

# Otvrdnjivanje zračenjem u procesima površinske obrade drva

---

**Pavelić, Kristina**

**Master's thesis / Diplomski rad**

**2023**

*Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj:* **University of Zagreb, Faculty of Forestry and Wood Technology / Sveučilište u Zagrebu, Fakultet šumarstva i drvne tehnologije**

*Permanent link / Trajna poveznica:* <https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:108:358993>

*Rights / Prava:* [In copyright](#)/[Zaštićeno autorskim pravom.](#)

*Download date / Datum preuzimanja:* **2024-08-27**



*Repository / Repozitorij:*

[University of Zagreb Faculty of Forestry and Wood Technology](#)



**FAKULTET ŠUMARSTVA I DRVNE TEHNOLOGIJE  
DRVNOTEHNOLOŠKI ODSJEK**

**SVEUČILIŠNI DIPLOMSKI STUDIJ  
DRVNOTEHNOLOŠKI PROCESI**

**Kristina Pavelić**

**OTVRDNJIVANJE ZRAČENJEM  
U PROCESIMA POVRŠINSKE  
OBRADE DRVA**

**DIPLOMSKI RAD**

**ZAGREB, 2023.**



**OTVRDNJIVANJE ZRAČENJEM U  
PROCESIMA POVRŠINSKE OBRADJE  
DRVA**

**DIPLOMSKI RAD**

Diplomski studij: Drvnotehnološki procesi

Predmet: Tehnološki procesi površinske obrade drva

Ispitno povjerenstvo:

1. prof. dr. sc. Vlatka Jirouš-Rajković
2. doc. dr. sc. Josip Miklečić
3. izv. prof. dr. sc. Goran Mihulja

Student: Kristina Pavelić

JMBAG: 0068227008

Datum odobrenja teme: 25.04.2023.

Datum predaje rada: 20.08.2023.

Datum obrane rada: 22.09.2023.

Zagreb, rujan, 2023.

## Dokumentacijska kartica

Naslov	Otvrdnjivanje zračenjem u procesima površinske obrade drva
Title	Radiation curing in wood finishing processes
Autor	Kristina Pavelić
Adresa autora	Lanište 3D, 10020 Novi Zagreb, Republika Hrvatska
Mjesto izrade	Sveučilište u Zagrebu, Fakultet šumarstva i drvne tehnologije
Vrsta objave	Diplomski rad
Mentor	prof. dr. sc. Vlatka Jirouš-Rajković
Komentor	prof. dr. sc. Vlatka Jirouš-Rajković
Godina objave	2023.
Obujam	Stranica: 75 Slika: 67 Tablica: 1 Navoda literature: 67
Ključne riječi	UV otvrdnjivanje, elektronsko otvrdnjivanje, tehnologija otvrdnjivanje zračenjem
Keywords	UV cured, electron beam cured, radiation curing
Sažetak	U radu će se napraviti pregled primjene UV i elektronskog zračenja u procesima otvrdnjivanja premaznih materijala na drvu. Rad će obuhvatiti mehanizam otvrdnjivanja, opremu za otvrdnjivanje, materijale koji se primjenjuju za ove tehnologije, nanos premaznih materijala te primjere uporabe ovih tehnologija u procesima površinske obrade drva.
Abstract	The paper will review the application of UV and electronic radiation in the processes of curing coating materials on wood. The paper will cover the curing mechanism, curing equipment, materials used for these technologies, application of coating materials and examples of the use of these technologies in wood surface treatment processes.



**IZJAVA**  
**O AKADEMSKOJ ČESTITOSTI**

**OB FŠDT 05 07**

Revizija: 2

Datum: 29.04.2021.

„Izjavljujem da je moj *diplomski rad* izvorni rezultat mojega rada te da se u izradi istog nisam *koristila* drugim izvorima osim onih koji su u njemu navedeni“.

---

*vlastoručni potpis*

*Kristina Pavelić*

U Zagrebu, 22.09.2023.

## **Zahvala**

*Zahvaljujem se svojoj mentorici, prof. dr. sc. Vlatki Jirouš-Rajković koja mi je svojim stručnim savjetima pomogla i pružala potporu prilikom izrade ovog diplomskog rada.*

*Posebno se želim zahvaliti svojim roditeljima, bratu, sestri i dečku koji su me tokom čitavog školovanja podupirali, vjerovali u mene, bili tu u teškim i sretnim trenucima. Bez njih sve ovo što sam postigla ne bi bilo moguće.*

*I na kraju hvala svim prijateljima i kolegama koje su mi vrijeme na fakultetu učinili ljepšim.*

## Sadržaj

1. Uvod .....	1
2. Otvrđnjivanje zračenjem .....	2
2.1. Premazi.....	3
2.2. Konvencionalni i zračenjem otvrđnjivajući premazi.....	3
2.3. Tehnologija otvrđnjivanja zračenjem .....	4
2.4. Vrste zračenja za otvrđnjivanje lakova .....	6
2.4.1. Ultraljubičasto zračenje (UV).....	6
2.4.2. Elektronsko zračenje .....	7
3. Tehnologija otvrđnjivanja ultraljubičastim (UV) zračenjem .....	9
3.1. Vrste UV otvrđnjujućih premaznih materijala.....	11
3.1.1. UV premazi sa 100% suhe tvari (100% otvrđnjujući premazi).....	11
3.1.2. Otopalni ili vodeni hibridni UV premazi .....	12
3.1.3. UV praškasti premazi.....	13
3.1.4. UV pigmentirani premazi.....	15
3.2. Mehanizmi UV otvrđnjivanja .....	15
3.2.1. Otvrđnjivanje preko slobodnih radikala.....	18
3.2.2. Kationsko otvrđnjivanje .....	26
3.3. Oprema.....	27
3.4. Proces UV otvrđnjivanja .....	32
3.4.1. Primjeri sustava za UV otvrđnjivanje lakova na drvu.....	34
3.5. Tehnologija postizanja mat površina eksimer-sijalicama .....	39
3.6. Inovativne metode UV otvrđnjivanja.....	41
3.6.1. <i>Larolux</i> proces .....	41
3.6.2. Otvrđnjivanje UV plazmom.....	42
3.6.3. UV-LED otvrđnjivanje.....	44
3.7. Novije primjene UV otvrđnjivanja .....	49
3.8. Utjecajni čimbenici na kvalitetu UV otvrđnjivanja .....	55
4. Tehnologija otvrđnjivanja elektronskim zračenjem.....	57
4.1. Premazi koji otvrđnjivaju elektronskim zračenjem.....	60
4.1.1. Napon ubrzavanja elektrona .....	60
4.1.2. Količina zračenja .....	61
4.1.3. Snaga zračenja.....	61
4.2. Formulacija premaza za otvrđnjivanje elektronskim zračenjem.....	61
4.3. Industrijsko postrojenje u tehnologiji elektronskog otvrđnjivanja .....	62
4.4. Primjena elektronskog otvrđnjivanja.....	64
5. Zaključak.....	67
6. Literatura.....	69



## 1. Uvod

Tehnologija procesa otvrdnjivanja zračenjem razvijena je 1960-ih godina. Postupno je počela dobivati na važnosti te je dosegla nova tržišta kako bi konačno postala vrhunska tehnologija u mnogim primjenama, uključujući industriju premaza. Početkom 20. stoljeća je započeo proces UV otvrdnjivanja premaznog materijala dok su se 1940-te godine pojavili prvi premazni materijali koji su otvrdnjivali na drvenoj podlozi. Elektronsko otvrdnjivanje se pojavilo nešto kasnije. Ranih sedamdesetih počinje industrijska primjena elektronskog otvrdnjivanja. Prva tvrtka koja je započela elektronsko otvrdnjivanje premaza za plastične unutarnje obloge jest *Ford Motor Company* čije sjedište se nalazi u SAD-u. Nakon toga je započela primjena u Njemačkoj i Nizozemskoj za otvrdnjivanje premaza za namještaj. U tim ranim godinama primjene zračenja za otvrdnjivanje bio je veliki broj патената i fokus je bio usmjeren na elektronsko otvrdnjivanje. Tijekom 80-tih i 90-tih tehnologija UV otvrdnjivanja premaza pokazala se kao vodeća tehnologija, dok se tehnologija elektronskog otvrdnjivanja industrijski primjenjivala samo u Sjevernoj Americi (Glöckner i drugi, 2008).

Obje tehnologije su se dugoročno pokazale uspješnima u mnogim primjenama koje uključuju ravne podloge i velike brzine otvrdnjivanja. Dan danas obje tehnologije otvrdnjivanja zračenjem su rastuće tehnologije zbog manje potrošnje energije, jeftinijih uređaja u slučaju UV-tehnologije, potrebe za manjim prostorom, jednostavnijeg čišćenja, ne onečišćuju okoliš, a mogu se upotrebljavati na plastikama metalima, tekstilu, drvu i papiru (Glöckner i drugi, 2008). U ovom diplomskom radu će se obraditi obje navedene tehnologije i njihova primjena u drvnom sektoru.

## 2. Otvrdnjivanje zračenjem

Otvrdnjivanje zračenjem je otvrdnjivanje s pomoću zračenja visoke energije. Zračenja visoke energije mogu biti ultraljubičasto, elektronsko ili lasersko zračenje (Struna, 2023). Pri navedenom procesu dolazi do fizičkih promjena (uzrokovanih polimerizacijom, depolimerizacijom, umreživanjem ili cijepljenjem) koje nastaju kada elektromagnetsko zračenje prodire u materijal (Davidson, 2001). Fizičke promjene manifestiraju se na različite načine. Primjerice tekućina prelazi u čvrstu tvar (prilikom stvaranja filma), može doći do promjena u topljivosti (depolimerizacija će povećati topljivost u specifičnom organskom otapalu, a umreživanje može smanjiti topljivost u otapalu ili može doći do promjene u tvrdoći, žilavosti i lomljivosti uslijed umreživanja (Davidson, 2001). Iako bi mnoge vrste zračenja teoretski bile moguće, industrijska primjena je uglavnom ograničena na otvrdnjivanje ultraljubičastim zračenjem (UV) i elektronskim zračenjem (EB). Kod elektronskog zračenja samo zračenje pokreće proces umrežavanja. Prilikom UV otvrdnjivanja zračenjem aktivira se izravno komponenta osjetljiva na svjetlo (fotoinicijator) nakon čega fotoinicijator pokreće proces polimerizacije. Otvrdnjavanje zračenjem odvija se vrlo velikom brzinom — od djelića sekunde do samo nekoliko sekundi (Glöckner i drugi, 2008). Područje u kojima se može upotrebljavati ova tehnologija su pigmentirane tiskarske boje, premazi za drvo, lakovi za pretisak, elektronika, ljepila i ostali industrijski premazi koji mogu uključivati premaze za automobile (Glöckner i drugi, 2008).

Posljednjih nekoliko desetljeća premazi koji otvrdnjivaju zračenjem su počeli rasti otprilike od 6 do 10 % svake godine. Procjenjuje se da veličina globalnog tržišta koja upotrebljava ove tipove premaza ide iznad 300.000 tona. Najveći dio se upotrebljava za UV otvrdnjivanje, dok otprilike od 10 do 12 % pripada elektronskom otvrdnjivanju. Prema znanstveno-istraživačkom institutu (SRI) koji je vršio istraživanja 2005. godine, pokazalo se da Azija ima najveću potrošnju premaznih materijala, nakon čega slijedi Europa i Sjeverna Amerika. U skoroj budućnosti procjenjuje se da će Kina i jugoistočna Azija znatno povećavati svoju proizvodnju, dok će Sjeverna Amerika, Europa i Japan znatno početi zaostajati za vodećim zemljama (Glöckner i drugi, 2008).

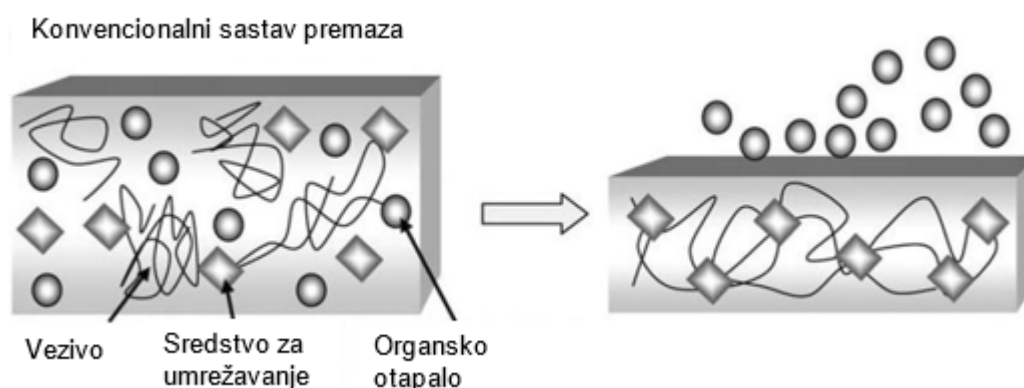
## 2.1. Premazi

Premazi koji otvrdnjivaju zračenjem su formulacije komponenata koje sadrže reaktivne skupine koje reagiraju jedna s drugom nakon izlaganja zračenju bogatom energijom. Nema fizičkog sušenja, a suvremene formulacije u većini slučajeva ne sadrže organska otapala (Glöckner i drugi, 2008).

## 2.2. Konvencionalni i zračenjem otvrdnjivajući premazi

**Konvencionalni (klasični) premazi** sastoje se od veziva (polimer koji stvara premaz), hlapljivog organskog otapala, pigmentata i punila (ukoliko nije prozirni premaz) te aditiva. Ovakvi tipovi premaza se suše isparavanjem otapala i mogućim naknadnim kemijskim umreživanjem veziva sa samim sobom ili s otvrdnjivačem. To se može dogoditi na sobnoj temperaturi, na temperaturama ispod 100 °C (prisilno sušenje) ili iznad 100°C (pečenje). Ukoliko nakon isparavanja otapala ne dođe do nikakve kemijske reakcije, premazi se nazivaju fizički sušivima (Glöckner i drugi, 2008).

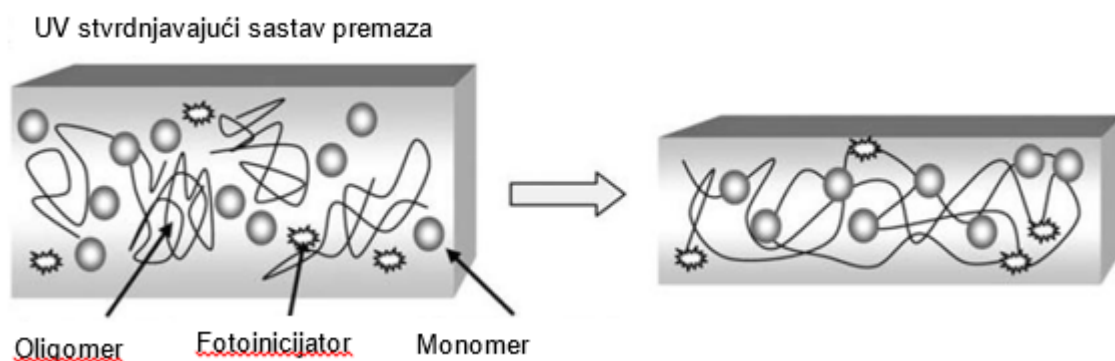
Najpoznatiji predstavnici su formulacije na bazi otapala, odnosno otapalni premazi. Otapalo se primarno koristi da omogući proizvodnju i nanošenje premaza te djeluje kao smanjivač viskoznosti. Na slici 1. prikazano je kako organska otapala napuštaju premaz tijekom sušenja i umreživanja. Također, postoje i premazi na bazi vode, odnosno vodeni premazi gdje je organsko otapalo zamijenjeno vodom. U ovom slučaju veziva su najčešće raspršena u vodi (Glöckner i drugi, 2008).



Slika 1. Konvencionalni sastav premaz (Glöckner i drugi, 2008)

**Premazi koji otvrdnjavaju zračenjem** sastoje se od oligomera, monomera, fotoinicijatora (u slučaju UV otvrdnjavanja), pigmenta i punila (ukoliko nije prozirni premaz) te aditiva. Ovakve vrste premaza otvrdnjuju bez isparavanja hlapljivog otapala. Sve komponente u formulaciji ostaju unutar premaza. Komponente koje tvore premaz kombinacija su oligomera većih molekularnih masa i monomera manjih molekularnih masa (niskomolekularnih monomera) od kojih svi nose reaktivne skupine koje se međusobno umrežuju (Glöckner i drugi, 2008).

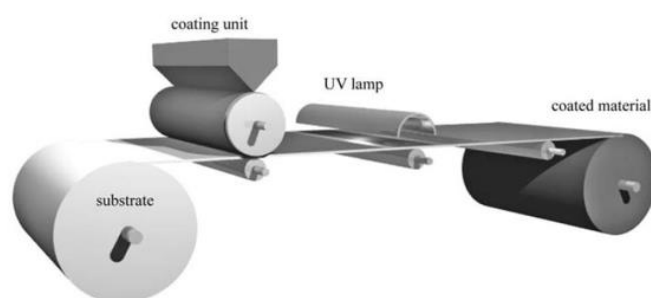
Ni jedna komponenta nije sama po sebi smanjivač viskoznosti, nego sve komponente postaju dio konačne polimerne mreže te pridonose svojstvima konačnog premaza. Na slici 2. je primjer UV otvrdnjujućeg premaza koji se umrežava bez emitiranja organskih otapala (Glöckner i drugi, 2008).



Slika 2. Sastav UV otvrdnjujućeg premaza (Glöckner i drugi, 2008)

### 2.3. Tehnologija otvrdnjavanja zračenjem

Uporabom tehnologije otvrdnjavanja zračenjem dolazi do smanjene emisije hlapljivih organskih spojeva, odnosno spojeva koji hlape spontano (Struna, 2023). Većina formulacije premazih materijala su sustavi sa 100 % suhe tvari (osim formulacija na bazi vode) i ne dolazi do isparavanja otapala u atmosferu (Davidson, 2001). Gotovo trenutačno otvrdnjavanje i odsutnost otapala omogućuju dobivanje suhog i potpuno otvrdnutog premaza u samo nekoliko sekundi. Nema potrebe za dugim vremenima isparavanja ili tunelima za sušenje koji troše vrijeme i energiju u linijama za nanošenje premaza. Na slici 3. prikazan je primjer otvrdnjavanja UV zračenjem (Glöckner i drugi, 2008).



Slika 3. Primjer tehnologije otvrdnjavanja UV zračenjem (Glöckner i drugi, 2008)

Otvrdnjivanje zračenjem je idealna tehnologija za otvrdnjivanje premaza na ravnim (dvodimenzionalnim) podlogama te je jednostavna za montažu i rukovanje (Glöckner i drugi, 2008). Prednosti i nedostaci ove tehnologije prikazane su u nastavku.

Prednosti tehnologije su (Glöckner i drugi, 2008):

- velika brzina otvrdnjivanja
- značajna ušteda vremena i troškova
- niska emisija hlapljivih organskih spojeva
- otvrdnuti premazi pokazuju izvrsnu otpornost i sjaj
- smanjena potrošnja energije za otvrdnjivanje
- manja novčana ulaganja u slučaju UV postrojenja
- potreba za manjim prostorom (posebice u slučaju UV postrojenja)
- moguća primjena na podlogama koje su osjetljive na toplinu.

Nedostaci tehnologije su (Glöckner i drugi, 2008):

- otvrdnjivanje trodimenzionalnih predmeta zahtijeva složena postrojenja za otvrdnjivanje
- upotrebom pojedinih sirovina može doći do iritacije kože
- teško je ostvariti mat završni sloj premaza
- zbog velike količine pigmenata može doći do problema s otvrdnjivanjem debeloslojnih premaza
- određene formulacije premaza ne mogu se upotrebljavati za otvrdnjivanje premaznog materijala na sobnoj temperaturi
- potrebno je osigurati kvalificirano osoblje

- visoki troškovi sirovina
- visoki investicijski troškovi u slučaju upotrebe otvrđnjivanja elektronskim zračenjem
- adhezija na metalne ili pojedine plastične podloge može biti problematična.

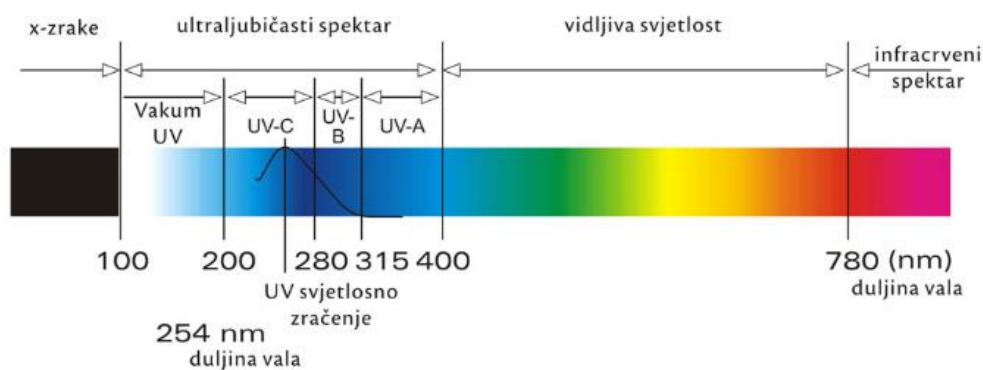
Između elektronskog i UV otvrđnjivanja postoje značajne razlike koje će se obraditi u nastavku, no osnovna razlika u formulaciji premaza je da za elektronsko otvrđnjivanje nije potreban fotoinicijator. Sa tehnološkog gledišta razlika je u vrsti zračenja jer se za UV zračenje koriste valne dužine od 180 nm do 380 nm, a kod elektronskog zračenja se površina premaza bombardira elektronima. Time nastaju slobodni radikali bitni za reakciju polimerizacije. Ova tehnologija ima puno manju primjenu u području lakiranja drva i drvnih materijala nego što ima UV tehnologija (Glöckner i drugi, 2008).

## **2.4. Vrste zračenja za otvrđnjivanje lakova**

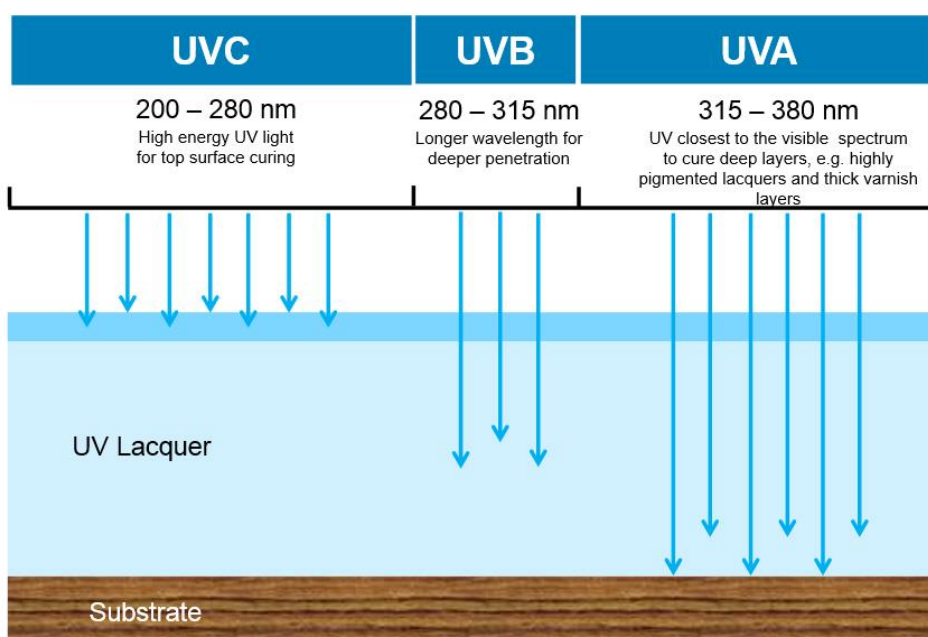
Za otvrđnjivanje lakova zračenjem u užem smislu podrazumijevaju se dvije vrste zračenja: ultraljubičasto zračenje (UV) i elektronsko zračenje (EB).

