

## VPLIV IZBRANIH PARAMETROV OBDELAVE LESA Z ATMOSFERSKO PLAZMO NA PROCES OBDELAVE IN OMOČLJIVOST LESA

### THE INFLUENCE OF SELECTED TREATMENT PARAMETERS WITH ATMOSPHERIC PLASMA ON THE TREATMENT PROCESS AND WOOD WETTABILITY

Jure Žigon<sup>1\*</sup>, Dejan Todorović<sup>1</sup>, Matjaž Pavlič<sup>1</sup>, Marko Petrič<sup>1</sup>, Sebastian Dahle<sup>1</sup>

UDK 630\*829.1:52-726

Izvirni znanstveni članek / Original scientific article

Prispelo / Received: 6. 5. 2020

Sprejeto / Accepted: 28. 5. 2020

#### Izveček / Abstract

**Izveček:** V prispevku je predstavljena uporaba nizkotemperaturne plazme, ustvarjene v zraku pri atmosferskem tlaku, za obdelavo površin lesa z namenom izboljšanja njihove omočljivosti. Uporabljena je bila naprava s plazemsko razelektritvijo s površinsko oviro, v konfiguraciji s plavajočo elektrodo. Izkazalo se je, da sta gostota in homogenost plazemske razelektritve, ki se je tvorila med izoliranimi visoko napetostnima elektrodama in površino lesa smreke (*Picea abies* (L.) Karst.) in bukve (*Fagus sylvatica* L.), zelo odvisni od velikosti razmika med elektrodo in lesom. Meritve topografije s konfokalnim laserskim mikroskopom so pokazale, da obdelava lesa s plazmo na njegovi površini povzroči spremembe na submikroskopskem nivoju. Meritve stičnih kotov kapljic vode in premaza na vodni osnovi so pokazale izboljšano dovzetnost za omočitev obdelanih površin. Zaznati je bilo tudi razlike v omočljivosti površin, v odvisnosti od izbranih parametrov pri obdelavi: vrste lesa, podajalne hitrosti obdelovanca, razdalje med elektrodama, razdalje med elektrodama in obdelovancem ter debeline obdelovanca.

**Ključne besede:** les, omočljivost, plazma, stični kot, voda

**Abstract:** The paper presents the use of low-temperature plasma, generated in the air at atmospheric pressure, for treatment of wood surfaces to improve their wettability. For this purpose, a dielectric barrier discharge plasma device with a floating electrode configuration was used. The density and homogeneity of the plasma discharge, formed between the isolated high voltage electrodes and the surface of the spruce (*Picea abies* (L.) Karst.) and beech (*Fagus sylvatica* L.) wood, was shown to be highly dependent on the size of the gap between the electrode and wood. Topography measurements using a confocal laser microscope showed that exposure of wood to plasma causes changes on its surface at the sub-microscopic level. Measurements of the contact angles of water droplets and water-based coating showed the improved susceptibility to wetting of treated surfaces. Differences in surface wettability were also detected depending on the selected treatment parameters: type of wood, workpiece feed speed, the distance between the electrodes, the distance between the electrodes and workpiece, and workpiece thickness.

**Keywords:** wood, wettability, plasma, contact angle, water

## 1 UVOD

### 1 INTRODUCTION

Plazma poleg trdnega, tekočega in plinastega, predstavlja četrto agregatno stanje snovi. Plazma predstavlja skupino nabitih, vzbujenih in nevtralnih delcev, kot so elektroni, ioni, atomi, molekule, radikali in fotoni. Z umetno ustvarjeno plazmo se dandanes srečujemo v vsakdanjem življenju, kot so na primer fluorescentne luči, plazemski zasloni in fuzijski

procesi za proizvodnjo električne energije (Goldston & Rutherford, 1995). Glede na temperaturo ionov in elektronov poznamo visoko- in nizkotemperaturno plazmo, slednjo nadalje delimo na termično ravnovesno in neravnovesno plazmo. O termični plazmi govorimo, kadar imajo elektroni in težji delci enako temperaturo in so v termičnem ravnovesju, v neravnovesni plazmi imajo ioni in nevtroni veliko nižjo temperaturo kot elektroni in ta je blizu sobni (Kogelschatz et al., 1997; Bittencourt, 2004).

Tehnološko lahko plazemsko stanje snovi dosežemo z energetskim vzbujanjem (segrevanjem ali ustvarjanjem elektromagnetnega polja) pri nor-

<sup>1</sup> Univerza v Ljubljani, Biotehniška fakulteta, Oddelek za lesarstvo, Jamnikarjeva 101, 1000 Ljubljana, SLO

\* e-pošta: jure.zigon@bf.uni-lj.si

malnem ali znižanem tlaku okolice (Rosnagel et al., 1990; Panjan et al., 1998).

Plazma je lahko aktivacijski medij za različne fizikalno-kemijske procese. Visoka energija delcev v plazmi omogoča nastanek vrste različnih procesov (disociacija, ekscitacija in ionizacija atomov ter molekul), ki omogočajo in pospešujejo potek kemijskih reakcij (Junkar et al., 2006; Mozetič, 2019). Ob izpostavitvi trdnih snovi plinu v plazemskem stanju, zaradi bombardiranja molekul na površini in trkov z reaktivnimi delci, pride do sprememb v smislu migracije površinskih atomov, desorpcije nečistoč, kemijskih reakcij s cepitvijo kemijskih vezi, polimerizacije ali oksidacije površine itd. (Panjan, 1989; Panjan, 1999; Blanchard et al., 2009). To s pridom izkoriščamo za modifikacijo površin materialov, kot je čiščenje, sterilizacija, jedkanje, depozicija plasti drugih materialov in njihova funkcionalizacija (omočljivost, morfologija in adhezijske lastnosti) pred nadaljnjo obdelavo (Panjan, 1989; Mozetič & Panjan, 2000). Nastanek določene vrste plazme je tesno povezan s plazemskimi parametri (Cvelbar & Mozetič, 2007). Med parametre, ki jih lažje nadzorujemo in uravnavamo, spadajo tudi lastnosti izmeničnega toka (napetost, frekvenca in oblika signalov), lastnosti in dimenzije obdelanega materiala, sestava plazemskega plina, velikost razmika med izolirano elektrodo in površino obdelovanca, čas izpostavitve, itd.

Z vidika tehnoloških in ekonomskih vidikov je izvajanje tovrstnih postopkov najbolj smotno pri atmosferskem tlaku ob prisotnosti različnih plinov. Tu poznamo tri načine generiranja plazme, in sicer koronske, tokovne oz. s šobami (angl. *jet*) in potencialne dielektrične (angl. *dielectric discharge*) razelektritve (Cvelbar & Mozetič, 2007). Slednje, imenovane tudi kot razelektritve s površinsko oviro, so v tuji literaturi in tehnoloških aplikacijah znane pod angleškim nazivom *dielectric barrier discharges* (kratica DBD) (Chirokov et al., 2005). V osnovi gre za konfiguracijo dveh elektrod, od katerih je vsaj ena prekrita z dielektrikom, ob dotoku električne napeitosti v razmiku med elektrodama pride do razelektritve plina, pojava plazme (Wolf, 2013).

Obdelava s plazmo ima velik potencial tudi za modifikacijo lastnosti površin lesa in lesnih tvoriv (Rehn & Viöl, 2003; Gramlich et al., 2006; Petrič, 2013; Žigon et al., 2018). Pri trku vpadnega delca iz plazme s površino lesa pride do različnih kemijskih reakcij (Vesel & Mozetič, 2003; Drenik et al., 2005),

pri tem tudi do povečanja proste površinske energije površin (Klampfer & Jesih, 1999; Žigon et al., 2019). Pri lesu to pozitivno vpliva na omočljivost in adhezijo nanesenih premaznih sredstev in lepil na vodni osnovi (Tóth et al., 2007; Prigent et al., 2015; Peters et al., 2017; Žigon et al., 2019).

Ena od različic DBD plazem je tudi DBD plazma s plavajočo elektrodo (Hoffmann et al., 2013). Ta se od osnovne DBD konfiguracije razlikuje v tem, da drugo elektrodo predstavlja prevodni objekt kot nosilec električnega naboja, t.i. plavajoči potencial (od tod ime). Tovrstna DBD plazma je bila večkrat raziskana za aplikacijo v medicinske namene (Fridman et al., 2006; Fridman et al., 2007; Cooper et al., 2010). Nasprotno elektrodo lahko predstavlja tudi les, ki je zaradi vsebnosti vlage do neke mere električno prevoden. Ker je električna prevodnost lesa pri ravnovesnih vlažnostih, ki so primerne za nadaljnjo obdelavo (t.j. 5 % - 12 %) prenizka, je prisotnost nasprotne (kovinske) elektrode kljub temu nujna. To lahko predstavlja npr. nosilec na spodnji strani obdelovanca (Žigon et al., 2019).

V splošnem obdelava s plazmo v zraku pri atmosferskem tlaku površine lesa očisti in povzroči njihovo oksidacijo, na kar nakazuje povečanje prisotnosti C-O, O-C=O in -OH komponent, ter zmanjšanje C-C in C-H komponent v celulozi, hemicelulozah in ligninu. Skupaj z nastankom različnih radikalov, kationov (npr.  $N^+$ ,  $O^+$ ,  $OH^+$ ) in anionov ( $OH^-$  in  $O_2^-$ ) pride do povečanja polarnega značaja površin (Avramidis et al., 2009; Hardy et al., 2015; Král et al., 2015). Vseeno velja, da je učinkovitost obdelave s plazmo razen od strukture in kemične sestave lesa odvisna tudi od časa izpostavitve. Hidrofilnost lesa se namreč poveča že po nekaj sekundah obdelave (Altgen et al., 2020). Daljši čas obdelave s plazmo in predvsem povečana dovedena moč lahko povzročita tudi spremembe v mikrostrukturi in jedkanje površine lesa (Jamali & Evans, 2011; Jamali & Evans, 2020).

