

# Utjecaj elektromagnetskog zračenja na degradaciju optičkih svojstava pigmentiranog papira

---

Kičinbaći, Ivan

Undergraduate thesis / Završni rad

2014

*Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj:* **University of Zagreb, Faculty of Graphic Arts / Sveučilište u Zagrebu, Grafički fakultet**

*Permanent link / Trajna poveznica:* <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:216:795525>

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

*Download date / Datum preuzimanja:* **2025-04-02**



*Repository / Repozitorij:*

[Faculty of Graphic Arts Repository](#)



**SVEUČILIŠTE U ZAGREBU**  
**GRAFIČKI FAKULTET**

**ZAVRŠNI RAD**

Ivan Kičinbaći



Sveučilište u Zagrebu  
Grafički fakultet

Smjer: Tehničko - tehnološki

# ZAVRŠNI RAD

## UTJECAJ ELEKTROMAGNETSKOG ZRAČENJA NA DEGRADACIJU OPTIČKIH SVOJSTAVA PIGMENTIRANOG PAPIRA

Mentor:

Dr.sc., Vesna Džimbeg-Malčić

Student:

Ivan Kičinbaći

Zagreb, 2014

## **SAŽETAK**

U ovom radu ispitivana su optička svojstva pigmentiranih papira. Mjereni uzorci bili su izloženi različitim izvorima elektromagnetskog zračenja (Xenon lampa u Solar box-u i UV lampa) u različitim vremenskim intervalima. Promjene površinskih svojstava papira ispitane su mjerenjem spektra u vidljivom dijelu elektromagnetskog zračenja u refleksiji, te uspoređene s onim nestarenih papira.

Uzorci su izlagani vidljivom i ultraljubičastom dijelu spektra, te su promatrane razlike u degradaciji tiskovnih podloga s obzirom na spomenute intervale zračenja. Cilj ovog rada je procjena potencijalne dugoročnosti te upotrebljivosti materijala s obzirom na optičku stabilnost materijala.

Ključne riječi:

Pigmentirani papir

Degradacija papira

Uv zračenje

Ksenonska lampa

Interakcija svjetlosti



## SADRŽAJ

1	UVOD.....	1
2	PRIRODA SVJETLOSTI .....	2
2.1	Svjetlost kao elektromagnetski val .....	4
2.2	Spektar elektromagnetskih valova .....	6
3	INTERAKCIJA SVJETLOSTI S MATERIJOM.....	8
3.1	Elektronski oscilator .....	8
3.2	Interakcija svjetlosti i pigmenta .....	9
3.3	Intekakcija svjetlosti i papira.....	10
4	TEORIJA BOJA .....	12
4.1	Aspekti boja .....	12
4.2	Karakteristike boja .....	13
4.3	Nastajanje bojenog efekta.....	14
5	RASPRŠENJE SVJETLOSTI.....	16
5.1	Raspršenje svjetlosti u papiru .....	16
5.2	Apsorpcija svjetlosti.....	17
6	OPTIČKA SVOJSTVA PAPIRA .....	18
7	STARENJE PAPIRA .....	21
8	EKSPERIMENTALNI DIO .....	24
8.1	SOLARBOX 1500 E .....	25
8.2	Plan rada.....	26
9	REZULTATI I RASPRAVA .....	27
9.1	Uzorci osvijetljeni sa UV lampom.....	27
9.2	Uzorci osvijetljeni sa Solarbox lampom.....	36
10	ZAKLJUČAK.....	44
11	LITERATURA .....	46

## 1 UVOD

Ovaj završni rad se bavi optičkim svojstvima pigmentiranih papira. Mjereni uzorci bili su izloženi različitim izvorima elektromagnetskog zračenja (Xenon lampa u Solar box-u i UV lampa) u različitim vremenskim intervalima. Uzroci su bili ozračeni u intervalima od 10 sati, 20 sati, 40 sati, 60 sati i 80 sati. Promjene površinskih svojstava papira ispitane su mjerenjem spektra u vidljivom dijelu elektromagnetskog zračenja u refleksiji, te uspoređene s onim nestarenih papira.

Uzorci su izlagani vidljivom i ultraljubičastom dijelu spektra, te su promatrane razlike u degradaciji tiskovnih podloga s obzirom na spomenute intervale zračenja. Cilj ovog rada je procjena potencijalne dugoročnosti te upotrebljivosti materijala s obzirom na optičku stabilnost materijala.

## 2 PRIRODA SVJETLOSTI

Budući da je kroz povijest postojala dvojba je li svjetlost giba kao val ili se sastoji od čestica svjetlosti (fotona) koje putuju od izvora do opažača, postoje dvije teorije o prirodi svjetlosti: valna (undularna) i čestična (korpuskularna).