### **2.4.1. Ultraljubičasto zračenje (UV)**

Ultraljubičasto zračenje (UV) je elektromagnetsko zračenje spektra valnih duljina koji se kreću otprilike između 10 nm i 400 nm, a nalazi se u između rendgenskoga zračenja i ljubičastoga dijela vidljive svjetlosti (Hrvatska enciklopedija, 2023). UV zračenje (slika 4.) se može podijeliti na UV-A (315-400 nm), UV-B (280-315 nm) i UV-C (100-280 nm) (Jirouš-Rajković, 2020). Na slici 5. prikazan je utjecaj UV-A, UV-B i UV-C zračenja na otvrđnjivanje UV premaza (Heraeus Holding, 2023). Upotrebljavanjem ultraljubičastoga zračenja dolazi do fotokemijske reakcije koja stvara umreženu mrežu polimera prilikom čega nastaje ultraljubičasto otvrđnjivanje (UV otvrđnjivanje). UV otvrđnjivanje se najčešće upotrebljava za: tisak, premazivanje i ukrašavanje materijala, stereolitografiju te za sastavljanje različitih proizvoda i materijala (Wikipedia, 2023).



Slika 4. Spektar UV zračenja (Ljekarna Lipa, 2023)

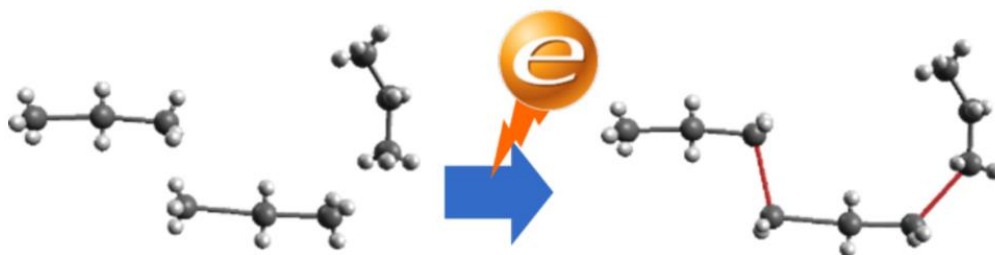


Slika 5. Utjecaj UV-A, UV-B i UV-C zračenja na otvrdnjavanje UV premaza (Heraeus Holding, 2023)

#### 2.4.2. Elektronsko zračenje

„Elektronsko zračenje je roj brzih elektrona nastao izbacivanjem elektrona iz atomskoga omotača ili ubrzavanjem elektrona ubrzivačima čestica. Po prirodi je jednako beta-zračenju i jedna je od sastavnica zračenja kao posljedice radioaktivnosti“ (Struna, 2023).

Beta-čestice su ustvari elektroni velikih brzina, ali za razliku od elektrona u elektronskom omotaču atoma, nastaju iz atomske jezgre (Wikipedia, 2023). Roj beta-čestica, brzih elektrona ili pozitrona izbačenih iz teških atomskih jezgara uzrokuje čestično ionizirajuće zračenje odnosno beta-zračenje ( $\beta$ -zrake) (Hrvatska enciklopedija, 2021). U međudjelovanju beta-zračenja i tvari dolazi do izmjene energije i izmjene strukture ozračene tvari a zaustaviti ga može tanki sloj aluminijske folije. Beta zračenje u zraku ima domet i od nekoliko metara dok brzina beta-čestica iznosi 0,5 do 0,9 brzine svjetlosti (Hrvatska enciklopedija, 2021; Đurina, 2021). Princip otvrđnjivanja lakova elektronskim zračenjem prikazan je na slici 6. Snopovi elektrona trenutačno povezuju monomere i oligomere nanasene na podlogu i stvaraju premaz (NHV Corporation).



Slika 6. Princip otvrđnjivanja elektronskim zračenjem (NHV Corporation)



### **3. Tehnologija otvrđnjivanja ultraljubičastim (UV) zračenjem**

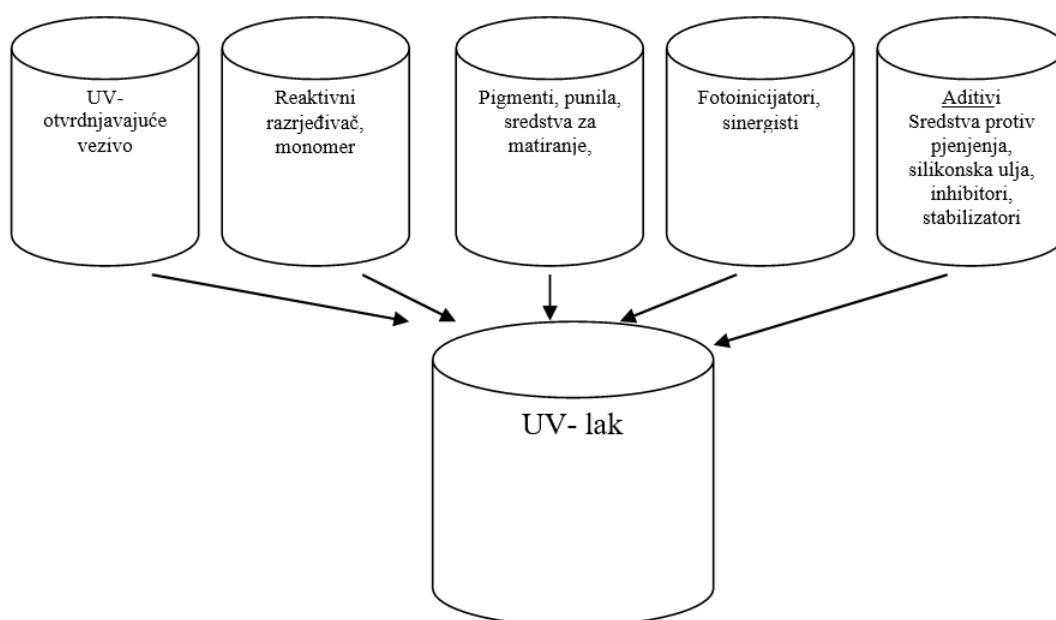
Otvrdnjivanje UV zračenjem (eng. *UV curing*) je brz i učinkoviti proces u kojem se uz pomoć zračenja događa proces pretvorbe tekućeg materijala u čvrsti materijal. Ovakva vrsta tehnologije je razvijena 1960-ih, te se postupno sve više počela upotrebljavati u drvnj industriji. Razlog povećanoj uporabi ovakve vrste tehnologije leži u činjenici da je niska potrošnja energije ali postoje i ekološke i ekonomske prednosti u odnosu na ostale tehnologije koje se primjenjuju (Glöckner i drugi, 2008). UV otvrđnjivanje se mnogo koristi u drvnom sektoru za različite proizvode. Uobičajene metode nanošenja su valjkom, štrcanjem, nalijevanjem i vakuumskim nanošenjem.

Sustav UV premaza koji se sastoji od zapunjača pora, temeljnog premaza, prozirnog ili pigmentiranog završnog premaza koristi se za kuhinjski ili uredski namještaj, stolice, parkete, ukrasne dijelove u automobilima, panele itd. UV otvrđnjivanje nastaje polimerizacijom funkcionalnog oligomera pri čemu dolazi do stvaranja čvrstog umreženog premaza. Da bi se proces otvrđnjivanja premaznog materijala ostvario, potrebna je molekula osjetljiva na svjetlost koja se zove fotoinicijator (Glöckner i drugi, 2008).

Fotoinicijatori su spojevi kod kojeg dolazi do stvaranja radikala kada su izloženi UV izvorima svjetlosti (Jirouš-Rajković, 2019). Svjetlost je ključni element u procesu UV otvrđnjivanja zato što UV zračenje apsorbira fotoinicijator koji prolazi kroz kemijsku modifikaciju prilikom čega dolazi do stvaranja aktivnih vrsta molekula koje pokreću postupak otvrđnjivanja. Prema procesu polimerizacije UV otvrđnjivanje se može podijeliti na radikalsku polimerizaciju, kationsko otvrđnjivanje i umreživanje poliadicijom ili pokondenzacijom koje se mogu inicirati pomoću svjetlosti. Za ovakve sustave potrebni su fotolatentni katalizatori (kiseline ili lužine) koji imaju sposobnost ubrzavanja reakcije umreživanja, no ovaj način otvrđnjivanja se još uvijek nije razvio u velikoj mjeri da bi se počeo masovno upotrebljavati (Glöckner i drugi, 2008).

Tehnologija UV otvrđnjivanja je vrlo bitna za premaze koji sadrže veziva na bazi akrilata ili poliestera (oligomer) i reaktivnog otapala (monomera). Vremensko otvrđnjivanje poliestera se kreće od 10 do 15 sekundi, a za poliakrilate od 5 do 8 sekundi, te je čitav proces otvrđnjivanja desetak puta kraći od klasičnog procesa

otvrdnjivanja. Da bi lakovi postali osjetljivi na UV svjetlost koja je potrebna za otvrdnjivanje, potrebno je dodati fotoinicijatore ili senzibilizatore. Najpovoljnija valna dužina pri kojoj se maksimalno apsorbira svjetlost upotrebljavajući premaze zajedno sa senzibilizatorima se kreće između 340 i 380 nm (Jirouš-Rajković, 2020). Premazi koji otvrdnjuju zračenjem imaju sličnu formulaciju kao i konvencionalni premazi. Značajna razlika između ta dva premaza leži u činjenici da premazi koji otvrdnjuju zračenjem imaju vezivo koje sadržava funkcionalne grupe koje pod utjecajem UV svjetlosti polimeriziraju pri čemu dolazi do nastanka trodimenzionalne netopljive mreže. Formulaciju UV otvrdnjivajućih premaza može se vidjeti na slici 7. (Jirouš-Rajković, 2019).



Slika 7. Sastojci UV otvrdnjivajućih premaza (Jirouš-Rajković, 2019)

Prednosti UV otvrdnjivajućih premaza su (Jirouš-Rajković, 2019):

- ušteda energije
- visoka produktivnost
- brzo otvrdnjivanje
- bez otapala (100 % suhe tvari)
- manje zagrijavanje podloge materijala
- povećana trajnost proizvoda
- otpornost na ogrebotine
- visoki sjaj.

Nedostaci UV otvrdnjivajućih premaza su (Jirouš-Rajković, 2019):

- visoki investicijski troškovi
- upotreba tehnologije koja zahtijeva prilagodbu za 3D proizvode
- mogućnost iritacije kože zbog djelovanja reaktivnih razrjeđivača (monomera).

### 3.1. Vrste UV otvrdnjujućih premaznih materijala

UV otvrdnjujući premazni materijali su se pokazali kao dobra rješenja za većinu drvenih površina koju je potrebno obraditi prije procesa otvrdnjivanja. Premazi se mogu podijeliti na: UV premaze sa 100 % suhe tvari (100 % aktivni ili 100 % otvrdnjujući premazi), otapalne ili vodene hibridne UV premaze i UV premaze u prahu (UV+EB technology, 2023).

#### 3.1.1. UV premazi sa 100% suhe tvari (100% otvrdnjujući premazi)

UV premazi sa 100% suhe tvari (slika 8.) su se po prvi puta počeli upotrebljavati ranih 1970-ih godina. U tom dobu proizvodi su bili na bazi poliesteru te su imali puno nižu učinkovitost nego danas (Baroncini, 2004). Ovakvi tipovi premaza ne sadržavaju otapalo ili vodu (UV+EB technology, 2023). Najčešće se upotrebljavaju za dvodimenzionalne elemente koji se koriste za proizvodnju namještaja. Premazi (prozirni ili pigmentirani) se mogu nanositi pomoću valjaka, nalijevanjem ili raspršivanjem, a otvrdnjuju pomoću visokotlačne ili galijeve sijalice prilikom čega se na površini stvara čvrsti površinski sloj (Nienhuis, 2004).



Slika 8. UV premaz sa 100 % suhe tvari (Cureuv.com, 2023)

Prednosti ovakvih premaza su (Nienhuis, 2004):

- nema hlapljivih organskih spojeva
- brzo otvrđnjivanje
- vrlo dobra otpornost na kemikalije i ogrebotine
- jednostavnije čišćenje uređaja
- kraće linije otvrđnjivanja
- skraćena isporuka gotovih proizvoda.

Nedostaci ovakvih premaza su (Nienhuis, 2004):

- ne mogu se otvrđnjivati trodimenzionalni elementi
- upotrebljavanjem reaktivnog razrjeđivača dolazi do iritacije kože
- dolazi do stvaranje ozona
- pojedini pigmenti (žuti, zeleni i narančasti) teže otvrđnjivaju
- teže prijanjanje između slojeva
- visoki trošak struje za stvaranje UV svjetlosti
- zbog visoke topline potrebno je hlađenje sijalica
- upotrebljavaju se samo za unutarnji interijer.

### **3.1.2. Otapalni ili vodeni hibridni UV premazi**

Otapalni ili vodeni hibridni UV premazi sadrže ili vodu ili otapalo kako bi se smanjio sadržaj suhe aktivne tvari. Ovo smanjenje udjela suhe tvari omogućuje veću lakoću u kontroli nanasene debljine mokrog filma i/ili u kontroli viskoznosti premaza. U upotrebi, ovi se UV premazi nanose na drvene površine različitim metodama i moraju se potpuno osušiti prije UV otvrđnjivanja (UV+EB technology, 2023). Na slici 9. prikazan je vodeni hibridni UV premaz.



Slika 9. UV premaz na bazi vode (Cureuv.com, 2023)

Prednosti vodenih hibridnih UV premaza su (Nienhuis, 2004):

- jednostavnije otvrđnjivanje trodimenzionalnih elemenata
- nema hlapljivih organskih spojeva
- ne sadrži reaktivni razrjeđivač
- povećana trajnost proizvoda
- nakon otvrđnjivanja proizvod ima vrlo dobra svojstva
- skraćena isporuka gotovih proizvoda.

Nedostaci ovakvih premaza su (Nienhuis, 2004):

- pojedini pigmenti (žuti, zeleni i narančasti) teže otvrđuju
- dolazi do isparavanja vode
- nakon sušenja započinje postupak otvrđnjivanja
- zbog visoke topline potrebno je hlađenje sijalica.

### 3.1.3. UV praškasti premazi

UV praškasti premazi (slika 10.) su premazi koji se mogu nanositi na drvo (najčešće na MDF i HDF), plastiku, kompozitne i druge materijale (YouTube, 2023). Ovakvi premazi se najčešće nanose elektrostatički na samu površinu materijala. Nakon zagrijavanja prah se otapa, dolazi do stvaranja površinskog premaza i UV otvrđnjivanja (UV+EB technology, 2023).



Slika 10. UV praškasti premazi (IndiaMART, 2023)

Prednosti ovakvih premaza su (YouTube, 2023):

- brže otvrđnjivanje
- upotreba manje energije
- nema hlapljivih organskih spojeva
- nema otapala
- nema kemikalija
- uređaji zahtijevaju manje prostora
- otvrđnjivanje se vrše na nižim temperaturama.

Nedostaci ovakvih premaza su (Peka Chemie, 2023):

- nije moguće dodavati boju nakon proizvodnje premaza
- teško se proizvode tanki slojevi premaza
- premazi se nanose samo elektrostatičkim putem
- premazi otvrđjavaju na temperaturi većoj od 180 °C
- teško se primjenjuju na velikim plohama.

Neovisno o tome koja se vrsta UV premaza upotrebljava u drvnoj industriji završni premaz osigurava određenu kvalitetu, trajnost i otpornost na različite čimbenike (UV+EB technology, 2023).

### 3.1.4. UV pigmentirani premazi

UV pigmentirani premazi kompliciraniji su za upotrebu u odnosu na prozirne premaze zato što treba dobro uskladiti pigmente i fotoinicijatore kada su izloženi UV svjetlu. Pigmenti bi trebali imati vrlo dobru UV prozirnost kako ne bi došlo do ometanja reakcije fotoinicijatora. S druge strane, za dobru pokrivenost moraju imati dobru apsorpciju u rasponu od 400 do 700 nm. Kako bi se zadovoljili navedeni uvjeti za uspješnu primjenu pigmentiranih premaza upotrebljava se kombinacija fotoinicijatora koji apsorbiraju UV svjetlost u rasponu od 380 do 410 nm s odgovarajućim sijalicama (s dodatkom galija ili željeza). Korištenjem dualnog procesa otvrđnjivanja mogu se eliminirati poteškoće otvrđnjivanja pigmentiranih UV lakova na 3D objektima. Na slici 11. prikazana je stolica na kojoj je upotrebljen UV pigmentirajući premaz (Schwalm, 2006).



Slika 11. Stolica na kojoj je upotrebljen UV pigmentirajući premaz (Schwalm, 2006)

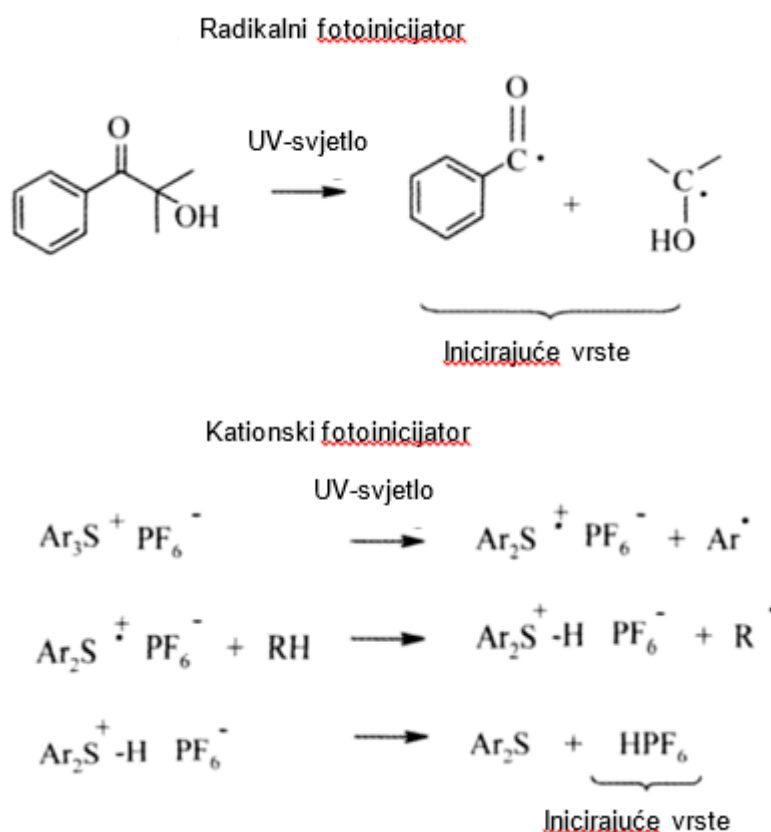
### 3.2. Mehanizmi UV otvrđnjivanja

Najpoznatiji mehanizmi koji se upotrebljavaju za UV otvrđnjivanje su: radikalska polimerizacija i kationsko otvrđnjivanje. Ovakvi tipovi otvrđnjivanja sadrže sljedeću formulaciju (Glöckner i drugi, 2008):

- fotoinicijatori
- smole
- monomeri
- aditivi.

## Fotoinicijator

U mehanizmu otvrdnjivanja slobodnih radikala upotrebljavaju se fotoinicijatori koji proizvode slobodne radikale, a u kationskom otvrdnjivanju koriste se fotoinicijatori koji najčešće proizvode protone ili Lewisovu kiselinu. Na slici 12. je prikazana aktivacijska reakcija radikalnog i kationskog fotoinicijatora. Najčešća upotreba koncentracije fotoinicijatora se kreće u rasponu od 0,5 do 8 tež.%, ali sve to ovisi o samoj primjeni fotoinicijatora (Glöckner i drugi, 2008).



Slika 12. Radikalni i kationski fotoinicijator (Glöckner i drugi, 2008)

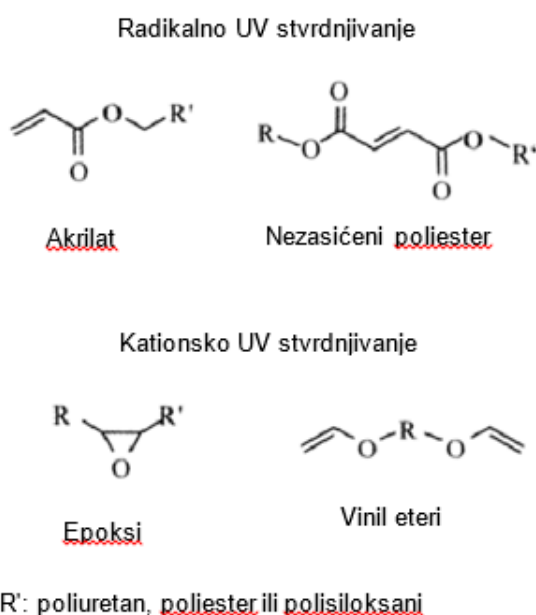
Od fotoinicijatora se zahtjevaju sljedeća svojstva (Jirouš-Rajković, 2019):

- visoka reaktivnost
- termička stabilnost
- visoka stabilnost prilikom skladištenja u tamnom prostoru
- povoljna cijena
- da ne uzrokuju žućenje
- bez mirisa i toksičnosti
- dobra topljivost u laku.



## Smole

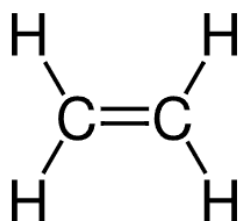
Ova skupina čini najveći dio formulacije za otvrđnjivanje (otprilike od 50 % do 80 %). Okosnicu čini oligomer koji tijekom umrežavanja poboljšava mehanička svojstva i utječe na otpornost materijala pri različitim vremenskim uvjetima. Za UV otvrđnjivanje preko slobodnih radikala se upotrebljavaju nezasićene i akrilatne smole, a za kationsko UV otvrđnjivanje se upotrebljavaju epoksidi i vinil eteri. Primjeri za UV otvrđnjivanje preko slobodnih radikala i kationa prikazani su na slici 13. (Glöckner i drugi, 2008).