Merjenje stičnega kota (SK) med tangento na površino kapljice tekočine in stično površino je enostavna in zanesljiva metoda za ugotavljanje omočljivosti določenega materiala. SK je poleg površinske napetosti tekočine v veliki meri odvisen od proste površinske energije in ostalih lastnosti površine (kemijska sestava, morfologija, poroznost) (Gardner et al., 1991; Liptáková & Kúdela, 1994; Wälinder & Gardner, 1999). Z vidika površinske zaščite lesa s premazi je povišanje proste površinske energije

je pred nanosom premaza seveda zelo zaželeno. Tako lahko s plazmo nadomestimo ostale postopke priprave površin lesa pred premazovanjem, kot sta brušenje in nanos temeljnih premazov (Wolkenhauer et al., 2009; Demirkir et al., 2014).

V prispevku bomo predstavili primer uporabe DBD plazme s plavajočo elektrodo za obdelavo površin lesa z namenom izboljšanja omočljivosti z vodo in izbranim premazom na vodni osnovi. Predstaviti želimo vpliv nekaterih nastavitvev naprave pri obdelavi, kot tudi lastnosti obdelovancev na proces obdelave. Vpliv obdelave na morfologijo površin lesa smo proučili s primerjavo stanja površin na mikroskopskem nivoju pred obdelavo in po njej. Razlike v omočljivosti površin, ob spreminjanju izbranih parametrov obdelave, smo ugotavljali z merjenjem stičnih kotov kapljic vode in premaza.

## 2 MATERIALI IN METODE

### 2 MATERIALS AND METHODS

#### 2.1 LES

##### 2.1 WOOD

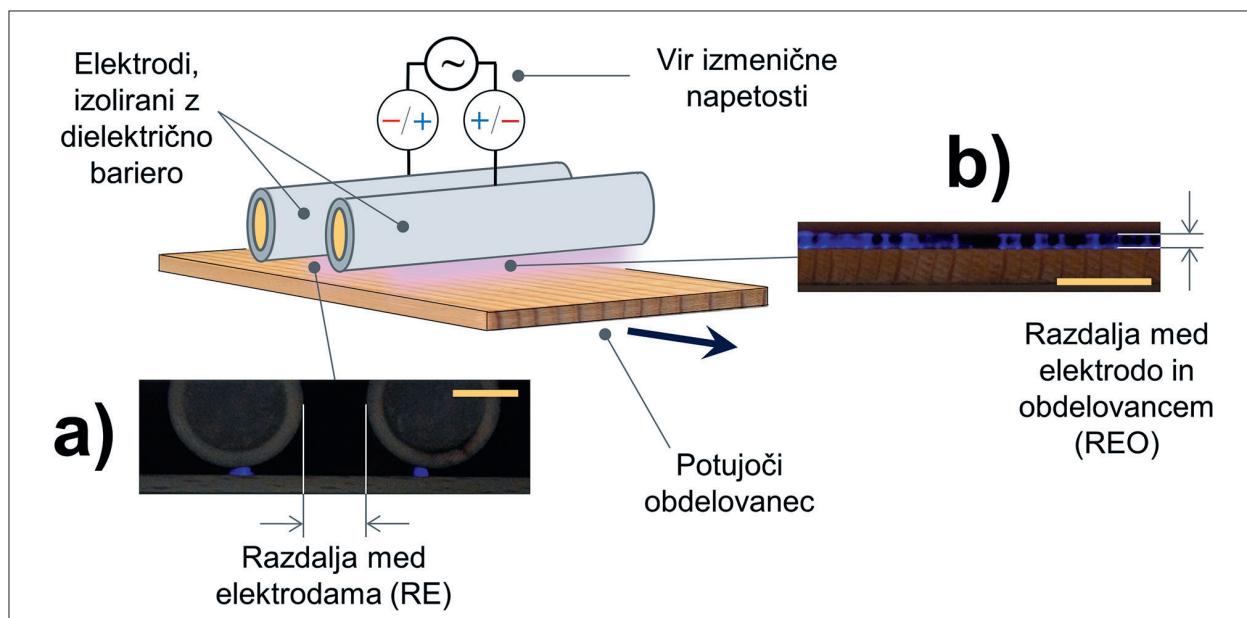
V raziskavi je bil uporabljen les navadne smreke (*Picea abies* (L.) Karst.) in navadne bukve (*Fagus sylvatica* L.), iz katerega smo pripravili vzorce veli-

kosti 60 mm × 30 mm × 3 mm (orientacija vlaken: longitudinalno × radialno × tangencialno). Nadaljnje analize so potekale na radialnih ploskvah. Vsi vzorci so bili pred začetkom klimatizirani v prostoru s temperaturo 20 °C in relativno zračno vlažnostjo 65 %. Pri tem so bukovi vzorci dosegli 12,1 %, smrekovi vzorci pa 10,8 % ravnovesno vlažnost (ugotovljena gravimetrično).

#### 2.2 OBDELAVA LESA Z DBD PLAZMO S PLAVAJOČO ELEKTRODO

##### 2.2 TREATMENT OF WOOD WITH FLOATING ELECTRODE DBD PLASMA

Vhodne električne parametre v napravi krmilimo preko visokonapetostnega napajalnika, ki je priključen na električno omrežje. Pretvornik proizvaja visoko napetost do 15 kV z izhodno močjo do 300 W pri izbirni frekvenci 5 kHz. Na visokonapetostno stran tuljave sta priključeni elektrodi z določeno kapacitivnostjo, med katerima pride do razelektritve prisotnega plina. Elektrodi sta z namenom enakomerne razporeditve naboja v električnem polju in preprečitve preboja prekriti z dielektrično bariero. Prisotnost prevodnega ali dielektričnega obdelovanca z določeno električno prevodnostjo in kapacitivnostjo vpliva na lastnosti



Slika 1. Prikaz obdelave vzorca lesa z DBD plazmo s plavajočo elektrodo: stranski (a) in frontalni (b) pogled na tvorjeno plazemsko razelektritev. Merilni skali predstavljata dolžino 10 mm.

Figure 1. Schematic illustration of the treatment of a wooden sample with a floating electrode DBD plasma: side (a) and front (b) view of the generated plasma discharge. The length of scale bars represents 10 mm.

ustvarjenega električnega polja oz. plazemsko razelektritev. Nasprotno obdelava površine obdelovanca z nabitimi delci vpliva na lastnosti njegovih površin.

V raziskavi so bili vzorci lesa obdelani s plazmo tako, kot je prikazano na sliki 1. Medeninasti elektроди premera 15 mm, vstavljeni v keramični ( $Al_2O_3$ ) cevi (debelina stene 2,5 mm), sta bili priklopljeni na visoko napetostni napajalnik z nastavljenimi električnimi parametri. Plazemska razelektritev zraka se je tvorila med izoliranimi elektrodama in površino obdelovanca, ki je pod njima potoval z določeno hitrostjo ( $1\text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$  ali  $3\text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$ ). V nadaljevanju eksperimentalnega dela smo spreminjali tudi razdaljo med elektrodama (RE) (slika 1a), razdaljo med elektrodama in obdelovancem (REO) (slika 1b) ter obdelovali vzorce lesa različnih debelin (1,5 mm, 2,5 mm in 3,2 mm).

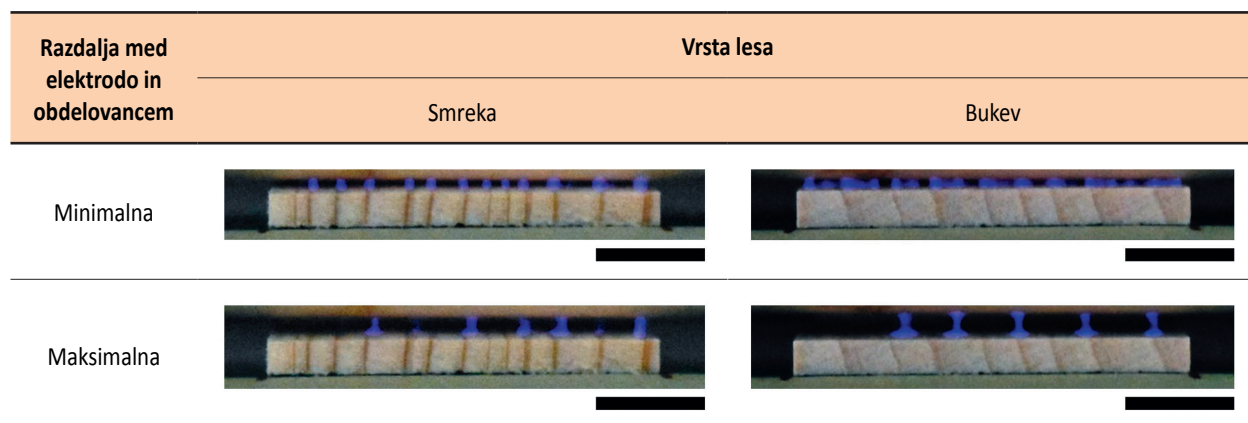
## 2.3 ANALIZA PLAZEMSKIH RAZELEKTRITEV

### 2.3 PLASMA DISCHARGE ANALYSIS

Heterogene reakcije med plazemskimi delci in površinami trdnih snovi v atmosferskih pogojih se odražajo v obliki nastanka plazemskih pramenov (angl. *plasma streamers*), ki so porazdeljeni po dielektrični površini v razmiku med izolirano elektrodo in obdelovancem (Klampfer & Jesih, 1999; Cvelbar & Mozetič, 2007; Černák et al., 2009). Predhodne ugotovitve so pokazale vpliv razdalje med elektrodo in obdelovancem ter porazdelitve ranega