Rene Descartes je 1638. godine izložio teoriju prema kojoj se svjetlost prenosi na sličan način kao i zvuk zrakom.

Valnu teoriju koja se bazira na longitudinalnom valu razvio je Christian Huygens u 18. stoljeću. Njegova teorija temelji se na pretpostavci da se svjetlost širi kao val kroz neko sredstvo. Da bi se svjetlost mogla širiti poput zvuka mora postojati sredstvo koje titra. Titranje zagrijanih čestica eterom prenosi se kao longitudinalni val od izvora svjetlosti u okolni prostor.

U 17. stoljeću se zahvaljujući eksperimentima i razmišljanjima velikog matematičara i fizičara Isaaca Newtona dolazi do revolucionarnih otkrića o prirodi svjetlosti. Newton je svjetlost opisivao kao čestice. Pomoću čestica svjetlosti pokušao je objasniti pojavu loma svjetlosti. Newton je pobijao Huygensovu valnu teoriju te su je zbog toga odbacili i mnogi drugi istraživači.

Novu valnu teoriju razvio je Thomas Young. Njegova teorija zasnovana je na predodžbi o svjetlosti kao transverzalnemu valu. On je pretpostavio da pobude u valu svjetlosti slijede jedna drugu u pravilnim razmacima. Pomoću interferencije i ogiba transverzalnih valova protumačio je pojave koje je otkrio kada je dvije pukotine, usko i blisko smještene, obasjao svjetlošću.

J.C. Maxwell je 1865. godine dokazuje da je svjetlost elektromagnetski val te da se elektromagnetski valovi šire brzinom svjetlosti, čime je svjetlost uključena u područje elektromagnetskih valova.

Ideju o kvantnoj prirodi svjetlosti uveo je Albert Einstein 1905. godine objasnivši fotoelektrični efekt. Uz pretpostavku da svjetlost ima dualnu prirodu, foton je čestica koja se giba brzinom svjetlosti:

$$(1.) \quad E = h\nu$$



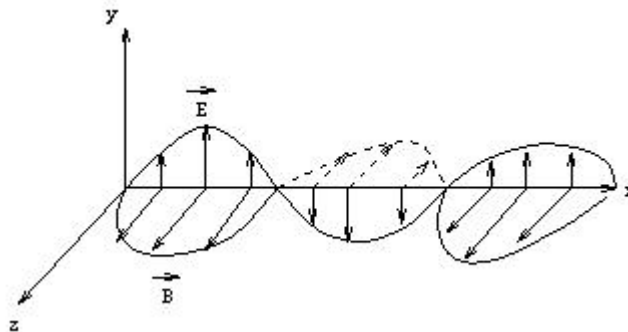
gdje je  $h$  Planckova konstanta, a  $\nu$  frekvencija elektromagnetskog zračenja. Energija kvanta  $E$  proporcionalna je frekvenciji  $\nu$ .

Svjetlost kao i ostali elektromagnetski valovi ima dvojnu prirodu, valnu i čestičnu. Zbog toga kod proučavanja interferencije i ogiba svjetlosti, svjetlost shvaćamo kao val određene valne duljine i frekvencije te koristimo zakone valnog gibanja. Prilikom proučavanja interakcije svjetlosti s materijom govorimo o fotonima određene energije i količine gibanja.

Interferencija, difrakcija i polarizacija elektromagnetskih valova pokazuju njihova valna svojstva, a fotoelektrični i Comptonov efekt dokaz su čestične prirode zračenja.

## 2.1 Svjetlost kao elektromagnetski val

Svjetlost je elektromagnetski val, dio elektromagnetskog spektra u uskom području valnih duljina od 380 do 750 nm. Taj dio elektromagnetskog zračenja uzrokuje osjet vida u ljudskom oku dok ostale dijelove elektromagnetskog zračenja poput toplinskog, ultraljubičastog, radiovalova, rendgenskog zračenja, ljudsko tijelo osjeća na druge načine ili ih uopće ne osjeća. J.C. Maxwell je 1865. godine ustanovio da se elektromagnetski valovi šire brzinom svjetlosti i nastaju promjenom električnog i magnetskog polja. Njegove jednadžbe opisuju elektromagnetske valove i njihovo širenje kroz prstor.



Slika 1. Sinusoidni elektromagnetski val koji putuje u smjeru osi z  
Izvor: <http://labman.phys.utk.edu/>

Fazna brzina odnosno brzina širenja valne fronte u smjeru širenja vala je

$$(2.) \quad v = 1/\sqrt{\epsilon\mu},$$

gdje je  $\epsilon$  dielektričnosti i  $\mu$  permeabilnost.