Slika 13. UV otvrđnjivanje slobodnih radikala i kationa (Glöckner i drugi, 2008)

## Monomeri

Monomeri (monofunkcionalni ili višefunkcionalni) se upotrebljavaju za smanjenje viskoznosti formulacije i povećanje fleksibilnosti polimera. Kako bi se monomeri unakrsno povezali s polimerima njihovi spojevi moraju sadržavati dvostruke veze (slika 14.) između dva atoma ugljika (Ribas-Massonis i drugi, 2022).



Slika 14. Primjer dvostruke veze između dva atoma ugljika (Wikipedia, 2023)

Najčešći monofunkcionalni monomeri koji se upotrebljavaju su: nezasićeni monomeri (često se koriste s nezasićenim poliesterskim smolama), akrilatni monomeri (najčešće se koriste u paru s akrilatnim smolama) i tiol-monomeri koji se mogu dodavati kao ubrzivači otvrđnjivanja. Na samu krutost polimera utječe omjer monomera, zato što veća koncentracija monomera stvara više uzastopnih veza između monomera. Zbog stvaranja tih veza dolazi do dužih lanaca poprečnih veza što povećava fleksibilnost polimera i smanjuje rizik pucanja. Međutim, veća količina monomera može usporiti otvrđnjivanje jer to znači da se mora stvoriti više veza kako bi se formirao polimer (Ribas-Massonis i drugi, 2022).

### **Aditivi**

Za UV otvrđnjivanje premaza dodaju se različiti sastojci (aditivi) kako bi se poboljšala njihova svojstva. Međutim aditivi ne sudjeluju u samom procesu polimerizacije, pa stoga nisu kovalentno vezani za polimer. Aditivi koji se mogu koristiti u formulaciji su: mineralna punila, razrjeđivač/zgušnjivač, mikrosfere, pigmenti (slika 15.), otapala i slične komponente. Vrsta i količina aditiva koji se upotrebljavaju u formulaciji određuje radili li se o kitu, temeljnom ili prozirnom premazu (Ribas-Massonis i drugi, 2022).



Slika 15. Primjer pigmenta za UV otvrđnjivanje (Luminochem, 2023)

#### **3.2.1. Otvrđnjivanje preko slobodnih radikala**

Većina UV otvrđnjivačke tehnologije upotrebljava mehanizam otvrđnjivanja preko slobodnih radikala zbog brzine UV otvrđnjivanja pri čemu dolazi do veće produktivnosti proizvodnje uz nisku potrošnju energije (Glöckner i drugi, 2008). Prednost ovog sustava je upotreba različitih vrsta monomera i oligomera za dobivanje željenih svojstava, a jedan od glavnih nedostataka je završetak polimerizacije uslijed isključivanja izvora svjetlosti. Međutim ovi sustavi su jako

osjetljivi na inhibiciju kisikom što znači da kisik u zraku sprječava polimerizaciju molekula na površini pri čemu dolazi do vlažne ili ljepljive površine (Pira International Ltd, 2006). Jedan od ključnih sastojaka koji se upotrebljava u ovom procesu su veziva koja sadržavaju ugrađene ugljikove dvostruke veze. Pri otvrđnjivanju premaznog materijala, veziva utječu na kemijsku otpornost, habanje, tvrdoću, fleksibilnost, čvrstoću na vlak i slična svojstva. Za samu proizvodnju reaktivnih veziva najpogodniji su niskomolekularni polikondenzacijski i poliadiacijski proizvodi (Jirouš-Rajković, 2019).

Najznačajnija UV veziva koja se upotrebljavaju za radikalnu polimerizaciju su (Jirouš-Rajković, 2019):

- nezasićeni poliesteri
- epoksi-akrilati
- poliest-akrilati
- polieter-akrilati
- uretan-akrilati.

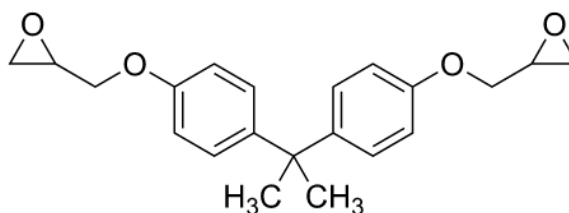
### **Nezasićeni poliesteri**

Prva veziva koja su se počela upotrebljavati u industrijskom nanošenju na drvene materijale su nezasićeni poliesteri na bazi maleinske kiseline, s reaktivnim razrjeđivačem i fotoinicijatorom. Riječ je o formulaciji koja osim stirola sadrži reaktivni razrjeđivač poput dipropilenglikoldiakrilata i/ili organskog otapala. Ova formulacija je bolja od formulacije bez stirola zato što formulacije koje ne sadrže stirol imaju jako malu brzinu reakcije prilikom UV osvjetljivanja pri čemu dolazi do ograničenja njihove uporabe u modernim uređajima s visokim brzinama pomaka. Najčešće se primjenjuju u površinskoj obradi drva u Južnoj i Istočnoj Europi te u Južnoj Americi (Jirouš-Rajković, 2019).

### **Epoksi-akrilati**

Epoksi-akrilati su spojevi koji se dobivaju reakcijom tekućih epoksidnih smola na bazi bisfenol-A-diglicidiletera (slika 16.) s akrilnom kiselinom. Riječ je o reaktivnom vezivu koji daje premaze koji su otporni na kemikalije te imaju vrlo dobru prionljivost na drvenim podlogama i sintetičkim folijama. Jedan od njihovih nedostataka je taj što

imaju aromatsku osnovnu strukturu pri čemu pod utjecajem topline dolazi do žućenja i visoke viskoznosti (Jirouš-Rajković, 2019).



Slika 16. Bisfenol-A-diglicidiletera (Wikipedia, 2023)

### **Poliester-akrilati**

Poliester-akrilati su spojevi koji se dobivaju od poliola i polikarbonskih kiselina u dvostrukom ili trostrukom postupku. U prvoj fazi dolazi do proizvodnje poliesteru koji sadržavaju hidroksilne grupe, u drugoj fazi dolazi do reakcije poliesteru s akrilnom kiselinom dok u trećoj fazi dolazi do reakcije viška akrilnih kiselina s niskomolekulnim epoksidnim smolama. Uporabom reaktivnog razrjeđivača i /ili organskog otapala dolazi do regulacije viskoznosti spojeva. Korištenjem ovih tipova premaza može doći do stvaranja niskomolekulnih estera akrilne kiseline pri čemu može doći do iritacije kože (Jirouš-Rajković, 2019).

### **Polieter-akrilati**

Polieter-akrilati su spojevi koji se u zadnje vrijeme dosta upotrebljavaju zbog male viskoznosti, dobrih svojstava te visoke UV reaktivnosti. Ovakvi tipovi veziva se najčešće koriste za proizvodnju lakova bez mirisa. Primjenjuju se i za razrjeđivanje epoksi, poliesterskih i uretanskih akrilata. Ostalni monomeri u polieter-akrilatima izbjegavaju se na način da se umjesto niskomolekulnih poliola u sintezi upotrebljavaju tzv. etoksilirani i /ili propoksilirani polioli velike molekularne mase. Na taj način nastaju polioli većih molekula čiji su esteri manje hlapljivi, manje su viskozni i ne dolazi do nadraživanja kože (Jirouš-Rajković, 2019).

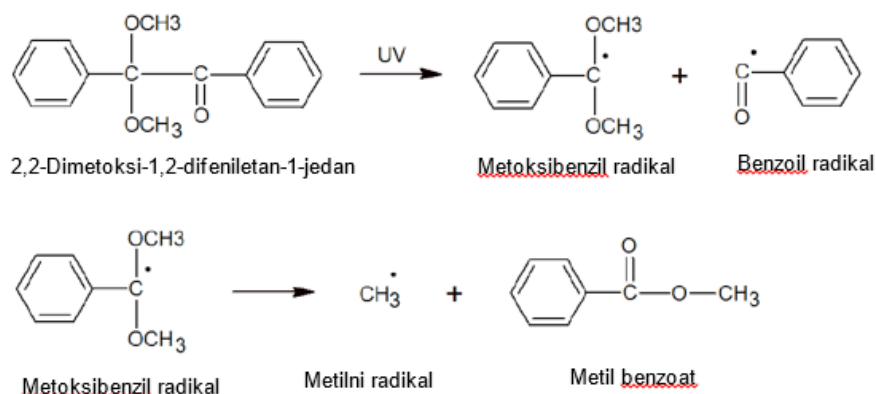
### **Uretan-akrilati**

Uretan-akrilati su spojevi koji se dobivaju reakcijom monomernih izocijanata s polioluma i hidroksiakrilatima. Postoji mogućnost dobivanja mnogobrojnih proizvoda s obzirom da se kao izocijanat mogu primjenjivati alifatski ili aromatski spojevi, a kao

polioli mogu se upotrebljavati i poliesterski polioli. Uretansko-akrilatni spojevi se moraju razrijediti organskim otapalima, niskoviskoznim polieter-akrilatima ili reaktivnim razrjeđivačima (Jirouš-Rajković, 2019).

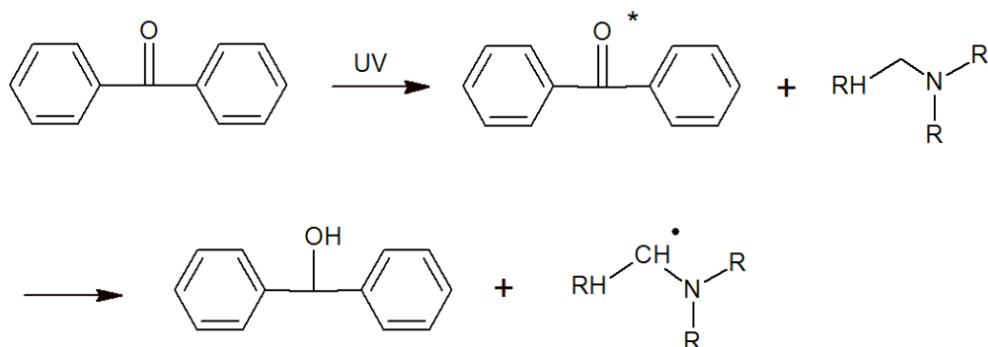
U procesu otvrđnjivanja preko slobodnih radikala, imamo dva osnovna principa djelovanja fotoinicijatora (Norrish tip I i II inicijator) (Polymerdatabase, 2023), a to su: stvaranje radikala homolitičkim cijepanjem veza (npr. benzoineter, benzilketali) i stvaranje radikala izlučivanjem vodika (npr. benzofenon, tioksanton). Ovi inicijatori za stvaranje radikala trebaju koinicijatore (sinergiste) (Jirouš-Rajković, 2019).

**Norrish tip I inicijatori** su spojevi koji nastaju homolitičkim cijepanjem veza između karbonilne skupine i  $\alpha$ -ugljika (Odak i drugi, 2016). Karbonilne skupine inicijatora apsorbiraju foton koji prelaze u pobuđeno stanje, a naknadnim homolitičkim cijepanjem pobuđene  $\alpha$ -ugljkove veze proizvode dva radikalna elemenata kao što je prikazano na slici 17. U primjeru (slika 17.) stvaranja radikala homolitičkim cijepanjem veza dolazi do cijepanja 2,2-dimetoksi-1,2-difenil-etana prilikom čega nastaju metoksibenzil i benzoil radikal. Benzoil radikal pokreće polimerizaciju slobodnih radikala, a metoksibenzil radikal se razgrađuje pri čemu daje stabilniji metilni radikal i metil benzoat (Jirouš-Rajković, 2019).



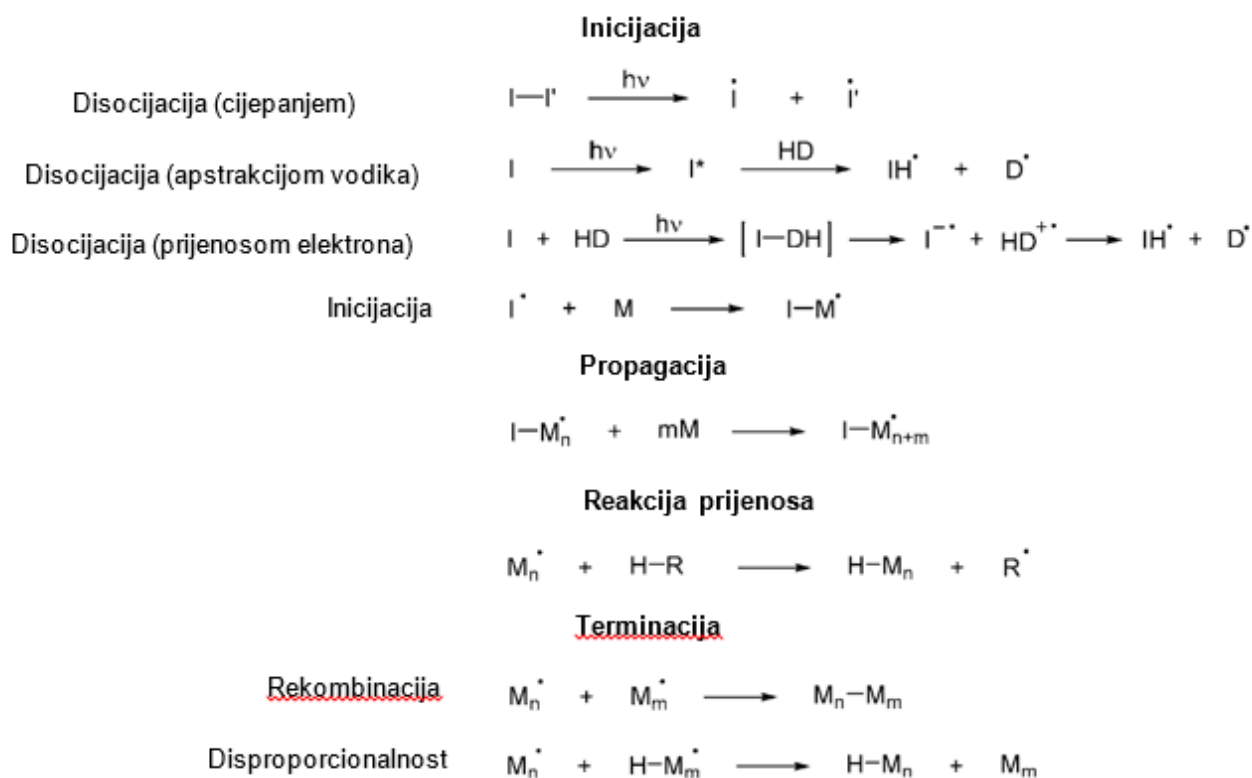
Slika 17. Stvaranje radikala homolitičkim cijepanjem veza (Jirouš-Rajković, 2019)

**Norrish tip II inicijatori** apsorbiraju UV svjetlost kako bi se stvorile pobuđene molekule koje uklanjaju atom vodika iz molekule davatelja (singerista) nakon čega ta molekula reagira s monomerom te započinje postupak polimerizacije. Najčešći fotoinicijator tipa II koji se upotrebljava je benzofenon s njegovim derivatima te izopropil tioksanten u kombinaciji sa sinergistom kao što je amin. Amini su aktivni donatori vodika za pobuđene fotoinicijatore. Apstrakcijom vodika dolazi do proizvodnje reaktivnih alkil-amino radikala kod kojih naknadno započinje proces polimerizacije (slika 18.) (Polymerdatabase, 2023).



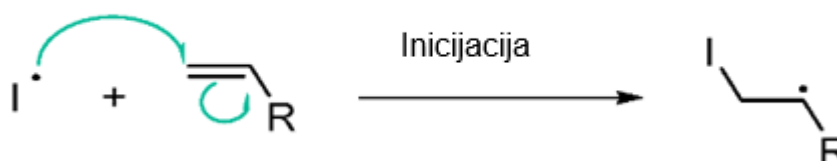
Slika 18. Stvaranje radikala izlučivanjem vodika (Polymerdatabase, 2023)

Da bi došlo do polimerizacije preko slobodnih radikala monomeri koji su povezani s kovalentnim vezama u polimere prolaze kroz niz postupnih kemijskih reakcija (Hrvatska enciklopedija, 2023) koja uključuje početak reakcije (inicijacija), rast lanca (propagacija), reakcija prijenosa i završetak reakcije (terminacija) (slika 19.) (Ribas-Massonis i drugi, 2022).



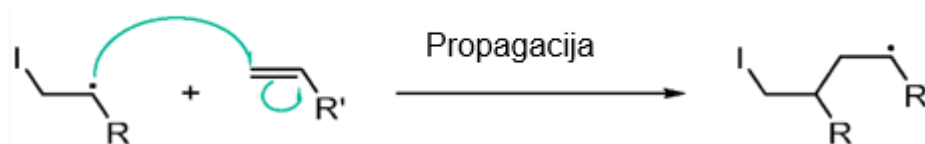
Slika 19. Postupak reakcije polimerizacije preko slobodnih radikala (Ribas-Massonis i drugi, 2022)

Početak reakcije polimerizacije slobodnih radikala sastoji se od dva procesa (slika 20. i slika 21.). Tijekom prvog procesa dolazi do raspadanja inicijatora u dvije vrste slobodnih radikala. Kod UV otvrđnjavanja dolazi do raspadanja inicijatora (apstrakcijom vodika, prijenosom elektrona i sličnim postupcima) nakon djelovanja UV zračenja. U toplinskom otvrđnjavanju inicijator (najčešće se upotrebljava peroksid) se termički razgrađuje cijepanjem veza kisika. U drugom procesu slobodni radikali započinju razmnožavanje polimernih lanaca pri čemu dolazi do spajanja obližnjeg monomera koji može biti dio slobodnog monomera ili oligomera, a ugrađen je u polimernu matricu (Ribas-Massonis i drugi, 2022).



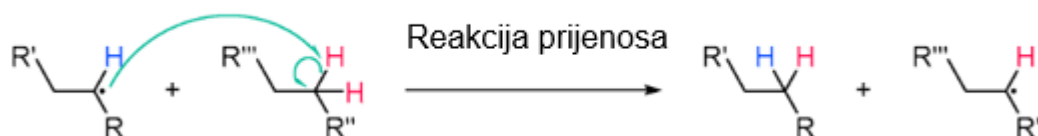
Slika 20. Početak reakcije polimerizacije slobodnih radikala (Ribas-Massonis i drugi, 2022)

Tijekom rasta (propagacije) polimernih lanaca (slika 21.) dolazi do reakcije slobodnih radikala i stvaranja kovalentnih veza između novih radikala. Rezultat reakcije je nastanak poprečnih veza između oligomera (Ribas-Massonis i drugi, 2022).



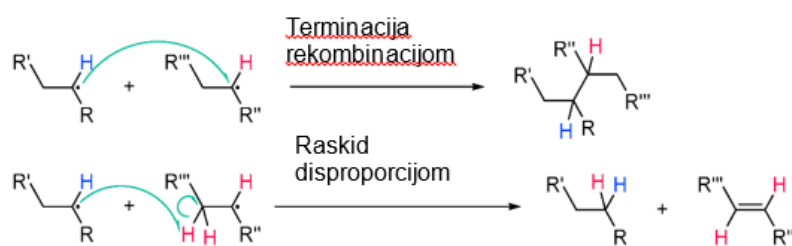
Slika 21. Razmnožavanje polimernih lanaca (Ribas-Massonis i drugi, 2022)

Nakon rasta polimernih lanaca dolazi do prijenosa lančanog sustava (slika 22.). Lanci odvajaju slabo vezane atome (vodik ili halogen) nakon čega se oni homolitično cijepaju. Kao posljedica toga, generiraju se mrtvi polimerni lanac i novi radikal, koji se može nastaviti razmnožavati (Ribas-Massonis i drugi, 2022).



Slika 22. Prijenos polimernog lančanog sustava (Ribas-Massonis i drugi, 2022)

Na samom kraju možemo imati dvije vrste završetka kemijske reakcije (slika 23.), a to su završetak reakcije rekombinacijom i završetak reakcije disproporcioniranjem makromolekula. Pri završetku reakcije rekombinacijom dolazi do izravnog spajanja dva rastuća polimerna lanca koji tvore jedan duži polimer. U završetku reakcije disproporcioniranjem jedan polimerni lanac uklanja vodik iz drugog polimernog lanca pri čemu nastaju dva stabilizirana lanca od kojih jedan sadrži dvostruku vezu (Ribas-Massonis i drugi, 2022).



Slika 23. Dvije vrste završetka reakcije (Ribas-Massonis i drugi, 2022)



Jedan od glavnih nedostataka polimerizacije preko slobodnih radikala je osjetljivost slobodnih radikala na inhibiciju kisikom. S obzirom da je kisik biradikal on ima sposobnost međudjelovanja sa slobodnim radikalima što dovodi do peroksi radikala smanjene reaktivnosti koji nije u mogućnosti raskinuti C-H vezu kako bi sudjelovao u lančanom prijenosu. Kao posljedica toga dolazi do smanjenja polimerizacije, a s obzirom da se na samoj površini kisik manje troši od njegove difuzije može doći do nepotpunog otvrđnjivanja površinskih slojeva. Postoji nekoliko metoda koji se mogu upotrijebiti za smanjenje inhibicije kisikom. To su upotreba inertnog plina, povećavanje koncentracije fotoinicijatora ili se mogu dodavati hvatači kisika u formulaciju kao što su amini ili tioli (Ribas-Massonis i drugi, 2022).

Prednosti UV otvrđnjivanja preko slobodnih radikala su (Glöckner i drugi, 2008):

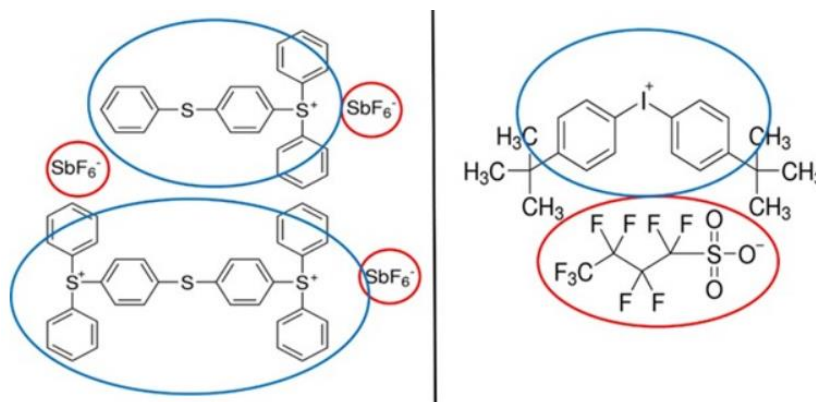
- unutar nekoliko sekundi dolazi do brzog otvrđnjivanja na sobnoj temperaturi
- niska potrošnja energije
- uređaji zauzimaju manje prostora
- pogodan ekološki proces (niska razina hlapljivih organskih spojeva)
- visoka kvaliteta obrade
- povećavanje produktivnosti proizvoda na proizvodnoj liniji strojeva
- svjetlost započinje postupak polimerizacije
- veliki izbor sirovina, fotoinicijatora, oligomera i reaktivnih razrjeđivača.