in kasnega lesa na obdelanem lesu na tvorbo plazemskih razelektritev (Žigon & Dahle, 2019). Slika 2 prikazuje odvisnost gostote razelektritve in porazdelitve plazemskih pramenov od velikosti razmika med elektrodo in vzorcem. Jakost razelektritev je v primeru bukve zaradi večje gostote in višje ravnovesne vlažnosti lesa večja kot pri smreki (Todorović, 2019). Poleg tega se plazemski prameni večinoma tvorijo na območju gostejšega kasnega lesa, vendar se tik nad površino njihov premer poveča in zajame tudi del ranega lesa (Klein et al., 2001; Kogelschatz, 2002). Minimalna razdalja predstavlja razmik, pri katerem vzorec še nemoteno potuje pod elektrodama (približno 0,5 mm), maksimalna razdalja pa razmik, pri katerem se med vzorcem in elektrodo razelektritev še tvori.

Proučevali smo vpliv RE (5 mm, 6 mm, 8 mm in 10 mm), kot tudi REO (minimalna in maksimalna) na tvorbo plazemskih razelektritev. Te smo posneli s fotokamero (Olympus E520, Olympus, Tokio, Japonska), vedno pri enakih pogojih fotografiranja (velikost zaslonke 5,6, čas osvetlitve 0,1 s, hitrost ISO 8.000). Posnete fotografije smo analizirali s programom Fiji (ImageJ 1.46d, Madison, WI, ZDA), in sicer z meritvami sive vrednosti v območju razelektritve vzdolž širine posameznega vzorca (0 – popolnoma črna, 255 – popolnoma bela). Analize plazemskih razelektritev so bile opravljene na petih vzorcih za posamezen parameter.



Slika 2. Prikaz minimalne in maksimalne razdalje med elektrodo in vzorcem lesa, ob tvorbi plazemske razelektritve. Merilne skale predstavljajo dolžino 10 mm.

Figure 2. Demonstration of the minimum and maximum distances between the electrode and the wood sample upon formation of the plasma discharge. The length of scale bars represents 10 mm.

## 2.4 ANALIZA VPLIVA OBDELAVE LESA S PLAZMO NA TOPOGRAFIJO POVRŠIN LESA

### 2.4 ANALYSIS OF THE INFLUENCE OF PLASMA TREATMENT ON WOOD SURFACE TOPOGRAPHY

Spremembe v topografiji površin vzorcev zaradi obdelave s plazmo smo spremljali s konfokalnim laserskim mikroskopom LEXT OLS5000 (Olympus, Tokio, Japonska). Iz obeh vrst lesov smo pripravili vzorce dimenzij 10 mm × 10 mm × 3 mm, z drsnim mikrotomom smo poravnali njihove radialne površine. Analize površin so bile opravljene na istem mestu, in sicer pred, ter po 5 s, 10 s in 30 s obdelave s plazmo. Mikroskopiranje je bilo izvedeno z laserskim žarkom z valovno dolžino 405 nm, pri lateralni resoluciji 0,12 μm. Tridimenzionalne topografske slike površin so bile zajete pri 5×, 10× in 20× povečavi, aritmetična povprečna hrapavost površine ( $S_a$ ) in njene spremembe so bile izračunane s programom OLS50-S-AA (Olympus, Tokio, Japonska). Analize topografije površin so bile opravljene na petih vzorcih posamezne lesne vrste.

## 2.5 MERJENJE STIČNIH KOTOV VODE IN PREMAZA

### 2.5 DETERMINATION OF WATER AND COATING CONTACT ANGLES

Ob predpostavki, da nastavitve določenih parametrov obdelave vzorcev lesa s plazmo vplivajo na spremembo omočljivosti lesa, smo proučili vpliv naslednjih parametrov: lesna vrsta, hitrost obdelave ( $v$ ), RE, REO in debelina obdelovanca ( $d$ ). Za analizo omočljivosti smo uporabili deionizirano vodo in komercialni pigmentiran akrilni premaz na vodni osnovi (Belinka Interier, Belinka belles d.o.o., Ljubljana, Slovenija). Površinska napetost vode je znašala 43,4 mN·m<sup>-1</sup>, površinska napetost premaza pa 30,1 mN·m<sup>-1</sup>. Oblike oz. obrise nanosenih kapljic, kot tudi analizo stičnih kotov (SK) med kapljicami destilirane vode oz. premaza in površino vzorcev smo izmerili z optičnim goniometrom Theta (Biolin Scientific, Oy, Espoo, Finska). SK so bili izmerjeni po načinu analize Young-Laplace, v programski opremi OneAttension različice 2,4 (r4931) (Biolin Scientific). Kapljice s prostornino 5 μL smo nanесли na štiri različna mesta na radialni površini posameznega vzorca. Analize omočljivosti so bile opravljene na treh vzorcih za posamezen parameter, skupno 12 meritve na serijo vzorcev. Opozoriti velja, da vplivi posameznih proučevanih parametrov med obdelavo na omočljivost lesov zaradi časovnih omejitev niso bili

izvedeni sočasno. Meritve SK na vzorcih, obdelanih s plazmo, so bile izvedene takoj po obdelavi. Sneljanje slike (1,3 slike na sekundo) se je začelo ob umiku konice pipete od kapljice in je potekalo 60 s. Meritve smo izvajali pri temperaturi 20 °C.

## 3 REZULTATI IN RAZPRAVA

### 3 RESULTS AND DISCUSSION

#### 3.1 INTENZIVNOST PLAZEMSKIH RAZELEKTRITEV

##### 3.1 INTENSITY OF PLASMA DISCHARGES

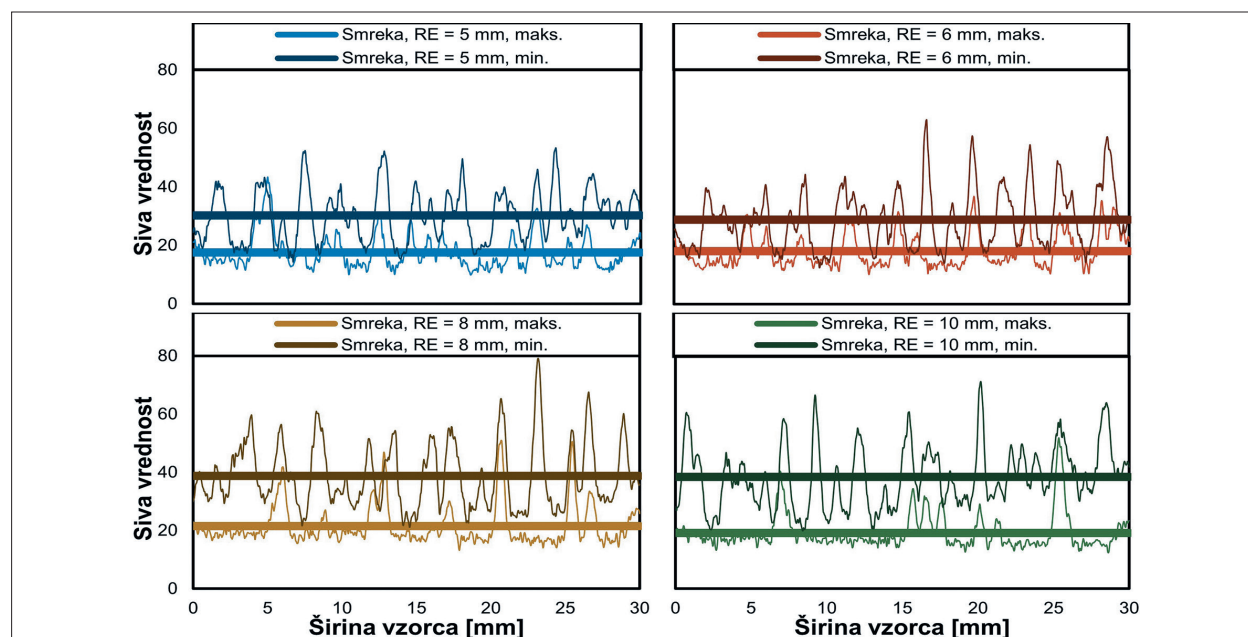
Iz slike 3 lahko razberemo porazdelitev plazemskih pramenov vzdolž širine vzorcev lesa smreke pri obdelavi s plazmo, kot tudi povprečne vrednosti izmerjenih sivih vrednosti pri določenih parametrih obdelave (RE in REO). Meritve so pokazale, da je pri minimalni REO povprečna izmerjena siva vrednost oz. svetlost tvorjene plazemske razelektritve višja kot pri maksimalni REO. To nakazuje na večjo jakost ustvarjenega električnega polja pri manjši REO. Izkazalo se je, da pri obdelavi lesa smreke s povečevanjem RE, narašča tudi povprečna siva vrednost. Vpliv RE je bil izrazitejši pri obdelavi lesa bukve (slika 4). Tu je s povečevanjem RE iz 5 mm na 6 mm, 8 mm oz. 10 mm, naraščala tudi izmerjena siva vrednost, tako pri minimalni (iz 33,7 na 41,8; 46,7 oz. 50,5), kot tudi pri maksimalni (iz 17,8 na 19,45; 22,3 oz. 20,8) REO. To pomeni, da se je plazemska razelektritev intenzivneje razvila pri obdelavi bukovine. Razlog za to sta najverjetneje višja ravnovesna vlažnost in gostota lesa ter posledično večja električna prevodnost bukovine.

