* – *TW*) са очуваном природном структуром, за које се предвиђа примена у различитим областима технике, од гређевинарства до електронике^{7,8,9}. У овом раду је дат је приказ досадашњих истраживања из области добијања, карактеризације и могућности примене провидног дрвета (ПД) очуване структуре.

ГРАЂА ДРВЕТА

Повољна својства, пре свега механичка, одраз су специфичне анатомске и хемијске грађе, и основа су широког поља примене дрвета. Физичку структуру дрвета, као материјала биолошког порекла, чине ћелије, различите по облику, димензијама, оријентацији (аксијално и радијално) и функцији у живом стаблу. Нај-

10 W. Gan and others, "Transparent magnetic wood composites based on immobilizing Fe_3O_4 nanoparticles into a delignified wood template", *J. Mater. Sci.* 52(6), 2016, 3321–3329. <<https://doi.org/10.1007/s10853-016-0619-8>>

2 Y. Li and others, "Transparent wood for functional and structural applications", *Phil. Trans. R. Soc. A* 376, 2017, n. pag. <<https://doi.org/10.1098/rsta.2017.0182>>

3 H. S. Yaddanapudi and others, "Fabrication and characterization of transparent wood for next generation smart building applications", *Vacuum*, 146, 2017, 649–654. <<https://doi.org/10.1016/j.vacuum.2017.01.016>>

4 H. Zhu and others, *Wood-Derived Materials for Green Electronics, Biological Devices, and Energy Applications*, *Chem. Rev.* 116(16), 2016, 9305–9374 <<https://doi.org/10.1021/acs.chemrev.6b00225>>

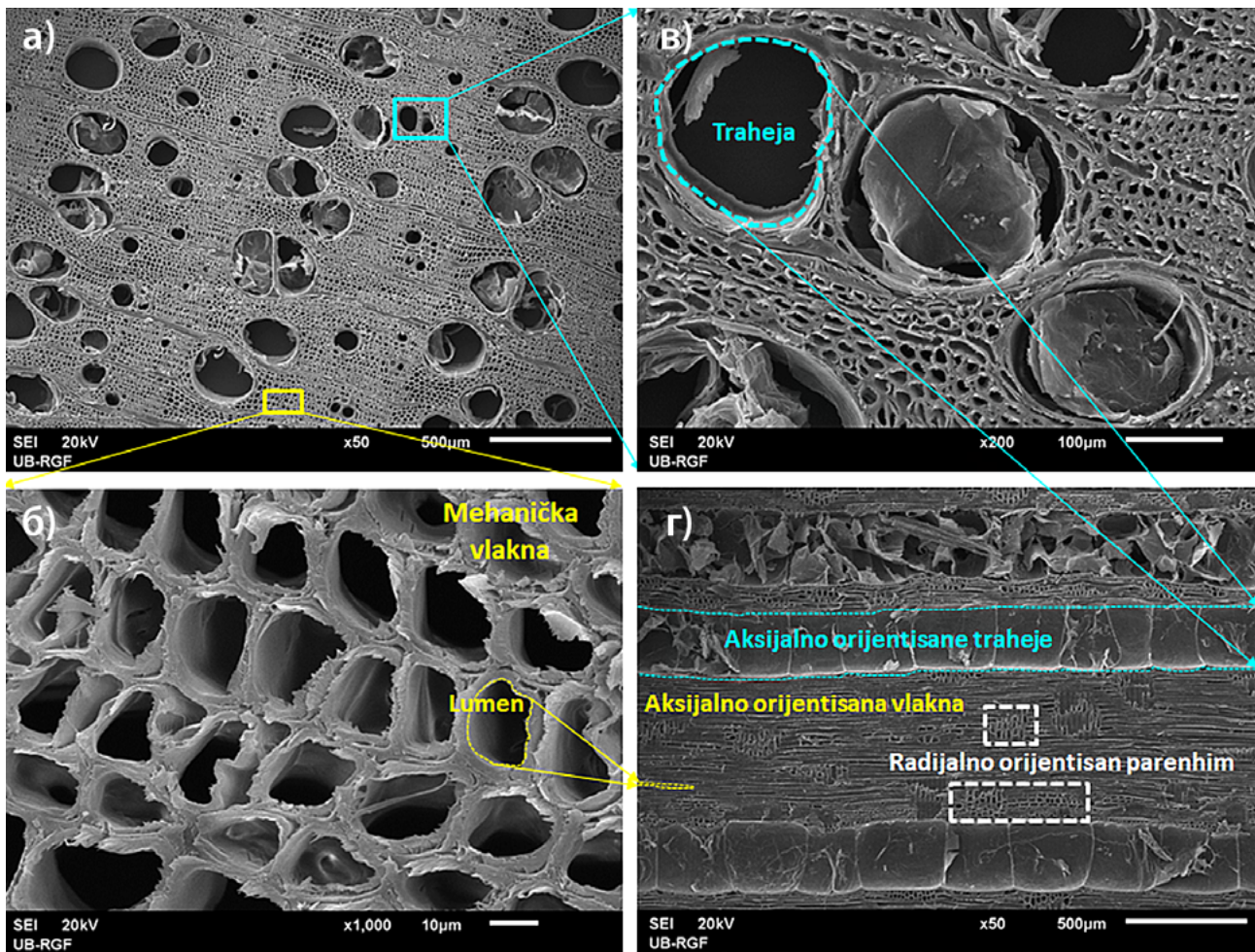
5 T. Stevanović-Janežić, *Hemija drveta sa hemijskom preradom. Deo 1. Hemija drveta*, Beograd, 1993, 10–11.

6 C. A. S. Hill, *Wood Modification: Chemical, Thermal and Other Processes*, Chichester, 2006, 20–22.

7 T. Li and others "Wood Composite as an Energy Efficient Building Material: Guided Sunlight Transmittance and Effective Thermal Insulation" *Adv. Energy Mater.* 6(22), (2016) 1601122. <<https://doi.org/10.1002/aenm.201601122>>

8 H. S. Yaddanapudi and others "Fabrication and characterization of transparent wood for next generation smart building applications", *Vacuum*, 146, 2017, 649–654. <<https://doi.org/10.1016/j.vacuum.2017.01.016>>

9 H. Zhu and others, "Wood-Derived Materials for Green Electronics, Biological Devices, and Energy Applications" *Chem. Rev.* 116(16), 2016, 9305–9374 <<https://doi.org/10.1021/acs.chemrev.6b00225>>



Сл. 1

веће учешће у дрвету имају аксијално оријентисане влакнасте ћелије пречника 20–30 μm , уских лумена, дебљине ћелијских зидова 2–8 μm ¹⁰, са просечним уделом од око 50% (32–83%) у лишћарским врстама, и чак до 95% (92–98%) у четинарским врстама¹¹. Лишћарским врстама својствени су проводни анатомски елементи широких лумена – трахеје, пречника и до 500 μm ¹² (сл. 1).

Ова специфична нехомогена ћелијска грађа, са израженом и веома сложеном порозном структуром, која укључује микро-, мезо- и макро-поре¹³, повлачи анизотропију својстава дрвета, што га чини јединственим у односу на остале материјале¹⁴.

Композитна природа ћелијских зидова дрвета одраз је снажних међусобних интеракција фибрила целулозе (са учешћем од 40–55%), хемицелулоза (20–35%) и лигнина (18–35%)¹⁵, што резултује одличним механичким својствима дрвета¹⁶.

10 M. Hoglund and others "Transparent Wood Biocomposites by Fast UV-Curing for Reduced Light-Scattering through Wood/Thiol-ene Interface Design" ACS Applied Materials & Interfaces 12(41), 2020, 46914–46922 <<https://doi.org/10.1021/acsami.0c12505>>

11 T. Higuchi, *Biochemistry and Molecular Biology of Wood*, New York 1997, 10–11.

12 С. Васиљевић, *Анатомија шумског грвећа*, Београд, 1967, 199.

13 Y. Li and others, "Transparent wood for functional and structural applications", Phil. Trans. R. Soc. A 376, 2017, n. pag. <<https://doi.org/10.1098/rsta.2017.0182>>

14 В. М. Шошкић, *Својства дрвета*, Београд, 1991, 68, 115.

15 S. Döring, *Power from Pellets: Technology and Applications*, Berlin Heidelberg 2013, 20.

16 L. J. Gibson, *The hierarchical structure and mechanics of plant materials*, J. R. Soc. Interface, 9(76), 2012, 2749–2766.

МОГУЋНОСТИ МОДИФИКАЦИЈЕ СВОЈСТАВА ДРВЕТА

Поред бројних предности, дрво као биокompatитни материјал има и многе недостатке. Дрво карактерише лака апсорпција влаге (воде), што повлачи димензионалну нестабилност и пуцање, као и подложност биолошкој и фотодеградацији, услед чега могу настати проблеми приликом примене и прераде, а трајност дрвета се скраћује. Истовремено, обиље разноврсних функционалних група у биополимерима ћелијског зида и порозна структура, сачињена од бројних међусобно повезаних лумена ћелија, која омогућава продирање хемијских реагенаса у унутрашњост дрвета, добра су подлога за различите физичке и хемијске модификације¹⁷. Могућности модификације дрвета у циљу побољшања одређених својстава дрвета интензивно су истраживане. Добри резултати у побољшању димензионалне стабилности постигнути су импрегнацијом дрвета различитим термоочвршћавајућим смолама као што су: фенол–формалдехидна, меламин–формалдехидна и уреа–формалдехидна^{18,19}, као и процесом фурфуриловања (импрегнација полифурфурил алкохол)²⁰. Поред тога, применом топлотне или хемијске енергије може се модификовати хемијски састав и побољшати димензионална стабилност дрвета^{21,22}. Један од најуспешнијих производа хемијске модификације у циљу побољшања димензионалне стабилности је ацетиловано дрво²³. Процес ацетиловања примењив је не само за дрво, већ и за композитне материјале на бази уситњеног дрвета. Ацетиловање иверја црног бора (*Pinus nigra*) и букве (*Fagus moesiaca*) резултовало је повећањем димензионалне стабилности плоча иверица израђених од овог иверја, али је дошло до пада механичких својстава²⁴. Својства дрвета могу се изменити и хемијским третманима водом или благим растворима хемикалија, који најчешће резултују уклањањем дела хемицелулоза из дрвета^{25,26,27,28}. Дејством

17 C.A.S. Hill, *Wood Modification: Chemical, Thermal and Other Processes*, Chichester, 2006, 19–22.

18 T. Furuno and others, "The modification of Wood by treatment with low molecular weight phenol-formaldehyde resin: a properties enhancement with neutralized phenolic-resin i resin penetration into Wood cell walls", *Wood Science i Technology*, 37 (2004) 349–617.

19 M. Deka and Saikia, C.N. "Chemical modification of Wood with thermosetting resin: effect on dimensional stability i strength property". *Bioresource Technology*, 73(2), 2000, 179–181. <[https://doi.org/10.1016/S0960-8524\(99\)00167-4](https://doi.org/10.1016/S0960-8524(99)00167-4)>

20 S. Lande and others "Properties of furfurylated wood", *Scand. J. of Forest Research*, 19(sup5), 2004, 22–30. <<https://doi.org/10.1080/0282758041001915>>

21 B. F. Tjeerdsmas and others "Characterisation of thermally modified Wood: molecular reasons for Wood performance improvement" *Holz als Roh – und Werkstoff*, 56, 1998, 149–53. <<https://doi.org/10.1007/s001070050287>>

22 C.A.S. Hill, *Wood Modification: Chemical, Thermal and Other Processes*, Chichester, 2006, 21–22,99.

23 C.A.S. Hill, *Wood Modification: Chemical, Thermal and Other Processes*, Chichester, 2006, 45.

24 J. Miljkovic and M. Djiporovic, "The acetulation of pine and beech for particleboard production" *J. Serb. Chem. Soc.* 59 (4), 1994, 225–264.

25 T.E. Amidon and others, "Effect of Hot Water Pre-Extraction on Alkaline Pulping of Hardwoods", *Pulping and Engineering Conference*, Atlanta, November 5–8, 2006.

26 S.H. Yoon and A. van Heiningen „Kraft pulping and papermaking properties of hot-water pre-extracted loblolly pine in an integrated forest products biorefinery“, *Tappi J.* 7(7), 2008, 22–27.

27 J. Gassan and A.K. Bledzki, *Alkali Treatment of Jute Fibers: Relationship Between structure and Mechanical Properties*, *Journal of Applied Polymer Science*, 71, 1999, 623–629.

28 O. Hosseinaei and others, *Effect of hemicellulose extraction on physical/mechanical properties and mold susceptibility of flakeboard*. *Forest Products Journal* 61(1), 2011, 31–37.

благих раствора сирћетне киселине или воде на температурама од 100 и 120 °C, повећана је димензионална стабилност узорака дрвета пољског јасена, упркос интензивнијем упијању воде^{29,30} док су третмани растворима натријум карбоната значајно побољшали адхезивна својства³¹. Третман иверја букве водом на температури од 150 °C резултовао је повећањем топлотне моћи иверја. Истовремено, повећана је и топлотна моћ пелета израђеног од овог иверја, док су афинитет према влази и садржај пепела смањени³².

Модификацијом полазне хемијске структуре дрвета, која је праћена импрегнацијом полимера, могу се променити и оптичка својства дрвета. Оптичка својства дрвета до недавно нису била предмет већег интересовања истраживача, иако се појам „провидно дрво“ први пут среће у литератури још 1992. године³³. Последњих неколико година јавља се велико интересовање истраживача за модификацију оптичких својстава дрвета у циљу добијања провидног дрвета и разматрају могућности примене овог новог композитног материјала.

ОПТИЧКА СВОЈСТВА ДРВЕТА

Када светлост, која представља видљиви део спектра електромагнетног (ЕМ) зрачења (таласне дужине 400 – 700 nm) ступи у интеракцију са материјом долази до комбинације рефлексије (одбијања), рефракције (преламања), апсорпције и пропуштања светлости. Посматрајући неко тело, људско око детектује резултат те сложене интеракције, која је зависна од таласне дужине светлости и физичко-хемијске природе материје.

Апсорпција светлости зависи од хемијске природе материје, а узрокују је молекули односно делови молекула (хромофори), који апсорбују тачно одређене таласне дужине ЕМ зрачења, а рефлектују и/или пропуштају остале. У зависности од врсте и интензитета интеракције видљиве светлости са молекулима неке материје, различити материјали различито су обојени или провидни³⁴. Део светлости који није апсорбован или рефлектован при проласку кроз материју дефинише оптичка пропустљивост, као однос интензитета пропуштене и упадне светлости³⁵. Што је оптичка пропустљивост већа, материјал је провиднији.

Поред тога, на граничним површинама између две средине различитих оптичких густина долази до преламања (рефракције) светлости, која се описује индексом преламања (рефракције), а резултује променом правца кретања

29 J. Popović i M. Điporović-Momčilović, "Uticaj hemijskih tretmana na dimenzionalnu stabilnost drveta poljskog jasena – prvi deo – tangencijalno bubrenje" Glasnik Šumarskog fakulteta, 106, 2012, 151–168.

30 J. Popović and others, "The Influence of Chemical Treatments on Dimensional Stability of Narrow Leaved Ash", Proceedings of the World Conference on Timber Engineering (WCTE), August 22–25, 2016, Vienna, Austria, 1627–1634.

31 J. Popović and others, "Effects of the Chemical Treatment Conditions of the Narrow-Leaved Ash (*Fraxinus angustifolia* Vahl. ssp. *Pannonica* Soo & Simon) on the Lap Shear Strength", Wood Research, 60(4), 2015, 543–554.