Nedostaci ovog sustava su (Glöckner i drugi, 2008):

- osjetljivost slobodnih radikala na inhibiciju kisikom
- slabije prijanjanje na podloge poput metala ili plastike
- pojedina punila djeluju kao apsorberi ili reflektori svjetlosti (primjerice pigmenti) te dolazi do sprječavanja dopiranja svjetlosti pojedinih fotoinicijatora
- potrebna je posebna tehnologija za 3D otvrđnjivanje
- veliki utjecaj imaju akrilati na otvrđnjivanje premaznog materijala na fleksibilnim podlogama
- nemogućnost upotrebe određenih vrsta premaza u kombinaciji s UV premaznim materijalima.

### 3.2.2. Kationsko otvrdnjavanje

Fotoinicijatori koji se upotrebljavaju za kationsko otvrdnjavanje se nazivaju fotokiselinskim generatorima. Kationski fotoinicijatori apsorbiraju UV zračenje nakon čega se molekula inicijatora pretvara u Lewisovu kiselinu. Najčešći fotoinicijatori koji se upotrebljavaju u kationskom otvrdnjivanju su sulfonijeve ili jodonijeve soli koje se sastoje od od kationskog i anionskog para. Kationski dio molekule fotoinicijatora sudjeluje u apsorpciji UV zračenja, dok anionski dio molekule postaje jaka kiselina nakon UV apsorpcije. Na slici 24. možemo vidjeti primjere sulfonijevih i jodonijevih soli prilikom čega su kationski dijelovi označeni plavom bojom, anionski dijelovi su označeni crvenom bojom (Gotro, 2016).



Slika 24. Sulfonijeve i jodonijeve soli (Gotro, 2016)

Kationske čestice apsorbiraju svjetlost, stoga njihove strukture određuje fotoosjetljivost, kvantni prinos i toplinska stabilnost soli. Anionske čestice određuju jačinu kiseline, učinkovitost samih inicijatora te reaktivnost ionskog para u procesu polimerizacije (Noè i drugi, 2020). Od ovakvih tipova soli najviše se koriste trifenilsulfonijeve soli, diazonijeve soli, ferocenijeve soli te različiti drugi spojevi. Upotrebljavanjem onijevih soli dolazi do formiranja stabilnih lanaca protoneke ili Lewisove kiseline prilikom čega nastaje mala vjerojatnost da će doći do prekida lanaca. Zahvaljujući ovim jakim kiselinama dolazi do kationske polimerizacije pri čemu kemijski dijelovi lanaca ostaju stabilni (Polymerdatabase, 2023). Ukoliko ove kiseline nisu dovoljno jake tada se spojene čestice koje imaju jaku nukleofilnost kombiniraju s kationima kako bi se spriječio postupak polimerizacije (ScienceDirect, 2023).

Polimerizacija se može događati bez svjetla (u mraku) stoga monomeri i/ili oligomeri mogu otvrdnuti s puno nižom dozom UV zračenja (Polymerdatabase, 2023). Monomeri koji se upotrebljavaju za kationsko otvrđnjivanje su: epoksi spojevi, vinil eteri, laktoni, acetali, ciklički eteri i slični spojevi (ScienceDirect, 2023).

Prednosti kationskog UV otvrđnjivajućeg sustava u odnosu na otvrđnjivanje slobodnih radikala su (Glöckner i drugi, 2008; Noè i drugi, 2020):

- na kationski sustav ne utječe inhibicija kisika stoga tijekom samog procesa otvrđnjivanja ne zahtjeva inertnu atmosferu
- proces otvrđnjivanja se može nastaviti nakon uklanjanja izvora svjetlosti pri čemu se ovaj proces može nazvati „tamna reakcija“ koja može dovesti do pretvorbe monomera na sobnoj temperaturi ili na toplinskoj obradi
- kationski monomeri nisu otrovni i ne uzrokuju iritaciju kože
- tijekom samog procesa otvrđnjivanja dolazi do manjeg volumnog utezanja i zbog toga otvrđnjivajuće podloge sadržavaju veću toplinsku otpornost
- visoka kemijska otpornost, visoki sjaj, visoka mehanička čvrstoća te otpornost na abraziju.

Nedostaci ovog sustava su (Glöckner i drugi, 2008):

- voda zaustavlja proces polimerizacije
- sporiji proces otvrđnjivanja u odnosu na proces slobodnih radikala (proces se nastavlja određeno vrijeme nakon završetka zračenja)
- za pokretanje samog procesa potrebna je svjetlost
- smanjena dostupnost sirovina u odnosu na akrilate.

### **3.3. Oprema**

U opremu koja se upotrebljava za UV otvrđnjivanje u drvnoj industriji pripadaju (Jirouš-Rajković, 2020):

- UV sijalice (lampe)
- reflektori (eliptični ili parabolični)
- opskrbljivanje električnom energijom
- zaštitni sustav
- sustavi za hlađenje
- odvođenja ozona.

### **UV sijalice (lampe)**

UV sijalice emitiraju valnu duljinu i intenzitet svjetlosti UV zračenja. Emisija valnih duljina sijalica ovise o konstrukciji sijalica, a najčešće se upotrebljavaju živa ili galij u kombinaciji s volframovim elektrodama. Osim ovih vrsta mogu se upotrebljavati i sijalice koje imaju dodatne elemente (primjerice indij ili željezo) koji su dodani u malim količinama (Bulian i drugi, 2009). Snaga sijalica ovisi o plinu koji se nalazi unutar samih sijalica. Najčešće se proizvode snage od 80 do 120 W/cm, ali za specijalne proizvode se upotrebljavaju snage do 275 W/cm. Veličine se kreću između 50 i 2000 milimetara (Jaić i drugi, 2000). Trajnost UV sijalica se kreće u prosjeku između 1500 i 2000 sati sve dok mu snaga ne padne na 80 %. Živine sijalice daju otprilike od 25 % do 30 % UV zračenja (UV-A, UV-B i UV-C) i infracrveno zračenje od 50% do 60% (Jirouš-Rajković, 2020). Da bi otvrdnjivanje same površine bilo uspješno, treba voditi računa o kompatibilnosti između odabira sijalica i sastava premaznih materijala zato što su pojedini fotoinicijatori osjetljivi na određene valne duljine UV spektra (Bulian i drugi, 2009). Većina sijalica stvaraju ozon zbog djelovanja između UV svjetlosti i kisika. Kako je ozon plin koji je dosta opasan za ljude i okolinu potrebno ga je smanjiti uporabom specijalnog stakla za samu konstrukciju sijalica te dobar izolacijski sustav (ispod 0,1 ppm). Inhibicija zraka na samoj površini predstavlja veliki problem koji se rješava pomoću dušika koji sprječava stvaranje ozona (Jirouš-Rajković, 2019).

U drvnoj industriji za UV otvrdnjivanje premaznih materijala sijalice možemo podijeliti na (Jirouš-Rajković, 2020):

- niskotlačne sijalice (male snage do 10 W/cm)
- srednjetačne sijalice (srednje snage od 30 do 50 W/cm)
- visokotlačne sijalice (velike snage od 80 do 120 W/cm).

Za niskotlačne sijalice (slika 25.) se najčešće upotrebljavaju fluorescentne žarulje koje služe za ozračivanje premaznog materijala kod bezbojnih (valna duljina UV spektra iznosi otprilike 360 nm) i pigmentiranih premaza (valna duljina UV spektra iznosi otprilike 420 nm) (Jaić i drugi, 2000).



Slika 25. Niskotlačne sijalice (UV-technik Speziallampen GmbH, 2023)

Srednjetlačne sijalice (slika 26.) se upotrebljavaju za ubrzavanje i završetak faze želiranja. Ovakve sijalice mogu biti živine koje se upotrebljavaju za bezbojne premaze (valna duljina UV spektra iznosi otprilike 366 nm) ili galijeve koje se najviše koriste za pigmentirane premaze (valna duljina UV spektra iznosi 412 i 420 nm) (Jaić i drugi, 2000) i premaze koji sadržavaju titanov dioksid koji je vrlo bitan za bijele i pastelne premaze (Bulian i drugi, 2009).



Slika 26. Srednjetlačne sijalice (Alpha-Purify, 2023)

Visokotlačne sijalice (slika 27.) su sijalice koje se upotrebljavaju za završno umreživanje. Najčešće se upotrebljavaju živine i galijeve sijalice (Jaić i drugi, 2000).

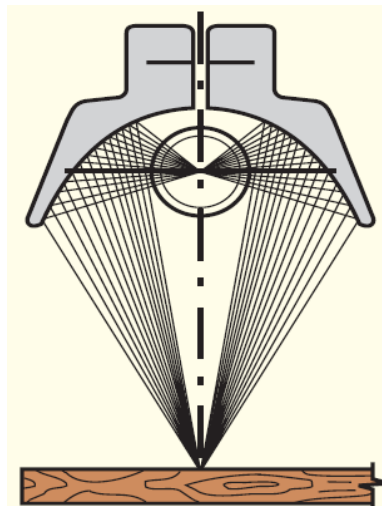


Slika 27. Visokotlačne sijalice (IndiaMART, 2023)

U samim postrojenjima uređaji za UV otvrdnjivanje sadržavaju više UV sijalica radi bržeg otvrdnjivanja premaznog materijala (Jirouš-Rajković, 2020). Na samom početku procesa, obradak prolazi po transportnoj traci ispod sustava za otvrdnjivanje. Doza samog zračenja se kontrolira pomoću snage sijalice i brzinom transportne trake. Niskotlačne sijalice se upotrebljavaju za ozračivanje obratka nakon čega slijedi otvrdnjivanje premaznog materijala pomoću srednjetačne ili visokotlačne sijalice. U samom procesu možemo imati kombinaciju sijalica (primjerice galij+indij) gdje se događa da prva uzrokuje unutarnje umreživanje, a druga djeluje na površini obratka gdje se povećava njezina tvrdoća (Bulian i drugi, 2009).

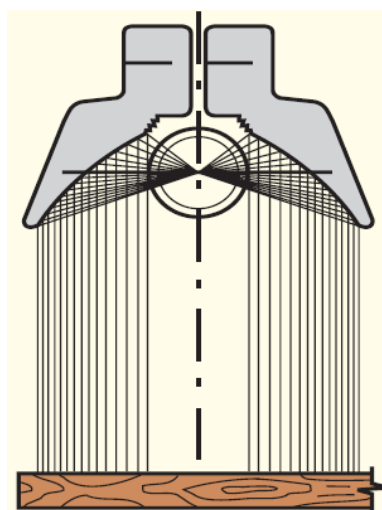
### Reflektori

Reflektori su uređaji koji proizvedenu energiju usmjeravaju na podlogu. Kućište reflektora je građeno od čistog aluminijskog, na kojem se nalazi ogledalo te su zaštićeni kvarcnim staklom. Mogu se podijeliti na dva osnovna oblika, a to su: eliptični i parabolični reflektori. Eliptični reflektori (slika 28.) imaju oblik elipse što znači da se zračenje reflektira oko žarišne linije na određeni dio podloge (Jaić i drugi, 2000).



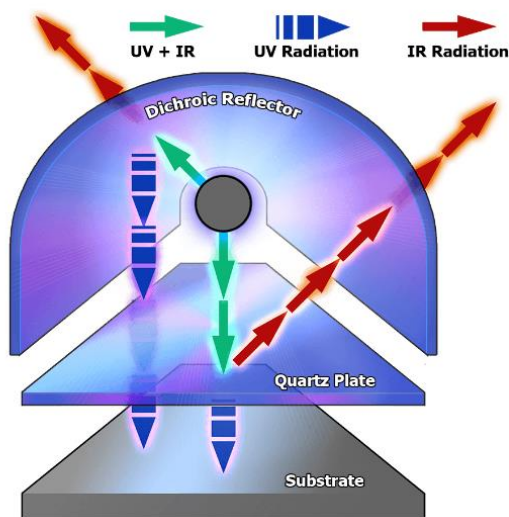
Slika 28. Eliptični tip reflektora (Jaić i drugi, 2000)

Parabolični reflektori (slika 29.) reflektiraju zračenje paralelno na području. U praksi se najčešće upotrebljavaju kombinirani reflektori (Jaić i drugi, 2000).



Slika 29. Parabolični tip reflektora (Jaić i drugi, 2000)

Ukoliko su podloge osjetljive na toplinu tada se primjenjuju dikroični reflektori (slika 30.) koji imaju svrhu uklanjanja topline, a zračenje usmjeravaju prema potrebnom mjestu (Jirouš-Rajković, 2020).



Slika 30. Dikroični reflektori (Alpha-Cure, 2023)

## **Sustavi za hlađenje**

Ravnomjernim hlađenjem sijalica i reflektora može se postići jednoliko sušenje premaza i duži vijek trajanja samih uređaja. Za hlađenje uređaja upotrebljava se zrak, voda i kombinacija zraka i vode. Živine sijalice se najčešće hlade pomoću strujanja zraka koje iznosi između 30 m<sup>3</sup>/h i 50 m<sup>3</sup>/h (Jaić i drugi, 2000).

## **3.4. Proces UV otvrdnjivanja**

Iako je u današnjim vremenima sve veća potražnja za gotovim proizvodima, završna obrada drvene površine mora biti kvalitetno obrađena prema pravilima drvne struke. Da bi se površina adekvatno zaštitila potrebno je poznavati svojstva, strukturu i ostale karakteristike drvnog materijala. Osnovnu strukturu čine lignin i celuloza, a preostali dio ekstraktivne tvari kao što su smole, ulja, bojila i slične tvari. UV premazi se mogu nanositi na iverice, furnire, MDF ploče i slične proizvode od drva. Prije nanosa premaznog materijala potrebno je pripremiti drvenu površinu. Postupak započinje brušenjem podloge i čišćenje četkastim valjcima. Nakon brušenja, obradak se transportira transportnim valjcima do linije strojeva za nanos premaznog materijala. Premazi se mogu nanijeti raspršivanjem ili štrcanjem (ručno ili automatski), valjcima ili nalijevanjem (zavjesom). Nakon nanosa premaznog materijala obradak se transportira na uređaj za otvrdnjivanje koji sadržava sijalice nakon čega slijedi brušenje, nanos drugog sloja, otvrdnjivanje te završno hlađenje premaznog materijala (Haider, 2023).

### **UV temeljni premaz (zapunjač pora i temelj za impregnaciju)**

Temelj za impregnaciju ima nešto manju viskoznost nego zapunjač pora ali oba imaju sličnu funkciju i nanose se direktno na podlogu. Temelj za impregnaciju popunjava pore podloge kako bi se dobila glatka površina. Ovim se sredstvom na drvu i furnirima postiže efekt otvorenih pora. Obavezno se nakon sušenja bruse i često se za temeljni impregnacijski premaz rabi epoksi akrilatni oligomer (slika 31.), a u za veću otpornost na abraziju može se dodati i uretan akrilat. Zapunjači pora i temelji za impregnaciju sadrže kalcijev karbonat, barijev sulfat, kalcijev sulfat, talk, cinkov oksid i ATH aluminijev trihidroksid.



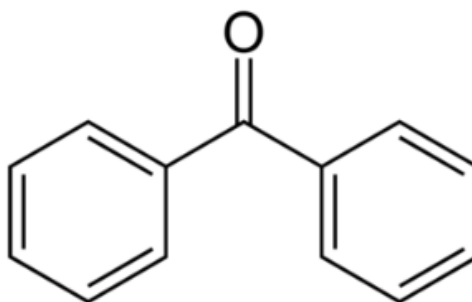
U većem postotku ih ima u zapunjačima pora, a u manjem u temeljima za impregnaciju gdje služe kao punila i sredstva koja poboljšavaju brušenje, a mogu i smanjiti sjaj kod formulacija sa 100 % suhe tvari. U formulacije temelja za impregnaciju ne dodavaju se silikoni ili silikonski akrilati zato što uzrokuju slabije prijanjanje premaznog materijala (Haider, 2023).



Slika 31. Primjer epoksi akrilatnog oligomera (Echemi.com Provide Better Products and Services, 2023)

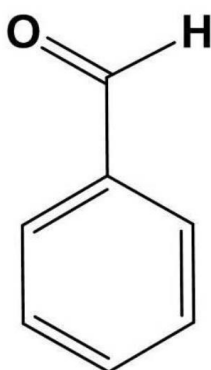
### **Završni premaz**

U završnom sloju UV premaza vrlo jednostavno se može postići visoki sjaj, ali je nešto teže dobiti odgovarajuću mat površinu. Važan je odabir pravog sredstva za matiranje jer ono može značajno povećati viskoznost. Kako bi se postigla odgovarajuća mat površina, debljina premaznog materijala mora biti što tanja zato što tanki sloj uzrokuje niski sjaj površine, dok deblji sloj uzrokuje veći sjaj površine. Za postizanje mat površina kod epoksi akrilata treba izbjegavati aminske aditive i višefunkcionalne monomere. Ukoliko ne želimo visoki sjaj površine tada bi se u formulaciji trebalo izbjegavati dodavanje benzofenonskih (slika 32.), aminskih i akrilatnih spojeva zato što ovi spojevi povećavaju sjaj premaza dok istovremeno uzrokuju žućenje na samoj površini. Da bi se to spriječilo, najčešće se u formulaciji primjenjuju alifatski uretanski akrilati zato što uzrokuju manje žućenje od aromatskih poliester, uretan i epoksi akrilata (Haider, 2023).



Slika 32. Strukturalna formula benzofenona (Wikipedia, 2023)

Fotoinicijatori se najčešće dodavaju od 3 % do 5 %, zato što veći postotak može uzrokovati žućenje, neugodne mirise poput benzaldehida (aromatski aldehid) (slika 33.) te probleme tijekom UV otvrđnjivanja (Haider, 2023).

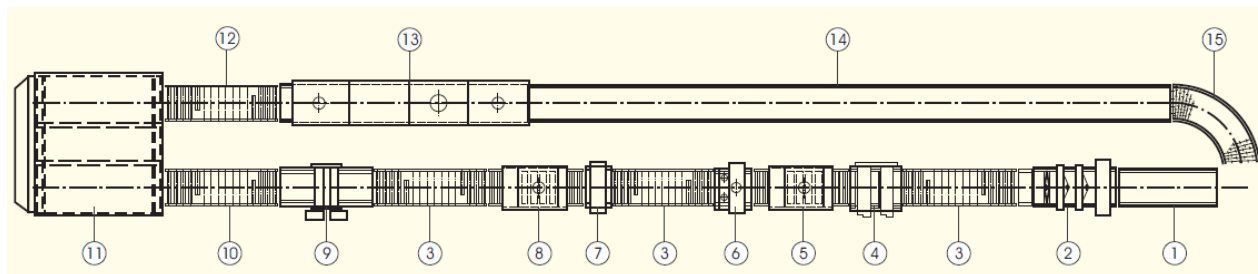


Slika 33. Strukturalna formula benzaldehida (Struna, 2023)

#### 3.4.1. Primjeri sustava za UV otvrđnjivanje lakova na drvu

Proces UV otvrđnjivanja pločastih elemenata započinje temeljnim i pokrivnim lakiranjem. Jedan primjer proizvodne linije procesa (slika 34.) se sastoji od: širokotračne brusilice za brušenje pločastih elemenata, uređaja za nanos premaznog materijala valjcima koji se sastoji od dva valjka, UV sijalica, brusilice za premazni materijal, uređaja za nalijevanje s dvije glave, vertikalne sušionice, sustava za hlađenje s mlaznicama, tračnog i valjkastog transportera. Postupak započinje brušenje pločastih elemenata na širokotračnoj brusilici uz odsisavanje prašine, nakon čega se nanosi UV temeljni sloj pomoću valjaka. Zatim slijedi kratko otvrđnjivanje UV visokotlačnim sijalicama snage 80 W/cm. Nakon otvrđnjivanja slijedi brušenje, nanos drugog sloja premaza pomoću valjaka te UV otvrđnjivanje visokotlačnim sijalicama.

Završni sloj UV premaza se suši u vertikalnoj sušionici, a hlađenje se vrši pomoću mlaznica. Nakon obrade jedne strane ploče, slijedi okretanje zbog obrade druge strane (Jaić i drugi, 2000).

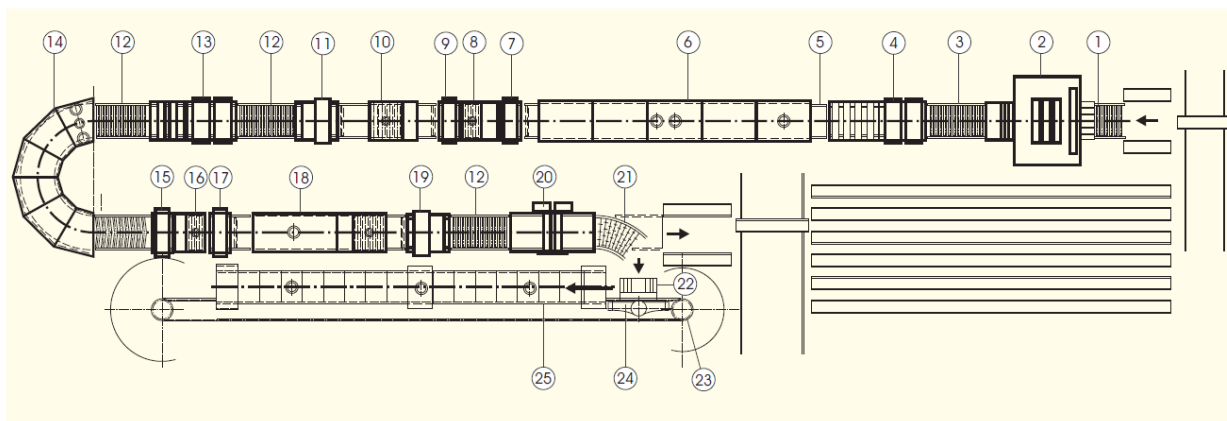


Slika 34. UV otvrđnjivanje pločastih elemenata temeljnim i pokrivnim lakiranjem (Jaić i drugi, 2000)

- 1 – Ulazni tračni transporter
- 2 – Širokotračna brusilica s odsisavanjem prašine
- 3 – Valjčani transporter
- 4 – Nanos premaznog materijala s dva valjka
- 5 – UV sustav za otvrđnjivanje
- 6 – Širokotračna brusilica za premazni materijal
- 7 – Nanos premaznog materijala valjkom
- 8 – UV sušionica
- 9 – Nanos premaznog materijala valjkom
- 10 – Ulazni transporter iz sušionice
- 11 – Vertikalna sušionica
- 12 – Izlazni transporter iz sušionice
- 13 – Sustav za hlađenje s mlaznicama
- 14 – Tračni transporter
- 15 – Polukružni transporter

Drugi primjer UV otvrdnjivanja je obrada pločastih elemenata za namještaj UV osnovnim i pokrivnim premazom (slika 35.). Ovo otvrdnjivanje se najčešće upotrebljava za obradu ravnih furniranih pločastih elemenata koji se upotrebljavaju za namještaj. Postupak započinje brušenjem pločastih elemenata na širokotračnoj brusilici, zatim slijedi nanos osnovnog premaza na površinu i sušenje u sušionici s mlaznicama. Nakon sušionice, slijedi obrada UV premazima. Pomoću valjaka se nanosi prvi sloj UV premaza, zatim se u UV sustavu događa međuželiranje premaza i slijedi nanos drugog sloja UV premaza gdje dolazi do UV otvrdnjivanja. Brušenje ovog premaznog materijala se vrši na širokotračnoj brusilici. Na kraju ovog procesa nanosi se još jedan sloj premaza nakon čega slijedi sušenje te isti postupak nanosa UV pokrivnog premaznog materijala (Jaić i drugi, 2000).