Brzina širenja elektromagnetskog vala u vakuumu je:

$$(3.) \quad v = \sqrt{(1/\epsilon_0\mu_0)} = 1/\sqrt{4\pi \times 10^{-7} C^{-2}Ns^2 \times 8,85 \times 10^{-12} C^2N^{-1}m^{-2}} = 2,998 \times 10^8 ms^{-1} = c,$$

a to je upravo brzina svjetlosti u vakumu, što upućuje na to da je svjetlost elektromagnetski val.

Eksperimentalnu izvedbu Maxwellove teorije prvi je proveo Heinrich Hertz 1888. godine pomoću posebnog oscilatora koji je mogao periodički izmjenično nabijati i prazniti dvije metalne kugle električnim nabojem. Same elektromagnetske valove uspio je detektirati prijemnikom odnosno rezonantnim titrajnim krugom. Ako u prostoru oko izmjenične struje doista titraju elektromagnetska polja, tada ta titranja moraju proizvesti slične izmjenične struje u žicama ili periodičke iskre u rezonatorima. U Hertzovim rezonatorima pojavila su se titranja iskre u istom ritmu kako je skakala iskra u emisionom oscilatoru. Time je Hertz pokazao da elektromagnetsko polje oko izmjenične struje titra isto kao i sama struja.

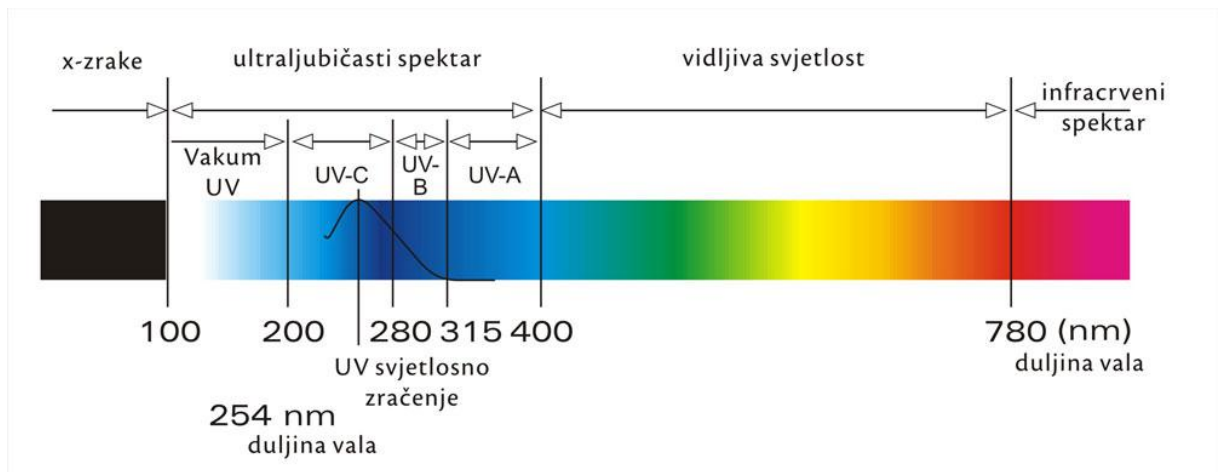
Vektori električnog i magnetnog polja međusobno su okomiti i okomiti su na smjer širenja vala. Način stvaranja i širenja elektromagnetskog vala je taj da magnetsko polje u gibanju stvara promjenjivo električno polje, koje opet stvara promjenjivo magnetsko polje.

## 2.2 Spektar elektromagnetskih valova

Spektar elektromagnetski valova obuhvaća veliki raspon valnih duljina i frekvencija. Sunčeva svjetlost koja se emitira sadrži elektromagnetske valove različitih valnih duljina koje su kontinuirano raspoređene od minimalnih do maksimalnih. Frekvencija  $\nu$  valna duljina  $\lambda$  su povezane relacijom:

$$(4.) \quad \lambda = c/\nu$$

Sunčeva svjetlost sastoji se od ultraljubičastog (UV) zračenja, vidljive svjetlosti, infracrvenog (IR) zračenja, mikrovalova, radiovalova, x-zračenja (rendgenskog) i  $\gamma$  zračenja. Vidljivom svjetlošću nazivamo elektromagnetske valove na koje je osjetljivo ljudsko oko. Obuhvaća valne duljine od 380 do 780 nm što odgovara frekvenciji od  $3,8 \times 10^{14}$  do  $7,7 \times 10^{14}$  Hz. Vidljivo područje bijele svjetlosti sastoji se od ljubičaste (380 – 440 nm), plave (440 – 490 nm), zelene (490 – 570 nm), žute (570 – 590 nm), narančaste (590 – 620 nm) i crvene (620 – 780 nm) boje.