#### 3.2 SPREMEMBE TOPOGRAFIJE POVRŠIN LESA

##### 3.2 CHANGES OF WOOD SURFACE TOPOGRAPHY

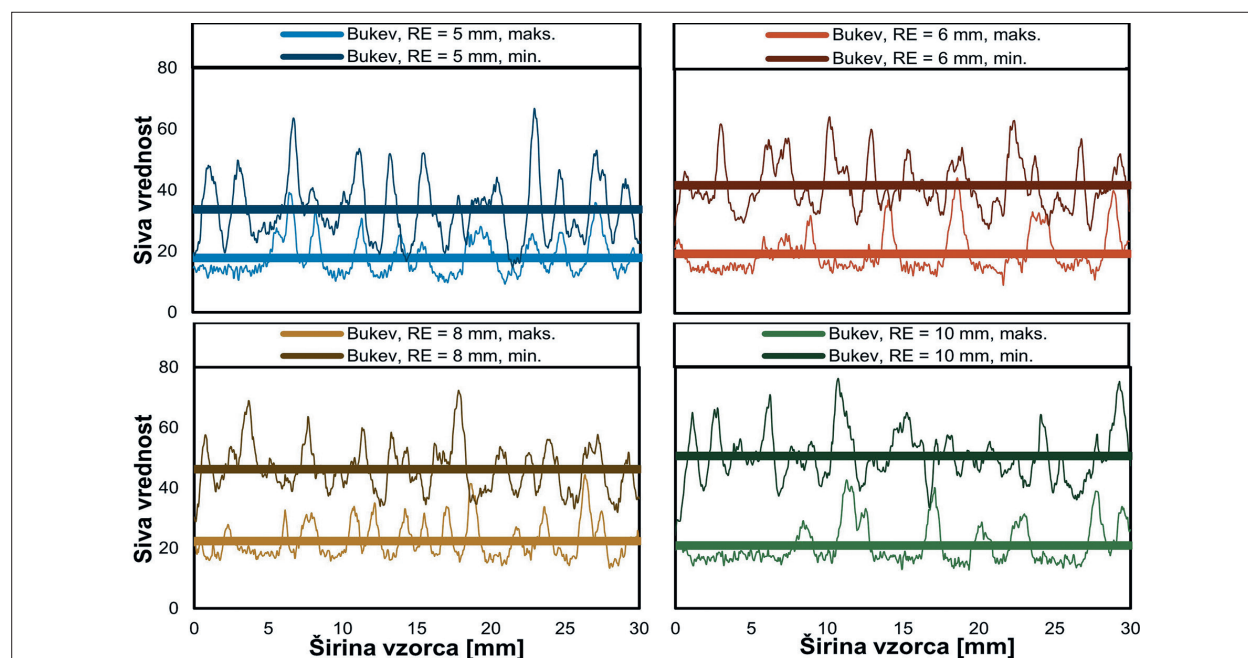
V preglednici 1 so prikazane 3-dimenzionalne topografske slike površin lesov pred različno dolgiimi obdelavami s plazmo in po njih, zajete pri 20× povečavi.

V preglednici 2 so navedene vrednosti sprememb aritmetične povprečne hrapavosti površine ( $S_a$ ) pred obdelavo lesa smreke in bukve in po njej, izmerjene pri različnih povečavah. Razbrati je mogoče, da je zaznana hrapavost neobdelanega lesa odvisna od uporabljene povečave in s tem velikosti površine pri opazovanju. Večja kot je bila površina analiziranega področja, večja je vrednost  $S_a$ , in obratno. Poleg tega je razvidno, da se vrednosti  $S_a$  ne glede na uporabljeno povečavo, s po-



Slika 3. Povprečna siva vrednost plazemske razelektritve vzdolž širine obdelovancev smreke pri različnih RE (5 mm, 6 mm, 8 mm in 10 mm) ter minimalni in maksimalni REO (min. in maks.).

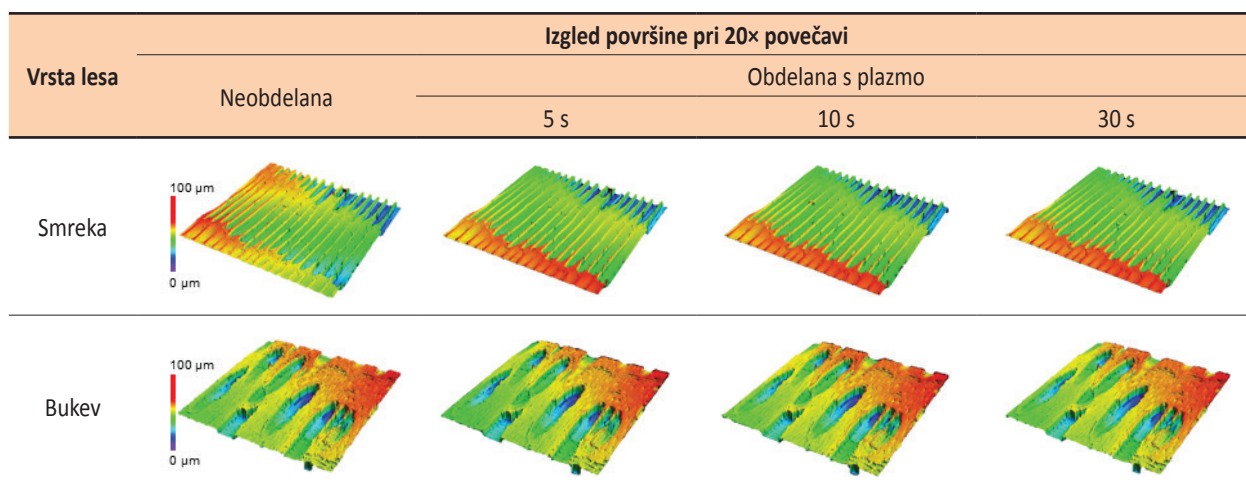
Figure 3. The average grey value of plasma discharge along the width of spruce workpieces at different distances between the electrodes (5 mm, 6 mm, 8 mm and 10 mm), and at the minimum or maximum distance between the electrode and the treated sample (min. and maks.).



Slika 4. Povprečna siva vrednost plazemske razelektritve vzdolž širine obdelovancev bukve pri različnih RE (5 mm, 6 mm, 8 mm in 10 mm) ter minimalni in maksimalni REO (min. in maks.).

Figure 4. The average grey value of plasma discharge along the width of beech workpieces at different distances between the electrodes (5 mm, 6 mm, 8 mm and 10 mm), and at the minimum or maximum distance between the electrode and the treated sample (min. and maks.).

Preglednica 1. Rekonstruirane 3-dimenzionalne topografske slike površin lesov pred obdelavo s plazmo in po njej.  
Table 1. Reconstructed 3-dimensional topographic photos of the surfaces before and after treatment with plasma.



\*Velikost analiziranih področij: 640 μm × 640 μm

daljševanjem časa obdelave znižujejo. Ta pojav je sicer pri lesu bukve manj opazen kot pri lesu smreke. Pri obeh lesnih vrstah negativne spremembe  $S_a$  nakazujejo na znižanje hrapavosti površin. To bi lahko bila posledica bodisi jedkanja površin, čiščenja površin oz. odstranitve nečistoč in prahu, ali znižanja vsebnosti vlage v lesu v procesu obdelave s plazmo. Opozoriti velja, da to lahko trdimo le za mikroskopski nivo opazovanja. Namreč, na nižjem (npr. nanometerskem) nivoju opazovanja bi morda lahko zaznali tudi drugačen pojav s povečanjem hrapavosti površin po obdelavi s plazmo (Wolkenhauer et al., 2008).

### 3.3 SK KAPLJIC VODE

#### 3.3 WATER DROPLETS CONTACT ANGLES (CA)

##### 3.3.1 Vpliv vrste lesa

##### 3.3.1 The influence of wood species

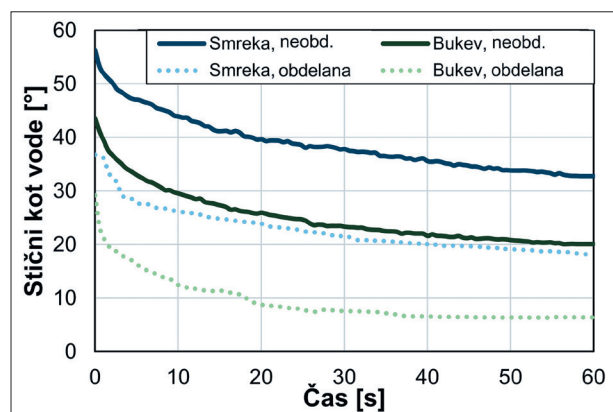
SK kapljic vode, nanesenih na površino lesa, se s časom zmanjšuje. Takoj po nanosu se volumen kapljice začne zmanjševati zaradi vpijanja tekočine v higroskopno podlago. Dinamika sprememb SK kapljic vode na površinah lesov v odvisnosti od vrste lesa in predhodne obdelave s plazmo je prikazana na sliki 5. Obdelava s plazmo je potekala pri naslednjih parametrih:  $v = 3 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$ ,  $RE = 5 \text{ mm}$ ,  $REO = 1 \text{ mm}$  in  $d = 3,2 \text{ mm}$ . Izkazalo se je, da

Vrsta lesa	Povečava	Vrednost $S_a$ [μm]			
		Neobdelano	Obdelano s plazmo		
			5 s	10 s	30 s
Smreka	5×	22,25	-0,19	-0,36	-0,03
	10×	10,90	-0,06	-0,06	-0,02
	20×	9,82	-0,02	-0,06	-0,08
Bukev	5×	18,36	-0,02	-0,06	-0,09
	10×	12,69	-0,02	-0,05	-0,04
	20×	10,25	-0,01	-0,01	0,00

Preglednica 2. Aritmetična povprečna hrapavost površine ( $S_a$ ) pred obdelavo lesa smreke in bukve s plazmo in po njej, izmerjena pri različnih povečavah.