32 J. Popović and others, "Effects of Water Pretreatment on Properties of Pellets Made from Beech Particles", Hem. Ind., Vol 75(1), 2021, 39–51. <<https://doi.org/10.2298/HEM-1N191224007P>>

33 S. Fink, "Transparent Wood – A New Approach in the Functional Study of Wood Structure.", Holzforschung 46, 1992, 403–408.

34 G. Waldman "Introduction to Light: The Physics of Light", Vision, and Color, Dover Publications, INC. New York, 2002, 184–186.

35 Y. Li and others, "Transparent wood for functional and structural applications", Phil. Trans. R. Soc. A 376, 2017, n. pag. <<https://doi.org/10.1098/rsta.2017.0182>>

светлости. Када светлост пролази кроз оптички нехомогену средину, услед преламања долази до њеног скретања у свим правцима (сл. 2 А), односно расејања (расипања, дифузије), што резултује појавом оптичког замућења. Оптичко замућење је однос дифузно пропуштене и укупне пропуштене светлости. Што је већа разлика у вредностима индекса преламања између две контактне средине, јаче је расипање светлости³⁶. Код провидних материјала, расејање (дифузија) светлости пропуштене кроз материјал резултује смањењем контраста слике која се посматра кроз материјал³⁷. На вредност оптичке пропустљивости и замућења материјала утицај имају индекс преламања, дебљина, храпавост површине, порозност, расподела и величина пора, итд.³⁸

И оптичка својства дрвета, као и остала, последица су његове анатомске и хемијске грађе. Због порозне структуре и присуства различитих хемијских једињења у ћелијском зиду, која карактеришу различити индекси рефракције и апсорпције светлости, оптичка природа дрвета је хетерогена. Када светлост ступи у интеракцију са дрветом, у зависности од таласне дужине светлости и својстава дрвета, као што су густина, хемијски састав, анатомски правац, долази до комбинације рефлексије, рефракције, апсорпције и њеног пропуштања. Захваљујући великом броју различитих хромофорних група у молекулској структури једињења дрвета, дрво има способност да ступа у интеракцију са широким опсегом таласних дужина ЕМ зрачења видљивог дела спектра, што резултује добром апсорпцијом светлости и светло-смеђом бојом природног дрвета. Укупној апсорпцији светлости, са учешћем од 80–95%, највише доприноси лигнин, у чијој се молекулској структури налази велики број хромофорних група, затим угљени хидрати, са 5–20%, а са свега око 2% и екстрактиви, пре свега полифенолног карактера, који су у различитим количинама присутни у свим врстама дрвета. Поред апсорпције, на свим граничним површинама између ћелијског зида (индекс рефракције око 1,56) и ваздуха (индекс рефракције од 1,0) одвија се расејање светлости (сл. 2 А)³⁹.

ДОБИЈАЊЕ ПРОВИДНОГ ДРВЕТА

Да би дрво постало провидно потребно је елиминисати или у што већој мери смањити апсорпцију и расејање светлости на граничној површини ваздух/ћелијски зид⁴⁰. Прве узорке провидног дрвета са очуваном структуром направио је Зигфрид Финк (*Siegfried Fink*), третирајући узорке неколико различитих врста дрвета 5% воденим раствором натријум хипохлорита (NaClO). После 1–2 дана хемијског третмана, током ког су из дрвета уклоњене обојене материје, узорци су импрегнисани полимером одговарајућег индекса преламања и постали провидни⁴¹.

36 Y. Li and others, "Transparent wood for functional and structural applications", *Phil. Trans. R. Soc. A* 376, 2017, n. pag. <<https://doi.org/10.1098/rsta.2017.0182>>

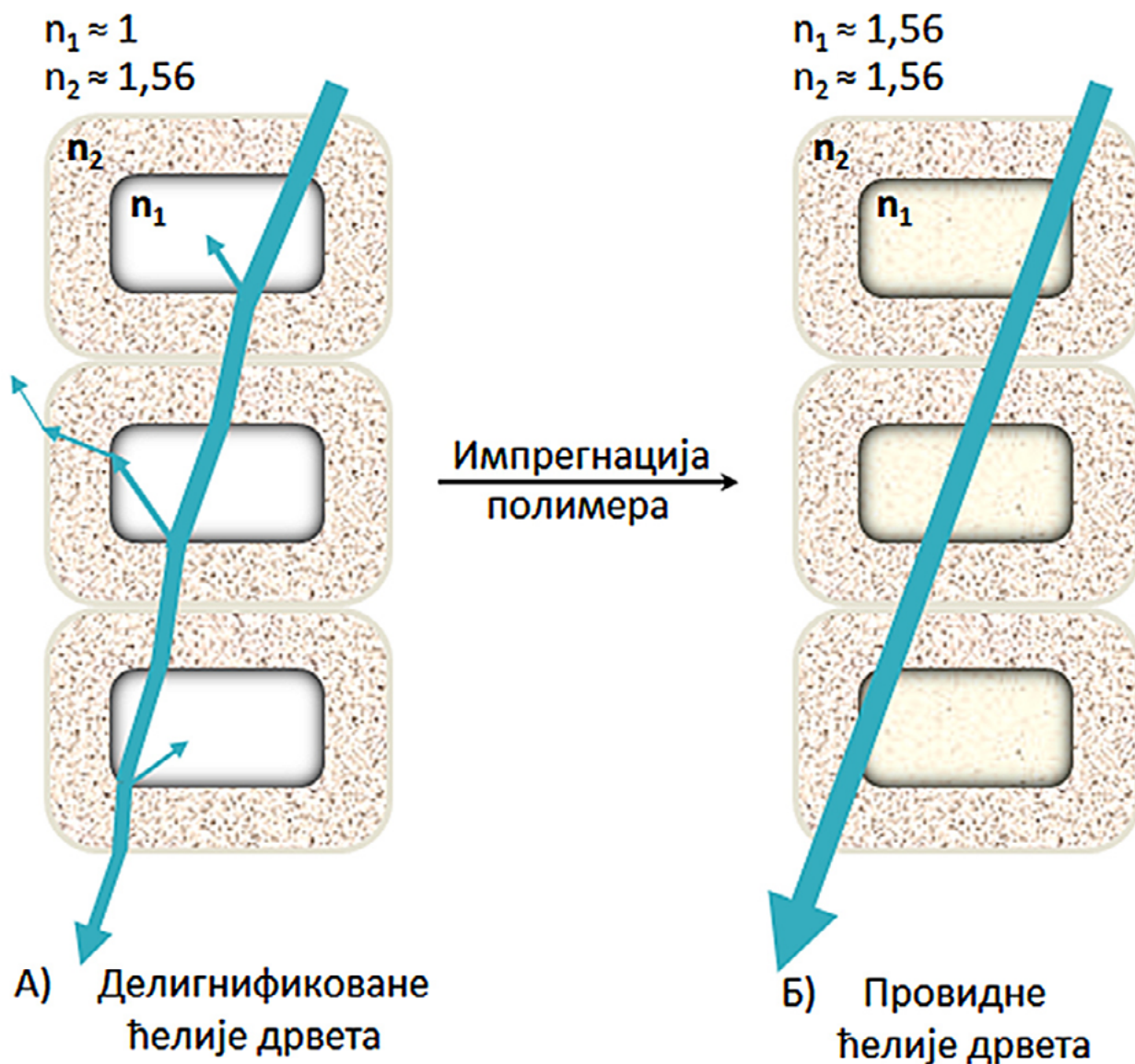
37 Y. Li and others, "Optically Transparent Wood: Recent Progress, Opportunities, and Challenges", *Adv. Optical Mater.* 2018, 6(14), 1800059. <<https://doi.org/10.1002/adom.201800059>>

38 Y. Li and others, "Transparent wood for functional and structural applications", *Phil. Trans. R. Soc. A* 376, 2017, n. pag. <<https://doi.org/10.1098/rsta.2017.0182>>

39 Y. Li and others, "Transparent wood for functional and structural applications", *Phil. Trans. R. Soc. A* 376, 2017, n. pag. <<https://doi.org/10.1098/rsta.2017.0182>>

40 Y. Li and others, "Transparent wood for functional and structural applications", *Phil. Trans. R. Soc. A* 376, 2017, n. pag. <<https://doi.org/10.1098/rsta.2017.0182>>

41 S. Fink, "Transparent Wood – A New Approach in the Functional Study of Wood Structure.", *Holzforschung* 46, 1992, 403–408.



Сл. 2

Међутим, тек од 2015. год. у Шведској (*KTH Royal Institute of Technology*) и Универзитету у Мериленду, САД (*University of Maryland, USA*) почињу озбиљнија истраживања могућности добијања и употребе провидног дрвета. Концепт добијања ПД који развијају истраживачи са ова два универзитета сличан је процесу који је применио Финк, и одвија се у две фазе. У првој фази се, хемијским третманом, смањује апсорпција светлости дрвета (сл. 2 А). Друга, физичка фаза, има циљ да смањи расипање светлости на бројним граничним површинама ваздух/ћелијски зид, до које долази при проласку светлости кроз дрво због разлика у њиховој оптичкој густини, односно индексу рефракције)⁴² (сл. 2 Б). За добијање ПД до сада су коришћени узорци дрвета мањих димензија, дебљине до 5 mm⁴³.

42 Y. Li and others, "Transparent wood for functional and structural applications", *Phil. Trans. R. Soc. A* 376, 2017, n. pag. < <https://doi.org/10.1098/rsta.2017.0182> >

43 Y. Li and others, "Transparent wood for functional and structural applications", *Phil. Trans. R. Soc. A* 376, 2017, n. pag. < <https://doi.org/10.1098/rsta.2017.0182> >

Апсорпција светлости при проласку кроз дрво може се у великој мери смањити уклањањем лигнина и других обојених материја (углавном полифенолних једињења), али и поступцима модификације структуре лигнина којима се уклањају само хромофорне групе⁴⁴ (сл. 3 б, д).

За делигнификацију у циљу постизања транспарентности узорци се могу тритирати натријум хлоритом (NaClO_2) при температури од 45°C током 10 h ⁴⁵, или раствором 1% NaClO_2 у присуству ацетатног пуфера ($\text{pH} = 4,6$) на температури од 80°C током 6 h , односно до постизања беле боје узорака^{46,47,48}, при чему се садржај лигнина са око 25% смањи до испод 3% ⁴⁹. Делигнификација до садржаја лигнина мањег од 3% може се постићи и кувањем узорака дрвета у раствору $2,5\text{ M NaOH}$ и $0,4\text{ M Na}_2\text{SO}_3$ на температури кључања током 12 h , после чега се $2,5\text{ M H}_2\text{O}_2$ раствором уклања жућкаста боја⁵⁰, али је поступак дуготрајан и еколошки неподобан⁵¹. Спаљивањем производа делигнификације, слично као у постројењима за производњу техничке целулозе⁵², приликом производње ПД у индустријским размерама може се регенерисати део утрошене енергије. На овај начин поступак би био еколошки и економски погоднији.

Међутим, с обзиром да лигнин чини и до 30% укупне масе дрвета и, остварује физичко-хемијске везе са структурним полисахаридима у ћелијском зиду, формирајући на тај начин композит, а такође има улогу да повезује све ћелија дрвета у једну целину, уклањање лигнина нарушава и слаби структуру дрвета^{53,54} (сл. 3 ж).

Уместо делигнификације, модификацијом структуре лигнина раствором који садржи 3% Na_2SiO_3 , 3% NaOH , $0,1\%$ MgSO_4 и 4% H_2O_2 током 1 h из дрвета се могу уклонити само хромофорне групе и постићи белина узорака од 79% . Поред тога што је овај поступак ефикаснији и еколошки прихватљивији, задржава се 80% лигнина, па је структура дрвета очуванија, а механичка својства боља⁵⁵.

44 Y. Li and others, "Transparent wood for functional and structural applications", Phil. Trans. R. Soc. A 376, 2017, n. pag. <<https://doi.org/10.1098/rsta.2017.0182>>

45 H. Yano, "Potential strength for resin-impregnated compressed wood" J. Mater. Sci. Lett. 20, 2001, 1127–1129. <<https://doi.org/10.1023/A:1010996424453>>

46 Y. Li and others, "Towards centimeter thick transparent wood through interface manipulation." Journal of Materials Chemistry A, 3(6), 2018, 1094–1101. <<https://doi.org/10.1039/C7TA09973H>>

47 Y. Li and others, "Transparent wood for functional and structural applications", Phil. Trans. R. Soc. A 376, 2017, n. pag. <<https://doi.org/10.1098/rsta.2017.0182>>

48 Q. Fu and others, "Transparent plywood as a load-bearing and luminescent biocomposite", Composites Science and Technology 164, 2018, 296–303 <<https://doi.org/10.1016/j.compscitech.2018.06.001>>

49 Y. Li and others, "Lignin-Retaining Transparent Wood, ChemSusChem", 10(17), 2017, 3445–3451. <<https://doi.org/10.1002/cssc.201701089>>

50 M. Zhu and others, "Highly Anisotropic, Highly Transparent Wood Composites", Adv. Mater. 28(26), 2016, 5181–5187. <<https://doi.org/10.1002/adma.201600427>>

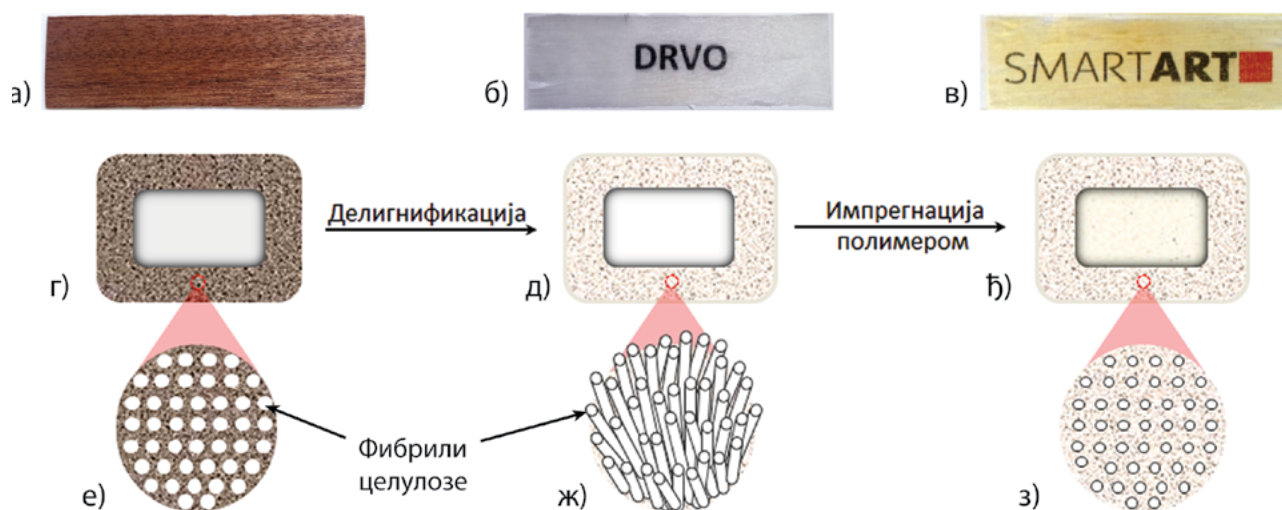
51 Y. Li and others, "Lignin-Retaining Transparent Wood, ChemSusChem", 10(17), 2017, 3445–3451. <<https://doi.org/10.1002/cssc.201701089>>

52 H. Tran and E.K. Vakkilainen "The kraft chemical recovery process", TAPPI Kraft Pulping Short Course, TAPPI, 2008. <<http://www.tappi.org/content/events/o8kros/manuscripts/1-1.pdf>>

53 Y. Li and others, "Lignin-Retaining Transparent Wood, ChemSusChem", 10(17), 2017, 3445–3451. <<https://doi.org/10.1002/cssc.201701089>>

54 Y. Li and others, "Optically Transparent Wood: Recent Progress, Opportunities, and Challenges", Adv. Optical Mater. 2018, 6(14), 1800059. <<https://doi.org/10.1002/adom.201800059>>

55 Y. Li and others, "Lignin-Retaining Transparent Wood, ChemSusChem", 10(17), 2017, 3445–3451. <<https://doi.org/10.1002/cssc.201701089>>



Сл. 3

Поступком модификације структуре лигнина произведено је такозвано „естетско провидно дрво”, које задржава 80% полазног лигнина⁵⁶.