Slika 2. Spektar vidljive svjetlosti

Izvor: <http://www.pik.ba/>

Ljudsko oko je najosjetljivije na valne duljine od oko 555 nm (žutozelena svjetlost), a uopće ne vidi elektromagnetske valove duljina ispod 380 i iznad 780 nm.

Svjetlo se širi ogromnom brzom i pokazuje vrlo male valne duljine. Brzinu svjetlosti je prvi izmjerio Ole Rener 1675. godine promatrajući pomrčine

Jupiterovih satelita. Kasnijim i točnijim mjerenjima dokazano je da je brzina svjetlosti u vakuumu  $2,998 \times 10^8$  m/s. Brzina svjetlosti je univerzalna konstanta te je ista za najrazličitije elektromagnetske valove u jednom sredstvu, bez obzira na valnu duljinu.

### 3 INTERAKCIJA SVJETLOSTI S MATERIJOM

Vidljiva svjetlost valnih duljina 380-750 nm omogućuje nam da vidimo predmete oko sebe. Ona se reflektira od predmeta što mikroskopski opisuje aktivnost finih atomskih i molekulskih mehanizama. Osvijetljeni nekim izvorom elektroni atoma izvode sićušne vibracije s krajnje malim amplitudama.

#### 3.1 Elektronski oscilator

Primjenom elektronskog oscilatora može se jednostavno opisati interakcija svjetlosti i materije. Elektroni u atomu mogu se zamisliti kao mali harmonički oscilatori. Ukratko; harmonički oscilator je sustav u kojem tijelo obješeno na elastičnu oprugu titra i to harmoničkom silom koja je proporcionalna pomaku iz položaja ravnoteže. U slučaju kada neki vanjski oscilator djeluje na sustav koji titra nastaje prisilno gibanje. Elektroni u atomu ponašaju se slično. Vibriraju vlastitom frekvencijom  $\omega_0$  koja je ujedno i frekvencija osnovnog stanja. Za svaki oscilator postoji vjerojatnost prijelaza u više stanje. Prvi prijelaz iz osnovnog stanja ima najveću jačinu pa se atom nadomješta jednim oscilatorom. Pri tom da se uvijek jedan dio gibanja u oscilaciji gubi u obliku topline (koeficijent otpora ili trenje).

Pod utjecajem svjetla nastavlja se na normalno gibanje temeljnog stanja. Skup svih elektrona u atomu vibrira istom frekvencijom kao što je i dolazeće svjetlo. To su zapravo vibracije  $10^{-17}$  m zahvaljujući kojima vidimo svijet oko sebe. Kako je bijela svjetlost mješavina svjetlosti više frekvencija gibanje oscilatora je superpozicija svih gibanja kad bi bio izložen pojedinačnom djelovanju svake frekvencije. Ako je  $\omega$  frekvencija elektromagnetskog vala, a  $\omega_0$  vlastita frekvencija elektrona amplituda i faza gibanja ovise o relativnim vrijednostima  $\omega$  i  $\omega_0$ . Kad je  $\omega$  puno manji od  $\omega_0$  oscilacija je slaba i oscilator je u oscilaciji s pogonskom električnom silom svjetlosti.

Kada je  $\omega$  puno veći od  $\omega_0$  oscilacija je također slaba u fazi suprotnoj od pogonske sile. Kad je  $\omega = \omega_0$  kaže se da je  $\omega$  u rezonanciji s  $\omega_0$ , oscilacija je

jaka i izvan je faze. S aspekta kvantne fizike to je prijelaz na drugo kvantno stanje. Kad je u pitanju amplituda, ona je mala za slučaj  $\omega \ll \omega_0$  i skoro je neovisan o  $\omega$ .

U slučaju  $\omega \gg \omega_0$  amplituda se smanjuje s povećanjem  $\omega$ .

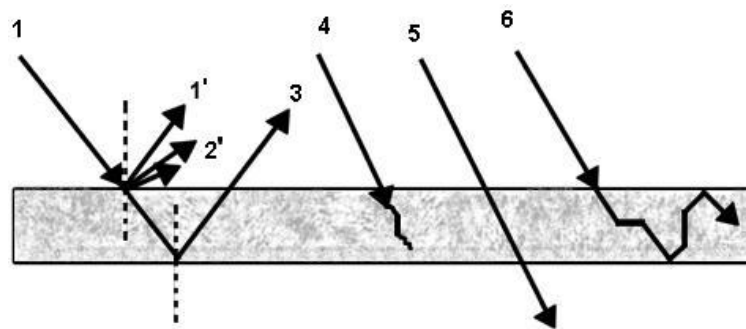
### 3.2 Interakcija svjetlosti i pigmenta