Table 2. Surface arithmetic mean roughness ( $S_a$ ) before and after treatment of spruce and beech wood with plasma, detected by different magnifications.

voda bolje omaka površino bukovine kot površino smrekovine, o čemer poročata tudi Papp in Csiha (2017). Vpliv obdelave s plazmo na SK vode je bil pri obeh vrstah lesa podoben. Po 60 s od nanosa se je pri smreki znižal z 32,8° na 18,2°, pri bukvi pa z 20,1° na 6,4°.

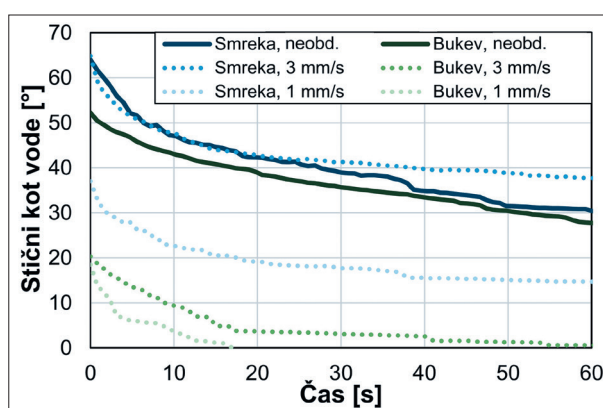


Slika 5. Odvisnost SK kapljic vode od vrste lesa.  
Figure 5. Dependence of the water droplets' CA on the wood species.

### 3.3.2 Vpliv hitrosti obdelave

#### 3.3.2 The influence of treatment feed speed

Hitrost pretoka obdelovanca skozi plazemsko razelektritev je sorazmerna s časom, v katerem je določen del površine obdelovanca izpostavljen trkom z aktivnimi delci plazme. Slika 6 prikazuje spremembe SK kapljic vode na površinah lesov v odvisnosti od podajalne hitrosti pri obdelavi s plazmo, pri kateri so bili ostali parametri sledeči: RE = 5 mm, REO = 1 mm in  $d = 3,2$  mm. V splošnem obdelava lesa s plazmo pri nižji podajalni hitrosti ( $1 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$ ) prispeva k boljši omočljivosti kot pri višji podajalni hitrosti ( $3 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$ ). Vpliv podajalne hitrosti je bil pri obdelavi lesa bukke očitnejši kot pri lesu smreke. Pri smreki je k znižanju SK z začetnih  $30,4^\circ$  na  $14,7^\circ$  (po 60 s meritve) prispevala le obdelava s hitrostjo  $1 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$ . Učinek obdelave s plazmo je bil pri bukovini vidnejši že pri podajalni hitrosti  $3 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$ , kjer je bila po zaključku meritve zaznana popolna omočitev. Bukovi vzorci, obdelani pri podajalni hitrosti  $1 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$ , so bili v povprečju popolnoma omočeni že po 17 s meritve.



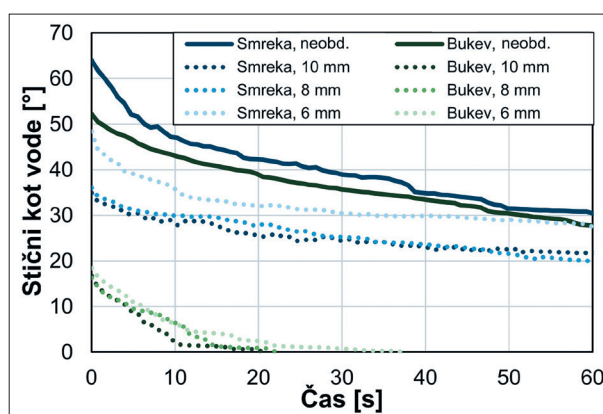
Slika 6. Odvisnost SK kapljic vode od podajalne hitrosti lesa pri obdelavi s plazmo.

Figure 6. Dependence of the water droplets' CA on the feed speed of the sample during the plasma treatment.

### 3.3.3 Vpliv razdalje med elektrodama

#### 3.3.3 Influence of distance between the electrodes

Razdalja med elektrodama (RE) pri uporabljeni konfiguraciji naprave z DBD plazmo vpliva na smer in gostoto ustvarjenega električnega polja med elektrodama. Pričakovati je torej, da to posredno vpliva tudi na učinek, ki ga ima plazma na obdelovanec (Žigon et al., 2019). Spremembe SK kapljic vode na površinah lesov v odvisnosti RE pri obdelavi s plazmo so prikazane na sliki 7. Tu so bili parametri obdelave naslednji:  $v = 3 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$ , REO = 1 mm in  $d = 3,2$  mm. Pri obeh lesnih vrstah je s po-



Slika 7. Odvisnost SK kapljic vode od RE pri obdelavi s plazmo.

Figure 7. Dependence of the water droplets' CA on the distance between the electrodes during the plasma treatment.

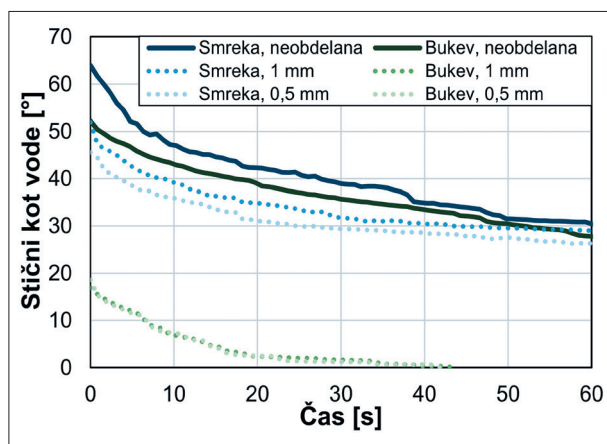


večevanjem RE omočitev z vodo postajala učinkovitejša. V primeru lesa smreke je po 60 s meritve zaznani SK vode pri RE 10 mm znašal 21,7°, pri RE 8 mm 19,7°, pri zmanjšanju RE na 6 mm se je ta zvišal na 27,4°. Pri obdelavi vzorcev bukovine z RE 10 mm je bila popolna omočitev zaznana po 21,3 s, ob RE 8 mm po 22,1 s, ob RE 6 mm po 37,1 s od nanosa kapljice vode.

### 3.3.4 Vpliv razdalje med elektrodama in obdelovancem

#### 3.3.4 Influence of distance between the electrodes and the workpiece

Predhodne simulacije tvorbe električnega polja in analize plazemskih razelektritev so pokazale vpliv RE. Podobno so simulacije pokazale vpliv REO na lastnosti plazme (Žigon et al., 2019; Žigon & Dahle, 2019). Posledično bi bilo pričakovati, da ima vpliv na spremembo omočljivosti površin lesov tudi REO. Slika 8 prikazuje krivulje SK kapljic vode v odvisnosti od REO (približno 0,5 mm in približno 1 mm), pri čemer so bili ostali parametri, kot sledi:  $v = 3 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$ ,  $RE = 5 \text{ mm}$  in  $d = 3,2 \text{ mm}$ . Vpliv REO na izboljšanje omočljivosti lesa je bil zaznan pri obdelavi lesa smreke; po 60 s meritve je SK vode pri manjši REO znašal 26,2°, pri večji REO pa 29,0°. Pri obdelavi lesa bukke so bile razlike ob različnih REO skoraj neznačajne. Popolna omočljivost je bila namreč zaznana po 43,5 s (večja REO) oz. po 41,9 s (manjša REO).



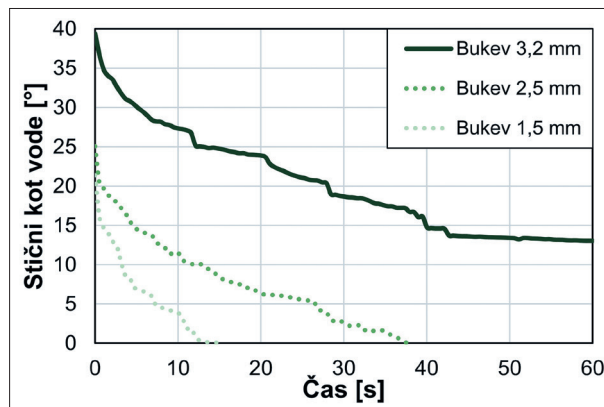
Slika 8. Odvisnost SK kapljic vode od REO pri obdelavi s plazmo.