Расипање светлости смањује се испуњавањем лумена ћелија и других пора полимером који има исти индекс преламања као ћелијски зид делигнификованог дрвета. На тај начин смањује се неусклађеност индекса преламања светлости на граничним површинама у дрвету и постиже висока оптичка пропустљивост (сл. 3 в). Поред тога, преузимајући улогу лигнина као биополимерне везивне компоненте, полимер обезбеђује компактност структуре дрвета⁵⁷ (сл. 3 з).

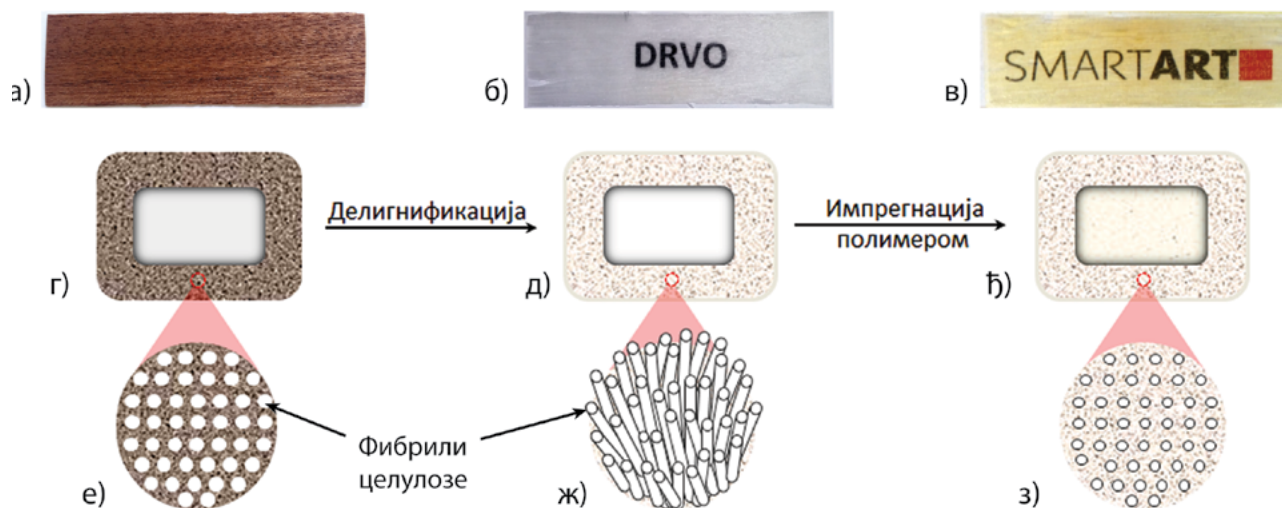
Полимери који се користе за импрегнацију морају бити правилно изабрани, односно да имају индекс преламања што сличнији индексу преламања делигнификованог ћелијског зида. Индекс преламања ћелијског зида дрвета варира у зависности од врсте дрвета, ефикасности делигнификације, и сл. За израду провидног дрвета најчешће се примењују следећи полимери (са индексом преламања у загради): поли(метил метакрилат) – РММА, (приближно 1,49), епоксидна смола (1,5), полистирен (1,59), поливинилпиролон (1,53), n-бутил метакрилат (1,50), дибутил фталат (1,52), изо-ронил метакрилат (1,48–1,50), диалил фталат и поли(винилкарбазол) (1,68). Избором оптималног полимера, после полимеризације може се добити провидно дрво са оптичким пропуштањем већим од 80% (сл. 4), уз замућење од око 75%⁵⁸.

Један од проблема приликом израде провидног дрвета је лоша компатибилност између хидрофилног ћелијског зида дрвета и полимера, који су по хемијској природи хидрофобни. Због лоше компатибилности, услед смањења запремине полимера током полимеризације могу настати празнине између полимера и ћелијског зида, што доводи до већег расејања светлости, а тиме и мање оптичке пропустљивости. Компатибилност између дрвета и РММА може се побољшати ацетиловањем површине делигнификованог дрвета пре импрегнације ММА. На тај начин постигнута је оптичка пропустљивост дрвета балзе

56 R. Mi and others, “Scalable aesthetic transparent wood for energy efficient buildings”, Nature Communications, 11, 2020, 3836, <<https://doi.org/10.1038/s41467-020-17513-w>>

57 Y. Li and others, “Transparent wood for functional and structural applications”, Phil. Trans. R. Soc. A 376, 2017, n. pag. <<https://doi.org/10.1098/rsta.2017.0182>>

58 Y. Li and others, “Transparent wood for functional and structural applications”, Phil. Trans. R. Soc. A 376, 2017, n. pag. <<https://doi.org/10.1098/rsta.2017.0182>>



Сл. 4

дебљине 1,5 mm од 92%, која је блиска пропустљивости чистог PMMA (95%), уз замућење од 50%. Са повећањем дебљине дрвета оптичка пропустљивост опада, па узорак дебљине 10 mm пропушта свега 60 % светлости, уз замућење од 76%⁵⁹.

Увођење нових функција

Захваљујући ћелијском уређењу са веома сложеном порозном структуром, која укључује бројне поре широког спектра димензија, од лумена ћелија (сл. 1) до нано-пора у ћелијском зиду, потенцијал дрвета за увођење нових функција је велики⁶⁰. Додавањем различитих функционалних компоненти у облику квантних тачака (*quantum dots* – QD) у порозне регионе настаје дрво које реагује на стимулансе⁶¹, магнетно дрво⁶², УВ-стабилизовано дрво^{63,64}, и проводљиво дрво^{65,66}, чиме се поље примене материјала на бази дрвета проширује на нове области технике.

59 Y. Li and others, "Towards centimeter thick transparent wood through interface manipulation." *Journal of Materials Chemistry A*, 3(6), 2018, 1094–1101. <<https://doi.org/10.1039/C7TA09973H>>

60 Y. Li and others, "Transparent wood for functional and structural applications", *Phil. Trans. R. Soc. A* 376, 2017, n. pag. <<https://doi.org/10.1098/rsta.2017.0182>>

61 Y. Li and others, "Lignin-Retaining Transparent Wood, *ChemSusChem*", 10(17), 2017, 3445–3451. <<https://doi.org/10.1002/cssc.201701089>>

62 S. Trey and others, "Controlled deposition of magnetic particles within the 3-D template of wood: making use of the natural hierarchical structure of wood." *RSC Advances*, 4(67), 2014, 35678–35685. <<https://doi.org/10.1039/C4RA04715J>>

63 W. Gan and others, "Multifunctional wood materials with magnetic, superhydrophobic and anti-ultraviolet properties." *Appl. Surf. Sci.* 332, 2015, 565–572. <<https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2015.01.206>>

64 H. Guo and others, "UV protection of wood surfaces by controlled morphology fine-tuning of ZnO nanostructures." *Holzforschung* 70(8), 2016, 699–708. <<https://doi.org/10.3929/ethz-b-000259380>>

65 C. Chen and others "All-wood, low tortuosity, aqueous, biodegradable supercapacitors with ultra-high capacitance". *Energy Environ. Sci.* 10, 2017, 538–545.

66 B. Hassel and others "A Study on the Morphology, Mechanical, and Electrical Performance of Polyaniline-modified wood – A Semiconducting Composite Material" *BioResources*, Vol 9(3), 2014, 5007-5023.

У поступак добијања ПД такође се може укључити овај корак, и на тај начин додатно оплеменити својства овог новог материјала. Провидно дрво, због уклањања лигнина, карактерише већа порозност у поређењу са оригиналним дрветом⁶⁷, што даје много могућности за модификовање својстава увођењем функционалних компоненти у порозне регионе. Попуњавањем простора микро-пора (лумена) делигнификованог дрвета полимерним растворима са диспергованим функционалним наночестицама, након чега следи очвршћавање полимера (полимеризација), оптички провидно дрво може се оплеменити новим функцијама^{68,69,70,71} (сл. 5). На тај начин настају нови, мулти-функционални материјали на бази провидног дрвета, а могућности његове примене се додатно проширују.

Дисперговањем Si или CdSe у облику квантних тачака у мономер/олигомер течну смешу ММА пре импрегнације преполимера у делигнификовано дрво, настаје нови материјал јединствених структурних и оптичких својстава – луминисцентно провидно дрво (ЛПД). После побуђивања УВ-зрачењем, ови композити показали су дифузну црвену или зелену луминисценцију, потеклу из уграђених Si, односно CdSe наночестица (сл. 5). Установљено је да је расподела емисионих центара уједначена, са променом интензитета сигнала мањом од 10%, што указује да су квантне тачке равномерно распршене у простору лумена и компатибилне са провидном матрицом дрвета. Дифузна луминисценција квантних тачака последица је структуре дрвета, која узрокује јако расипање светлости. Расипање луминисценције зависно је од смера влакана дрвета, и мање је у аксијалном правцу, у складу са очуваном оригиналном структуром дрвета⁷². Овакав, луминисцентни провидни композит на бази дрвета нуди занимљиве могућности примене, засноване на његовим јединственим структурним и оптичким својствима.

Делигнификовани тангенцијално сечени фурнири дрвета балсе (*Ochroma pyramidale*) дебљине 0,6–0,8 mm, после импрегнације преполимеризованим ММА са диспергованим CdSe/ZnS наночестицама, сложени су унакрсно. На тај начин Фу (*Fu*) и сарадници направили су петослојну луминисцентну провидну шперплочу дебљине око 3,5 mm. Овај ламинирани производ показао је оптичку пропустљивост од око 83%, уз висок степен оптичког замућења (око 80%), услед расипања светлости при проласку кроз нехомогени материјал. Зелена луминисценција овог провидног ламината била је изотропна, са максимумом на око 550 nm, у складу са емисионим пиком CdSe/ZnS наночестица (око 530

67 Y. Li and others "Optically transparent wood from a nanoporous cellulosic template: combining functional and structural performance" *Biomacromolecules* 17, 2016, 1358–1364.

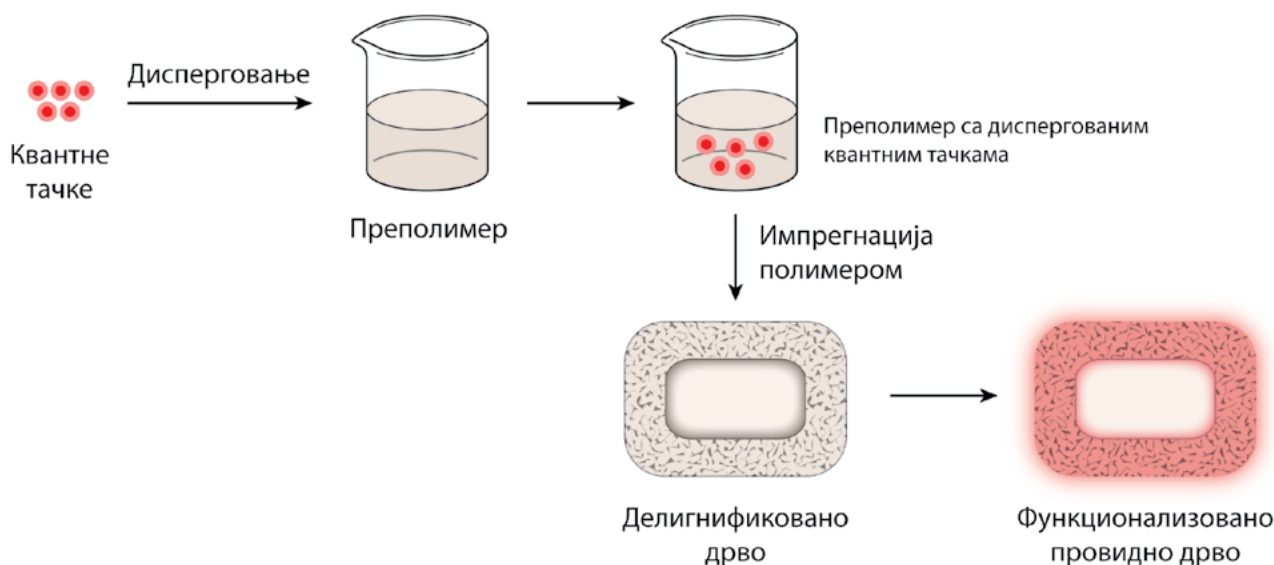
68 Z. Yu and others "Transparent wood containing CsxWO₃ nanoparticles for heat-shielding window applications." *Journal of Materials Chemistry A*, 5(13), 2017, 6019-6024.

69 W. Gan and others, *Transparent magnetic wood composites based on immobilizing Fe₃O₄ nanoparticles into a delignified wood template*. *J. Mater. Sci.* 52(6), 2016, 3321–3329. <<https://doi.org/10.1007/s10853-016-0619-8>>

70 W. Gan and others "Luminescent and transparent wood composites fabricated by Poly(methyl methacrylate) and γ -Fe₂O₃@YVO₄:Eu³⁺ nanoparticle impregnation" *ACS Sustain. Chem. Eng.* 5(5), 2017, 3855–3862 <<https://doi.org/10.1021/acssuschemeng.6b02985>>

71 Y. Li and others, "Luminescent transparent wood". *Adv. Opt. Mater.* 5(1), 2016, 1600834 <https://doi.org/10.1002/adom.201600834>

72 Y. Li and others, "Luminescent transparent wood". *Adv. Opt. Mater.* 5(1), 2016, 1600834 <https://doi.org/10.1002/adom.201600834>



Сл. 5

nm). Због ламинирања, крајња чврстоћа у попречном правцу повећана је са 15 на око 45 МПа⁷³.

Луминисценција провидног дрвета може се постићи и наночестицама $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3@\text{YVO}_4:\text{Eu}^{3+}$, које истовремено испољавају и суперпарамагнетизам. Ган (Gan) и сарадници дисперговали су $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3@\text{YVO}_4:\text{Eu}^{3+}$ наночестице у предполимеризовани раствор ММА у масеном односу 1:1000, 2:1000, 5:1000 и 10:1000. Припремљеним дисперзијама са различитим концентрацијама наночестица импрегнисани су узорци врсте тополе (*Populus cathayana* Rehd) дебљине 0,5 mm. После очвршћавања полимера, композити ПД са концентрацијом наночестица од 0,1% показали су високу оптичку пропустљивост (80,6%), уз магнетизацију засићења од 0,26 етu/g и луминисценцију црвене боје. Са повећањем масеног удела наночестица оптичка пропустљивост се смањивала, а магнетизација повећавала. Поред тога, ови провидни луминисцентни магнетни узорци дрвета имали су добра механичка и топлотна својства⁷⁴.