Boje su lančaste i prstenaste molekule gdje se elektroni gibaju slobodno duž lanca ili prstena. Zbog veće udaljenosti preko koje se proteže elektroni stanje uzbude takvog sustava je s nižim energijama i nižim frekvencijama. Za boje je bitno da se neemitirana energija pretvori u toplinu (što je naglašeno kod masnih tvari) te da se rezonancijske frekvencije rasporede u širokom pojasu. Boja sa uskim pojasom apsorpcije reflektirala bi većinu valnih duljina i izgledala bi bijelo. Kod masnih krutina i tekućina to nije slučaj i razine energije atoma i molekula šire se u široke energetske pojaseve pa se rezonancije protežu preko širokih opsega frekvencije. Tako crvena boja apsorbira svjetlost svih valnih duljina (vidljivih frekvencija) osim crvene. Svaka pojedina boja se ponaša tako. Apsorpcija neke boje pokriva vidljivi dio spektra s izuzetkom stvarne aktualne boje.

### 3.3 Intekakcija svjetlosti i papira

Na pitanje zašto nam je važna kvantna fizika u grafičkoj tehnologiji odgovor je vrlo jednostavan – zato jer je naš vizualni doživljaj grafičkog proizvoda posljedica interakcije svjetlosti s materijom. Ta interakcija ovisi i o izvoru zračenja (emisiji) te o procesima koji se zbivaju na i u tiskovnoj podlozi (papiru) posljedica kojih su optička svojstva promatranog sustava (reemisija). Objašnjenje procesa koji se odvijaju na atomarnoj i molekularnoj razini a koje klasična fizika nije mogla objasniti, daje kvantna fizika.

Većina objekata koje vidimo oko sebe ne emitira svoju vlastitu svjetlost, a vidljivi su nam jer reemitiraju dio svjetlosti koji pada na njih iz nekog svjetlosnog izvora. U interakciji s nekom podlogom, svjetlost može biti apsorbirana, reflektirana ili transmitirana. Svi oblici interakcija odvijaju se istodobno.



Slika 3. Interakcija svjetlosti i papira

(1 – upadna zraka svjetlosti, površinska refleksija; 1' – zrcalna refleksija; 2' – difuzna refleksija; 3 i 6 – unutrašnja refleksija (zraka 6 ne izlazi iz tiskovne podloge); 4 – svjetlost je apsorbirana; 5 – transmitirana svjetlost).

Izvor: <http://phy.grf.unizg.hr/>

Kada svjetlost pada na neku neprozirnu podlogu (npr. papir) dio svjetlosti se reflektira na gornjoj podlozi papira ne ulazeći u njegovu unutrašnjost. Pritom su valne duljine reflektirane svjetlosti gotovo nepromijenjene. Takva refleksija naziva se površinska refleksija.

Dio svjetlosti koji se ne reflektira prolazi kroz podlogu i ulazi u njenu unutrašnjost. Ta se svjetlost može raspršiti unutar strukture podloge (papira) te se ponovo reflektirati iz unutrašnjosti. Takva se refleksija naziva unutarnjom refleksijom. Dijelovi svjetlosti koji se reflektiraju ili na gornjoj podlozi ili iz



unutrašnjosti u optičkim se mjerenjima ne mogu jednostavno razlučiti tako da oba snopa daju informacije o podlozi kao ukupna reflektirana svjetlost .

Apsorbirani dio svjetlosti se sastoji od dijela svjetlosti koji se apsorbira unutar podloge i dijela svjetlosti koji doživljava unutarnju refleksiju u podlozi i ne izlazi iz nje. Zrake svjetlosti koje na neki način prolaze kroz podlogu pripadaju transmitiranoj svjetlosti. Apsorpcija je proces koji uključuje interakciju svjetlosti i čestice, odnosno molekule ili dijela molekule koji apsorbira svjetlost, a zovemo je kromofor (chromophore). Kako broj molekula kromofora raste, raste i vjerojatnost da foton bude apsorbiran, dok količina transmitirane svjetlosti opada.

Svi dijelovi svjetlosti koji nisu vraćeni s podloge (papira) doprinose smanjenju reflektirane svjetlosti. Ako reflektirana svjetlost ne mijenja zastupljenost valnih duljina s obzirom na ulaznu svjetlost, tada će smanjenje svjetlosti značiti samo gubitak sjaja koji opisuje tu podlogu pri čemu sama podloga ne mijenja boju. Međutim, ako dolazi do promjene valnih duljina reflektirane svjetlosti u odnosu na ulaznu svjetlost, tada će smanjenje svjetlosti značiti i promjenu boje promatranog uzorka. Takav se gubitak svjetlosti određenog intervala valnih duljina u procesu refleksije pripisuje pojavi apsorpcije koju nazivamo selektivna apsorpcija. Pojam selektivne apsorpcije veže se uz pojam nestajanja potpuno određenih dijelova spektra što ovisi o vrsti podloge (bojila) na kojoj refleksija nastaje.