Osim UV pokrivnog premaza mogu se upotrebljavati pojedini konvencionalni premazi kao što su nitrocelulozni, kiselo otvrdnjivački, poliuretanski i slični premazi. Oni se nanose na uređajima za nalijevanje (dvije glave), a sušenje se vrši na etažnim kolicima koji se transportiraju u tunelsku sušionicu (Jaić i drugi, 2000).



Slika 35. UV otvrdnjivanje pločastih elemenata za namještaj UV osnovnim i pokrivnim premazom (Jaić i drugi, 2000)

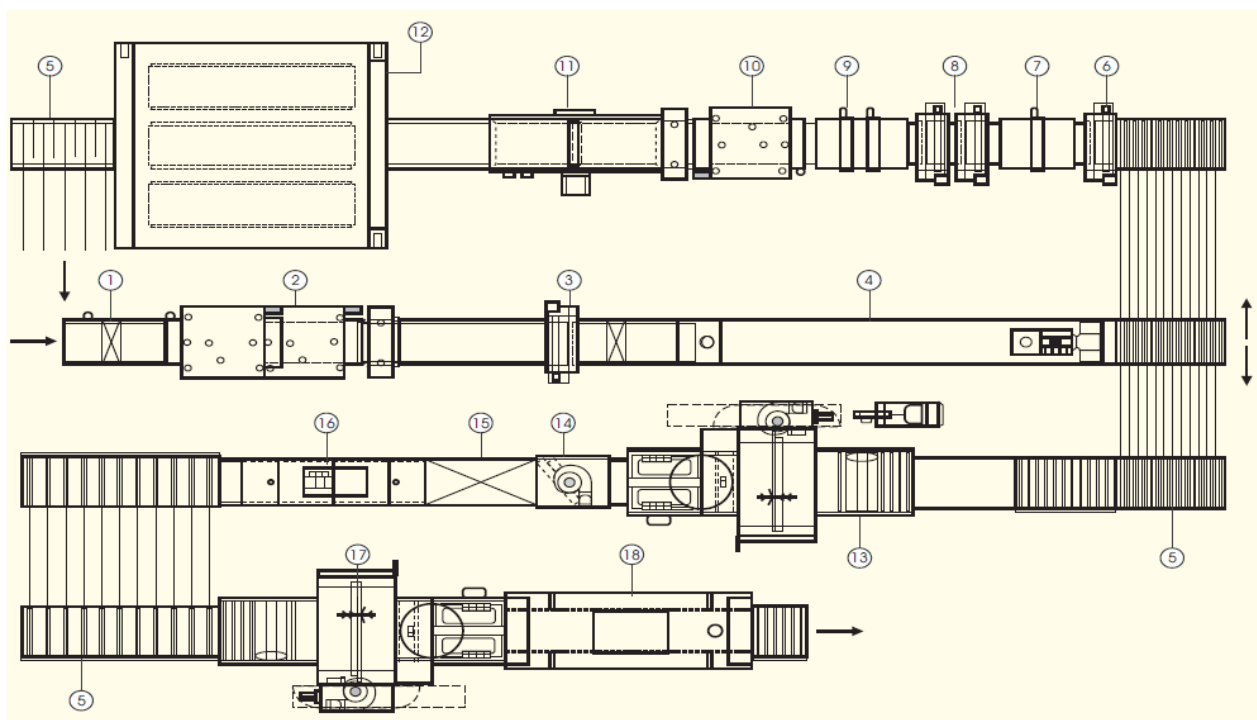
- 1 – Pogonski transporter s valjcima
- 2 – Širokotračna brusilica
- 3 – Valčani transporter
- 4 – Uređaj za nanos premaza
- 5 – Transportna traka
- 6 – Sustav s mlaznicama za sušenje premaza
- 7 – Nanos premaznog materijala valjkom

- 8 – UV sustav za međuželiranje premaza
- 9 – Nanos premaznog materijala valjkom
- 10 – UV sustav za otvrdnjivanje osnovnog premaza
- 11 – Širokotračna brusilica za premazni materijal
- 12 – Valjčani transporter
- 13 – Uređaj za nanos premaza
- 14 – Polukružni sustav za sušenje premaza
- 15 – Nanos premaznog materijala valjkom
- 16 – UV sustav za međuželiranje premaza
- 17 – Nanos premaznog materijala valjkom
- 18 – UV sustav za otvrdnjivanje pokrivnog premaza
- 19 – Širokotračna brusilica za premazni materijal
- 20 – Uređaj za nanos premaznog materijala nalijevanjem s dvije glave
- 21 – Polukružni transporter
- 22 – Etažna kolica
- 23 – Pogonski mehanizam vučnog lanca
- 24 – Zid za odsisavanje drvene prašine
- 25 – Sustav za sušenje

Za treći primjer UV otvrdnjivanja možemo navesti površinsku obradu kuhinjskih elemenata s vertikalnom sušionicom (slika 36.). U ovoj obradi imamo kombinirani sustav u kojoj se mogu upotrebljavati konvencionalni ili UV premazi za obrađivanje ravnih i profiliranih ploča. U sustavu u kojem se obrađuju ravne ploče, premaz se nanosi nalijevanjem ili valjcima, a za profilirane ploče premaz se nanosi štrcanjem (Jaić i drugi, 2000).

U obradi ravnih elemenata proces započinje brušenjem podloge, zatim slijedi valjčani nanos i konvencionalno sušenje premaza u kanalnoj sušionici. Nakon sušenja elementi se transportiraju do valjka koji nanosi prvi sloj UV premaza gdje se želiranje događa pri niskotlačnim sijalicama. Drugi sloj UV premaza se nanosi dvostrukim valjcima nakon čega dolazi do uređaja za UV otvrdnjivanje koji ima dvije visokotlačne sijalice te se dalje transportira do širokotračne brusilice. Na samom kraju procesa završni premaz se nanosi nalijevanjem, a sušenje se vrši u vertikalnoj sušionici (Jaić i drugi, 2000).

U procesu u kojem se obrađuju profilirani elementi ravnih površina sam proces započinje transportiranjem ravnih elemenata do uređaja za brušenje. Izbrušene ploče prolaze kroz liniju premaza i sušenja te se elementi dalje transportiraju do uređaja za profiliranje površine. Na profiliranu površinu nanosi se premaz automatskim prskanjem premaza (u slučaju kada se obrada proizvoda izvodi u prirodnoj boji, automatskim prskanjem premaza nanosi se temeljni premaz). Višak premaza uklanja se četkama. Sušenje premaza (i temeljnog premaza) se vrši u vertikalnoj sušionici koja ima dvije temperaturne zone. Da bi se dobio konačni proizvod, na profilirani element se nanosi završni premaz na uređaju za automatsko prskanje premaza. Kada se nanese završni premaz elementi se moraju sušiti u kanalnoj sušionici (Jaić i drugi, 2000).

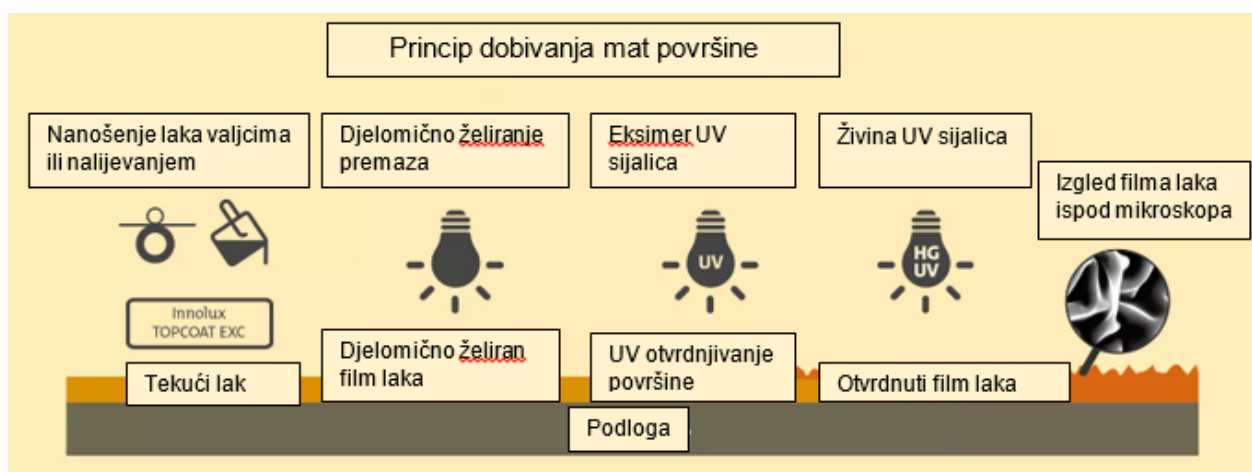


- 1 – Prihvatnik elemenata
- 2 – Brusilica
- 3 – Uređaj za valjanje
- 4 – Kanalna sušionica
- 5 – Transporter elemenata
- 6 – Sustav za valjanje s jednim valjkom
- 7 – UV otvrdjivač (niskotlačne sijalice)

- 8 – Sustav za valjanje s dva valjka
- 9 – UV otvrdnjivač (visokotlačne sijalice)
- 10 – Brusilica
- 11 – Uređaj za nalijevanje
- 12 – Vertikalna sušionica
- 13 – Sustav za prskanje elemenata (temeljni premaz)
- 14 – Uređaj s četkama za uklanjanje viška premaza
- 15 – Kanalna sušionica (I temperaturna zona)
- 16 – Kanalna sušionica (II temperaturna zona)
- 17 – Sustav za prskanje elemenata (završni premaz)
- 18 – Kanalna sušionica

### 3.5. Tehnologija postizanja mat površina eksimer-sijalicama

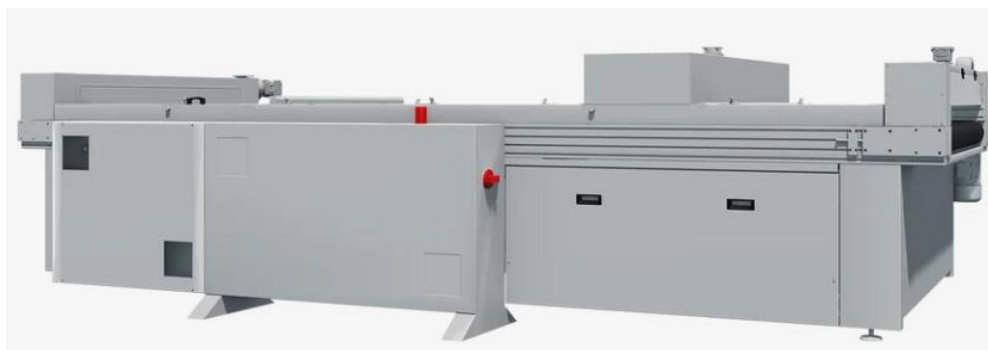
Otvrdnjivanje eksimer-sijalicama je UV otvrdnjivanje koje omogućuje dobivanje mat površina s dobrom otpornošću premaza. Mogu se postići površine s efektom mekoće na dodir i otporne na tragove prstiju. Ovaj proces koristi kratkovalni UV polimerizacijski proces koji se izvodi u atmosferi bez kisika. Započinje isparavanjem otapala, nakon čega se obradak transportira do eksimer-sijalice te se na kraju proces završava UV umreživanjem. Na slici 37. prikazan je princip dobivanja mat površine uporabom eksimer-sijalice (Adler Coatings).



Slika 37. Princip dobivanja mat površine uporabom eksimer-sijalice (Adler Coatings)

Eksimer-sijalice su izvori ultraljubičastog svjetla koji se temelje na spontanoj emisiji eksimer molekula. Rad eksimer-sijalica temelji se na stvaranju pobuđenih dimera (eksimera), koji spontanom prelaskom iz pobuđenog stanja u osnovno stanje rezultiraju emisijom UV-fotona. Spektralni maksimum zračenja eksimer-sijalice određen je radnom eksimer molekulom. Poput sijalica sa živinom parom, eksimer-sijalice su vrsta sijalica na izboj. Eksimer-sijalice sastoje se od kvarcne cijevi koja služi kao dielektrična barijera. Cijev je ispunjena rijetkim plinovima koji mogu tvoriti eksimer molekule. Različiti plinovi proizvode različite pobuđene molekule i određuju koje specifične valne duljine emitira lampa. Iskustvo je pokazalo da na valnoj duljini od 172 nm eksimer-sijalice imaju emisiju vrlo visoke energije, koja započinje proces polimerizacije u najgornjem dijelu sloja UV otvrdnjujućeg laka. Međutim, dubina prodiranja eksimer UV emisije je relativno niska, tako da ovaj proces stvara samo tanki film na tekućem laku bez otvrdnjivanja dubljih slojeva laka. Ovo stvaranje filma dovodi do skupljanja laka pri čemu film laka blizu površine razvija tzv. mikro savijanje. Konačno se otvrdnjivanje laka po cijeloj dubini sloja može ostvariti konvencionalnom UV, LED ili ESH tehnologijom. Rezultat je jako mat, mehanički i kemijski vrlo otporna površina. Mat lakovi trenutno su vrlo traženi, prije svega u industriji namještaja (Wikipedia, 2023).

Za postizanje mat površine počeli su se upotrebljavati uređaji koji se zovu Exydry-Z (slika. 38.). Ovaj inovativni sustav djeluje na način da se premazni materijal štrca pomoću oscilirajućih strojeva. Njegov dizajn omogućuje kontinuirani protok predmeta kroz sušionicu vodeći računa o tome da uklanja kisik bez zaustavljanja proizvodnje. Također ovi sustavi mogu obrađivati i trodimenzionalne predmete prilikom čega se dobiva kvalitetna obrada gotove površine (Cefla Finishing, 2023).



Slika 38. Exydry-Z sustav (Cefla Finishing, 2023)

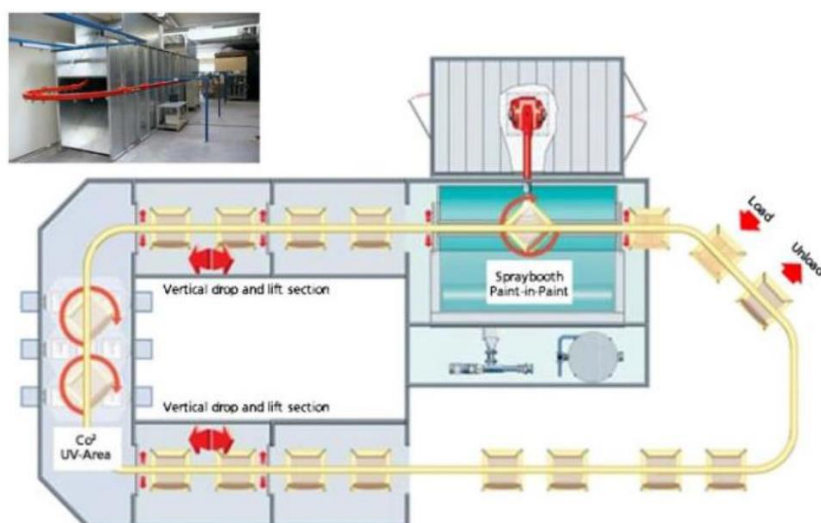


### 3.6. Inovativne metode UV otvrđnjivanja

Od inovativnijih metoda koji su se počeli pojavljivati na tržištu su »*Larolux proces*«, otvrđnjivanje UV plazmom i otvrđnjivanje UV-LED sustavom.

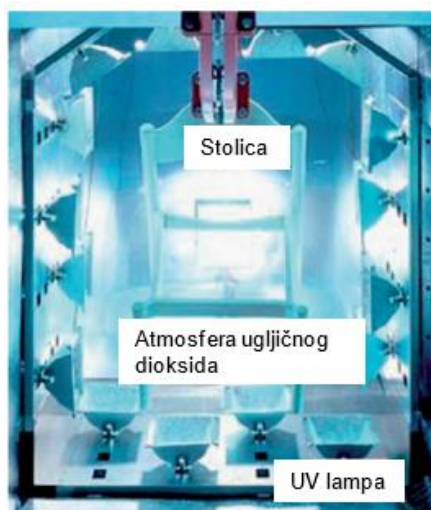
#### 3.6.1. *Larolux proces*

Jedan od inovativnijih postupaka koji se upotrebljava za 3D elemente je *Larolux proces* (slika 39.) kojeg je razvio Erich Beck. U ovom procesu se upotrebljava ugljični dioksid koji je 1,5 puta teži od zraka prilikom čega dolazi do inertiranja u komore u kojoj se događa otvrđnjivanje trodimenzionalnih elemenata. Plin koji je namijenjen za ovaj proces proizvodi se u postrojenjima bez zagađenja okoliša. U ovom procesu nisu potrebne lampe visokih intenziteta koji stvaraju ozon i emitiraju kratkovalno UV zračenje nego se koristi jeftinija oprema. Velike prednosti ovog sustava su umanjeni troškovi samih materijala zbog smanjene upotrebe fotoinicijatora i manje potrošnje plina. U komorama u kojoj se nalazi ugljikov dioksid mogu se otvrđnjivati elementi uz manji ostatni postotak kisika (manje od 1 %). Navedeni postotak se u proizvodnji pokazao sasvim dovoljan za konvencionalne UV premaze koji otvrđuju preko slobodnih radikala. Istraživanja su pokazala da smanjenjem kisika ispod 15 % premazi imaju dobru otpornost na ogrebotine i vremenske uvjete (Schwalm, 2006).



Slika 39. *Larolux proces* (Schwalm, 2006)

Za otvrđnjivanje trodimenzionalnih elemenata, sijalice se moraju prilagoditi geometrijskom obliku elemenata kako bi došlo do odgovarajućeg otvrđnjivanja površine elemenata. Primjerice u procesu otvrđnjivanja stolica (slika 40.) moraju se namjestiti parametri kako bi se održavali inertni uvjeti niske razine kisika da bi se smanjili učinci inhibicije kisikom (Schwalm, 2006). Stolice se uranjaju u željeni premazni materijal te se transportiraju u komoru gdje prevladavaju atmosferski uvjeti s ugljičnim dioksidom i na samom kraju procesa dolazi do UV otvrđnjivanja. Kako bi se otvrdnulo područje oko skrivenih zona („područje sjena“) upotrebljavaju se reflektirajuće aluminijske ploče (Jirouš-Rajković, 2019).



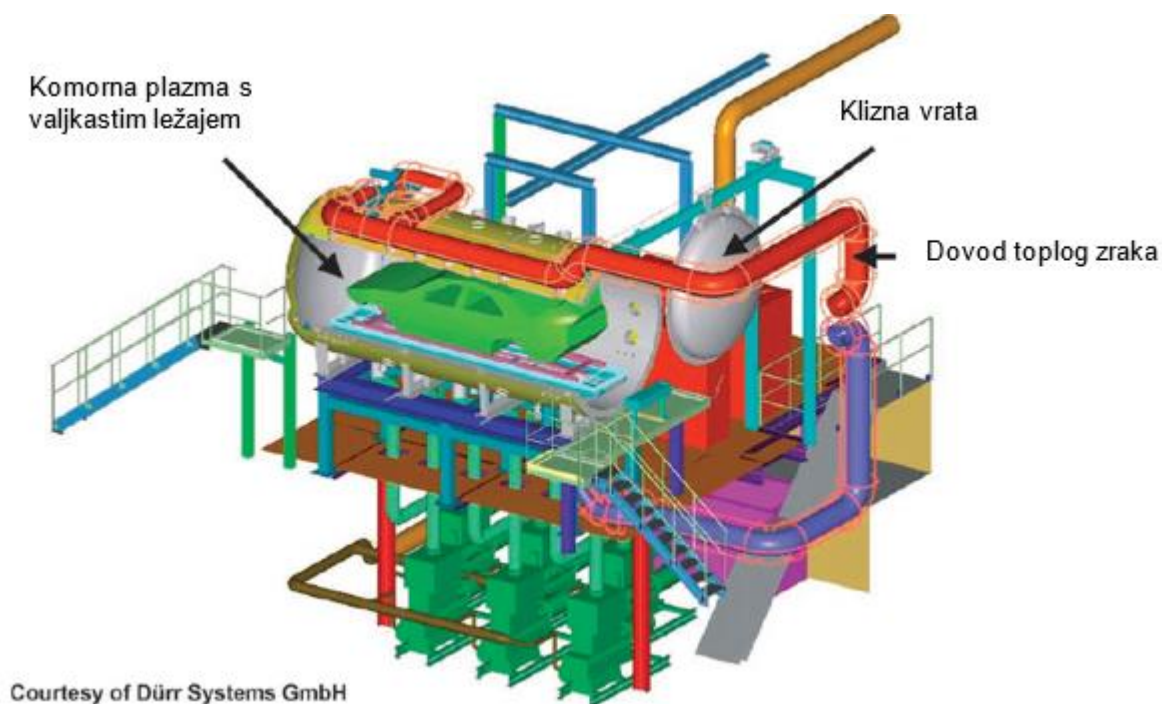
Slika 40. UV otvrđnjivanje stolica (Schwalm, 2006)

*Larolux* proces se može upotrebljavati i u proizvodnji dijelova automobila. Manji dijelovi karoserije automobila se transportiraju na visećim remenima do komore u kojoj se nalazi ugljikov dioksid i UV sijalice te dolazi do otvrđnjivanja (Schwalm, 2006).

### 3.6.2. Otvrđnjivanje UV plazmom

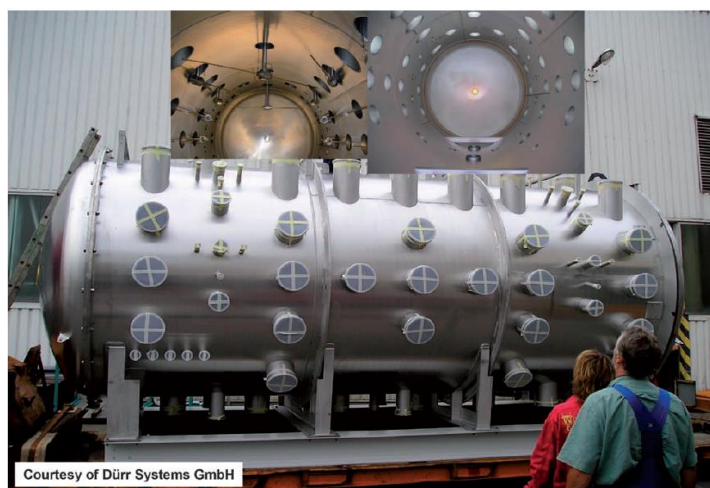
Otvrdnjivanje UV plazmom (slika 41.) inovativni je proces koji se još nalazi u fazi razvoja. U ovom tipu procesa otvrđnjivanje se događa u reaktoru prilikom čega se smanjuje mogućnost pojave skrivenih zona (područje sjena). Elementi s nanesenim premazom transportiraju se u vakumsku komoru u kojoj se nalazi plinovi poput helija, argona ili dušika pod tlakom ispod 0,1 mbar, nakon čega mikro valovi (od 800 do 900

W) iniciraju plazmu koja emitira elektromagnetsko zračenje u UV spektru. Nakon devedeset sekundi dolazi do potpunog umreživanja UV premaza. Rezultati otvrdnjivanja UV premaza na osnovi uretanskih akrilata na ovaj način usporedivi su s otvrdnjivanjem pomoću UV sijalica (Schwalm, 2006).