Провидни магнетни материјали на бази дрвета имају велики потенцијал за различите инжењерске примене⁷⁵. Провидни магнетни материјали обично су дизајнирани уграђивањем магнетних наночестица као што су Fe, Co, $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$ или Fe_3O_4 у различите матрице. На пример, надоградњом матрице нанофибрилисане целулозе (*nanofibrillated cellulose – NFC*) магнетним наночестицама Ли (Li) и сар. направили су провидни магнетни нанопапир⁷⁶. На сличан начин, дисперговањем Fe_3O_4 магнетних наночестица у различитом масеном уделу у предполимеризовани ММА, којим је затим импрегнисано делигнификовано дрво

73 Q. Fu and others, "Transparent plywood as a load-bearing and luminescent biocomposite", *Composites Science and Technology* 164, 2018, 296–303 <<https://doi.org/10.1016/j.compscitech.2018.06.001>>

74 W. Gan and others "Luminescent and transparent wood composites fabricated by Poly(methyl methacrylate) and $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3@\text{YVO}_4:\text{Eu}^{3+}$ nanoparticle impregnation" *ACS Sustain. Chem. Eng.* 5(5), 2017, 3855–3862 <<https://doi.org/10.1021/acssuschemeng.6b02985>>

75 W. Gan and others, *Transparent magnetic wood composites based on immobilizing Fe_3O_4 nanoparticles into a delignified wood template.* *J. Mater. Sci.* 52(6), 2016, 3321–3329. <<https://doi.org/10.1007/s10853-016-0619-8>>

76 Y. Li and others, "Strong transparent magnetic nanopaper prepared by immobilization of Fe_3O_4 nanoparticles in a nanofibrillated cellulose network" *J Mater Chem* 1, 2013, 15278–15283.

тополе (*Populus cathayana* Rehd), Ган и сар. направили су магнетно провидно дрво (МПД). Како магнетна и оптичка својства провидних композита у великој мери зависе од величине и удела магнетних наночестица, са повећањем масеног удела Fe_3O_4 наночестица повећава се магнетизација засићења МПД, док оптичка пропустљивост опада. МПД композит са магнетизацијом засићења од 0,35 ети/г имао је оптичку пропустљивост од 63%⁷⁷.

У циљу побољшања својстава и увођења нових функција, као што је заштита од инфрацрвеног зрачења, у провидно дрво могу се додати наночестице које апсорбују зрачење у ИР области спектра. Цезијум-волфрамове наночестице (Cs_xWO_3) карактерише снажна апсорпција светлости у широком опсегу таласних дужина (800–15000 nm), што их чини погодним за примену у соларним филтерима. Филм припремљен од $\text{Cs}_{0,32}\text{WO}_3$ наночестица на обичном стаклу показао је одлична заштитна својства од ИР зрачења. На овај начин апсорбовано је приближно 99% зрачења у блиској инфрацрвеној области (НИР) (таласних дужина у опсегу 780 – 2600 nm), док је 78,9% видљиве светлости таласне дужине од 465 nm је пропуштено⁷⁸. Испуњавањем нанопора делигнификованог дрвета дисперзијом Cs_xWO_3 наночестица у ММА, после очвршћавања полимера настаје провидно дрво са функцијом заштите од топлоте⁷⁹.

Уграђивањем електрохромних честица у провидно дрво може се регулисати оптичка пропустљивост и подешавати степен осветљености просторије. Принцип рада електрохромних материјала заснива се на стварању нових електронских стања насталих као резултат редокс реакције, који проузрокују померање профила апсорпције, што омогућава подешавање пропуштања светлости у опсегу таласних дужина од УВ до ИР области. Као електрохромни материјали најчешће се користе оксиди неких метала (WO_3 , NbO_x , VO_x), молекулски електрохроми (нпр. деривати виологена) и електрохромни полимери (*electrochromic polymers* – ЕСРс). Растворљивост и могућности финог управљања бојом путем модификације полимерне структуре, чини електрохромне полимере веома погодним за примену. Наношењем провидних ЕСРс у облику премаза на ПД омогућена је његова примена за израду такозваних паметних прозора⁸⁰.

За израду паметних прозора на бази провидног дрвета, поред електрохромних материјала, могу се користити и фотохромне честице додате у преполимер. Фотохромна једињења карактерише реверзибилна промена конфигурације молекула, која настаје као последица апсорпције ЕМ зрачења различитих таласних дужина, а визуелно се манифестује као промена боје, најчешће из безбојног у обојени облик. Додатак фотохромног једињења на бази спиропирана у преполимер ММА током поступка припреме провидног дрвета резултовао је фотохромним ПД, које при промени таласне дужине ЕМ зрачења мења боју

77 W. Gan and others, *Transparent magnetic wood composites based on immobilizing Fe_3O_4 nanoparticles into a delignified wood template*. J. Mater. Sci. 52(6), 2016, 3321–3329. <<https://doi.org/10.1007/s10853-016-0619-8>>

78 Y. Yao and others “*Synthesis of Cs_xWO_3 nanoparticles and their NIR shielding properties*”, *Ceramics International*, Vol. 44(12), 2018, 13469–13475, <<https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2018.04.158>>

79 Z. Yu and others “*Transparent wood containing Cs_xWO_3 nanoparticles for heat-shielding window applications*.” *Journal of Materials Chemistry A*, 5(13), 2017, 6019–6024.

80 A.W. Lang and others “*Transparent Wood Smart Windows: Polymer Electrochromic Devices Based on Poly(3,4-Ethylenedioxythiophene):Poly(Styrene Sulfonate) Electrodes*” *ChemSusChem* 11(5), 2018, 854–863. <<https://doi.org/10.1002/cssc.201702026>>

од љубичасте (под дејством УВ зрачења) у безбојну (зелена светлост видљивог дела ЕМ спектра), не мењајући при том оптичку пропустљивост⁸¹.

Комбиновање структурних и функционалних перформанси је велика предност провидног дрвета, која пружа могућност израде конструкција са оптичким и заштитним, магнетним и/или другим функцијама⁸².

СВОЈСТВА ПРОВИДНОГ ДРВЕТА

Могућности примене ПД условљене су његовим својствима, која свакако зависе од полазног узорка и поступка добијања, као и од својстава полимера употребљеног за импрегнацију. Провидно дрво задржава добра механичка својства природног дрвета, а одликују га и ниска густина (око $1,2 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$), висока оптичка пропустљивост (преко 80%) и замућеност (преко 70%), а захваљујући порозној структури, која је задржана приликом делигнификације, ПД поседује велики потенцијал за мултифункционалне модификације⁸³. Задржавајући оригиналну ћелијску структуру дрвета, провидни композити дрвета такође показују анизотропију својстава, која се односи и на оптичке карактеристике, иако су у великој мери измењене у односу на полазни материјал^{84,85}.

За карактеризацију оптичких својстава ПД од посебног су значаја оптичка пропустљивост, као мера губитка у транспорту енергије, и оптичка замућеност, као одраз губитка садржаја информација⁸⁶. ПД показује високу оптичку пропустљивост и високу оптичку замућеност, док рефлексија на додирној површини ваздух/ПД у уздужном смеру износи око 10%⁸⁷. Оптичка пропустљивост ПД велика је у видљивој и блиској ИР области спектра ЕМ зрачења, а на таласним дужинама које припадају ИР и УВ области ограничена је апсорпцијом која потиче од молекулских вибрација и електронских прелаза⁸⁸.

Оптичка пропустљивост ПД, између осталог, у највећој мери зависи од апсорпције светлости. Ограничену апсорпцију светлости, која је скоро у потпуности смањена уклањањем или модификацијом лигнина, поред заосталог лигнина, узрокује целулоза, па је њен удео важан параметар за оптичку пропустљивост ПД. Оптичка пропустљивост зависи и од врсте дрвета, оријентације целулозних фибрила, и

81 L.Wang and others "Photochromic transparent wood for photo-switchable smart window applications." *Journal of Materials Chemistry C* 7 (2019): 8649–8654.

82 Y. Li and others, "Transparent wood for functional and structural applications", *Phil. Trans. R. Soc. A* 376, 2017, n. pag. <<https://doi.org/10.1098/rsta.2017.0182>>

83 Y. Li and others, "Transparent wood for functional and structural applications", *Phil. Trans. R. Soc. A* 376, 2017, n. pag. <<https://doi.org/10.1098/rsta.2017.0182>>

84 M. Zhu and others, "Highly Anisotropic, Highly Transparent Wood Composites", *Adv. Mater.* 28(26), 2016, 5181–5187. <<https://doi.org/10.1002/adma.201600427>>

85 T. Li and others "Wood Composite as an Energy Efficient Building Material: Guided Sunlight Transmittance and Effective Thermal Insulation" *Adv. Energy Mater.* 6(22), (2016) 1601122. <<https://doi.org/10.1002/aenm.201601122>>

86 Y. Li and others, "Optically Transparent Wood: Recent Progress, Opportunities, and Challenges", *Adv. Optical Mater.* 2018, 6(14), 1800059. <<https://doi.org/10.1002/adom.201800059>>

87 T. Li and others "Wood Composite as an Energy Efficient Building Material: Guided Sunlight Transmittance and Effective Thermal Insulation" *Adv. Energy Mater.* 6(22), (2016) 1601122. <<https://doi.org/10.1002/aenm.201601122>>

88 Y. Li and others, "Optically Transparent Wood: Recent Progress, Opportunities, and Challenges", *Adv. Optical Mater.* 2018, 6(14), 1800059. <<https://doi.org/10.1002/adom.201800059>>

дебљине узорка ПД⁸⁹. Са порастом дебљине узорка расте дужина светлосног пута, чиме се повећава број додирних површина полимер/дрво на којима долази до расипања светлости, услед чега оптичка пропустљивост опада, уз истовремени пораст замућености. Са повећањем дебљине ПД са 0,7 mm на 3,7 mm, пропустљивост са 90% опада на 40%, док се замућеност са 50% повећава на 80%⁹⁰.

Поред пропустљивости, оптичка замућеност је још једно значајно својство провидног дрвета. За разлику од већине осталих провидних материјала за које је својствена хомогена структура, провидно дрво карактерише интензивно и анизотропно расејање светлости које доводи до појаве оптичке замућености⁹¹. Расипање светлости у провидном дрвету углавном се дешава на граници ћелијски зид/полимер. Што је мања разлика између индекса преламања делигнификованог ћелијског зида дрвета и полимера, расипање светлости биће мање⁹². Поред тога, тешко је добити идеалне везе између полимера и ћелијског зида. Због недовољне компатибилности полимера и делигнификованог ћелијског зида и смањења запремине (утезања) полимера током очвршћавања (полимеризације) постоји ризик за настајање празнина између полимера у лумену и ћелијског зида, која постају места расејања и доводе до смањења оптичке пропустљивости^{93,94}.

С обзиром да се расејање светлости одвија на додирној површини ћелијски зид/полимер, анизотропна структура дрвета има велики значај за расејање светлости. Наиме, број ових додирних површина по јединици дужине мањи је када се светлост креће у правцу оријентације влакана (аксијално), него када се простира управно на правац влакана (осу стабла). У зависности од врсте дрвета, дебљине узорка и карактеристика полимера за импрегнацију, вредности оптичке пропустљивости провидних узорка дрвета управно на правац влакана крећу се од 40% до 90%, са замућеношћу од 90 до 50%⁹⁵, док оптичка пропустљивост паралално са правцем влакана износи око 90%. Ипак, Ји (Jia) и сарадници направили су ПД високе оптичке пропустљивости са замућењем од свега 10 %, које су назвали „брстро дрво“. Одлична оптичка својства овог материјала, упоредива са стаклом, постигнута су уклањањем великог дела компоненти ћелијског зида – лигнина и дела хемицелулоза, после чега између целулозних влакана остају празнине које су затим испуњене епокси смолом. На тај начин расипање светлости је у великој мери смањено⁹⁶.

89 Y. Li and others, "Optically Transparent Wood: Recent Progress, Opportunities, and Challenges", *Adv. Optical Mater.* 2018, 6(14), 1800059. <<https://doi.org/10.1002/adom.201800059>>

90 Y. Li and others "Optically transparent wood from a nanoporous cellulosic template: combining functional and structural performance" *Biomacromolecules* 17, 2016, 1358–1364.

91 Y. Li and others, "Optically Transparent Wood: Recent Progress, Opportunities, and Challenges", *Adv. Optical Mater.* 2018, 6(14), 1800059. <<https://doi.org/10.1002/adom.201800059>>

92 Y. Li and others "Optically transparent wood from a nanoporous cellulosic template: combining functional and structural performance" *Biomacromolecules* 17, 2016, 1358–1364.

93 Y. Li and others, "Transparent wood for functional and structural applications", *Phil. Trans. R. Soc. A* 376, 2017, n. pag. <<https://doi.org/10.1098/rsta.2017.0182>>

94 Y. Li and others, "Optically Transparent Wood: Recent Progress, Opportunities, and Challenges", *Adv. Optical Mater.* 2018, 6(14), 1800059. <<https://doi.org/10.1002/adom.201800059>>

95 Y. Li and others, "Transparent wood for functional and structural applications", *Phil. Trans. R. Soc. A* 376, 2017, n. pag. <<https://doi.org/10.1098/rsta.2017.0182>>

96 C. Jia and others "Clear Wood toward High-Performance Building Materials" *ACS Nano* 2019 13(9), 9993–10001 <<https://doi.org/10.1021/acs.nano.9b00089>>

Поред одличних оптичких својстава, топлотна проводљивост од $0,35 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$, која је много ниже вредности у поређењу са стаклом, даје „бистром дрвету“ и добра термоизолациона својства⁹⁷. И остале припремљене узорке ПД карактеришу ниске вредности топлотне проводљивости ($0,24 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$)⁹⁸ – $0,32 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$ ⁹⁹, што га сврстава у термоизолационе материјале.

Термоизолациона својства провидног дрвета испитивана су на моделима кућа са обичним стаклом и са ПД, при чему је праћен пораст температуре у унутрашњости током излагања кућа симулацији сунчевог зрачења. После 10 минута излагања зрачењу, температура у унутрашњости модела куће са стаклом са $24,2 \text{ }^\circ\text{C}$ повећала се на $41,7 \text{ }^\circ\text{C}$, док је температура куће са ПД са $24,7 \text{ }^\circ\text{C}$ порасла на $36,5 \text{ }^\circ\text{C}$. Добра термоизолациона својства провидног дрвета приписују се апсорпцији зрачења у опсегу $1300 - 2500 \text{ nm}$, која потиче од молекулских вибрација функционалних група целулозе¹⁰⁰.

Механичка својства су такође веома значајна за примену провидног дрвета. Својства ПД у великој мери зависе од својстава природног дрвета, које карактерише изразита анизотропија, са већим модулом и чврстоћом у уздужном него у радијалном правцу¹⁰¹. Како оригинална ћелијска структура дрвета остаје очувана, и провидни композити показују анизотропију у погледу механичких својстава. На пример, механичке перформансе ПД зависе од правца деловања силе, и двоструко су веће у правцу паралелно са влакнима него управно на влакна¹⁰². Међутим, због попуњености лумена полимером, механичка својства ПД су побољшана, а из истог разлога однос анизотропије механичких перформанси у уздужном и попречном правцу ПД мањи је у поређењу са полазним узорком¹⁰³. Поред тога, за разлику од стакла, најчешће коришћеног провидног материјала, које је веома круто и крхко, и има ниску отпорност на удар, ПД показује жилавост и велику отпорност на удар¹⁰⁴. Тестом савијања установљено је да је енергија потребна за лом ПД ($1,2 \text{ MJ}\cdot\text{m}^{-3}$) за ред величине већа у поређењу са стаклом ($0,1 \text{ MJ}\cdot\text{m}^{-3}$), што указује на потенцијал овог материјала за примену тамо где се захтева добра отпорност на удар¹⁰⁵.