Tijela s velikim faktorom apsorpcije za sve valne duljine, a malim faktorom refleksije i transmisije izgledaju crno, a tijela s velikim faktorom refleksije za sve valne duljine imaju bijelu boju. Tijela koja imaju veliki faktor transmisije (skoro jednak jedinici) za sve valne duljine sunčevog zračenja izgledaju prozirno i nemaju boju.

## 4 TEORIJA BOJA

### 4.1 Aspekti boja

Kada govorimo o boji možemo govoriti o dva različita aspekta boja:

a) Boja s psihofizičkog aspekta

Kod psihofizičkog aspekta govorimo o osjetu boje. Sunce emitira elektromagnetsko zračenje različitih valnih duljina, dok je ljudsko oko osjetljivo na samo mali dio tog spektra. Osjet boje u našem oku izaziva elektromagnetsko zračenje valnih duljina od 380 – 750 nm što spada u vidljivi dio spektra, tzv. bijelu svjetlost. Oko prihvaća reflektirano svjetlo od predmeta, svjetlosni signal se pretvara u živčani, koji se putem živaca prenos do mozga i tu se stvara osjet, odnosno doživljaj boje.

b) Boja s fizikalnog aspekta

Kod fizičkog aspekta govorimo o fizičkog podražaja kojeg predstavlja vidljivo zračenje. Osjet boja je posljedica vidljivog zračenja tj. svjetla. Svjetlo nastaje u izvorima svjetla koji mogu biti izravni (direktno emitiraju svjetlo) i neizravni (prenosioci zračenja). Izravni izvori mogu biti prirodni (sunce) i umjetni (rasvjetna tijela). Neizravni izvori su prenosioци energije zračenja, a to su skoro sva tijela u prirodi, koja energiju svjetla prenose apsorpcijom, refleksijom ili transmisijom. Boja nekog tijela ovisi upravo o toj apsorpciji, refleksiji ili transmisiji.

## 4.2 Karakteristike boja

Pod karakteristikama boja misli se na njihove psihofizičke karakteristike, koje služe pri opisivanju neke od boja, a to su: ton, zasićenje i svjetlina.

Ton boje predstavlja dominantnu valnu duljinu, odnosno određuje vrstu boje. To svojstvo pokazuje selektivnu apsorpciju boje, tj. opisuje boju koju osjeća ljudsko oko.

Svjetlina boje je karakteristika koja određuje stupanj prisutnosti crne boje u nekoj boji, odnosno koliko svjetla neka boja reflektira.

Zasićenje boje je karakteristika koja pokazuje koliki je udio bijele svjetlosti u nekom tonu boje, odnosno pokazuje odstupanje boje od akromatske boje iste svjetline. Maksimalno zasićene boje su boje spektra, dok su boje nastale mješanjem uvijek manje zasićene od boja od kojih su nastale.

Ton i zasićenje određuju kvalitet, a svjetlina kvantitet određene boje. Te karakteristike odnose se na subjektivnu ocjenu boja, tj. ovise o promatraču i uvjetima promatranja, pa se objektivni rezultati dobivaju mjerenjem fizičkih karakteristika: dominantne valne duljine čistoće boje i luminancije. Dominantna valna duljina odgovara tonu boje, čistoća zasićenju, dok zajedno čine kromatičnost boje.

### 4.3 Nastajanje bojenog efekta

Osjet određene boje u ljudskom oku mogu izazvati samo valne duljine od 380 – 750 nm, a koju ćemo boju doživjeti ovisi o valnoj duljini, odnosno frekvenciji elektromagnetskog zračenja. Za neku tvar kažemo da je obojena ako apsorbira elektromagnetsko zračenje određene valne duljine iz vidljivog djela spektra, a reflektira ili propušta elektromagnetsko zračenje ostalih valnih duljina iz vidljivog spektra. Ako npr. neku tvar osvjetlimo bijelim svjetlom i ona apsorbira zeleni i crveni dio spektra, onda je ona plava jer taj dio spektra reflektira i izaziva osjet plave u ljudskom oku.

Kako će određena molekula apsorbirati fotone ovisi o njenoj sposobnosti prijelaza iz osnovno u pobuđeno stanje, odnosno da njen elektron prijeđe iz osnovnog nepobuđenog stanja u više energetska stanja. Da bi došlo do tog prijelaza potreban je foton čija je energija jednaka razlici energije elektrona na pobuđenom nivou i energije na nepobuđenom energetskom nivou. Prema tome mogući su prelazi elektrona za koji je  $\lambda = hc / \Delta E$ .