Slika 41. Otvrdnjivanje UV plazmom (Schwalm, 2006)

Prvi korisnici koji su počeli upotrebljavati ovaj sustav su proizvođači automobilske opreme Duerr GmbH. Oni su počeli upotrebljavati komoru (slika 42.) u kojem se mogu otvrdnjivati UV plazmom čitave karoserije automobila (Schwalm, 2006).



Slika 42. Komora za otvrdnjivanje UV plazmom (Schwalm, 2006)

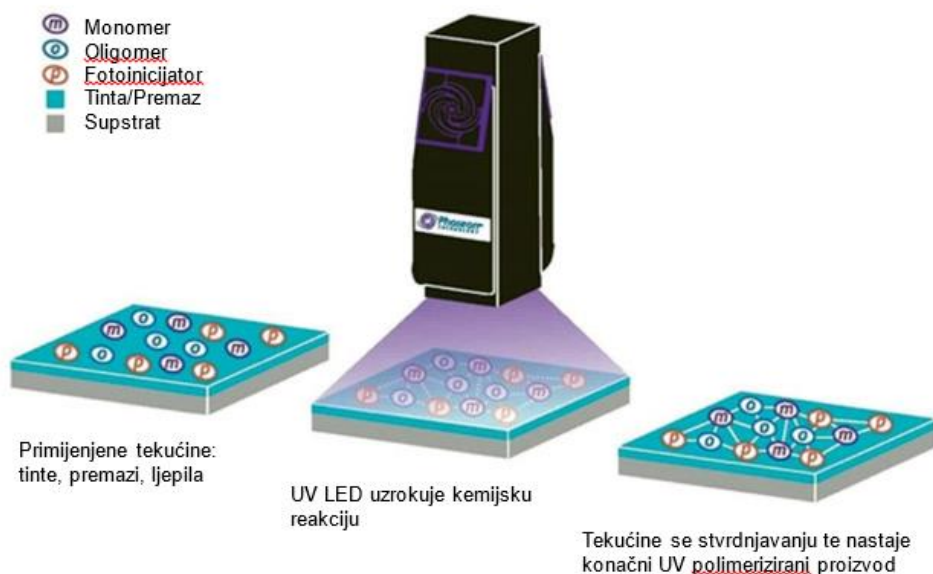
Postrojenje za UV otvrđnjivanje bezbojnih premaza ne zahtjeva veliki prostor koliko zahtjeva postrojenje za konvencionalni postupak toplinskog otvrđnjivanja (slika 43.). Iz tog razloga ovo je velika prednost za proizvođače automobilskih oprema (Schwalm, 2006).



Slika 43. Usporedba postrojenja (Schwalm, 2006)

### 3.6.3. UV-LED otvrđnjivanje

UV-LED rješenja koriste se u industriji premaza jer nude vrlo pouzdano UV otvrđnjivanje (Coatings World). Ova tehnologija se najviše počela upotrebljavati zbog uporabe jeftinijih sirovina te trenutnog i dubinskog otvrđnjivanja na niskim površinskim temperaturama (Šlibar, i drugi, 2010; Coatings World). Pogodna je za okolinu, ekološki je prihvatljiva i donosi značajnu uštedu resursa u odnosu na klasične tehnologije (FuturePrint, 2023; Coatings World). Na slici 44. možemo vidjeti postupak UV-LED otvrđnjivanja premaznog materijala (Coatings World).



Slika 44. UV-LED otvrđnjavanja (Coatings World)

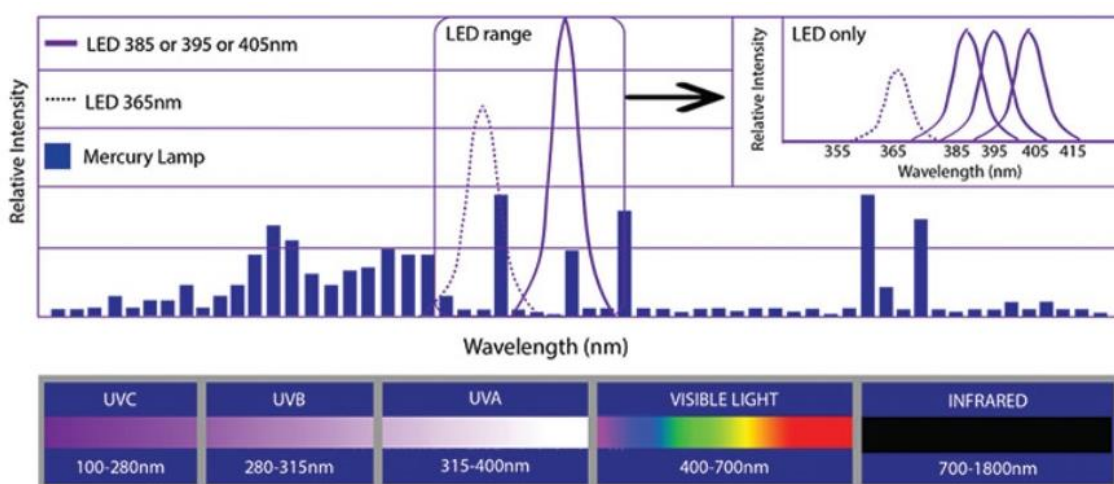
LED ili svjetleća dioda dolazi od engleske riječi "*Light Emitting Diode*" prilikom čega svjetleće diode emitiraju svjetlost iz spojeva p- sloja i n-sloja što znači da p-sloj djeluje kao anoda, a n-sloj djeluje kao katoda (Šlibar, i drugi, 2010). Upotrebljavajući LED sijalice (slika 45.) poboljšani su uvjeti rada jer nema stvaranja ozona i stoga nije potreban ispušni sustav te je smanjena potrošnja energije (Coatings World). Osim što imaju smanjenju potrošnju energije ovakvi tipovi sijalica su izdržljiviji i imaju duži vijek trajanja (Šlibar, i drugi, 2010).



Slika 45. LED sijalica (GEW (EC) Limited, 2023)



Postoji značajna razlika između klasičnih i UV-LED sijalica (slika 46.). Klasične UV sijalice upotrebljavaju plin (najčešće je to živa) za pobuđivanje atoma nakon čega slijedi raspad atoma i emitiranje fotona. Fotoni emitiraju elektromagnetski spektar koji može uključivati i mali dio infracrvenog i vidljivog svjetla, ali samo se otprilike 20 % upotrebljava za UV otvrdnjivanje. UV-LED sijalice upotrebljavaju svjetleće diode koje pretvaraju električnu struju u svjetlost. Prolaskom električne struje kroz diodu dolazi do emitiranja UV zračenja pri čemu dolazi do kemijske reakcije u molekulama unutar tekućine, tvoreći lance polimera sve dok tekućina ne postane kruta (Doctoruv.com). Materijali koji se nalaze u samoj diodi određuju valnu duljinu elektromagnetskog spektra (Coatings World).



Slika 46. Razlika između klasičnih i UV-LED sijalica (Coatings World)

Sherwin-Williams je industrijskim proizvođačima predstavio završnu obradu drva za potpuno otvrdnjivanje LED sijalicama. Ova tehnologija omogućuje uporabu LED sijalica kroz cijelu liniju otvrdnjivanja sa većom uštedom energije i poboljšanjem kvalitete. Korištenjem LED sijalica u potpunosti se eliminirao problem neželjenog efekta žućenja završnih premaza. Na taj način se omogućila učinkovitija proizvodnja. Zbog niskih temperatura otvrdnjivanja LED-sijalica, moguće je površinski obrađivati materijale poput borovine i drugog smolastog drva sa znatno nižim stopama odbačenih proizvoda (grešaka). LED lampe također traju puno dulje (tisuće sati), što smanjuje ukupne troškove održavanja u usporedbi s korištenjem konvencionalnih UV lampi, a bez potrebnih ciklusa zagrijavanja manje je vrijeme zastoja .

Dodatno, LED svjetiljke ne proizvode visoke temperature niti štetan ozon, što smanjuje utjecaj na okoliš (Coatings World).

Prednosti ovog sustava su (American Coatings Association, 2023; Coatings World):

- smanjena površinska temperatura obratka (omogućeno otvrđnjivanje podloga osjetljivih na toplinu)
- minimalno održavanje (nije potrebno vrijeme zagrijavanja i manje je vremena zastoja zahvaljujući trenutnom uključivanju/isključivanju LED dioda, smanjen je otpad, nema reflektora za čišćenje)
- kontinuirana i stabilnija proizvodnja (LED diode traju više od 20 000 sati rada, uz samo minimalan pad snage tijekom vijeka trajanja jedinice za otvrđnjivanje)
- bolje otvrđnjivanje (dobro prianjanje i otvrđnjivanje pigmentiranih premaza za drvo)
- smanjena potrošnja energije (nema opasnog UV-C zračenja, pretjerane topline ili buke, UV-A svjetlo nije štetno za oči)
- smanjena uporaba prostora
- kvalitetniji krajnji proizvodi po niskim troškovima
- premazivanje drvenih površina osjetljivih na toplinu (tradicionalne UV lampe mogu uzrokovati probleme na toplinski osjetljivim drvenim materijalima. Kada se smolasto drvo, poput bora, previše zagrije, smole izlaze na površinu ili "krvare", uzrokujući probleme s prianjanjem premaza i gubitkom boje).

Nedostatak površinskog otvrđnjivanja premaznog materijala očituje se kod otvrđnjivanja na određenim valnim duljinama. Budući da se UV LED otvrđnjivanje odvija na određenim valnim duljinama, a ne u širokom rasponu valnih duljina, fotoinicijatori i smole razvijeni za konvencionalno UV otvrđnjivanje često ne daju očvrslu filmove s istim svojstvima pri korištenju UV LED sustava. Osim toga, UV LED sustavi daju širi raspon energije i eliminiraju UV zračenje kraćih valnih duljina. Veće valne duljine prodiru dublje u materijal i dubinski otvrđuju materijal, ali povećana je inhibicija kisikom na površini zbog proizvodnje manje slobodnih radikala, što može negativno utjecati na produktivnost. "Formuliranje funkcionalne i posebne kemije s tvrdim površinskim otvrđnjavanjem u cijelom rasponu zaštite.

Ovaj problem je jedan od razloga zašto je UV LED otvrđnjivanje za premaze za drvo ograničeno na temeljne premaze ili zapunjače pora i često se ne koristi za završne premaze". »Postoje ograničene količine dostupnih sirovina koje reagiraju na LED valne duljine (405 nm, 395 nm, 385 nm, 365 nm) za površinsko otvrđnjivanje i vrlo malo proizvoda koji mogu u potpunosti očvrstnuti pomoću LED dioda bez promjene boje. Živine sijalice često se koriste na kraju procesa završne obrade kako bi se osiguralo potpuno otvrđnjivanje« (American Coatings Association, 2023).

Također, glavni čimbenici koji bi mogli ograničavati upotrebu UV-LED-a su (Landry i drugi, 2015):

- nedostatak prikladnih otvrđnjujućih materijala, primjerice fotoinicijatora prilagođenih UV LED tehnologiji
- visoki investicijski troškovi (nabavna cijena UV-LED dioda još uvijek je viša od one konvencionalnih sijalica)
- tehnička ograničenja opreme (UV-LED sijalice su osjetljive na toplinu i korištenje dioda velike snage često zahtijeva dodatno hlađenje. Njihova je snaga još uvijek niska u usporedbi s konvencionalnim sijalicama i polimerizacija premaza je uporabom UV-LED dioda sporija nego kod tradicionalnih UV sijalica. Proizvođači sijalica rade na razvoju snažnijih sijalica koje bi trebale poboljšati otvrđnjivanje).

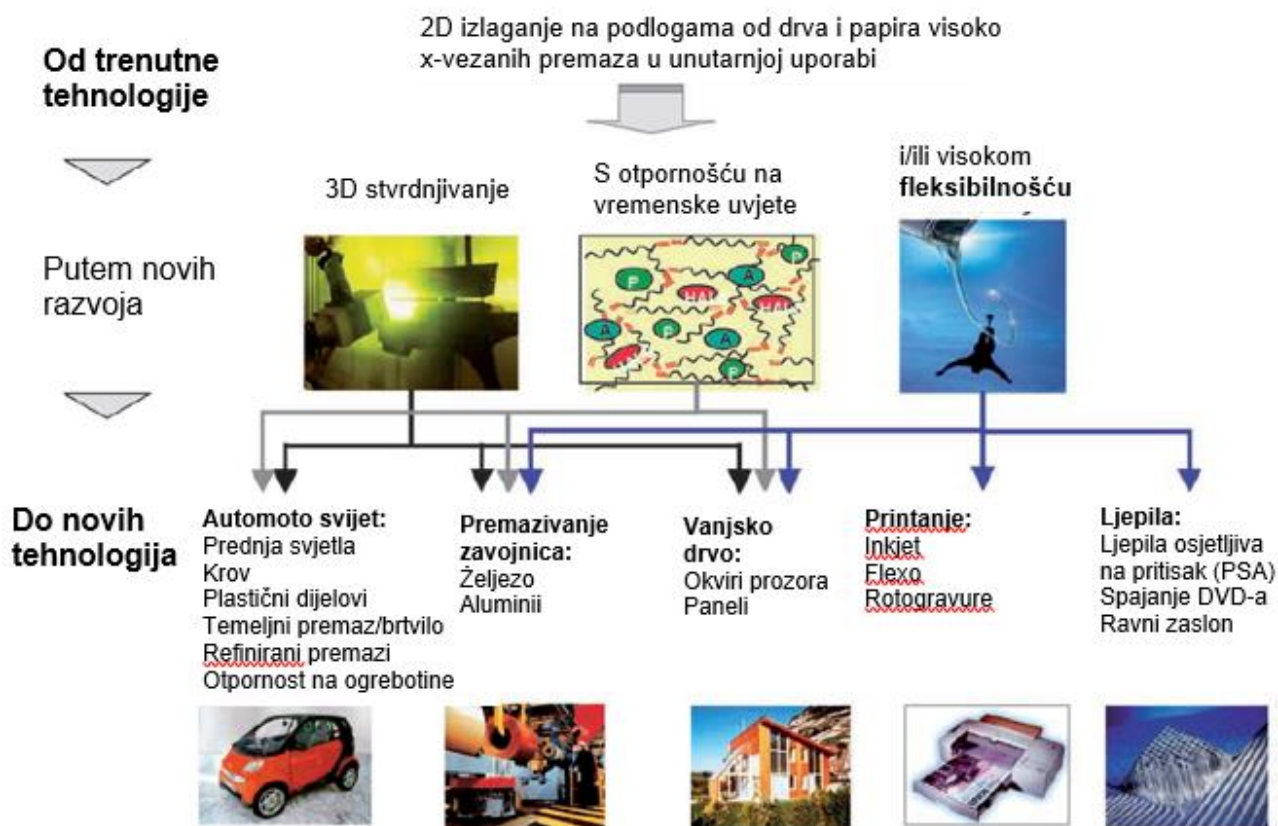
Landry i suradnici (2015) su uspoređivali mehanička svojstva UV-otvrđnjujućih premaza s visokim udjelom suhe tvari i UV-otvrđnjujućih vodenih premaza formuliranih za drvene podove nakon UV-LED otvrđnjivanja i UV-otvrđnjavanja živinim sijalicama. Ustanovili su da ozračenost UV-živinom sijalicom može biti 5 do 12 puta veća od UV-LED sijalice ovisno o položaju sijalice i brzini transportera. Pritom je temperatura površine podnih elemenata otvrđnutih UV-LED sijalicom prosječno 12 °C niža nego kada se koristi UV-živina sijalica. Također je ustanovljeno da intenzitet UV-LED sijalice nije dovoljno visok za otvrđnjivanje UV premaza s visokim udjelom suhe tvari pri brzini transportne trake od 1,5 m/min, što je brzina pokretne trake znatno niža od one za standardnu liniju za drvene podove s UV otvrđnjivanjem (Landry i drugi, 2015).



Međutim, UV-LED sijalica ima dovoljan intenzitet za otvrdnjivanje prozirnih UV vodenih premaza. Vodeni premazi koji su otvrdnjivali UV-LED sijalicama imali su nižu tvrdoću premaza i otpornost na habanje od premaza otvrdnutih pod UV-živinim sijalicama. Autori su zaključili da ima još posla kako bi se UV-LED tehnologija dovela na istu razinu kao otvrdnjivanje UV-živinim sijalicama. Potreban je razvoj fotoinicijatora koji su najprikladniji za ovu vrstu tehnologije, tj. prozirni nakon otvrdnjivanja. Neophodan je i razvoj UV-LED sijalica većeg ozračivanja (Landry i drugi, 2015).

### 3.7. Novije primjene UV otvrdnjivanja

Osim što se UV otvrdnjivanje upotrebljava u drvoj industriji također su se počele primjenjivati i u drugim različitim industrijama kao što su grafička industrija, stereolitografija, medicina, kozmetika i slično. Na slici 47. možemo vidjeti područje primjene UV otvrdnjivajućih premaza (Schwalm, 2006).



Slika 47. Područje primjene UV otvrdnjivajućih premaza (Schwalm, 2006)

Novije primjene UV otvrđnjivanja su se počele primjenjivati za otvrđnjivanje ljepila u završnoj obradi za proizvodnju glazbenih instrumenata (slika 48.), biljarskih štapova, ispisa na različite podloge kao što su plastike, papiri, različita platna, stakla i metali (Wikipedia, 2023). Produkt otvrđnjivanja trodimenzionalnih elemenata se primjenjuju na televizorima i na različitim dijelovima automobila (Schwalm, 2006).



Slika 48. Primjer UV otvrđnjivanja površine na glazbenom instrumentu (Reverb, 2023)

Primjer UV otvrđnjivanja površine na glazbenom instrumentu prikazat će se pomoću automatizirane komore za UV otvrđnjivanje (slika 49.) (Cureuv.com, 2023).



Slika 49. Komora za UV otvrđnjivanje (Cureuv.com, 2023).

Komora koristi jednu sijalicu velike snage koja može sigurno i jednostavno polimerizirati sve površine proizvoda. Nema čekanja da se sijalica uključi između ciklusa otvrđnjivanja zbog toga što je sijalica (slika 50.) uvijek u stanju pripravnosti (dok je uključena). Samo otvrđnjivanje je dva puta brže (slika 51.) (Cureuv.com, 2023).



Slika 50. Sijalica za UV otvrđnjivanje (Cureuv.com, 2023)



Slika 51. Poboljšano otvrđnjivanje rubova (Cureuv.com, 2023).

Kako tehnologija napreduje tako i komora sa svojim dizajnom i raznolikošću omogućuje neograničene vrste proizvoda i konfiguracije. Iz tog razloga u nastavku je prikazana primjena UV premaza na tvrdom drvu s visokim sadržajem ekstrakta (ulja) i mat završnim efektom. Za ovaj postupak je potrebna UV sijalica. Drvo treba biti brušeno granulacijom 220. Po potrebi premazati uljnim močilom (bajcom) po drvenoj površini (slika 52.) i ostaviti dok se potpuno ne osuši (Cureuv.com, 2023).



Slika 52. Nanos ulja na drvenu površinu (YouTube, 2013)

Slijedi nanošenje izolacijskog temelja vlažnom krpom (slika 53.) koja ne ostavlja dlačice na vrste drva koje sadrže ulja, nakon čega je potrebno sušenje na zraku (procjena 15 min u normalnoj prostoriji na 75 stupnjeva (YouTube, 2013).



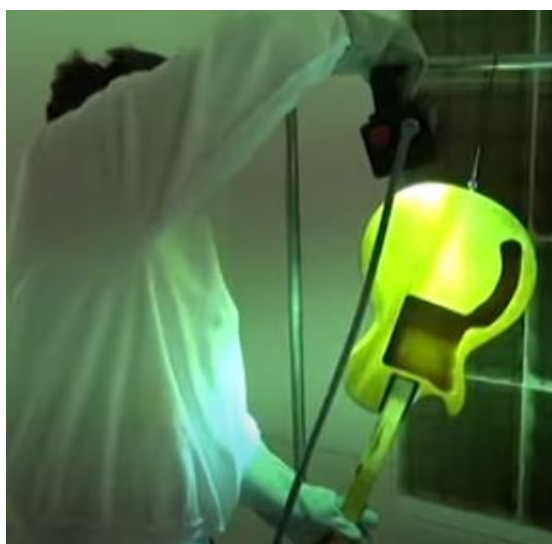
Slika 53. Brisanje drvene površine (YouTube, 2013)

Na osušenu drvenu podlogu nanosi se UV gel punilo (slika 54.) kako bi se popunila vlakanca na drvenoj površini te se ponovo briše krpom koja ne ostavlja dlačice (YouTube, 2013).



Slika 54. Nanos UV gel punila na drvenu podlogu (YouTube, 2013)

Višak materijala se ukloni pri čemu se smanjuje brušenje koje je inače potrebno prije nanošenja bilo kakvih naknadnih premaza. Oba materijala istovremeno se izlažu izvoru UV svjetla od 365 nm pri intenzitetu od 1 W/cm<sup>2</sup> (slika 55.) (YouTube, 2013).



Slika 55. Otvrdnjivanje drvene površine UV sijalicom (YouTube, 2013)

Nakon otvrđnjivanja potrebno je brusiti površinu granulacijom 220 sve dok ne nastane vidljivi sjaj. Zaostale čestice prašine očiste se krpom koja ne ostavlja dlačice (može biti lagana alkoholna maramica) (slika 56., slika 57.) (YouTube, 2013).



Slika 56. Brušenje drvene površine (YouTube, 2013)



Slika 57. Brisanje drvene površine (YouTube, 2013)



Prije nanošenja završnog premaza potrebno je potpuno osušiti drvenu podlogu. Završni premaz može se četkati, valjati ili štrcati sa samoregulirajućim, gravitacijskim HVLP-om pištoljem za štrcanje (slika 58.) (YouTube, 2013).



Slika 58. Nanošenje završne površine UV prskanjem (YouTube, 2013)

Nakon nanošenja završnog premaza drvena podloga se ostavlja do 2 minute da se omogući razlijevanje premaza i slijedi izlaganje izvoru UV svjetla od 365 nm pri intenzitetu od 1 W/cm<sup>2</sup>. Nakon otvrđnjivanja slijedi brušenje granulacijom 220 i otprašivanje površine te se postupak nanošenja laka i otvrđnjivanja ponavlja. Po potrebi se drvena podloga može polirati finim čvrstim voštanim kompozitom pomoću vunenog ili platnenog jastučića. Međutim, praksa je pokazala kako to nije najbolje rješenje zbog tvrdoće završnog sloja. Prilikom uporabe UV izvora uvijek je potrebno nositi propisanu zaštitnu opremu za oči i kožu (cureUV.com).