Увођење функционалних наночестица у структуру ПД доводи до благог пада механичких својстава, смањења оптичке пропустљивости и повећања оптичког

97 C. Jia and others “Clear Wood toward High-Performance Building Materials” *ACS Nano* 2019 13(9), 9993–10001 <<https://doi.org/10.1021/acs.nano.9b00089>>

98 R. Mi and others, “Scalable aesthetic transparent wood for energy efficient buildings”, *Nature Communications*, 11, 2020, 3836, <<https://doi.org/10.1038/s41467-020-17513-w>>

99 Y. Li and others, “Towards centimeter thick transparent wood through interface manipulation.” *Journal of Materials Chemistry A*, 3(6), 2018, 1094–1101. <<https://doi.org/10.1039/C7TA09973H>>

100 Z. Yu and others “Transparent wood containing CsxWO_3 nanoparticles for heat-shielding window applications.” *Journal of Materials Chemistry A*, 5(13), 2017, 6019–6024.

101 Y. Li and others, “Transparent wood for functional and structural applications”, *Phil. Trans. R. Soc. A* 376, 2017, n. pag. <<https://doi.org/10.1098/rsta.2017.0182>>

102 M. Zhu and others, “Highly Anisotropic, Highly Transparent Wood Composites”, *Adv. Mater.* 28(26), 2016, 5181–5187. <<https://doi.org/10.1002/adma.201600427>>

103 Y. Li and others, “Optically Transparent Wood: Recent Progress, Opportunities, and Challenges”, *Adv. Optical Mater.* 2018, 6(14), 1800059. <<https://doi.org/10.1002/adom.201800059>>

104 T. Li and others “Wood Composite as an Energy Efficient Building Material: Guided Sunlight Transmittance and Effective Thermal Insulation” *Adv. Energy Mater.* 6(22), 2016, 1601122. <<https://doi.org/10.1002/aenm.201601122>>

105 Y. Li and others “Optically Transparent Wood: Recent Progress, Opportunities, and Challenges”, *Adv. Optical Mater.* 2018, 6(14), 1800059. <<https://doi.org/10.1002/adom.201800059>>

замућења услед додатног расејања светлости на наночестицама¹⁰⁶. Већи садржај неорганских наночестица доводи до њихове агрегације и може резултовати падом чврстоће^{107,108,109}. Ипак, механичка својства композита ПД/ПММА/Cs_xWO₃ са чврстоћом од 59,8 МПа и модулом до 2,72 GPa незнатно се разликују од својстава композита ПД/ПММА (60,1 МПа и 2,67 GPa, респективно). До сличног закључка дошли су Ган и сар. испитујући провидно дрво са диспергованим магнетним честицама (Fe₃O₄). Поред тога, пречници магнетних наночестица много су мањи од таласне дужине видљиве светлости, тако да у великој мери могу смањити рефлексију од површине, што је важно да би се обезбедила добра оптичка пропустљивост¹¹⁰. Са друге стране, са повећањем садржаја Cs_xWO₃ наночестица, апсорпција у НИР опсегу се повећава, али се оптичка пропустљивост смањује због апсорпције светлости од стране наночестица и неусклађености индекса рефракције¹¹¹.

Такође је установљено да вода има занемарљив ефекат на својства ПД, што је важно за комерцијалну примену овог материјала у грађевинском сектору¹¹².

МОГУЋНОСТИ ПРИМЕНЕ ПРОВИДНОГ ДРВЕТА

Постизањем провидности дрвета проширују се постојеће, и отвара широк спектар нових могућности примене овог новог композитног материјала. Прва примена ПД датира из 1992. године, када је Финк припремљене провидне узорке дрвета употребио у циљу лакшег проучавања структуре дрвета¹¹³. Међутим, тек након што су Ли и сарадници 2016. год. детаљније истражили оптичка, топлотна и механичка својства ПД, уочен је велики потенцијал овог материјала за примену у различитим инжењерским областима¹¹⁴. Захваљујући јединственој структури, у комбинацији са одличним механичким и оптичким својствима, провидно дрво се сматра инжењерским материјалом¹¹⁵ који може наћи примену као енергетски

106 Z. Yu and others "Transparent wood containing Cs_xWO₃ nanoparticles for heat-shielding window applications." *Journal of Materials Chemistry A*, 5(13), 2017, 6019–6024.

107 W. Gan and others „Transparent magnetic wood composites based on immobilizing Fe₃O₄ nanoparticles into a delignified wood template“, *J. Mater. Sci.* 52(6), 2016, 3321–3329. <<https://doi.org/10.1007/s10853-016-0619-8>>

108 Z. Yu and others "Transparent wood containing Cs_xWO₃ nanoparticles for heat-shielding window applications." *Journal of Materials Chemistry A*, 5(13), 2017, 6019–6024.

109 Y. Li and others, "Optically Transparent Wood: Recent Progress, Opportunities, and Challenges", *Adv. Optical Mater.* 2018, 6(14), 1800059. <<https://doi.org/10.1002/adom.201800059>>

110 W. Gan and others, *Transparent magnetic wood composites based on immobilizing Fe₃O₄ nanoparticles into a delignified wood template.* *J. Mater. Sci.* 52(6), 2016, 3321–3329. <<https://doi.org/10.1007/s10853-016-0619-8>>

111 Y. Li and others, "Optically Transparent Wood: Recent Progress, Opportunities, and Challenges", *Adv. Optical Mater.* 6(14), 2018, 1800059. <<https://doi.org/10.1002/adom.201800059>>

112 T. Li and others "Wood Composite as an Energy Efficient Building Material: Guided Sunlight Transmittance and Effective Thermal Insulation" *Adv. Energy Mater.* 6(22), (2016) 1601122. <<https://doi.org/10.1002/aenm.201601122>>

113 S. Fink, "Transparent Wood – A New Approach in the Functional Study of Wood Structure.", *Holzforschung* 46, 1992, 403–408.

114 T. Li and others "Wood Composite as an Energy Efficient Building Material: Guided Sunlight Transmittance and Effective Thermal Insulation" *Adv. Energy Mater.* 6(22), 2016, 1601122. <<https://doi.org/10.1002/aenm.201601122>>

115 Q. Xia and others "Solar-assisted fabrication of large-scale, patternable transparent wood" *Sci. Adv.* 7, 2021, n. pag.

ефикасни грађевински материјал^{116,117,118}, за контролу осветљења¹¹⁹, пројектовање паметних зграда, за израду украсних панела, фурнира и намештаја, у уметничком и дизајну ентеријера¹²⁰, а предвиђа се и његова примена у архитектури¹²¹.

Провидно дрво као енергетски ефикасан грађевински материјал

Решавање проблема сталног пораста потражње за енергијом велики је изазов садашњице. Највећи део енергије тренутно се производи из фосилних горива, што резултује великом емисијом гасова који доводе до ефекта стаклене баште, киселих киша и других негативних утицаја на животну средину¹²². Предвиђа се да ће се у периоду од 2012. до 2040. године, потрошња енергије у свету повећати за 48%, уз повећање емисије угљен-диоксида за 34%, што је алармантно и захтева хитну реакцију¹²³. Велики део електричне енергије произведене у свету користи се у грађевинском сектору¹²⁴. Процењено је да потрошња енергије у стамбеним и пословним зградама чини и до 40% укупне потрошње енергије са тенденцијом пораста у наредним деценијама¹²⁵. Према америчком одељењу за енергетику (*US Department of Energy Resources*), у укупној потрошњи енергије у зградама, расвета и климатизација учествују са преко 50%. Због тога су изузетно пожељни грађевински материјали који пружају ефикасну тоplotну изолацију, како би се смањила потрошња енергије за загревање, односно хлађење просторија¹²⁶. Зидови већине стамбених и пословних зграда углавном су добро изоловани материјалима попут дрвета и композитне пене. Међутим, због велике оптичке пропустљивости и врло ниског коефицијента тоplotног ширења, као грађевински материјал за израду прозора традиционално се користи стакло¹²⁷. Стакло обезбеђује природно осветљење током дана, што смањује

116 H. S. Yaddanapudi and others “Fabrication and characterization of transparent wood for next generation smart building applications”, *Vacuum* 146, 2017, 649–654. <<https://doi.org/10.1016/j.vacuum.2017.01.016>>

117 Z. Yu and others “Transparent wood containing CsxWO₃ nanoparticles for heat-shielding window applications.” *Journal of Materials Chemistry A*, 5(13), 2017, 6019–6024.

118 L. Wang and others “Photochromic transparent wood for photo-switchable smart window applications.” *Journal of Materials Chemistry C* 7 (2019): 8649–8654.

119 Q. Xia and others “Solar-assisted fabrication of large-scale, patternable transparent wood” *Sci. Adv.* 7, 2021, n. pag.

120 Q. Fu and others “Transparent plywood as a load-bearing and luminescent biocomposite” *Composites Science and Technology* 164, 2018, 296–303 <<https://doi.org/10.1016/j.compscitech.2018.06.001>>

121 D. Katunský and others “Structural elements with transparent wood in architecture”, *Int. Rev. Appl. Sci. Eng.* 9(2), 2018, 101–106.

122 H. S. Yaddanapudi and others “Fabrication and characterization of transparent wood for next generation smart building applications”, *Vacuum*, 146, 2017, 649–654. <<https://doi.org/10.1016/j.vacuum.2017.01.016>>

123 Y. Li “Optically Transparent Wood Substrate for Perovskite Solar Cells” *ACS Sustainable Chem. Eng.* 7, 2019, 6061–6067. <<https://doi.org/10.1021/acssuschemeng.8b06248>>

124 H. S. Yaddanapudi and others, “Fabrication and characterization of transparent wood for next generation smart building applications”, *Vacuum* 146 (2017), 649–654 <<https://doi.org/10.1016/j.vacuum.2017.01.016>>

125 Q. Fu and others, “Transparent plywood as a load-bearing and luminescent biocomposite”, *Composites Science and Technology* 164, 2018, 296–303 <<https://doi.org/10.1016/j.compscitech.2018.06.001>>

126 T. Li and others “Wood Composite as an Energy Efficient Building Material: Guided Sunlight Transmittance and Effective Thermal Insulation” *Adv. Energy Mater.* 6(22), (2016) 1601122. <<https://doi.org/10.1002/aenm.201601122>>

127 Z. Yu and others “Transparent wood containing CsxWO₃ nanoparticles for heat-shielding window applications.” *Journal of Materials Chemistry A*, 5(13), 2017, 6019–6024.

потрошњу електричне енергије за осветљење, док су кртост, мала отпорност на удар и проблеми са одсјајем¹²⁸, ограничавајући фактори за употребу стакла у грађевинском сектору. Поред тога, релативно велика топлотна проводљивост стакла резултује смањењем укупне топлотне изолације зграде, тако да прозори имају кључну улогу у управљању енергијом у зградама¹²⁹.

У циљу уштеде енергије јавља се потреба за развијањем алтернативних, енергетски ефикасних грађевинских материјала, који, у комбинацији са повољним механичким својствима, омогућују бољу топлотну изолацију, уз пријатно унутрашње осветљење ефикасним искоришћењем сунчеве светлости¹³⁰.

Грађевински материјали на бази провидног дрвета, које одликује висока оптичка пропустљивост (преко 80%) у целом опсегу таласних дужина видљиве светлости (од 400 nm до 800 nm) и замућеност (преко 70%), ниска густина, добра механичка својства као и нижа топлотна проводљивост у поређењу са стаклом¹³¹, атрактивни су за примену у енергетски ефикасним зградама. Провидно дрво као материјал за прозоре (сл. 6 б) или кров (сл. 6 в) омогућава коришћење природног дневног светла, чиме смањује утрошак енергије и негативан утицај вештачког осветљења, док замућеност, на исти начин као матирано стакло, обезбеђује приватност^{132,133} (сл. 5). Поред тога, кров од ПД обезбедио би равномерније и угодније осветљење током дана, уз константнију температуру просторија¹³⁴ (сл. 6 в).

Због добрих механичких својстава, ламинирано провидно дрво може се користити као носећи грађевински материјал, чак и са могућностима емитовања светлости уколико се, током производног процеса, оплемени луминисцентним наночестицама¹³⁵.

Провидно дрво као материјал за израду термоизолационих прозора

Поред уштеде енергије за осветљење коришћењем природног дневног светла, разматран је и потенцијал примене ПД за топлотну изолацију, што додат-

128 Q. Fu and others "Transparent plywood as a load-bearing and luminescent biocomposite", *Composites Science and Technology* 164, 2018, 296–303 <<https://doi.org/10.1016/j.compscitech.2018.06.001>>

129 T. Li and others "Wood Composite as an Energy Efficient Building Material: Guided Sunlight Transmittance and Effective Thermal Insulation" *Adv. Energy Mater.* 6(22), 2016, 1601122. <<https://doi.org/10.1002/aenm.201601122>>

130 R. Mi and others, "Scalable aesthetic transparent wood for energy efficient buildings", *Nature Communications*, 11, 2020, 3836, <<https://doi.org/10.1038/s41467-020-17513-w>>

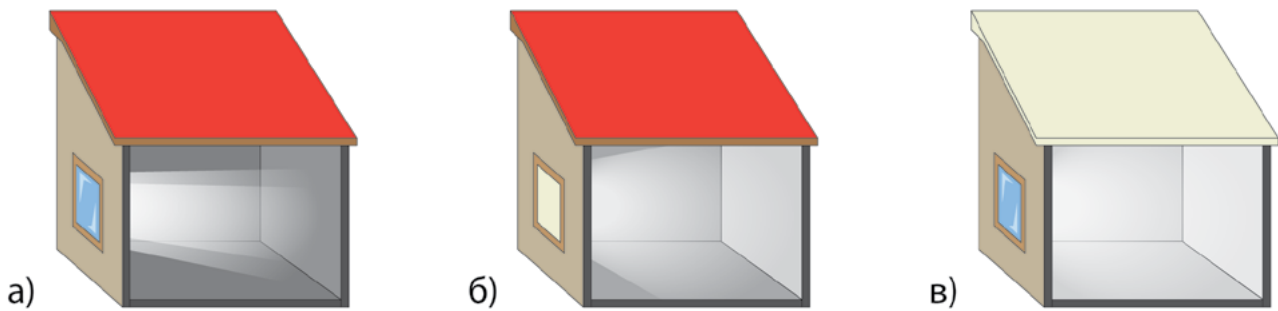
131 Y. Li and others, "Optically Transparent Wood: Recent Progress, Opportunities, and Challenges", *Adv. Optical Mater.* 2018, 6(14), 1800059. <<https://doi.org/10.1002/adom.201800059>>

132 H. S. Yaddanapudi and others "Fabrication and characterization of transparent wood for next generation smart building applications", *Vacuum*, 146, 2017, 649–654. <<https://doi.org/10.1016/j.vacuum.2017.01.016>>

133 Z. Yu and others "Transparent wood containing CsxWO₃ nanoparticles for heat-shielding window applications." *Journal of Materials Chemistry A*, 5(13), 2017, 6019–6024.