Figure 8. Dependence of the water droplets' CA on the distance between the electrode and the workpiece by the treatment with plasma.

### 3.3.5 Vpliv debeline obdelovanca

#### 3.3.5 Influence of the workpieces' thickness

Zaradi načina tvorbe razelektritev pri DBD plazmi s plavajočo elektrodo je pričakovan tudi vpliv debeline obdelovanca na spremembo omočljivosti po obdelavi. Za obdelovanec je namreč značilna določena kapacitivnost, ki med drugim zavisi tudi od njegovih fizičnih dimenzij (Saslow, 2002). V tem delu raziskave so bili uporabljeni zgolj obdelovanci lesa bukke, parametri obdelave so bili:  $v = 3 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$ ,  $RE = 5 \text{ mm}$  in  $REO = 1 \text{ mm}$ . Kot je razvidno iz slike 9, je vpliv obdelave s plazmo na omočljivost lesa zelo odvisen od debeline obdelovanca. SK vode pri najdebelejših obdelovancih je po 60 s meritve znašal 13,0°, medtem ko so bili obdelovanci debeline 2,5 mm in 1,5 mm popolnoma omočeni po 37,9 s oz. po 15,3 s od začetka meritve.



Slika 9. Odvisnost SK kapljic vode od debeline obdelovanca pri obdelavi s plazmo.

Figure 9. Dependence of the water droplets' CA on the workpieces' thickness during the plasma treatment.

## 3.4 SK KAPLJIC PREMAZA

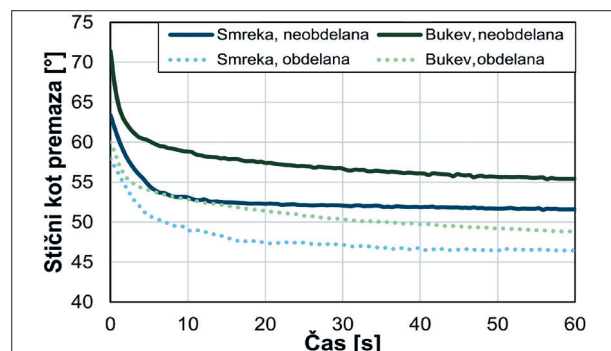
### 3.4 COATING DROPLETS' CA

#### 3.4.1 Vpliv vrste lesa

##### 3.4.1 The influence of wood species

Pri meritvah SK premaza je bila zaznana podobna dinamika kot v primeru SK kapljic vode v odvisnosti od vrste lesa in predhodne obdelave (slika 10). V splošnem so vrednosti SK premaza sicer višje od vode, razlog za to so drugačne fizikalne lastnosti obeh tekočin (npr. površinska napetost). Obdelava s plazmo je potekala pri  $v = 3 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$ ,  $RE = 5 \text{ mm}$ ,  $REO = 1 \text{ mm}$  in  $d = 3,2 \text{ mm}$ . Za razliko od vode je premaz nekoliko bolj omakal površino smrekovine kot površino buko-

vine, vpliv obdelave na razliko med omočljivostjo neobdelanih in obdelanih površin je bil pri obeh lesovih podoben. Po 60 s od nanosa se je SK pri smreki znižal z 51,6° na 46,4°, pri bukvi pa s 55,4° na 48,8°.

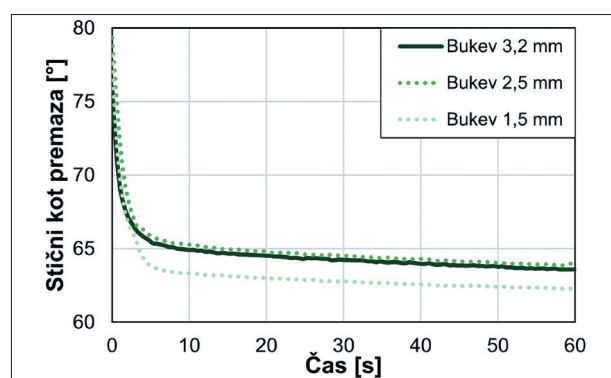


Slika 10. Odvisnost SK kapljic premaza od vrste lesa.  
Figure 10. Dependence of the coating droplets' CA on the wood species.

### 3.4.2 Vpliv debeline obdelovanca

#### 3.4.2 Influence of the workpieces' thickness

Vpliv debeline obdelovanca na učinek obdelave na spremembo omočljivosti lesa s premazom je bil manj izrazit (slika 11) kot pri SK vode; obdelava je bila izvedena sicer z enakimi parametri ( $v = 3 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$ ,  $RE = 5 \text{ mm}$  in  $REO = 1 \text{ mm}$ ). SK kapljic premaza pri obdelovancih debeline 3,2 mm in 2,5 mm je bil po 60 s meritve enak ( $64,0^\circ$ ), pri najtanjših obdelovancih se je ta za malenkost znižal (na  $62,8^\circ$ ). Vpliv debeline obdelovanca je tu manj izrazit najverjetneje zaradi že omenjenih drugačnih fizikalnih lastnosti premaza v primerjavi z lastnostmi vode.



Slika 11. Odvisnost SK kapljic premaza od debeline obdelovanca pri obdelavi s plazmo.

Figure 11. Dependence of the coating droplets' CA on the workpieces' thickness during the plasma treatment.

## 4 ZAKLJUČEK

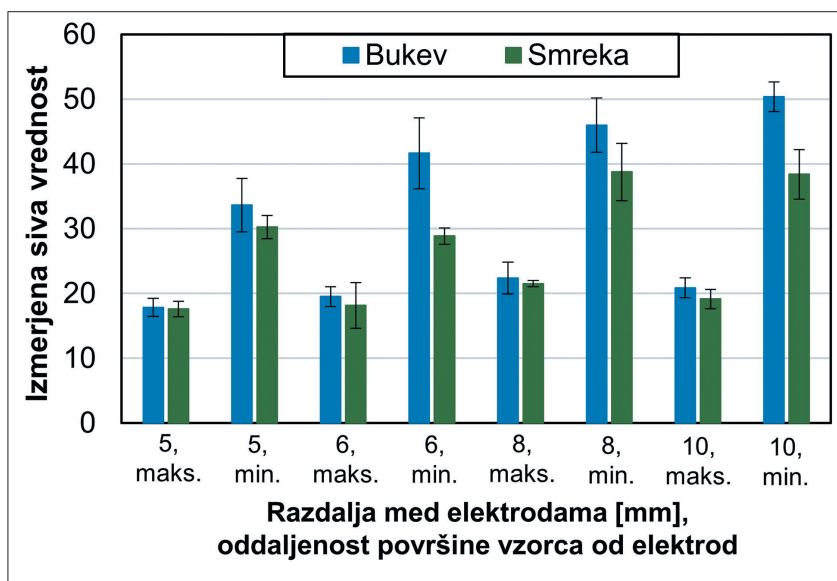
### 4 CONCLUSION

Rezultati analize tvorjenih plazemskih razelektritev med izoliranimi elektrodama in površinami obdelovancev obeh lesov so povzeti na sliki 12. Izkazalo se je, da z manjšanjem REO svetlost tvorjene plazemske razelektritve narašča. Pojav sovпада z značilnostmi DBD plazem, kjer je jakost električnega polja zelo odvisna od razdalje oz. razmika med nasprotnima elektrodama. To je verjetno povezano z gostoto električnega toka v plinski razelektritvi. Do električnega preboja namreč pride takoj, ko je jakost električnega polja v REO dovolj velika. Pri manjši REO se to zgodi malenkost prej kot pri večji REO, jakost električnega polja se pri tem ne razlikuje. Pri tem moč transformatorja ostaja omejena, zato mora biti napetost, ob enaki jakosti električnega polja, pri večji REO višja, tok se pri tem zmanjša. Po drugi strani s povečevanjem REO jakost razelektritev in s tem njihova intenzivnost narašča. Pri uporabljeni konfiguraciji DBD plazme s plavajočo elektrodo namreč RE vpliva na smer in gostoto električnega polja, ustvarjenega med elektrodama preko obdelovanca. Posledično, bolj kot sta bili elektrodi narazen, manj energije se je izgubilo neposredno med njima, večji so bili električni tokovi in energija v razelektritvi in večja je bila svetlost razelektritve zraka v razmiku med izolirano elektrodo in površino obdelovanca, opazovane s frontalne strani. Dognanja o ugotovljenih vplivih RE in REO na izmerjene sive vrednosti plazemskih razelektritev so se odrazila tudi pri ugotovitvah učinka le-teh na omočljivost lesov z vodo in premazom po obdelavi s plazmo.

Obdelava lesa s plazmo je vplivala na hrapavost površin lesa, ki se je sicer s podaljševanjem časa obdelave zniževala. Ker plazma velja za fizikalen pojav, so zaznane spremembe v topografiji površin lesa posledica njihovega jedkanja, čiščenja, sušenja ipd.

Drugi del raziskave je potrdil iz dosedanjih raziskav znano dejstvo, da obdelava premazov s plazmo, ustvarjeno v zraku in pri atmosferskem tlaku, izboljša omočljivost lesa z vodo (t.j. hidrofilnost) in s premazi na vodni osnovi (preglednica 3).

Nivo znižanja SK vode pri lesu smreke in bukve napram neobdelanemu lesu po obdelavi s plazmo je zelo podoben, in sicer za  $15^\circ$  do  $20^\circ$ . Obdelava lesa s plazmo pri nižji podajalni hitrosti prispeva k boljši omočljivosti obdelovanca kot pri



Slika 12. Povprečna izmerjena siva vrednost plazemske razelektrivne vzdolž širine vzorcev lesa pri različnih RE ter minimalni in maksimalni REO.