### **3.8. Utjecajni čimbenici na kvalitetu UV otvrđnjivanja**

Odabir i upotreba odgovarajućeg premaza koji otvrđjava UV zračenjem utječe na kvalitetu završne obrade UV otvrđujućih premaza. U procesu završne obrade važno je nanijeti točnu količinu zaštitnog premaznog materijala zbog poboljšanja ujednačenosti završnog sloja. Pretjerano nanošenje temeljnog premaza rezultirat će debljim slojem i bit će potrebno brušenje premaza kako bi se dobila ujednačena površina za nanošenje završnog premaza. Nanošenje gornjih slojeva na zaštitni sloj premaza mora biti unutar kratkog vremenskog razdoblja (do 24 sata u određenim slučajevima). Nakon isteka tog vremena neophodno je brušenje površine kako bi se

postigla kvalitetna međuslojna adhezija.

Završni premazi koji otvrdnjavaju UV zračenjem su tvrdi, čvrsti, izdržljivi i teško ih se brusi. Za ujednačenost završnog sloja premaza drvena površina bi trebala biti mikrohrapava zbog toga što se hrapave površine lakše premazuju nego glatke površine. Kvaliteta pripreme drva važna je za kvalitetno prijanjanje UV otvrdnjavajućih premaza. Brušenje s visokom granulacijom uzrokuje zapunjenje pora drvene površine prašinom te može uzrokovati nedostatak prijanjanja. Mnogi čimbenici utječu na sjaj premaza pri otvrdnjivanju UV zračenjem. Deblji slojevi UV premaza daju veći sjaj, a tanji slojevi manji. Veća viskoznost premaza utječe na veći sjaj, a manja viskoznost daje manji sjaj premaza. Boja drvne podloge također može utjecati na sjaj i pokazalo se da je na tamnijim vrstama drva sjaj UV premaza manji, nego na svijetlim vrstama drva. Vrsta UV sijalica, njihova snaga (ozračenje), ozračenost (gustoća energije), brzina pomaka također utječu na sjaj. Visoka snaga lampi, visoko ozračenje i velika brzina daju veći sjaj, dok manja snaga, dovoljno ozračenje i mala brzina pomaka daju manji sjaj. Za kvalitetnu završnu obradu površine sadržaj vode u drvu bi se trebao kretati u rasponu od 5 do 8 %. Drvo treba držati na propisanoj temperaturi. Svako skladištenje drva na hladnom može utjecati na površinsku vlagu drva kad ga se unese na toplo (vlaga će se kondenzirati na površini hladnog drva u toplom okruženju). UV premazi sa 100 % suhe tvari mogu imati problema s adhezijom ako se nanose na vlažnu površinu. Lipovina i topolovina se često površinski zagrijevaju infracrvenim grijačima prije nanošenja UV premaza (Lawrence Van Iseghem, 2006).

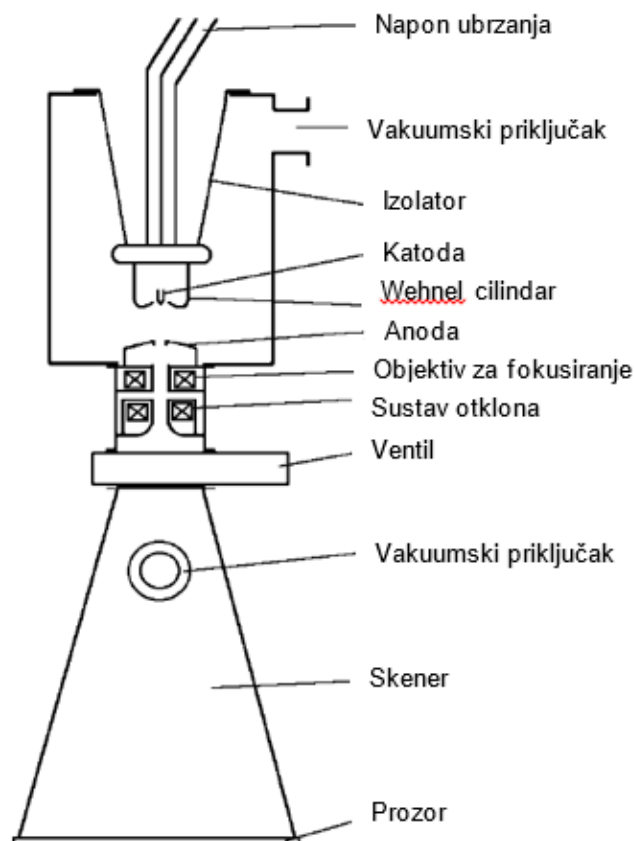
Na kvalitetu UV otvrdnjivanja u velikoj mjeri utječe kvaliteta opreme koja se upotrebljava. UV sijalice rade na visokim temperaturama (otprilike oko 800 °C) stoga je potrebno održavati sustav hlađenja kako se sijalice ne bi pregrijale. Sijalice se najčešće hlade strujanjem zraka kroz njeno kućište. Ukoliko sijalice ne dobivaju dovoljnu količinu zraka doći će do savijanja, pucanja i skraćivanja životnog vijeka sijalica. Ako je sijalica previše ohlađena dolazi do isključivanja tijekom procesa otvrdnjivanja. Na emitiranje zračenja uz sijalice utječu i reflektori. Pretjeranim zagrijavanjem reflektora dolazi do nepravilnog emitiranja zračenja pri čemu neće doći do jednolikog otvrdnjivanja drvene površine. Reflektori koji se upotrebljavaju trebaju biti čisti i sjajni. Čiste se izopropilnim alkoholom i krpicom koja ne ostavlja dlačice i mucice. Sredstva na bazi amonijaka se ne preporučavaju. Na kraju je važno voditi računa o čistoći filtera uređaja, zaštititi radnika od UV svjetla i o samoj struji koja



pokreće sustav otvrđnjivanja (Blandford, 2009).

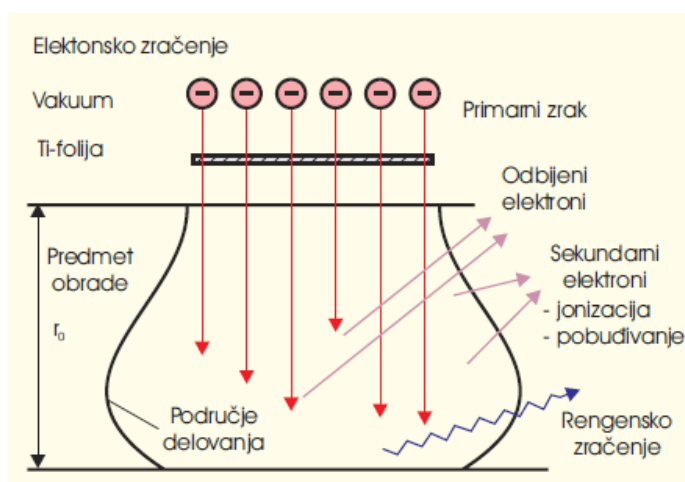
#### **4. Tehnologija otvrđnjivanja elektronskim zračenjem**

Tehnologija otvrđnjivanja elektronskim zračenjem (eng. *Electron beam curing*) je tehnologija koja za otvrđnjivanje premaza upotrebljava elektrone. Elektroni se stvaraju i ubrzavaju u uređaju koji se zove akcelerator (slika 59.) (Jaić i drugi, 2000). „Akcelerator je uređaj u kojem se električki nabijene čestice (elektroni, protoni, ioni i slične čestice) u stalnim ili izmjeničnim električnim poljima ubrzavaju do visokih kinetičkih energija“ (Wikipedia, 2023). Zagrijavanjem akceleratorne katodne cijevi elektroni prolaze kroz tanku titanovu ili aluminijsku foliju odnosno tanki metalni prozor debljine od 12 do 15  $\mu\text{m}$ . Ovakvi tipovi folija se moraju hladiti (pomoću vode ili zraka) kako ne bi došlo do taljenja tih folija (Jaić i drugi, 2000). Nakon prolaska kroz titanove ili aluminijske folije, elektroni udaraju u površinu materijala pri čemu dolazi do stvaranja slobodnih radikala koji uzrokuju umreživanje polimera odnosno započinje postupak polimerizacije tekućih monomera i oligomera prilikom čega dolazi do otvrđnjivanja samog premaza u samo nekoliko sekundi (Swanson, 2013). Najčešće se otvrđnjivanje premaznog materijala događa u atmosferi dušika bez prisutnosti kisika (Jirouš-Rajković, 2020). Na kraju samog procesa dobivaju se površine koje su otporne na habanje, otapala, kemikalije i atmosferske uvjete (Laurell i drugi, 2006).



Slika 59. Akcelerator (Laurell i drugi, 2006)

Na slici 60. je prikazano djelovanje elektronskog zračenja na površini materijala prilikom čega jedan dio elektrona reagira s premaznim materijalom, a drugi dio elektrona izlazi u okolinu. Elektron koji izlazi u okolinu se sastoji od povratnog ili odbijenog elektrona i sekundarnog elektrona. Kao posljedica izlaska elektrona iz materijala dolazi do nastanka rendgenskog zračenja koje je dosta opasno stoga je potrebno zaštititi okolni prostor. To se postiže betonskim zidom debljine do 1 metra ili olovnim pločama debljine od 25 do 40 milimetara. Povratni elektroni su dosta korisni ukoliko se otvrdnjivanje događa na bočnim ploham i rubovima kod profiliranih elemenata (Jaić i drugi, 2000).



Slika 60. Djelovanje elektronskog zračenja na površinu materijala (Jaić i drugi, 2000)

Tijekom otvrdnjivanja premaznog materijala elektronskim zračenjem, emisija štetnih tvari ne bi smjela dospjeti u atmosferu, vodu ili hranu te se ne bi smjeli osjetiti neugodni mirisi s površine materijala. Tehnologija otvrdnjivanja elektronskim zračenjem ima sljedeće prednosti i nedostatke (Laurell i drugi, 2006).

Prednosti sustava otvrdnjivanja elektronskim zračenjem su (Laurell i drugi, 2006):

- nema emisije štetnih organskih spojeva
- nema zagrijavanja površine elemenata
- uređaji zauzimaju manje prostora nego klasični uređaji
- premazni materijal vrlo dobro prianja za podlogu
- upotrebljavaju se materijali bez otapala
- brzo otvrdnjivanje
- jednoliko otvrdnjivanje kroz čitavi premazni materijal
- ne upotrebljavaju se fotoinicijatori.

Nedostaci sustava otvrdnjivanja elektronskim zračenjem su (Glöckner i drugi, 2008):

- uređaji su dosta skupi
- visoka potrošnja električne energije
- složena instalacija uređaja
- sustav otvrdnjivanja nije prikladan za trodimenzionalne elemente.

## 4.1. Premazi koji otvrđnjivaju elektronskim zračenjem

Premazi koji otvrđnjivaju elektronskim zračenjem sadržavaju gotovo jednake sirovine kao i premazi koji otvrđnjivaju pomoću UV zračenja. Razlika između elektronskog i UV otvrđnjivanja je ta što se u formulaciju premaza za elektronsko zračenje ne upotrebljavaju fotoinicijatori i otapala, nego se koriste monomeri, oligomeri i aditivi. Elektronsko zračenje također sadržava veću energiju nego UV svjetlo stoga elektronsko otvrđnjivanje započinje pri sobnoj temperaturi (Glöckner i drugi, 2008). Na otvrđnjivanje premaznog materijala mogu utjecati: napon ubrzavanja elektrona, količina i snaga zračenja (Jaić i drugi, 2000).

### 4.1.1. Napon ubrzavanja elektrona

Napon ubrzavanja elektrona određuje kinetičku energiju i dubinu elektronskog zračenja elektrona. Industrijski uređaji za elektronsko otvrđnjivanje upotrebljavaju napon između 150 i 400 kV te se može regulirati dubina elektronskog zračenja (Jaić i drugi, 2000). Dubina elektronskog zračenja ovisi o energiji elektrona i gustoći ili formulaciji premaza. Upotrebljavajući visoku energiju napona, elektroni će prodrijeti u slojeve pigmentiranih premaza prilikom čega će doći do procesa otvrđnjivanja (Glöckner i drugi, 2008). Iz tablice 1. se može uočiti da dubina elektronskog zračenja jako ovisi o intenzitetu jakosti ubrzavanja elektrona (Jaić i drugi, 2000).

Tablica 1. Ovisnost dubine elektronskog zračenja o jakosti ubrzavanja elektrona (Jaić i drugi, 2000).

Napon ubrzavanja elektrona (kV)	Dubina elektronskog zračenja ( $\mu\text{m}$ )
150	80 - 120
300	220 - 250
500	500 - 700
750	800 - 1100

#### **4.1.2. Količina zračenja**

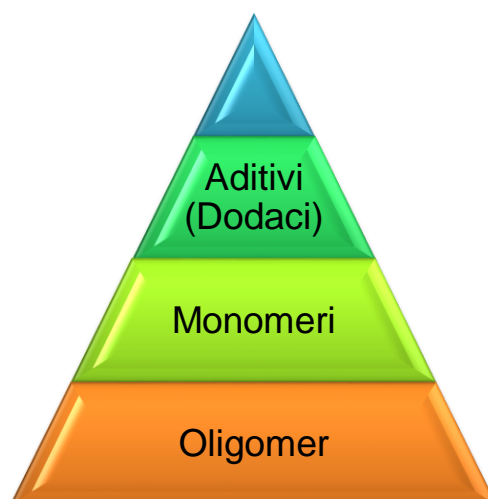
Količina zračenja predstavlja brzinu otvrdnjivanja odnosno reaktivnost smole koja određuje koliko je potrebna količina zračenja za otvrdnjivanje premaza. Premaz se podvrgava elektronskom zračenju sve dok se ne asporbira dovoljna količina zračenja. Izražava se u kGy (kilo Grayima) (Jaić i drugi, 2000). Najčešća količina zračenja se kreće od 5 do 100 kGy. S obzirom da u ovim formulacijama nije potreban inicijator, vezivo određuje samu formulaciju premaza. Ostali parametri kao što su temperatura i viskoznost premaza utječu na brzinu i učinkovitost otvrdnjivanja premaznog materijala (Glöckner i drugi, 2008).

#### **4.1.3. Snaga zračenja**

Snaga zračenja se izražava u vatima (W). Ova snaga se odnosi na napon ubrzavanja elektrona i električne energije elektrona sukladno sa širinom površine elementa koja se zrači (Jaić i drugi, 2000).

### **4.2. Formulacija premaza za otvrdnjivanje elektronskim zračenjem**

Premazi koji otvrdnjivaju elektronskim zračenjem imaju slijedeću formulaciju: oligomeri, monomeri i aditivi (dodaci) (slika 61.) (SlideShare from Scribd, 2023). Najčešći premazi koji se upotrebljavaju u ovoj tehnologiji su: poliesterski premazi, akrilni poliesteri, poliuretani i slični premazi (Jirouš-Rajković, 2020). Nakon samog procesa otvrdnjivanja ovakvi tipovi premaza imaju značajna svojstva kao što su niska emisija hlapljivih organskih spojeva, otpornost na kemikalije, habanje i povišene temperature, ujednačena kvaliteta premaza i vrlo dobro prijanjanje na plastične plohe (Mattausch i drugi). Premazi se nanose isključivo pomoću uređaja za nalijevanje zato što nanoseni premaz ne smije imati mjehuriće zraka te plohe moraju biti ravne i pravilno obrađene. Premazni materijal neće iscuriti sa podloge zbog trenutnog otvrdnjivanja (Jaić i drugi, 2000).



Slika 61. Formulacija za elektronsko otvrđnjivanje premaza (SlideShare from Scribd, 2023)

### **4.3. Industrijsko postrojenje u tehnologiji elektronskog otvrđnjivanja**

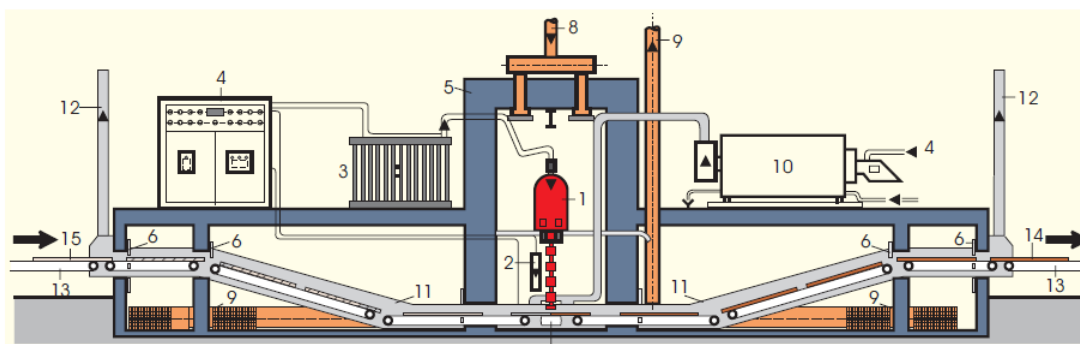
Industrijsko postrojenje za elektronsko otvrđnjivanje premaza se sastoji od (Jaić i drugi, 2000):

- visokonaponskog generatora
- akceleratora elektrona
- upravljačkog i kontrolnog sustava
- zaštitnog sustava od sekundarnog rendgenskog zračenja
- transportnog sustava.

S obzirom da je akcelerator elektrona vrlo bitan čimbenik za elektronsko otvrđnjivanje te o njemu ovisi konačna energija elektrona, u današnjoj primjeni su (Jaić i drugi, 2000):

- elektronski akcelerator s točkastom katodnom cijevi
- elektronski akcelerator s linearnom katodnom cijevi
- elektronski akcelerator s katodnom cijevi s većom površinom djelovanja.

Na slikama 62. i 63. prikazan je primjer jedne linije (shematski presjek i izgled) za klasično elektronsko otvrdnjivanje premaza (Jaić i drugi, 2000).



Slika 62. Shematski presjek linije za klasično elektronsko otvrdnjivanje premaza (Jaić i drugi, 2000)

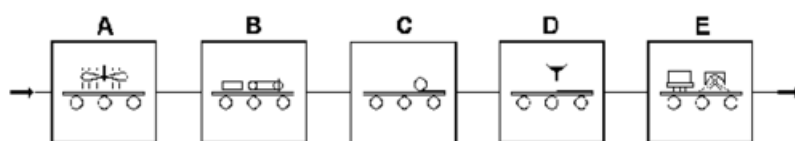
- 1 – Linearni elektronski ubrzivač
- 2 – Vakuumski uređaj
- 3 – Transformator visokog napona
- 4 – Upravljačka ploča
- 5 – Prostor za zaštitu od rendgenskog zračenja
- 6 – Olovni uteg
- 7 – Hladnjak
- 8 – Ventilacija zaštićenog prostora
- 9 – Ventilacijski odvod zraka
- 10 – Proizvodnja inertnog plina
- 11 – Kanal za inertni plin
- 12 – Odvođenje inertnog plina
- 13 – Transportni sustav
- 14 – Obradak



Slika 63. Izgled klasične linije za elektronsko otvrdnjivanje premaza (Jaić i drugi, 2000)

#### 4.4. Primjena elektronskog otvrdnjivanja

Elektronsko otvrdnjivanje premaznog materijala se može primjenjivati u: automobilskoj industriji, grafičkoj umjetnosti, u elektronici kao završni premaz za kućište mobitela, u industriji za proizvodnju konzervi i zavojnica (RadTech Europe, 2022). Ne samo da se može primjenjivati u različitim industrijama, nego je elektronsko otvrdnjivanje premaza našlo svrhu i u drvoju industriji gdje se mogu primjenjivati na MDF pločama, ivericama, kompozitnim pločama, prednjicama namještaja, laminatima, vratima, obloženim rubovima i slično (Laurell i drugi, 2006). Na slici 64. je prikazana jedna linija za lakiranje kompozitnih ploča koja se sastoji od nekoliko faza. Na samom početku procesa se kontrolira temperatura, nakon čega se obradak transportira do uređaja za brušenje. Zatim se pomoću valjaka nanosi temeljni izolacijski sloj i završni sloj premaza. Na kraju samog procesa dolazi do elektronskog otvrdnjivanja premaznog materijala prilikom čega su dobivene površine otporne na: vodu, vlagu, na izmjenu topline, kemikalije, ogrebotine te površina ima ravnomjerniji sjaj i otpornije boje na atmosferske uvjete (Jirouš-Rajković, 2020).



Slika 64. Linija za lakiranje kompozitnih ploča (Jirouš-Rajković, 2020)

A – Kontrola temperature

B – Brušenje

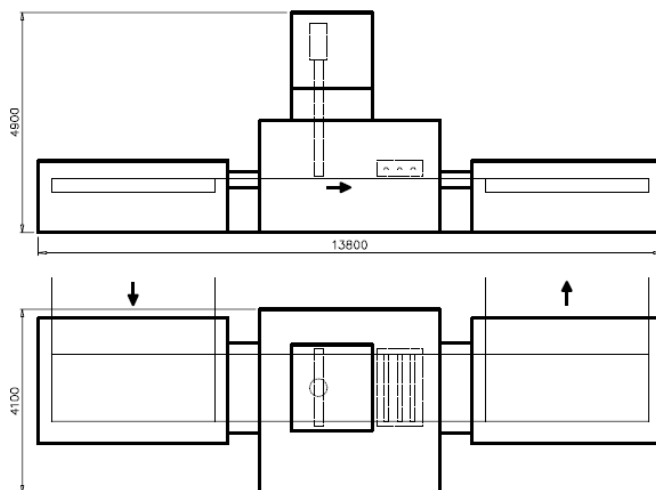
C – Valjci za nanos temeljnog izolacijskog sloja

D – Uređaj za nalijevanje završnog sloja laka

E – Elektronsko otvrdnjivanje premaznog materijala (Jirouš-Rajković, 2020).

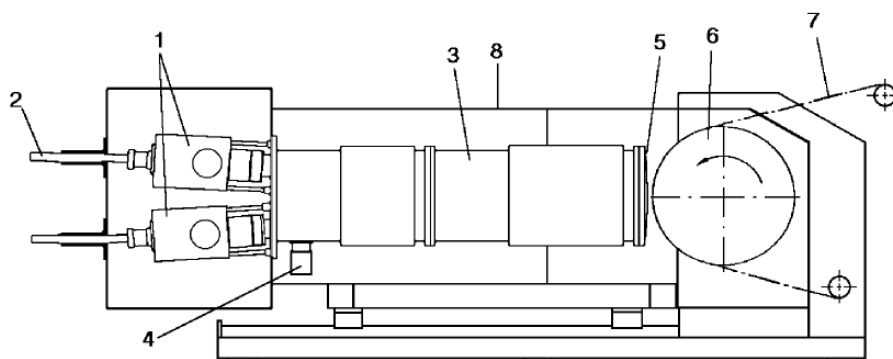
Za površinsku obradu različitih tipova fasadnih ploča može se upotrebljavati proizvodna linija (slika 65.) koja obrađuje ploče dimenzija od 600 x 150 milimetara do 3500 x 1250 milimetara te debljine od 4 do 30 milimetara. Kako bi se maksimalno iskoristio kapacitet proizvodne linije u jednoj seriji se mogu obrađivati do dvadeset fasadnih ploča. Upotrebljavajući ovakav tip tehnologije dobivaju se površine koje su otporne na UV zrake, kišu, vjetar, hladnoću i ostale atmosferske uvjete (Laurell i drugi, 2006).