134 T. Li and others "Wood Composite as an Energy Efficient Building Material: Guided Sunlight Transmittance and Effective Thermal Insulation" *Adv. Energy Mater.* 6(22), (2016) 1601122. <<https://doi.org/10.1002/aenm.201601122>>

135 Q. Fu and others, "Transparent plywood as a load-bearing and luminescent biocomposite", *Composites Science and Technology* 164, 2018, 296–303 <<https://doi.org/10.1016/j.compscitech.2018.06.001>>



Сл. 6

но може смањити потрошњу електричне енергије за климатизацију и грејање^{136,137,138,139,140}.

Како је претходно речено, симулацијом сунчевог зрачења на моделима кућа, Ју (Yu) и сарадници су показали да температура спорије расте у унутрашњости куће са ПД него са стаклом¹⁴¹. Стога се сматра да се ПД може користити као материјал за израду термоизолационих прозора, јер поред мање топлотне проводности од стакла, има мању густину и већу чврстоћу на удар¹⁴².

Поред тога, додатком ИР-адсорбујућих наночестица ($CsxWO_3$, на пример) провидном дрвету за израду прозора, може се додатно повећати заштита од топлоте¹⁴³. Ју и сар. демонстрирали су примену композитног материјала $CsxWO_3$ /PMMA/ПД за зграде/прозоре са функцијом заштите од топлоте. Симулацијом сунчевог зрачења на моделима кућа поређени су ефекти заштите од топлотног зрачења $CsxWO_3$ /PMMA/ПД композита и обичног стакла. Прозор $CsxWO_3$ /PMMA/ПД резултовао је нижим порастом температуре у унутрашњости у поређењу са уобичајеним стакленим прозором. После десет минута континуираног излагања зрачењу, температура у унутрашњости модела куће са обичним стаклом имала је значајно већи пораст (са 21,5 °C на 41,5 °C) у поређењу са температуром модела куће са $CsxWO_3$ /PMMA/ПД композитом (од 21,6 °C до 26,8 °C). Истовремено, током ове симулације прозор од провидног дрвета резултовао је порастом температуре у просторији са 24,7 °C на 36,5 °C. На овај начин су потврђене одличне перформансе композита $CsxWO_3$ /PMMA/ПД у погледу заштите од топлоте, па се може разматрати његова примена као новог, еколошки при-

136 H. S. Yaddanapudi and others "Fabrication and characterization of transparent wood for next generation smart building applications", *Vacuum*, 146, 2017, 649–654. <<https://doi.org/10.1016/j.vacuum.2017.01.016>>

137 Z. Yu and others "Transparent wood containing $CsxWO_3$ nanoparticles for heat-shielding window applications." *Journal of Materials Chemistry A*, 5(13), 2017, 6019–6024.

138 Q. Fu and others, "Transparent plywood as a load-bearing and luminescent biocomposite", *Composites Science and Technology* 164, 2018, 296–303 <<https://doi.org/10.1016/j.compscitech.2018.06.001>>

139 T. Li and others "Wood Composite as an Energy Efficient Building Material: Guided Sunlight Transmittance and Effective Thermal Insulation" *Adv. Energy Mater.* 6(22), 2016, 1601122. <<https://doi.org/10.1002/aenm.201601122>>

140 Y. Li and others, "Lignin-Retaining Transparent Wood, *ChemSusChem*", 10(17), 2017, 3445–3451. <<https://doi.org/10.1002/cssc.201701089>>

141 Z. Yu and others "Transparent wood containing $CsxWO_3$ nanoparticles for heat-shielding window applications." *Journal of Materials Chemistry A*, 5(13), 2017, 6019–6024.

142 Y. Li and others, "Lignin-Retaining Transparent Wood, *ChemSusChem*", 10(17), 2017, 3445–3451. <<https://doi.org/10.1002/cssc.201701089>>

143 Y. Li and others, "Lignin-Retaining Transparent Wood, *ChemSusChem*", 10(17), 2017, 3445–3451. <<https://doi.org/10.1002/cssc.201701089>>

хватљививог материјала, који својом функцијом заштите од топлотног зрачења смањује потрошњу енергије за климатизацију¹⁴⁴.

На сличан начин, испитивана је способност заштите од топлоте композита направљених импрегнацијом делигнификованих узорак дрвета епокси смолом са додатком ванадијум-диоксид/волфрамових (W/VO_2) наночестица. Приликом теста симулације сунчевог зрачења установљено је да температура у унутрашњости модела куће са прозором од композита W/VO_2 /епокси/ПД спорије расте у поређењу са моделом куће од ПД и стакла, јер VO_2 наночестице рефлектују значајну количину топлоте (ИР зрачења). На тај начин потврђена су добра својства заштите од топлотног зрачења ових композита. Поред ниске топлотне проводљивости ($0,20 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\text{K}^{-1}$) и добрих терморегулационих својстава, ови композити су показали и добра механичка својства, уз оптичку пропустљивост од 68,2%¹⁴⁵.

Провидно дрво као материјал за израду паметних прозора

Један од начина побољшања енергетске ефикасности зграде је контролисање пропуштене светлости применом такозваних „паметних прозора“, који су оплемењени електрохромним материјалима у циљу контроле упадног зрачење. Због добрих механичких својстава као што су чврстоћа и добра отпорност на удар, затим мале топлотне проводљивости и дифузне пропустљивости светлости (80%, уз замућеност од 70%), ПД има велики потенцијал да замени стакло у „паметним прозорима“¹⁴⁶. Наношењем електрохромних полимера у облику премаза на подлогу од ПД израђени су електрохромни уређаји за контролу пропуштене светлости, који су показали добре перформансе промене боје и ефикасности обојења, и то при ниским погонским напоном ($0,8 \text{ V}$)¹⁴⁷.

Наношењем течних кристала диспергованих у полимер (PDLC) у облику филма на подлогу од провидног дрвета¹⁴⁸ направљен је други тип „паметног прозора“, чија су својства регулисана променом оријентације течних кристала електричним пољем. Овај оптички уређај карактерише висока заштита од зрачења, а применом напајања постаје провидан¹⁴⁹.

Фотохромно провидно дрво добијено додатком фотохромних честица у преполимер може се такође користити за израду паметних прозора који мењају боју при промени таласне дужине ЕМ зрачења. Поред интензивне промене боје од љубичасте (УВ) у безбојну (видљива светлост), коју показује фотохромно ПД

144 Z. Yu and others “Transparent wood containing $CsxWO_3$ nanoparticles for heat-shielding window applications.” *Journal of Materials Chemistry A*, 5(13), 2017, 6019–6024.

145 L. Zhang and others “Transparent Wood Composites Fabricated by Impregnation of Epoxy Resin and W-doped VO_2 Nanoparticles for Application in Energy-saving Windows” *ACS Appl. Mater. Interfaces* 12(31) 2020, 34777–34783. <<https://doi.org/10.1021/acsaami.0c06494>>

146 A.W. Lang and others “Transparent Wood Smart Windows: Polymer Electrochromic Devices Based on Poly(3,4-Ethylenedioxythiophene):Poly(Styrene Sulfonate) Electrodes” *ChemSusChem* 11(5), 2018, 854–863. <<https://doi.org/10.1002/cssc.201702026>>

147 Y. Li and others, “Transparent wood for functional and structural applications”, *Phil. Trans. R. Soc. A* 376, 2017, n. pag. <<https://doi.org/10.1098/rsta.2017.0182>>

148 T. Li and others “Wood Composite as an Energy Efficient Building Material: Guided Sunlight Transmittance and Effective Thermal Insulation” *Adv. Energy Mater.* 6(22), 2016, 1601122. <<https://doi.org/10.1002/aenm.201601122>>

149 Y. Li and others, “Optically Transparent Wood: Recent Progress, Opportunities, and Challenges”, *Adv. Optical Mater.* 2018, 6(14), 1800059. <<https://doi.org/10.1002/adom.201800059>>

оплемењено једињењем на бази спиропирана додатим у преполимер ММА, применом различитих шаблона као фото-заклона, на прозорима од фотохромног ПД настају различите декоративне слике¹⁵⁰.

Провидно дрво као материјал за опремање ентеријера

Због јединствених естетских својстава, која су резултат комбинације очуване текстуре и постигнуте провидности, као и одличних механичких својстава, ПД може се користити за израду дизајнерског намештаја¹⁵¹, као замена за фурнире, за декорацију и друге елементе за опремање ентеријера¹⁵².

Додавањем активних оптичких медија у облику наночестица (квантних тачака) у подлогу од провидног дрвета настаје луминесцентно провидно дрво (ЛПД), чиме се може се проширити спектар примене овог новог материјала. ЛПД карактерише дифузна луминисценција, а у зависности од врсте, односно емисионих боја уграђених наночестица^{153,154}, емитована светлост може бити и у више боја¹⁵⁵. Исто као и ПД, ЛПД може се користити за дизајнерски намештај¹⁵⁶, уместо фурнира, за декорацију¹⁵⁷ као и за израду других, украсних или уметничких предмета, али и као извор светлости¹⁵⁸. У циљу демонстрације примене ПД за израду намештаја направљен је модел стола од ПД (сл. 7 а) и ЛПД са додатком QD-ова са различитим емисионим бојама¹⁵⁹ (сл. 7 б).

Провидно дрво као материјал за соларне ћелије

Поред повећања енергетске ефикасности, провидно дрво може наћи примену и у сектору производње енергије из обновљивих извора. Производња енергије углавном се заснива на експлоатацији фосилних горива, која чине више од 81% примарних извора енергије у свету¹⁶⁰. Све већа потражња за енергијом,

150 L. Wang and others "Photochromic transparent wood for photo-switchable smart window applications." *Journal of Materials Chemistry C*, 7, 2019, 8649–8654.

151 Y. Li and others, "Luminescent transparent wood". *Adv. Opt. Mater.* 5(1), 2016, 1600834 <<https://doi.org/10.1002/adom.201600834>>

152 Q. Fu and others, "Transparent plywood as a load-bearing and luminescent biocomposite", *Composites Science and Technology* 164, 2018, 296–303 <<https://doi.org/10.1016/j.compscitech.2018.06.001>>

153 W. Gan and others "Luminescent and transparent wood composites fabricated by Poly(methyl methacrylate) and $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3\text{:Eu}^{3+}$ nanoparticle impregnation" *ACS Sustain. Chem. Eng.* 5(5), 2017, 3855–3862 <<https://doi.org/10.1021/acssuschemeng.6b02985>>

154 Y. Li and others, "Luminescent transparent wood". *Adv. Opt. Mater.* 5(1), 2016, 1600834 <<https://doi.org/10.1002/adom.201600834>>

155 Q. Fu and others, "Transparent plywood as a load-bearing and luminescent biocomposite", *Composites Science and Technology* 164, 2018, 296–303 <<https://doi.org/10.1016/j.compscitech.2018.06.001>>

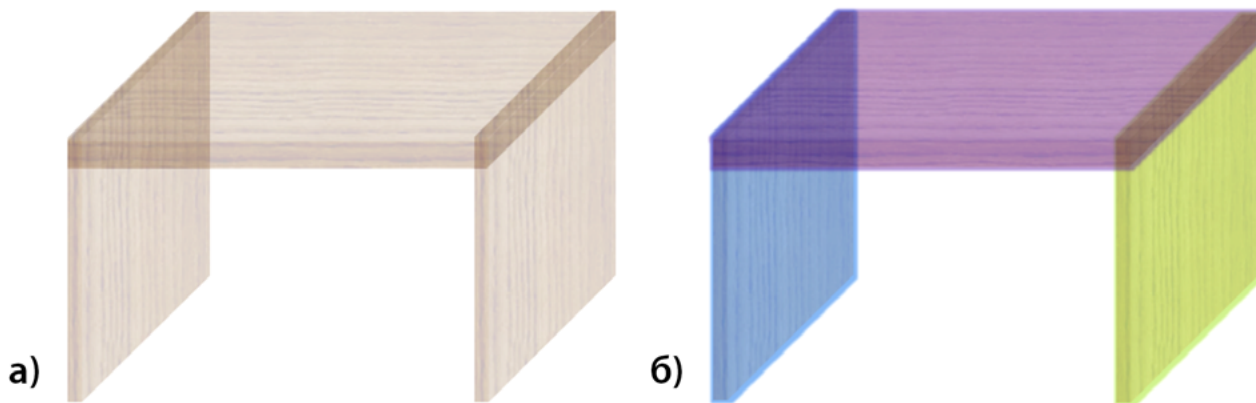
156 Y. Li and others, "Luminescent transparent wood". *Adv. Opt. Mater.* 5(1), 2016, 1600834 <<https://doi.org/10.1002/adom.201600834>>

157 Q. Fu and others, "Transparent plywood as a load-bearing and luminescent biocomposite", *Composites Science and Technology* 164, 2018, 296–303 <<https://doi.org/10.1016/j.compscitech.2018.06.001>>

158 Y. Li and others, "Transparent wood for functional and structural applications"; *Phil. Trans. R. Soc. A* 376, 2017, n. pag. <<https://doi.org/10.1098/rsta.2017.0182>>

159 Y. Li and others, "Lignin-Retaining Transparent Wood, *ChemSusChem*", 10(17), 2017, 3445–3451. <<https://doi.org/10.1002/cssc.201701089>>

160 S. Ladanai, and J. Vinterbäck. Global Potential of Sustainable Biomass for Energy." 013. Uppsala 2009: SUL, Swedish university of agriculture science, Department of Energy and Technology, 2009" <<http://pub.epsilon.slu.se/4523/>>



Сл. 7

ограниченост фосилних ресурса, а нарочито загађење животне средине и климатске промене, захтевају развој нових и повећање ефикасности постојећих обновљивих извора енергије¹⁶¹. Једна од технологија производње енергије из обновљивих извора заснива се на фотоелектричном ефекту који омогућава трансформацију сунчеве енергије у електричну. Овај процес одвија се у соларним (фотонапонским) ћелијама посредством полупроводничких материјала¹⁶². Међутим, ефикасност постојећих соларних уређаја није задовољавајућа, па се траже начини за повећање њихове ефикасности¹⁶³. Велико расејање светлости атрактивна је особина за примену провидног дрвета као „дифузног“ структурног материјала за фотонапонске уређаје као што су соларне ћелије¹⁶⁴. Због феномена расејања, светлост у соларној ћелији прелази дужи пут. На тај начин побољшава се интеракција између светлосног таласа и активног медијума, чиме је омогућена већа ефикасност соларних ћелија. После постављања ПД на површину соларних ћелија, њихова ефикасност повећана је за 18,02%¹⁶⁵. Поред тога, применом ПД као подлоге за перовскитне соларне ћелије, постигнута је ефикасност ових уређаја од 16,8%¹⁶⁶.

Провидно дрво као материјал за сензоре загађивача ваздуха

Један од често присутних загађивача ваздуха у ентеријеру је формалдехид (ФА), који се обично емитује из грађевинских материјала, а има веома негативан утицај на здравље, нарочито на нервни и респираторни систем, као и потенцијално

¹⁶¹ E.M.W. Smeets and others "A bottom-up assessment and review of global bio-energy potentials to 2050", *Prog Energy Combust Sci* 2007; 33:56–106.

¹⁶² B.Xu, and others "Carbazole-Based Hole-Transport Materials for Efficient Solid-State Dye-Sensitized Solar Cells and Perovskite Solar Cells". *Adv. Mater.* 2014, 26 (38), 6629–6634.

¹⁶³ M. Petrus, and others "Capturing the Sun: A Review of the Challenges and Perspectives of Perovskite Solar Cells". *Adv. Energy Mater.* 2017, 7(16), 1700264.