Figure 12. The average measured grey value of plasma discharge along the width of wood samples at different distances between the electrodes and the minimum and maximum distance between the electrode and workpiece.

višji podajalni hitrosti, pri čemer je vpliv podajalne hitrosti očitnejši pri bukovini. V DBD plazmi s plavajočo elektrodo je ob dovajanju visoke napetosti v elektrodi jakost ustvarjenega električnega polja zelo odvisna od RE in od REO. Vpliv posameznega kot tudi vzajemnega spreminjanja teh dveh parametrov v procesu obdelave se je odrazil tudi na omočljivosti lesa. S povečevanjem RE se je hidrofilnost površine lesov povečevala, kar je bilo zaznati zlasti pri obdelavi lesa bukve. Spremembe REO iz približno 1 mm na približno 0,5 mm (in obratno) niso drastično povečale hidrofilnosti lesov, vendar je bil trend kljub temu opazen, tako

pri lesu smreke kot tudi bukve. Izmed vseh proučevanih parametrov je največji vpliv na povečanje hidrofilnosti lesa bil zaznan ob spreminjanju debeline obdelovanca. Pri najdebelejših obdelovancih iz bukovine se je SK vode po 60 s meritev iz prvotnih 40° znižal na 13°, med tem, ko so bili tanjši obdelovanci (debeline 2,5 mm in 1,5 mm) popolnoma omočeni že pred potekom celotnih meritev (po 37,9 s oz. po 15,3 s).

SK kapljic premaza so višje od SK vode, razlog za to so drugačne fizikalne lastnosti obeh tekočin (površinska napetost, višja gostota in viskoznost premaza).

Preglednica 3. Slike in vrednosti SK kapljic vode in premaza, 1 s po nanosu na neobdelano in s plazmo obdelano površino lesa bukve. Merilne skale predstavljajo dolžino 2 mm.

Table 3. Figures and CA values of water and coating droplets, 1 s after deposition on untreated and plasma treated surfaces of beech wood. The length of scale bars represents 2 mm.

Vrsta tekočine	Površina lesa	
	Neobdelana	Obdelana s plazmo
Voda	60,6°	28,5°
Premaz	88,7°	80,6°

Razlike v hidrofilitnosti lesa, v odvisnosti od vrste materiala in predhodne obdelave s plazmo, so se odrazile tudi pri dinamiki sprememb SK kapljic premaza. Vpliv obdelave s plazmo na relativno povečanje omočljivosti s premazom je bil pri obeh lesovih podoben. Za razliko od znatnega vpliva debeline obdelovancev na povečanje hidrofilitnosti lesov po obdelavi s plazmo vpliv debeline obdelovancev na povečanje omočljivosti lesov s premazom ni bil tako očiten.

Izkazalo se je, da tehnologija obdelave površin lesa z DBD plazmo s plavajočo elektrodo, ki poteka v zraku in pri atmosferskem tlaku, predstavlja alternativen in okolju prijazen način za povečanje dovzetnosti površin obdelovanca za vpijanje vode in površinskega premaza. Kot je bilo prikazano, je učinek obdelave lesa s plazmo odvisen od vrste parametrov med obdelavo. V prispevku smo proučili le nekatere od njih, in sicer vrsto lesa, podajalno hitrost obdelovanca, razdaljo med elektrodama, razdaljo med elektrodama in obdelovancem in debelino obdelovanca. Izboljšana hidrofilitnost lesa nadalje prispeva k boljšemu vpijanju premazov na vodni osnovi. Predvidevamo, da slednje doprinese tudi k izboljšanim lastnostim utrjenih filmov tovrstnih premazov (Petrič et al., 2007), tudi v daljšem časovnem obdobju (Gindl et al., 2004), kar imamo namen preizkusiti in predstaviti v prihodnje.

## 5 POVZETEK

### 5 SUMMARY

In the present research, treatment of wood with dielectric barrier discharge plasma with a floating electrode, generated in air and at atmospheric pressure, has been shown as an alternative and environmentally friendly technology to increase the susceptibility of workpiece surfaces to wettability with water.

On the one hand, it was shown that with decreasing distance between the electrodes and the workpiece (DEW), the brightness of the generated plasma discharge increases. The phenomenon coincides with the characteristics of the DBD plasma, where the strength of the electrical phenomenon is highly dependent on the distance between the two opposite electrodes. As the distance between the electrodes (DE) increases, the activation and

kinetic energy of the travelling active species decrease. On the other hand, as the DE increases, the intensity of the discharges increases. In the DBD plasma with the floating electrode, the DE influences the direction and density of the electric field generated between the electrodes and the workpiece. As a result, when observed from the front, the more the electrodes were apart, the higher the brightness of the air discharge in the gap between the isolated electrode and the workpiece surface. These findings on the effects of DE and DEW on the measured grey values of plasma discharges were also reflected in the findings of their effect on the wood wettability with water and coating after plasma treatment.

Treatment with plasma affected the roughness of wood surfaces. It was found that the roughness of wood decreases with the prolongation of the processing time. Because plasma is considered as a physical phenomenon, the detected changes in the topography of wood surfaces are due to their etching, cleaning, drying, etc.

The second part of the research confirmed the known fact that treatment of wood with plasma, generated in air and at atmospheric pressure, improves the wettability of wood with water (i.e. hydrophilicity) and water-based coatings.

The water droplets' contact angles (CA) on wood surfaces showed that the level of CA reduction after plasma treatment for both spruce and beech wood is very similar, by 15° to 20°, respectively. Treatment of wood at a lower feed speed contributes to better wettability of the workpiece more than at a higher feed speed. The effect of feed speed was shown to be more evident for beech wood. When applying high voltage in the electrodes in floating electrode DBD plasma, the strength of the generated electric field is highly dependent on DE and DEW. The influence of the individual parameters, as well as the common alteration of these two parameters in the process, was also reflected in the wettability of wood. As the DE increased, the hydrophilicity of the wood increased, which was especially evident when processing beech wood. Changes in DEW from about 1 mm to about 0.5 mm (and vice versa) did not significantly increase the hydrophilicity of wood, but the trend was nevertheless noticeable for both spruce and beech. Of all the parameters

studied, the workpiece thickness had the greatest influence on the effect of plasma treatment on the hydrophilicity of wood. At the thickest beech wood workpieces, the water CA decreased from the original 40° to 13° after 60 s of measurement. However, the thinner (2.5 mm and 1.5 mm) workpieces were completely wetted before the end of measurements (37.9 s or 15.3 s after droplet deposition, respectively).

The coating CAs were found to be higher than the water CAs, due to the different physical properties of the two liquids.

Differences in the hydrophilicity of wood, depending on the material type and plasma pre-treatment, were also reflected in the dynamic changes of coating CA. The effect of plasma treatment on the relative enhancement in coating wettability was similar for both wood species. In contrast to the significant influence of workpiece thickness on the increase of wood hydrophilicity, the effect of workpiece thickness on the wettability enhancement of wood with coating was not so obvious.

As shown in the literature, the effect of plasma treatment depends on several parameters during processing, although only a few of them have been considered in the present paper. The improved hydrophilicity of wood can further contribute to better absorption of water-based coatings. It is anticipated that the latter will also contribute to the improved properties of coating cured films, even over a longer period of time, which we intend to test and present in the future.

## ZAHVALA

### ACKNOWLEDGEMENT

Avtorji se zahvaljujemo Žigi Verbiču, dipl. inž. les., za pomoč pri eksperimentalnem delu. Zahvaljujemo se tudi Javni agenciji za raziskovalno dejavnost (ARRS), ki financira programsko skupino P4-0015.

Projekt je financirala tudi EU – Obzorje 2020, raziskovalno inovacijski program, št. pogodbe 745936.

This project has received funding from the European Union's Horizon 2020 research and innovation programme under grant agreement No 745936.