Kod apsorpcije je važna razlika između osnovnog i pobuđenog energetskog nivoa, zbog čega tvar koja apsorbira u vidljivom djelu spektra mora imati bar jedan energetski nivo sa 40 – 114 kcal/mol više energije od osnovnog energetskog nivoa. Neke molekule sadrže uz osnovno i pobuđeno stanje i različita stanja rotacijske i vibracijske energije gdje za prijelaz nije potreban točno određeni foton određene valne duljine, zbog čega apsorpcija nije ograničena na određenu valnu duljinu nego je proširena na veće područje tj. apsorpcijsku vrpcu.

Postoji niz organiskih i anorganskih spojeva čija je energija pobude za određena energetska stanja takva da odgovara energiji svjetlosti (1.5 – 3.0 eV). To su molekule s prstenastom i lančanom strukturom koje imaju nisku energiju pobude, odnosno razlike  $\Delta E$  su manje te odgovaraju većim  $\lambda$ . Strukture sa  $\pi$  - elektronima slabije su povezane pa su energetska stanja međusobno manje udaljena. Kod struktura s konjugiranim dvostrukim vezama poput ugljikovodika, energetska stanja  $\pi$  - elektrona tako su blizu da vrijednost razlike između njihovih

energije odgovara valnim duljinama vidljivog djela spektra. Takve tvari su obojene. Prisutnost heteroatoma (N, O, S) u konjugiranom lancu važna je za nastajanje boje. Primjer je formaldehid  $\text{CH}_2=\text{O}$ , koji apsorbira svjetlo sa  $\lambda = 190$  i  $300 \text{ nm}$ . Od etilena potječe prva vrpca apsorpcije, odnosno od jednog njegovog prelaza  $\pi$  – elektrona na viši nivo, dok druga potječe od prelaza valencijskog  $\pi$  – elektrona kisikova atoma na viši nivo. Na pomak apsorpcije prema većim valnim duljinama utječe povećano područje konjugacije.

Prisustvom atoma dušika (N) i kisika (O) proširuje se područje konjugacije u konjugiranom lancu s elektronskim parovima, odnosno  $\pi$  – elektronima koji su ušli u valencijsku vezu.

Apsorpcijsku vrpca se pomiče prema većim valnim duljinama kada je usamljeni elektronski par olabavljen prisutnošću negativnog naboja, što znači da boja postaje zasićenija. Primjer je  $\pi$  – nitrofenol obojen slabo svjetložuto, dok je njegov anion izrazito narančastocrven. Obojenost se može uvjetovati i hiperkonjugacijom tj. račvanjem konjugacije pri čemu se mogu dobiti produkti čija se boja ističe po svojoj zasićenosti.

## 5 RASPRŠENJE SVJETLOSTI

Kada su čestice puno manje od valne duljine svjetlosti, dolazi do tzv. Rayleighovog raspršenja svjetlosti. Smanjenjem valne duljine svjetlosti raspršenje svjetlosti raste. Do Rayleighovog raspršenja svjetlosti će doći ako papir sadrži ultrasitne čestice punila ili sitne djeliće vlakana, ali ono je vrlo slabo u odnosu na višestruku refleksiju i lom svjetlosti. Raspršenje svjetlosti ovisi o indeksu loma i o unutrašnjoj strukturi (površini) materije. Intenzitet koji se raspršuje na sitnim česticama pod nekim kutem  $\alpha$  proporcionalan je s  $(1+\cos^2 \alpha)$ , a obrnuto proporcionalan s  $\lambda^4$ .

$$(5.) \quad I = \frac{1+\cos^2 \alpha}{\lambda^4}$$

### 5.1 Raspršenje svjetlosti u papiru

Unutar papira raspršenje svjetlosti raste kada se upadna zraka lomi i reflektira od površine celuloznog vlakanca i čestica punila. Kada se percipira list papira ljudsko oko registrira difuznu refleksiju. Na raspršenje svjetlosti utječu i sitne pukotine u vlakancima. Prilikom kemijske obrade sirovine za izradu papira, stvara se kaša koja se odvlaknjuje. U tom procesu stvaraju se nove površine na vlakancima celuloze na kojima može doći do raspršenja, ali te površine u procesu sušenja nestaju zbog povezivanja vlakana. Odvlaknjivanjem se odstranjuju nepovezana vlakanca. Ovim načinom obrade povećava se čvrstoća papira, a opada raspršenje svjetlosti i obrnuto. S tim se problemom susreću proizvođači papira odnosno kako povećati raspršenje svjetlosti u papiru bez smanjenja vučne čvrstoće papira. Postizanje povećanja raspršenja u papiru omogućava se punilima, premazima i dodavanjem kaše dobivene mehaničkom obradom (mljevenjem) sirovine za izradu papira.