¹⁶⁴ Y. Li and others, "Optically Transparent Wood: Recent Progress, Opportunities, and Challenges", *Adv. Optical Mater.* 2018, 6(14), 1800059. <<https://doi.org/10.1002/adom.201800059>>

¹⁶⁵ M. Zhu and others, "Transparent and haze wood composites for highly efficient broadband light management in solar cells". *Nano Energy* 26, 2016, 332–339. <<https://doi.org/10.1016/j.nanoen.2016.05.020>>

¹⁶⁶ Y. Li "Optically Transparent Wood Substrate for Perovskite Solar Cells" *ACS Sustainable Chem. Eng.* 7, 2019, 6061–6067. <<https://doi.org/10.1021/acssuschemeng.8b06248>>

канцерогено дејство¹⁶⁷. Детекција ФА захтева сложене и дуготрајне процедуре, од узорковања до лабораторијских анализа, при чему резултат не одражава загађење у реалном времену. Функционализацијом грађевинских материјала уграђивањем високо селективних оптичких сензора велике осетљивости на ФА, могло би се у реалном времену визуелно детектовати загађење овим гасом. У ту сврху може се користити ЛПД, са уграђеним угљеничним квантним тачакама, за које је својствена луминисценција осетљива на присуство ФА. Такав грађевински материјал који има способност да реагује на стимулансе, може послужити за визуелну детекцију ФА у реалном времену¹⁶⁸.

Остале могућности примене провидног дрвета

Како је већ речено, додавањем полупроводничких нанокристала, металних наночестица или биоактивних молекула уведе се нова својства и/или нове функције, чиме се проширују могућности примене провидног дрвета¹⁶⁹. Поред већ наведених потенцијалних примена, разматра се употреба ПД у биоинжењерингу, за израду флексибилне електронике, антена, а оптичка својства чине га погодним за примену у фотоелектроници, за израду фотонских уређаја¹⁷⁰, оптичких инфраструктура, панела осетљивих на додир¹⁷¹, светлосних сензора, уређаја за складиштење енергије¹⁷² и слично.

Провидни магнетни материјали са уграђеним магнетним наночестицама (Fe_3O_4 или $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3@YVO_4:\text{Eu}^{3+}$) основ су за развој материјала на бази дрвета за магнето-оптичку примену^{173,174}. Комбинација добрих механичких својстава ПД и магнетне функције Fe_3O_4 наночестица дају потенцијал композиту $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{ММА}/\text{ПД}$ за примену у магнетним зградама које проводе светлост¹⁷⁵. Такође се разматра употреба провидног дрвета са луминисцентним магнетним квантним

167 Y.Liu and others "Luminescent Transparent Wood Based on Lignin-Derived Carbon Dots as a Building Material for Dual-Channel, Real-Time, and Visual Detection of Formaldehyde Gas" ACS Appl. Mater. Interfaces 12, 2020, 36628–36638.

168 Y.Liu and others "Luminescent Transparent Wood Based on Lignin-Derived Carbon Dots as a Building Material for Dual-Channel, Real-Time, and Visual Detection of Formaldehyde Gas" ACS Appl. Mater. Interfaces 12, 2020, 36628–36638.

169 Q. Fu and others, "Transparent plywood as a load-bearing and luminescent bio-composite", Composites Science and Technology 164,2018, 296–303 <<https://doi.org/10.1016/j.compscitech.2018.06.001>>

170 Zhu and others "Transparent and haze wood composites for highly efficient broadband light management in solar cells" Nano Energy 26, 2016, 332–339 <<https://doi.org/10.1016/j.nanoen.2016.05.020>>

171 Q. Xia and others "Solar-assisted fabrication of large-scale, patternable transparent wood" Sci. Adv. 7, 2021, n. pag.

172 Q. Fu and others, "Transparent plywood as a load-bearing and luminescent bio-composite", Composites Science and Technology 164,2018, 296–303 <<https://doi.org/10.1016/j.compscitech.2018.06.001>>

173 W. Gan and others, *Transparent magnetic wood composites based on immobilizing Fe_3O_4 nanoparticles into a delignified wood template*. J. Mater. Sci. 52(6), 2016, 3321–3329. <<https://doi.org/10.1007/s10853-016-0619-8>>

174 W. Gan and others "Luminescent and transparent wood composites fabricated by Poly(methyl methacrylate) and $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3@YVO_4:\text{Eu}^{3+}$ nanoparticle impregnation" ACS Sustain. Chem. Eng. 5(5), 2017, 3855–3862 <<https://doi.org/10.1021/acssuschemeng.6b02985>>

175 W. Gan and others, *Transparent magnetic wood composites based on immobilizing Fe_3O_4 nanoparticles into a delignified wood template*. J. Mater. Sci. 52(6), 2016, 3321–3329. <<https://doi.org/10.1007/s10853-016-0619-8>>

тачкама, као што су наночестице $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$ @ YVO_4 : Eu^{3+} , за магнетне прекидаче и заштиту од електромагнетних сметњи^{176,177}.

ПРАВЦИ БУДУЋЕГ РАЗВОЈА

Поред нових могућности за примену, у будућности се очекује усмеравање истраживања на превазилажење постојећих проблема у производњи провидног дрвета, у смислу даљег побољшања оптичких и механичких својстава и изна-лажења нових производних метода. Наиме, процеси делигнификације током израде провидног дрвета су дуготрајни и, због примене хемикалија, нису увек еколошки прихватљиви. Поред тога, уклањање лигнина доводи до слабљења структуре дрвета, што значајно отежава руковање (манипулацију), па израда производа већих димензија представља велики изазов. Једно од решења је уклањање само хромофорних група, али то доводи у питање стабилност оптичких перформанси током дуже примене¹⁷⁸.

До сада направљени провидни узорци дрвета, због малих димензија, пре свега дебљине, нису прихватљиви за примену у зградама, где се захтевају (провидне) дрвене конструкције великих димензија. Међутим, са повећањем дебљине светлост прелази дужи пут унутар провидног дрвета, при чему, услед апсорпције и расипања, долази до слабљење интензитета светлости, и пада оптичке пропустљивости. Повећање дебљине уз очување довољне оптичке пропустљивости намеће потребу за развојем нових производних технологија, које би се успешно примењивале у индустријским размерама.

Такође, потребно је ангажовање на побољшању инфилтрације полимера за израду узорака ПД великих димензија. Својства полимера, као што су индекс преламања, вискозност, компатибилност са ћелијским зидом, скупљање током полимеризације, важна су за израду и перформансе провидног дрвета. Стога је и избор одговарајуће полимерне формулације од виталног значаја у даљем развоју ове области.

ИЛУСТРАЦИЈЕ

1. SEM (SEM) слике порозне ћелијске структуре дрвета пољског јасена. а) попречни пресек (увећање 50x); б) попречни пресек – механичка влакна (увећање 1000x) в); попречни пресек са означеним трахејама (анатомски елементи са проводном функцијом) (увећање 200x); г) радијални пресек са означеним аксијално оријентисаним (механичка влакна и трахејае) и радијално оријентисаним (паренхим) ћелијама (увећање 100 пута).
SEM micrographs of the porous cellular structure of Narrow leaved Ash wood: а) cross-section (50 x); б) cross-section - mechanical fibers (1000x); в) cross-section with marked vessels (anatomical elements with transport function) (200x); г) radial cross-section with marked axial orientated (mechanical fibers and vessels) and radial orientated (parenchyma) cells (100x).
2. Пут светлости кроз делигнификоване ћелије дрвета А) испуњене ваздухом; Б) испуњене полимером приближно исте оптичке густине као ћелијски зид.
Light path through delignified wood cells: А) filled with air; Б) filled with polymer of the similar optical density as the wood cell.
3. Приказ поступка добијања провидног дрвета: а) оригинални узорак дрвета махагонија; б) делигнификован узорак дрвета махагонија; в) делигнификован узорак дрвета махагонија испуњен епокси смолом (провидно дрво) са SmartArt логом; г) ћелија дрвета; д) ћелија

176 Y. Li and others, "Transparent wood for functional and structural applications", Phil. Trans. R. Soc. A 376, 2017, n. pag. <<https://doi.org/10.1098/rsta.2017.0182>>

177 Y. Li and others, "Optically Transparent Wood: Recent Progress, Opportunities, and Challenges", Adv. Optical Mater. 2018, 6(14), 1800059. <<https://doi.org/10.1002/adom.201800059>>

178 Y. Li and others, "Transparent wood for functional and structural applications", Phil. Trans. R. Soc. A 376, 2017, n. pag. <<https://doi.org/10.1098/rsta.2017.0182>>

- делигнификованог дрвета испуњена ваздухом; ђ) ћелија делигнификованог дрвета испуњена полимером приближно исте оптичке густине као ћелијски зид.
 Illustrated procedure for obtaining the transparent wood: a) a sample of the original mahogany wood; б) delignified sample of mahogany wood; в) delignified sample of mahogany wood filled with epoxy resin (transparent wood) with *SmartArt* logo; г) wood cell; д) delignified wood cell filled with air; ђ) delignified wood cell filled with polymer of the similar optical density as the wood cell.
4. Оптичка proustljivost kroz delignifikovane ćelije дрвета A) ispunjene vazduhom; Б) ispunjene polimerom približno iste optičke gustine kao ćelijski zid
 Optical transmittance through delignified wood cells: A) filled with air; Б) filled with polymer of the similar optical density as the wood cell.
 5. Приказ функционализације провидног дрвета луминисцентним квантним тачкама (QD)
 Transparent wood functionalization displayed by luminescent quantum dots (QD).
 6. Prikaz osvetljenosti unutrašnjosti prostorije sa: a) staklenim prozorom; б) prozorom od providnog дрвета; в) krovom od providnog дрвета.
 The illustration of the effects on interior illumination in case of: a) glass window; б) transparent wood window; в) transparent wood roof.
 7. Приказ стола од провидног дрвета и луминисцентног провидног дрвета
 Table made of transparent wood and luminescent transparent wood.

ЛИТЕРАТУРА

- Amidon**, T.E., Bolton, T.S., Francis, R.C., Gratien, K. “Effect of Hot Water Pre-Extraction on Alkaline Pulping of Hardwoods”, Pulping and Engineering Conference, Atlanta, November 5–8, 2006.
- Васиљевић** Светислав, *Анаџомија шумској дрвећа*, Завод за издавање уџбеника СРС, Београд, 1967.
- Gan** Wentao, L. Gao, Qingfeng Sun, Chunde Jin, Y. Lu and J. Li. “Multifunctional wood materials with magnetic, superhydrophobic and anti-ultraviolet properties.” Applied Surface Science 332, 2015, 565–572. <<https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2015.01.206>>
- Gan** Wentao, Gao Likun, Xiao Shaoliang, Zhang Wenbo, Zhan Xianxu and Li Jian “Transparent magnetic wood composites based on immobilizing Fe₃O₄ nanoparticles into a delignified wood template”. *Journal of Materials Science* 52(6), 2016, 3321–3329. <<https://doi.org/10.1007/s10853-016-0619-8>>
- Gan** Wentao, Xiao Shaoliang, Gao Likun, Gao Runan, Li Jian, Zhan Xianx., “Luminescent and transparent wood composites fabricated by Poly(methyl methacrylate) and γ-Fe₂O₃@YVO₄:Eu³⁺ nanoparticle impregnation” ACS Sustain. Chem. Eng. 5(5), 2017, 3855–3862 <<https://doi.org/10.1021/acssuschemeng.6b02985>>
- Gassan** J., Bledzki A.K. *Alkali Treatment of Jute Fibers: Relationship Between structure and Mechanical Properties*, Journal of Applied Polymer Science, 71, 1999, 623–629.
- Gibson** Lorna J, *The hierarchical structure and mechanics of plant materials*, J. R. Soc. Interface, 9(76), 2012, 2749–2766.
- Guo** Huizhang, Fuchs Peter, Cabane Etienne, Michen Benjamin, Hagendorfer Harald, Romanyuk Yaroslav E., Burgert Ingo, “UV protection of wood surfaces by controlled morphology fine-tuning of ZnO nanostructures.” *Holzforschung* 70(8), 2016, 699–708. <<https://doi.org/10.3929/ethz-b-000259380>>
- Deka**, M. and Saikia, C.N. “Chemical modification of Wood with thermosetting resin: effect on dimensional stability i strength property”. *Bioresource Technology*, 73(2), 2000, 179–181. <[https://doi.org/10.1016/S0960-8524\(99\)00167-4](https://doi.org/10.1016/S0960-8524(99)00167-4)>
- Döring** Stefan, *Power from Pellets: Technology and Applications*, Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2013.
- Fink** S. “Transparent Wood – A New Approach in the Functional Study of Wood Structure.”, *Holzforschung* 46, 1992, 403–408.
- Zhang** Liangmiao, Wang An, Zhu Tianli, Chen Zhang, Wu Yupeng, Gao Yanfeng” *Transparent Wood Composites Fabricated by Impregnation of Epoxy Resin and W-doped VO₂ Nanoparticles for Application in Energy-saving Windows*” ACS Appl. Mater. Interfaces 12(31) 2020, 34777–34783. <<https://doi.org/10.1021/acsaami.0c06494>>
- Zhu** Mingwei, Li Tian, Davis Chelsea S., Yao Yonggang, Dai Jiaqi, Wang Yanbin, AlQatari Feras, Gilman Jeffrey W., Hu Liangbing “Transparent and haze wood composites for highly efficient broadband light management in solar cells” *Nano Energy* 26, 2016, 332–339 <<https://doi.org/10.1016/j.nanoen.2016.05.020>>
- Zhu** Mingwei, Song Jianwei, Li Tian, Gong Amy, Wang Yanbin, Dai Jiaqi, Yao Yonggang, Luo Wei, Henderson Doug and Hu Liangbing “Highly Anisotropic, Highly Transparent Wood Composites” *Advanced materials*, 28(26), 2016, 5181–5187 <<https://doi.org/10.1002/adma.201600427>>
- Zhu** Hongli, Luo Wei, Ciesielski Peter N., Fang Zhiqiang, Zhu J. Y., Henriksson Gunnar, Himmel Michael E., and Liangbing Hu, “Wood-Derived Materials for Green Electro-

tics, *Biological Devices, and Energy Applications*”, Chem. Rev. 116(16), 2016, 9305–9374 <<https://doi.org/10.1021/acs.chemrev.6b00225>>

Jia Chao, Chen Chaoji, Mi Ruiyu, Li Tian, Dai Jiaqi, Yang Zhi, Pei Yong, He Shuaiming, Bian Huiyang, Jang Soo-Hwan, Zhu J. Y., Yang Bao and Hu Liangbing “*Clear Wood toward High-Performance Building Materials*” ACS Nano 2019 13(9), 9993–10001 <<https://doi.org/10.1021/acsnano.9b00089>>

Katunský D., Kanócz J., Karla V. “*Structural elements with transparent wood in architecture*”, Int. Rev. Appl. Sci. Eng. 9(2), 2018, 101–106.