Slika 65. Proizvodna linija fasadnih ploča (Laurell i drugi, 2006)

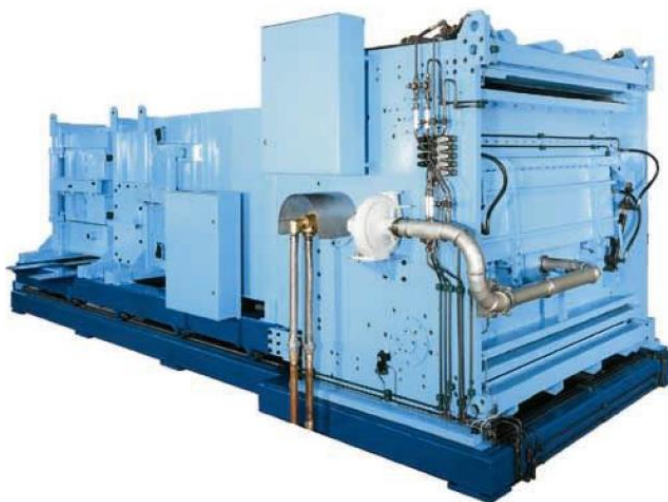
Elektronsko otvrđnjivanje premaznog materijala se može primjenjivati i na fleksibilnim materijalima koji se namataju s role na rolu (slika 66.). Akcelerator elektrona je postavljen u vodoravnom položaju koji je usmjeren prema bubnju koji se može grijati ili hladiti. Elektronski snop prolazi kroz prozorčić za snop elektrona gdje dolazi do predaje energije premaznom materijalu prilikom čega dolazi do procesa otvrđnjivanja u vrlo kratkom vremenu (Laurell i drugi, 2006).



Slika 66. Elektronsko otvrđnjivanje premaza na fleksibilnim materijalima s role na rolu (Laurell i drugi, 2006)

- 1 – Akcelerator s dvije katode
- 2 – Visokonaponski kabel
- 3 – Skenirajući sustav
- 4 – Crpni sustav
- 5 – Izlazni prozorčić za snop elektrona (zona inertnog plina)
- 6 – Bubanji za dovoz materijala
- 7 – Ulaz i izlaz materijala
- 8 – Zaštita od zračenja (Laurell i drugi, 2006).

Na slici 67. prikazan je uređaj za elektronsko otvrdnjivanje premaza na fleksibilnim materijalima s role na rolu. Napon za ubrzavanje elektrona iznosi maksimalno 280 kV, dubina prodiranja iznosi maksimalno 320 g/m<sup>2</sup> pri ionizaciji od 80%, doza zračenja pri 800 m/min iznosi 10 kGy, a jednoličnost doze zračenja po radnoj širini iznosi  $\pm 3\%$  (Laurell i drugi, 2006).



Slika 67. Uređaj za elektronsko otvrdnjivanje premaza na fleksibilnim materijalima s role na rolu (Laurell i drugi, 2006)

## 5. Zaključak

Iz ovog rada možemo zaključiti da tehnologija otvrdnjivanja UV zračenjem i tehnologija otvrdnjivanja elektronskim zračenjem omogućuju veću produktivnost, štede električnu energiju i smanjuju emisiju hlapljivih organskih spojeva što je bitno za ljude i okolinu. Ovakvim postupcima otvrdnjivanja dobivaju se površine koje su otporne na mehanička oštećenja te na atmosferske uvjete kao što su sunce, vjetar kiša i slično.

**Prednosti tehnologije otvrdnjivanja UV zračenjem** su velika brzina otvrdnjivanja, značajna ušteda vremena i troškova, niska emisija hlapljivih organskih spojeva, otvrdnuti premazi pokazuju izvrsnu otpornost i sjaj, smanjena potrošnja energije za otvrdnjivanje, manja novčana ulaganja u slučaju UV postrojenja, potreba za manjim prostorom (posebice u slučaju UV postrojenja) i moguća primjena na podlogama koje su osjetljive na toplinu. **Nedostaci tehnologije otvrdnjivanja UV zračenjem** su što otvrdnjivanje trodimenzionalnih predmeta zahtijeva složena postrojenja za otvrdnjivanje, upotrebom pojedinih sirovina može doći do iritacije kože, teško je ostvariti mat završni sloj premaza, zbog velike količine pigmenata može doći do problema s otvrdnjivanjem debeloslojnih premaza, određene formulacije premaza ne mogu se upotrebljavati za otvrdnjivanje premaznog materijala na sobnoj temperaturi, potrebno je osigurati kvalificirano osoblje, visoki troškovi sirovina i investicijski troškovi u slučaju upotrebe otvrdnjivanja elektronskim zračenjem te je posebno problematično prianjanje na metalne ili pojedine plastične podloge.

**Prednosti sustava otvrdnjivanja elektronskim zračenjem** su što nema emisije štetnih organskih spojeva, nema zagrijavanja površine elemenata, uređaji zauzimaju manje prostora nego klasični uređaji, premazni materijal vrlo dobro prianja za podlogu, upotrebljavaju se materijali bez otapala, brzo i jednoliko otvrdnjivanje kroz čitav premazni materijal i ne upotrebljavaju se fotoinicijatori.

**Nedostaci sustava otvrdnjivanja elektronskim zračenjem** su skupi uređaji, visoka potrošnja električne energije, složena instalacija uređaja i neprikladnost sustava za trodimenzionalne elemente.

Zbog stalnog razvoja sirovina (smole, aditivi) došlo je i do razvoja i upotrebe sve kvalitetnije opreme i uređaja za tehnologiju otvrdnjivanja. Zahvaljujući ovakvom tipu razvoja upotrebljavaju se sve kvalitetniji premazi uz sve manje troškove. S obzirom da obje tehnologije otvrdnjivanja zračenjem imaju svoje prednosti i nedostatke, sami

proizvođači biraju koju će tehnologiju odabrati. Odabir prave tehnologije u velikoj mjeri ovisi o zahtjevima tržišta, kapacitetima i proizvodnom programu.

Obje tehnologije omogućuju inovativne proizvodne procese koje troše manje energije te udovoljavaju standardnoj kvaliteti zraka bez potrebe za dodatnom kontrolom zagađenja. Premazi za postupak otvrđnjivanja formulirani su tako da nema otapala u mješavini zbog čega ne postoji ispuštanje isparljivih organskih spojeva koji zagađuju atmosferu. Kako nema ispuštanja hlapljivih organskih tvari, tako nije potreban ni termički oksidator koji se koristi za spaljivanje tih tvari. Na taj način smanjuje se potrošnja energije toplinskog sustava te se izbjegava bilo koja druga sanacija radi zaštite okoliša. Postupak otvrđnjivanja započinje izlaganjem premaza visokoenergetskim elektronima ili visokoenergetskim svjetlosnim valovima u UV pojasu. Kako je ta energija usmjerena na premaz tako je i energija za obavljanje funkcije sušenja čak 95 % manja. Sposobnost održavanja ravnoteže ovih procesa i materijala istovremeno značajno smanjujući operativne troškove vodi prema definiciji održivosti. Danas je to jako važno zbog toga što zadovoljava potrebe današnjice, a da pritom ne ugrožava potrebe budućih generacija.

## 6. Literatura

1. Adler Coatings 'Excimer coatings – UV coatings for extremely matt surfaces' [Online]. Dostupno: <https://www.adler-coatings.com/industrial-coatings/excimer> (Pristupljeno 16. rujna 2023.).
2. Alpha-Purify (2023) 'REPLACEMENT UV LAMP FOR PROMINENT 1009385' [Online]. Dostupno: <https://www.alpha-purify.com/Medium-Pressure-UV-lamps/Replacement-UV-lamp-for-PROMINENT-1009385.aspx> (Pristupljeno 1. lipnja 2023.).
3. American Coatings Association (2023) 'Adoption of UV LED Curing Advances as Technology Evolves' [Online]. Dostupno: <https://www.paint.org/coatingstech-magazine/articles/adoption-of-uv-led-curing-advances-as-technology-evolves/> (Pristupljeno 10. srpnja 2023.).
4. Baroncini, B. (2004) 'General Overview of UV-application on Wood Furniture' PITTURE E VERNICI - EUROPEAN COATINGS 9 - Presented at "RadTech Europe", Blandford, B. (2009) 'Poor Cure? It's Not Always the Coating' [Online]. Dostupno: <https://www.pcimag.com/articles/110072-poor-cure-its-not-always-the-coating> (Pristupljeno 15. rujna 2023.).
5. Bulian, F. i drugi (2009) 'Wood coatings: Theory and Practice', Amsterdam, Elsevier Science, str. 304-308.
6. Cefla Finishing (2023) 'Deep matt finishes: excimer matting technology' [Online]. Dostupno: <https://www.ceflafinishing.com/en/magazine/deep-matt-finishes-excimer-matting-technology> (Pristupljeno 08. rujna 2023.).
7. Coatings World 'LED Curing Technology for Coatings' [Online]. Dostupno: [https://www.coatingsworld.com/issues/2016-04-01/view\\_features/led-curing-technology-for-coatings/](https://www.coatingsworld.com/issues/2016-04-01/view_features/led-curing-technology-for-coatings/) (Pristupljeno 6. srpnja 2023.).
8. Cureuv.com (2023) 'CureUV Waterborne/ UV Curable Self-Sealing Topcoat' [Online]. Dostupno: <https://www.cureuv.com/products/cureuv-waterborne-uv-curable-self-sealing-topcoat> (Pristupljeno 17. srpnja 2023.).

9. Cureuv.com (2023) 'Fully Automated Gen 5 UV Guitar Finishing Cabinet' [Online]. Dostupno: <https://www.cureuv.com/products/fully-automated-gen-5-uv-guitar-finishing-cabinet> (Pristupljeno 09. rujna 2023.).
10. Cureuv.com (2023) 'UV Cure Premium Clear Wet-Look Finish Topcoat' [Online]. Dostupno: <https://www.cureuv.com/products/uv-cure-premium-clear-topcoat-1-gallon> (Pristupljeno 17. srpnja 2023.).
11. cureUV.com, 2855 S Congress Ave, Delray Bch, FL, [Online]. Dostupno: <https://cdn.shopify.com/s/files/1/1343/9763/files/UV-Finish-Application-Guidelines-Guitar-Refinishing.pdf?v=1470254159> (Pristupljeno 09. rujna 2023.).
12. Davidson, R.S. (2001) 'Radiation Curing', Shawbury, Shrewsbury, Shropshire SY4 4NR, United Kingdom, Rapra Technology Limited.
13. Doctoruv.com 'LED Light Curing Systems' [Online]. Dostupno: <https://www.doctoruv.com/uv-curing-systems/uv-led-curing> (Pristupljeno 08. rujna 2023.).
14. Đurina, M. (2021) 'Ionizirajuće zračenje i učinci ionizirajućeg zračenja' Veleučilište u Karlovcu [Online]. Dostupno: <https://repozitorij.vuka.hr/islandora/object/vuka%3A2182/datastream/PDF/view> (Pristupljeno 09. rujna 2023.).
15. Echemi.com Provide Better Products and Services 'Epoxy Acrylate Resin 100% Transparent HE421F from HAOHUI manufacture' [Online]. Dostupno: <https://www.echemi.com/produce/pr2303179407-epoxy-acrylate-resin-100-transparent-he421f-from-haohui-manufacture.html> (Pristupljeno 6. lipnja 2023.).
16. FuturePrint 'Understanding UV LED Technology' [Online]. Dostupno: <https://www.futureprint.tech/the-futureprint-blog/understanding-uv-led-technology> (Pristupljeno 6. srpnja 2023.).
17. GEW (EC) Limited (2023) 'LeoLED Standard' [Online]. Dostupno: <https://www.gewuv.com/products/led-uv-systems/leoled-standard/> (Pristupljeno 16. rujna 2023.).
18. Glöckner, P. i drugi (2008) 'Radiation Curing for Coatings and Printing Inks', P.O. Box 6247, 30062 Hannover, Germany, Vincentz Network GmbH & Co. KG, Hannover.

19. Gotro, J. (2016) 'UV Curing Part Five: Cationic Photopolymerization' [Online]. Dostupno: <https://polymerinnovationblog.com/uv-curing-part-five-cationic-photopolymerization/> (Pristupljeno 08. rujna 2023.).
20. Haider, O. A. M. 'Study of UV Curing in the Wood Industry' [Online]. Dostupno: [https://inis.iaea.org/collection/NCLCollectionStore/\\_Public/31/016/31016316.pdf](https://inis.iaea.org/collection/NCLCollectionStore/_Public/31/016/31016316.pdf) (Pristupljeno 17. veljače 2023.).
21. Heraeus Holding (2023) 'UV curing process' [Online]. Dostupno: [https://www.heraeus.com/en/hng/light\\_is\\_more/how\\_does\\_it\\_work/uv\\_curing/uv\\_curing.html#tabs-48256-2](https://www.heraeus.com/en/hng/light_is_more/how_does_it_work/uv_curing/uv_curing.html#tabs-48256-2) (Pristupljeno 15. rujna 2023.).
22. Hrvatska enciklopedija (2021) 'Beta-zračenje' [Online]. Dostupno: <https://enciklopedija.hr/natuknica.aspx?ID=7314> (Pristupljeno 10. rujna 2023.).
23. Hrvatska enciklopedija (2021) 'Polimerizacija' [Online]. Dostupno: <https://www.enciklopedija.hr/natuknica.aspx?ID=49182> (Pristupljeno 20. kolovoza 2023.).
24. Hrvatska enciklopedija (2021) 'Ultraljubičasto zračenje' [Online]. Dostupno: <https://www.enciklopedija.hr/natuknica.aspx?ID=63114> (Pristupljeno 20. travnja 2023.).
25. IndiaMART (1996 – 2023) 'UV Powder Coating' [Online]. Dostupno: <https://www.indiamart.com/proddetail/uv-powder-coating-13016605530.html> (Pristupljeno 17. srpnja 2023.).
26. Jaić, M. i drugi (2000) 'Površinska obrada drveta', Beograd, Zavod za grafičku tehniku TMF.
27. Jirouš-Rajković, V. (2020) 'Sušenje i otvrdnjivanje lakova – PowerPoint prezentacija'.
28. Jirouš-Rajković, V. (2019) 'UV lakiranje – PowerPoint prezentacija'.
29. Landry, V. i drugi (2015) 'UV-LED Curing Efficiency of Wood Coatings' [Online]. Dostupno: <https://www.mdpi.com/2079-6412/5/4/1019> (Pristupljeno 16. rujna 2023.).
30. Laurell, B. i drugi (2006) 'Electron beam technology and coatings', Skyttevägen 42, 302 44 Halmstad, Švedska, Electron Crosslinking AB.

31. Lawrence Van Iseghem, C. (2006) 'Wood Finishing with UV-Curable Coatings', RADTECH REPORT MAY/JUNE 2006.
33. Luminochem 'LUHK2' [Online]. Dostupno: <https://luminochem.com/lproduct/luhk2/> (Pristupljeno 29. svibnja 2023.).
34. Ljekarna Lipa 'Štetno djelovanje UV zračenja' [Online]. Dostupno: <http://ljekarna-lipa.hr/stetno-djelovanje-uv-zracenja/> (Pristupljeno 20. travnja 2023.).
35. Mattausch, G. i drugi 'Electron beam curing of lacquers', Winterbergstr. 28 01277 Dresden, Germany, Fraunhofer Institute for Organic Electronics, Electron Beam and Plasma Technology FEP.
36. Nienhuis, J.G (2004) 'Review on drying and curing techniques of coatings', COST E 18 Final seminar, Nizozemska, 26.–27 travnja.
37. NHV Corporation 'Electron Beam Curing' [Online]. Dostupno: <https://www.nhv.jp/en/eb/cure/> (Pristupljeno 15. rujna 2023.).
38. Noè, C. i drugi (2020) 'Cationic UV-Curing of Epoxidized Biobased Resins', Basel, Switzerland, Licensee MDPI.
39. Odak, I. i drugi (2016) 'ORGANSKA FOTOKEMIJA - Principi i primjena', Prvo izdanje Zagreb 2017, Dalmatinska 12, 10000 Zagreb, ITG d.o.o. za izdavačku i grafičku djelatnost.
40. Peka Chemie 'Advantages and disadvantages of powder coating' [Online]. Dostupno: <https://pekachemie.com/en/article/30/advantages-disadvantages-of-powder-coating> (Pristupljeno 17. srpnja 2023.).
41. Pira International Ltd (2006) 'Developments in Radiation Curing for Adhesives', Cleeve Road, Leatherhead Surrey kt22 7ru, UK.
42. Polymerdatabase 'Photoinitiators' [Online]. Privremeno nedostupno: <https://polymerdatabase.com/polymer%20chemistry/Photoinitiators1.html> (Pristupljeno 18. svibnja 2023.).
43. Polymerdatabase 'Photoinitiators' [Online]. Privremeno nedostupno: <https://polymerdatabase.com/polymer%20chemistry/Photoinitiators2.html> (Pristupljeno 23. svibnja 2023.).



44. RadTech Europe (2018) 'UV/EB Brochure' [Online]. Dostupno: [https://www.radtech-europe.com/uploads/Bestanden/rte\\_uveb\\_brochure\\_2018\\_0.pdf](https://www.radtech-europe.com/uploads/Bestanden/rte_uveb_brochure_2018_0.pdf) (Pristupljeno 15. kolovoza 2022.).
45. Reverb (2023) 'Kanilea K-3 Tenor Premium Curly Koa 2023 - Uv Cured High Satin' <https://reverb.com/item/69296679-kanilea-k-3-tenor-premium-curly-koa-2023-uv-cured-high-satin> (Pristupljeno 20. srpnja 2023.).
46. Ribas-Massonis, A. i drugi (2022) 'Free-Radical Photopolymerization for Curing Products for Refinish Coatings Market', Basel, Switzerland, Licensee MDPI.
47. Schwalm, R. (2006) 'UV Coatings - Basics, Recent Developments and New Applications', Amsterdam, Elsevier Science.
48. ScienceDirect (2021, 2023) 'Cationic Photopolymerization' [Online]. Dostupno: <https://www.sciencedirect.com/topics/engineering/cationic-photopolymerization> (Pristupljeno 23. svibnja 2023.).
49. SlideShare from Scribd (2023) 'PowePoint prezentacija (2014) – Ultra Violet (UV)/ Electron Beam (EB) Curing of Coatings [Online]. Dostupno: <https://www.slideshare.net/sustenergy/ultra-violet-uv-electron-beam-eb-curing-of-coatings-operation-applications-market> (Pristupljeno 28.7.2023.).
50. Struna (2011) 'Benzaldehid' [Online]. Dostupno: <http://struna.ihjj.hr/naziv/benzaldehid/42156/#naziv> (Pristupljeno 11. lipnja 2023.).
51. Struna (2011) 'Elektronsko zračenje' [Online]. Dostupno: <http://struna.ihjj.hr/naziv/elektronsko-zracenje/21288/#naziv> (Pristupljeno 20. travnja 2023.).
52. Struna (2011) 'Hlapljivi organski spoj' [Online]. Dostupno: <http://struna.ihjj.hr/naziv/hlapljivi-organski-spoj/5039/#naziv> (Pristupljeno 27. travnja 2023.).
53. Struna (2011) 'Infracrveno zračenje' [Online]. Dostupno: <http://struna.ihjj.hr/naziv/infracrveno-zracenje/8579/#naziv> (Pristupljeno 23. ožujka 2023.).

54. Struna (2011) 'Otvrdnjivanje zračenjem' [Online]. Dostupno: <http://struna.ihjj.hr/naziv/otvrdnjivanje-zracenjem/39272/#naziv> (Pristupljeno 23. ožujka 2023.).
55. Swanson, K.E. (2013) 'Converting to Electron Beam Technology', Adhesive&Sealants industry, 2401 W. Big Beaver Rd. Suite 700 Troy, MI 48084, BNP Media.
56. Šlibar, M. i drugi (2010) 'UV LED tehnologija na području lesnih premazov', 51. Mednarodni lesni sejem Celovec / Avstrija, vol. 62, št. 7-8, str. 344-346
57. UV+EB technology (2022) 'UV-Curable Wood Coatings: Answering the Industry's Questions' [Online]. Dostupno: <https://uvebtech.com/articles/2023/uv-curable-wood-coatings-answering-the-industrys-questions/> (Pristupljeno 12. srpnja 2023.).
58. UV-technik Speziallampen GmbH (2023) 'UVC low pressure lamps' [Online]. Dostupno: <https://www.uvtechnik.com/en/products/uvc-low-pressure-lamps#> (Pristupljeno 31. svibnja 2023.).
59. Wikipedia (2022) 'Akcelerator čestica' [Online]. Dostupno: [https://hr.wikipedia.org/wiki/Akcelerator\\_%C4%8Destica](https://hr.wikipedia.org/wiki/Akcelerator_%C4%8Destica) (Pristupljeno 24. srpnja 2023.).
60. Wikipedia (2022) 'Benzofenon' [Online]. Dostupno: <https://hr.wikipedia.org/wiki/Benzofenon> (Pristupljeno 11. lipnja 2023.).
- Wikipedia (2023) 'Beta-čestica' [Online]. Dostupno: <https://hr.wikipedia.org/wiki/Beta-%C4%8Destica> (Pristupljeno 15. rujna 2023.).
61. Wikipedia (2023) 'Bisphenol A diglycidyl ether' [Online]. Dostupno: [https://en.wikipedia.org/wiki/Bisphenol\\_A\\_diglycidyl\\_ether](https://en.wikipedia.org/wiki/Bisphenol_A_diglycidyl_ether) (Pristupljeno 26. svibnja 2023.).
62. Wikipedia (2022) 'Dvostruka veza' [Online]. Dostupno: [https://bs.wikipedia.org/wiki/Dvostruka\\_veza](https://bs.wikipedia.org/wiki/Dvostruka_veza) (Pristupljeno 29. svibnja 2023.).
63. Wikipedia (2023) 'Excimer lamp' [Online]. Dostupno: <https://hr.wikipedia.org/wiki/Beta-%C4%8Destica> (Pristupljeno 16. rujna 2023.).

64. Wikipedia (2023) 'Spektar (fizika)' [Online]. Dostupno: [https://hr.wikipedia.org/wiki/Spektar\\_\(fizika\)](https://hr.wikipedia.org/wiki/Spektar_(fizika)) (Pristupljeno 21. travnja 2023.).
65. Wikipedia (2023) 'UV curing' [Online]. Dostupno: [https://en.wikipedia.org/wiki/UV\\_curing](https://en.wikipedia.org/wiki/UV_curing) (Pristupljeno 20. travnja 2023.).
66. YouTube (2013) 'UV Cure Guitar Finishing and Drying: How to use a UV Lamp' [Online]. Dostupno: <https://www.youtube.com/watch?v=giMPDqSaGyw> (Pristupljeno 09. rujna 2023.).
67. YouTube (2022) 'What is UV Powder Coating?' [Online]. Dostupno: <https://www.youtube.com/watch?v=RCaLpYLUVXc&t=1s> (Pristupljeno 17. srpnja 2023.).