## LITERATURA REFERENCES

- Altgen, D., Altgen, M., Kyyrö, S., Rautkari, L., & Mai, C. (2020). Time-dependent wettability changes on plasma-treated surfaces of unmodified and thermally modified European beech wood. *European Journal of Wood and Wood Products*, 78, 417-420.
- Avramidis, G., Hauswald, E., Lyapin, A., Militz, H., Viöl, W., & Wolkenhauer, A. (2009). Plasma treatment of wood and wood-based materials to generate hydrophilic or hydrophobic surface characteristics. *Wood Material Science and Engineering*, 4 (1-2), 52-60.
- Blanchard, V., Blanchet, P., & Riedl, B. (2009). Surface energy modification by radiofrequency inductive and capacitive plasmas at low pressures in sugar maple: An exploratory study. *Wood and Fiber Science*, 41(3), 245-254.
- Bittencourt, J. A. (2004). *Fundamentals of plasma physics* (3. izd.). New York, Springer-Verlag: XXIII, 679 p.
- Chirokov, A., Gutsol, A., & Fridman, A. (2005). Atmospheric pressure plasma of dielectric barrier discharges. *Pure and Applied Chemistry*, 77 (2), 487-495.
- Cooper, M., Fridman, G., Fridman, A., & Joshi, S. G. (2010). Biological responses of *Bacillus stratosphericus* to floating electrode-dielectric barrier discharge plasma treatment. *Journal of Applied Microbiology*, 109, 2039-2048.
- Cvelbar, U., & Mozetič, M. (2007). Osnove kisikove plazme. *Vakuumist*, 27 (1-2), 24-33.
- Černák, M., Černáková, L., Hudec, I., Kováčik, D., & Zahoranová, A. (2009). Diffuse Coplanar Surface Barrier Discharge and its applications for in-line processing of low-added-value materials. *The European Physical Journal Applied Physics*, 47 (2), 22806.
- Demirkir, C., Aydin, I., Çolak, S., & Çolakoğlu, G. (2014). Effects of plasma treatment and sanding process on surface roughness of wood veneers. *Turkish Journal of Agriculture and Forestry*, 38, 663-667.
- Drenik, A., Cvelbar, U., Vesel, A., Mozetič, M., Vratnica, Z., & Vujošević, D. (2005). Meritve gostote atomov v šibkoionizirani kisikovi plazmi vzdolž zaprte cevi. *Vakuumist*, 25 1-2, 16-19.
- Fridman, G., Peddinghaus, M., Ayan, H., Fridman, A., Balasubramanian, M., Gutsol, A., Brooks, A., & Friedman, G. (2006). Blood coagulation and living tissue sterilization by floating-electrode dielectric barrier discharge in air. *Plasma Chemistry and Plasma Processing*, 26, 425-442.
- Fridman, G., Shereshevsky, A., Jost, M. M., Brooks, A. D., Fridman, A., Gutsol, A., Vasilets, V., & Friedman, G. (2007). Floating electrode dielectric barrier discharge plasma in air promoting apoptotic behavior in melanoma skin cancer cell lines. *Plasma Chemistry and Plasma Processing*, 27, 163-176.
- Gardner, D. J., Generalla, N. C., Gunnells, D. W., & Wolcott, M. P. (1991). Dynamic wettability of wood. *Langmuir*, 7, 2498-2502.
- Gindl, M., Reiterer, A., Sinn, G., & Stanzl-Tschegg, S. E. (2004). Effects of surface ageing on wettability, surface chemistry, and adhesion of wood. *Holz als Roh- und Werkstoff*, 62, 273-280.
- Goldston, R. J., & Rutherford, P. H. (1995). *Introduction to plasma physics*. Boca Raton, CRC press: 510 p.

Žigon, J., Todorović, D., Pavlič, M., Petrič, M., & Dahle, S.: The influence of selected treatment parameters with atmospheric plasma on the treatment process and wood wettability

- Gramlich, M. W., Gardner, J. D., & Neivandt, J. D. (2006). Surface treatments of wood-plastic composites (WPCs) to improve adhesion. *Journal of Adhesion Science and Technology*, 20 (16), 1873-1887.
- Hardy, J.-M., Levasseur, O., Vlad, M., Stafford, L., & Riedl, B. (2015). Surface free radicals detection using molecular scavenging method on black spruce wood treated with cold, atmospheric-pressure plasmas. *Applied Surface Science*, 359, 137-142.
- Hoffmann, C., Berganza, C., & Zhang, J. (2013). Cold atmospheric plasma: methods of production and application in dentistry and oncology. *Medical Gas Research*, 3 (21), 15 p.
- Jamali, A., & Evans, P. D. (2011). Etching of wood surfaces by glow discharge plasma. *Wood Science and Technology*, 45, 169-182.
- Jamali, A., & Evans, P. D. (2020). Plasma treatment reduced the discoloration of an acrylic coating on hot-oil modified wood exposed to natural weathering. *Coatings*, 10 (3), 248.
- Junkar, I., Hauptman, N., Cvelbar, U., Kovač, J., & Mozetič, M. (2006). Obdelava umetnih žil s kisikovo plazmo. *Vakuumist*, 26 (4), 10-13.
- Klampfer, P., & Jesih, A. (1999). Kemijske reakcije v nizkotemperaturni plazmi. *Vakuumist*, 19 (4), 10-15.
- Klein, M., Miller, N., & Walhout, M. (2001). Time-resolved imaging of spatiotemporal patterns in a one-dimensional dielectric-barrier discharge system. *Physical review E*, 64, 2, 026402.
- Kogelschatz, U. (2002). Filamentary, patterned, and diffuse barrier discharges. *IEEE transactions on plasma science*, 30 (4), 1400-1408.
- Kogelschatz, U., Eliasson, B., & Egli, W. (1997). Dielectric-barrier discharges: Principle and applications. *Journal de Physique, IV Colloque*, 7 (C4), C4/47-C4/66.
- Kralj, P., Ráhel', J., Stupavská, M., Šrajcar, J., Klímek, P., Mishra, P. K., & Wimmer, R. (2015). XPS depth profile of plasma-activated surface of beech wood (*Fagus sylvatica*) and its impact on polyvinyl acetate tensile shear bond strength. *Wood Science and Technology*, 49, 319-330.
- Liptáková, E., & Kúdela, J. (1994). Analysis of the wood-wetting process. *Holzforschung*, 48, 139-144.
- Mozetič, M., & Panjan, P. (2000). Uporaba kisikove plazme v sodobnih tehnologijah. *Vakuumist*, 20 (1), 9-11.
- Mozetič, M. (2019). Surface modification to improve properties of materials. *Materials*, 12 (3), 1-8.
- Panjan, P. (1989). Plazemske tehnologije. *Vakuumist*, 17, 5-7.
- Panjan, P., Kralj, T., Mozetič, M., & Maček, M. (1998). Industrijska uporaba plazemskih površinskih tehnologij. *Vakuumist*, 18 (3), 4-12.
- Panjan, P. (1999). Plazemsko inženirstvo površin. *Vakuumist*, 19 (2), 16-19.
- Papp, E. A., & Csiha, C. (2017). Contact angle as function of surface roughness of different wood species. *Surfaces and Interfaces*, 8: 54-59.
- Peters, F., Hünnekens, B., Wieneke, S., Militz, H., Ohms, G., & Viöl, W. (2017). Comparison of three dielectric barrier discharges regarding their physical characteristics and their influence on the adhesion properties on maple, high density fibreboards and wood plastic composites. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 50, 475206.
- Petrič, M., Knehtl, B., Krause, A., Militz, H., Pavlič, M., Pétrissans, M., Rapp, A., Tomažič, M., Welzbacher, C., Gérardin, P. (2007). Wettability of waterborne coatings on chemically and thermally modified pine wood. *Journal of Coatings Technology and Research*, 4, 203-206.
- Petrič, M. (2013). Surface modification of wood: A critical review. *Reviews of Adhesion and Adhesives*, 1 (2), 216-247.
- Prégent, J., Vandsburger, L., Blanchard, V., Blanchet, P., Riedl, B., Sarkissian, A., & Stafford, L. (2015). Determination of active species in the modification of hardwood samples in the flowing afterglow of N<sub>2</sub> dielectric barrier discharges open to ambient air. *Cellulose*, 22, 811-827.
- Rehn, P., & Viöl, W. (2003). Dielectric barrier discharge treatments at atmospheric pressure for wood surface modification. *Holz als Roh- und Werkstoff*, 61, 145-150.
- Rossnagel, S. M., Westwood, W. D., & Cuomo, J. J. (1990). Handbook of plasma processing technology - Fundamental, etching, deposition and surface interactions. New Jersey, Park Ridge, Noyes Publications: 546 p.
- Saslow, W. M. (2002). Electricity, Magnetism, and Light. Academic press: 800 p.
- Todorović, D. (2019). Vpliv parametrov obdelave z DBD plazmo s plavajočo elektrodo na omočljivost lesa. Diplomsko delo. Ljubljana: Univerza v Ljubljani.
- Tóth, A., Černáková, L., Černák, M., & Kunovská, K. (2007). Surface analysis of groundwood paper treated by diffuse coplanar surface barrier discharge (DCSBD) type atmospheric plasma in air and in nitrogen. *Holzforschung*, 61, 528-531.
- Vesel, A., & Mozetič, M. (2003). Plazemska sterilizacija. *Vakuumist*, 23 (4), 9-14.
- Wälinder, M. E. P., & Gardner, D. J. (1999). Factors influencing contact angle measurements on wood particles by column wicking. *Journal of Adhesion Science and Technology*, 13 (12), 1363-1374.
- Wolf, A. R. (2013). Atmospheric pressure plasma for surface modification. New Jersey, Hoboken, Scrivener Publishing LLC: 249 p.
- Wolkenhauer, A., Avramidis, G., Hauswald, E., Militz, H., & Viöl, W. (2008). Plasma treatment of wood-plastic composites to enhance their adhesion properties. *Journal of Adhesion and Science and Technology*, 22 (16), 2025-2037.
- Wolkenhauer, A., Avramidis, G., Hauswald, E., Militz, H., & Viöl, W. (2009). Sanding vs. plasma treatment of aged wood: A comparison with respect to surface energy. *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 29, 18-22.
- Žigon, J., & Dahle, S. (2019). Improvement of plasma treatment efficiency of wood and coating process by sodium chloride aqueous solutions. *Proligno*, 15 (4), 260-267.
- Žigon, J., Petrič, M., & Dahle, S. (2018). Dielectric barrier discharge (DBD) plasma pretreatment of lignocellulosic materials in air at atmospheric pressure for their improved wettability: a literature review. *Holzforschung*, 72, 979-991.
- Žigon, J., Petrič, M., & Dahle, S. (2019). Artificially aged spruce and beech wood surfaces reactivated using FE-DBD atmospheric plasma. *Holzforschung*, 73 (12), 1069-1081.