Ladanai, Svetlana, and Johan Vinterbäck. “Global Potential of Sustainable Biomass for Energy.” 013. Uppsala 2009: SUL, Swedish university of agriculture science, Department of Energy and Technology, 2009. <<http://pub.epsilon.slu.se/4523/>>

Liang Augustus W., Li Yuanyuan, De Keersmaecker Michel, Shen Eric, Österholm Anna M., Berglund Lars, and Reynolds John R. “*Transparent Wood Smart Windows: Polymer Electrochromic Devices Based on Poly(3,4-Ethylenedioxythiophene):Poly(Styrene Sulfonate) Electrodes*” ChemSusChem 11(5), 2018, 854–863. <<https://doi.org/10.1002/cssc.201702026>>

Lande Stig, Westin Mats and Schneide Marc, “*Properties of furfurylated wood*”. Scandinavian Journal of Forest Research, 19(sup5), 2004, 22–30. <<https://doi.org/10.1080/0282758041001915>>

Li Yuanyuan, Zhu Hongli, Gu H, Dai Hongqi, Fang Zhiqiang, Weadock Nicholas J., Guo **Zhanhu**, Hu Liangbing, “*Strong transparent magnetic nanopaper prepared by immobilization of Fe₃O₄ nanoparticles in a nanofibrillated cellulose network*”, Journal of Materials Chemistry 1, 2013, 15278–15283.

Li Yuanyuan, Yu Shun, Veinot Jgc, Linnros Jan, Berglund Lars, Sychugov Ilya, “*Luminescent transparent wood*”. Adv. Opt. Mater. 5(1), 2016, 1600834 <<https://doi.org/10.1002/adom.201600834>>

Li Yuanyuan, Fu Qiliang, Yu Shun, Yan Min and Berglund Lars. “*Optically transparent wood from a nanoporous cellulosic template: combining functional and structural performance*” Biomacromolecules 17, 2016, 1358–1364.

Li Tian, Zhu Mingwei, Yang Zhi, Song Jianwei, Dai Jiaqi, Yao Yonggang, Luo Wei, Pastel Glenn, Yang Bao, and Hu Liangbing, “*Wood Composite as an Energy Efficient Building Material: Guided Sunlight Transmittance and Effective Thermal Insulation*”, Adv. Energy Mater. 2016, 6(22), 1601122 <<https://doi.org/10.1002/aenm.201601122>>

Li Yuanyuan, Fu Qiliang, Ramiro Rojas, Yan Min, Martin Lawoko and Lars Berglund “*Lignin-Retaining Transparent Wood*”, ChemSusChem, 10(17), 2017, 3445–3451. <<https://doi.org/10.1002/cssc.201701089>>

Li Yuanyuan, Yang Xuan, Fu Qiliang, Rojas Ramiro, Yan Min and Berglund Lars, *Towards centimeter thick transparent wood through interface manipulation*, Journal of Materials Chemistry A, 3(6), 2018, 1094–1101. <<https://doi.org/10.1039/C7TA09973H>>

Li Yuanyuan, Fu Qiliang, Yang Xuan, Berglund Lars, “*Transparent wood for functional and structural applications*”, Phil. Trans. R. Soc. A 376, 2017, n.pag. <<https://doi.org/10.1098/rsta.2017.0182>>

Li Yuanyuan, Vasileva Elena, Sychugov Ilya, Popov Sergei, and Berglund Lars, *Optically Transparent Wood: Recent Progress, Opportunities, and Challenges*, Advanced Optical Materials 6(14), 2018, 1800059, <<https://doi.org/10.1002/adom.201800059>>

Li Yuanyuan, Cheng Ming, Jungstedt Erik, Xu Bo, Sun Licheng and Berglund Lars “*Optically Transparent Wood Substrate for Perovskite Solar Cells*” ACS Sustainable Chem. Eng. 7, 2019, 6061–6067. <<https://doi.org/10.1021/acssuschemeng.8b06248>>

Liu Yushan, Yang Haiyue, Ma Chunhui, Luo Sha, Xu Mingcong, Wu Zhenwei, Li Wei and Liu Shouxin, “*Luminescent Transparent Wood Based on Lignin-Derived Carbon Dots as a Building Material for Dual-Channel, Real-Time, and Visual Detection of Formaldehyde Gas*” ACS Appl. Mater. Interfaces 12, 2020, 36628–36638.

Mi Ruiyu, Chen Chaoji, Keplinger Tobias, Pei Yong, He Shuaiming, Liu Dapeng, Li Jianguo, Dai Jiaqi, Hitz Emily, Yan Bao, Burgert Ingo and Hu Liangbing “*Scalable aesthetic transparent wood for energy efficient buildings*”, Nature Communications, 11, 2020, 3836, <<https://doi.org/10.1038/s41467-020-17513-w>>

Miljkovic Jovan and Djiporovic Milanka, “*The acetulation of pine and beech for particleboard production*” J. Serb. Chem. Soc. 59 (4), 1994, 225–264.

Petrus, M. L.; Schlipf, J.; Li, C.; Gujar, T. P.; Giesbrecht, N.; Müller-Buschbaum, P.; **Thelakkat**, M.; Bein, T.; Hüttner, S.; Docampo, P. “*Capturing the Sun: A Review of the Challenges and Perspectives of Perovskite Solar Cells*”. Adv. Energy Mater. 2017, 7(16), 1700264.

Popović Jasmina and Điporović-Momčilović Milanka, “*Utica hemijskih tretmana na dimenzionalnu stabilnost drveta poljskog jasena – prvi deo – tangencijalno bubrenje*.” Glasnik Šumarskog fakulteta 106, 2012, 151–168.

Popović J., Popović M., Điporović-Momčilović M., Gavrilović-Grmuša I., “*Effects of the Chemical Treatment Conditions of the Narrow-Leaved Ash (Fraxinus angustifolia Vahl.*

ssp. *Pannonica* Soo & Simon) on the Lap Shear Strength”, *Wood Research*, 60(4), 2015, 543–554.

Popović, J., Điporović-Momčilović, M., Popović, M., Gavrilović-Grmuša, I., “The Influence of Chemical Treatments on Dimensional Stability of Narrow Leaved Ash”, *Proceedings of the World Conference on Timber Engineering (WCTE)*, August 22–25, 2016, Vienna, Austria, 1627–1634.

Popović Jasmina, Popović Mlađan, Điporović-Momčilović Milanka, Prahin Ana, Dodevski Vladimir, Gavrilović-Grmuša Ivana, “Effects of Water Pretreatment on Properties of Pellets Made from Beech Particles”, *Hem. Ind.*, Vol 75(1), 2021, 39–51. <<https://doi.org/10.2298/HEMIN191224007P>>

Runge T, Wipperfurth P, Zhang C., “Improving biomass combustion quality using a liquid hot water treatment”. *Biofuels*, 4(1), 2013, 73–83. <<https://doi.org/10.4155/bfs.12.70>>

Smeets EMW, Faaij APC, Lewandowski IM, Turkenburg WC. “A bottom-up assessment and review of global bio-energy potentials to 2050”, *Prog Energy Combust Sci* 2007(33), 56–106.

Stevanović-Janežić Tatjana, *Hemija drveta sa hemijskom preradom. Deo 1. Hemija drveta*, Jugoslavijapublik, Beograd, 1993.

Tjeerdsma, B. F., Boonstra, M., Pizzi, A., Tekely, P., Militz, H. “Characterisation of thermally modified Wood: molecular reasons for Wood performance improvement” *Holz als Roh – und Werkstoff*, 56, 1998, 149–53. <https://doi.org/10.1007/s001070050287>

Tran H., and Vakkilainen E.K., “The kraft chemical recovery process”, *TAPPI Kraft Pulp Short Course*, TAPPI, 2008. <http://www.tappi.org/content/events/o8kros/manuscripts/1-1.pdf>, Accessed 19 Aug 2021.

Trey Stacy, Olsson Richard T., Ström Valte, Berglund Lars, Johansson Mats, “Controlled deposition of magnetic particles within the 3-D template of wood: making use of the natural hierarchical structure of wood.” *RSC Advances*, 4(67), 2014, 35678–35685. <<https://doi.org/10.1039/c4ra04715j>>

Fu Qiliang, Yan Min, Jungstedt Erik, Yang Xuan, Li Yuanyuan, Berglund Lars A., “Transparent plywood as a load-bearing and luminescent biocomposite”, *Composites Science and Technology* 164, 2018, 296–303. <<https://doi.org/10.1016/j.compscitech.2018.06.001>>

Furuno T., Imamura H. i Kajita H. “The modification of Wood by treatment with low molecular weight phenol-formaldehyde resin: a properties enhancement with neutralized phenolic-resin i resin penetration into Wood cell walls”, *Wood Science i Technology*, 37 (2004) 349–617.

Hassel Beatriz Ivón, Trey Stacy M., Leijonmarck Simon, Johansson Mats “A Study on the Morphology, Mechanical, and Electrical Performance of Polyaniline-modified wood – A Semiconducting Composite Material” *BioResources*, Vol 9(3), 2014, 5007–5023.

Higuchi Takayoshi, *Biochemistry and Molecular Biology of Wood*, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, New York 1997.

Hill, Callum A.S., *Wood Modification: Chemical, Thermal and Other Processes*, John Wiley & Sons Ltd, Chichester, 2006.

Hoglund Martin, Johansson Mats, Sychugov Ilya, and Berglund Lars A. “Transparent Wood Biocomposites by Fast UV-Curing for Reduced Light-Scattering through Wood/Thiolene Interface Design” *ACS Applied Materials & Interfaces* 12(41), 2020, 46914–46922 <<https://doi.org/10.1021/acsami.0c12505>>

Hosseinaei, O., Wang, S., Rials, G.T., Xing, C., Taylor, A.M., Kelley, S., *Effect of hemicellulose extraction on physical/mechanical properties and mold susceptibility of flakeboard*. *Forest Products Journal* 61(1), 2011, 31–37.

Chen, C., Y. Zhang, Y. Li, J. Dai, Jianwei Song, Y. Yao, Y. Gong, I. Kierzewski, J. Xie and L. Hu. “All-wood, low tortuosity, aqueous, biodegradable supercapacitors with ultra-high capacitance” *Energy and Environmental Science* 10, 2017, 538–545.

Šoškić Borisav M. *Svojstva drveta*, Šumarski fakultet Univerziteta u Beogradu, Beograd, 1991.

Xia Qinqin, Chen Chaoji, Li Tian, He Shuaiming, Gao Jinlong, Wang Xizheng, Hu Liangbing “Solar-assisted fabrication of large-scale, patternable transparent wood” *Science Advances*, 7, 2021, n. pag.

Xu, B.; Sheibani, E.; Liu, P.; Zhang, J.; Tian, H.; Vlachopoulos, N.; Boschloo, G.; Kloos, L.; Hagfeldt, A.; Sun, L. “Carbazole-Based Hole-Transport Materials for Efficient Solid-State Dye-Sensitized Solar Cells and Perovskite Solar Cells”. *Adv. Mater.* 2014, 26 (38), 6629–6634.

Yaddanapudi Haritha Sree, Hickerson Nathan, Saini Shrikant and Tiwari Ashutosh, “Fabrication and characterization of transparent wood for next generation smart building applications”, *Vacuum* 146, 2017, 649–654 <<https://doi.org/10.1016/j.vacuum.2017.01.016>>

Yano Hiroyuki, “Potential strength for resin-impregnated compressed wood” *J. Mater. Sci. Lett.* 20, 2001, 1127–1129. <<https://doi.org/10.1023/A:1010996424453>>

Yao Yongji, Zhang Liangmiao, Chen Zhang, Cao Chuanxiang, Gao Yanfeng, Luo Hongjie, "Synthesis of $CsxWO_3$ nanoparticles and their NIR shielding properties", *Ceramics International*, Vol. 44(12), 2018, 13469–13475, <<https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2018.04.158>>

Yoon S.H., van Heiningen A. „Kraft pulping and papermaking properties of hot-water pre-extracted loblolly pine in an integrated forest products biorefinery“, *Tappi J.* 7(7), 2008, 22–27.

Yu, Ziya, Yongji Yao, J. Yao, Liangmiao Zhang, Z. Chen, Yanfeng Gao and H. Luo. "Transparent wood containing $CsxWO_3$ nanoparticles for heat-shielding window applications." *Journal of Materials Chemistry A*, 5(13), 2017, 6019–6024.

Waldman Gary, "Introduction to Light: The Physics of Light", Vision, and Color, Dover Publications, INC. New York, 2002, 184–186.

Wang, L., Liu, Y., Zhan, X., Luo, D., & Sun, X. "Photochromic transparent wood for photo-switchable smart window applications" *Journal of Materials Chemistry C*. 2019.

СКРАЋЕНИЦЕ

ECPs (*electrochromic polymers*) – електрохромни полимери

EM – електромагнетно зрачење

ИР (IR) – инфрацрвена област

ЛПД – луминесцентно провидно дрво

ММА – метил метакрилат

МПД – магнетно провидно дрво

QD (*quantum dots*) – квантне тачке

НИР (NIR) – блиска инфрацрвена област

ПД – провидно дрво

ПММА – полиметил метакрилат

SEM (SEM) – скенирајући електронски микроскоп

УВ (UV) – ултраљубичасто зрачење

ФА – формалдехид

H_2O_2 – водоник пероксид

$CdSe$ – кадмијум селенид

Co – кобалт

Cs_xWO_3 – цезијум-волфрамове честице

$MgSO_4$ – магнезијум сулфата

Na_2SiO_3 – натријум силикат

Na_2SO_3 – натријум сулфит

$NaClO$ – натријум хипохлорит

$NaClO_2$ – натријум хлорит

$NaOH$ – натријум хидроксид

NbO_x – оксиди ниобијума

ZnS – цинк сулфид

Si – силицијум

W – волфрам

WO_3 – волфрам оксид

VO_2 – ванадијум-диоксид

VO_x – оксиди ванадијума

$YVO_4:Eu^{3+}$ – итријум ванадат допиран јонима еуропијума (Eu^{3+})

Fe – гвожђе

Fe_3O_4 – гвожђе (II, III) оксид (магнетит)

$\gamma-Fe_2O_3$ – γ -полиморф гвожђе (III) оксида (магхемит)

Јасмина Ј. ПОПОВИЋ, Миланка Р. МОМЧИЛОВИЋ-ЂИПОРОВИЋ, Млађан М. ПОПОВИЋ, Милица М. ГАЈИЋ

TRANSPARENT WOOD – FROM IDEA TO APPLICATION

Wood has been one of the most essential and most utilized materials in the history of human civilization. Even today, there is a strong interest in finding new application areas for this unique natural material. Some of the recent studies in wood modification has ventured into the area of wood optical properties. They proved that it is possible to reduce the absorption and scattering of light, when it interacts with wood. This can be achieved by changing the chemical structure of wood and followed by the impregnation step which involves the application of certain polymers with suitable properties. Using this approach, one can produce a new product – transparent wood (TW). With the preserved unique texture on its surface, the TW also retains many other beneficial properties of natural wood.

The main characteristic of TW is its high optical transmittance (above 80%) and dispersion (above 70%). This material also has relatively low density ($\approx 1,2 \text{ g}\cdot\text{cm}^3$), good mechanical properties and low thermal conductivity. Due to its good mechanical, thermal and optical properties, TW has a great potential as energy efficient building material. For instance, high optical transmittance and light scattering, together with low thermal conductivity, make this material an excellent choice for thermal insulation windows, and in the same aspect, it can be used to improve the efficiency of solar cells. TW could also present both challenging and rewarded opportunity for interior and furniture designers. On the other hand, the inherent porous structure of TW may offer some advanced features and application opportunities, especially if coupled with some novel nano materials, such as various functional nano-cells (magnetic, luminescent, electrically conductive etc.) that can be embedded into the transparent wood tissue together with polymer during the impregnation step. This paper presents a review of various research projects in the field of transparent wood and its production methods. It will further address the application possibilities for TW, with its preserved wood structure, but also the challenges that may be relevant in upcoming research activities in this field.

Keywords: transparent wood, delignification, impregnation, optical transmittance