## 5.2 Apsorpcija svjetlosti

Svjetlosno zračenje pretvara se u toplinu i druge oblike energije putem apsorpcije. predmet koji promatramo izgleda tamniji što je veća apsorpcija svjetlosti. Ljudsko oko promatrani predmet vidi obojenim ako je apsorpcija različita kod različitih valnih duljina odnosno ako tijelo pokazuje selektivnu apsorpciju. Boja koja se reflektira od površine tog predmeta je komplementarna apsorbiranoj.

Bijela boja u jednakoj mjeri reflektira sva valna područja vidljive svjetlosti. Crna površina potpuno apsorbira takvu svjetlost, a siva djelomično, ali u jednakoj mjeri reflektira sva područja bijele svjetlosti. Zbog prisutnosti lignina u papiru dolazi do povećane apsorpcije u plavom dijelu spektra te ljudskom oku papir djeluje žućkasto. Međusobni utjecaj raspršenja i apsorpcije svjetlosti određuje količinu raspršene reflektancije.

## 6 OPTIČKA SVOJSTVA PAPIRA

Kod opisivanja optičkih svojstava papira razlikujemo nekoliko različitih pojmova: opacitet ili neprozirnost, transparentnost, sjajnost, bjelina i boja.

### Opacitet

Opacitet je mjera za nepropusnost svjetla, odnosno neprozirnosti tiskovne podloge i izražava se u postotcima. Određuje se iz omjera stupnja reemisije pojedinog lista papira iznad jedne crne podloge i stupnja reemisije istog lista iznad tolikog snopa listova istovrsnog papira da kroz njega ne može proći svjetlo.

Opacitet se izračunava prema formuli:

$$(6.) \quad O = R_0 / R_\infty \times 100\%$$

$R_0$  – faktor refleksije jednog lista papira na crnoj podlozi

$R_\infty$  – faktor refleksije snopa istovrsnih listova papira

Stupanj reemisije lista u snopu je zapravo stupanj bjeline tog lista papira. Papiri s malom gramaturom imaju nisku vrijednost reflektancije, a porastom gramature povećava se i vrijednost opaciteta. Opacitet je primarno određen količinom punila u papiru, indeksom loma punila, premazom i gramaturom.

### Transparentnost

Transparentnost je propusnost papira za difuzno upadno svjetlo, a rezultati se izražavaju u postotcima. Transparentnost i opacitet su obrnuto razmjerne veličine. Papir visoke transparentnosti pokazuje nikakav ili samo mali opacitet i obrnuto.



## Sjajnost

Površina papira reflektira zrake svjetlosti koje padaju na nju. Zbog različitog stanja površine (više ili manje neravnih ploha) na koju svjetlost pada dolazi do difuzne refleksije, tj. upadni snop paralelnih zraka reflektira se u svim smjerovima te nam se ta površina čini manje sjajna ili uopće nije sjajna. Glatkoća doprinosi sjaju papira sprečavajući svjetlost da se rasprši na površini papira.

Mjerenje sjaja zasniva se na uspoređivanju ispitivanog uzorka s jednim sjajnim standardom. Određuje se udio svjetla koji se reflektira pod istim kutom pod kojim je upao. Što je taj udio veći, to je uzorak sjajniji.

## Bjelina

Bjelina ili stupanj bjeline definirani su kao stupanj refleksije ili reemisije difuznog svjetla valne duljine 461 nm s površine sloja papira u odnosu na standardni uzorak magnezijevog oksida čija se vrijednost uzima kao 100 %. U nedostatku magnezijevog oksida može se uzeti istaloženi barijev sulfat čiji stupanj bjeline iznosi 96 %. Stupanj bjeline daje se u postotcima u odnosu na navedene standarde.

Pretpostavka za izradu papira visokog stupnja bjeline je u prvom redu kvalitetno bijeljena vlaknasta sirovina, punila sa što većim stupnjem bjeline, plavila i optička bjelila koja stupanj bjeline trebaju još povećati.

## Boja

Boja je, u užem smislu, osjet vida što ga izaziva nadražaj mrežnice oka elektromagnetskim zračenjem valne duljine između 380 nm i 780 nm (vidljiva svjetlost). Prema tome, boja je psihički doživljaj izazvan fizičkim uzrokom (stimulusom) i ovisi o fiziološkim procesima u organizmu. U govoru, boja svjetla podrazumijeva njegov spektralni sastav ili osjet boje koji doživljavamo, a boja tijela boju svjetla koje se od njih reflektira ili kroz njih prolazi kad su osvjetljena danjim ili njemu sličnim svjetlom.

Mjerenje boja obuhvaća određivanje njihovih psihofizičkih karakteristika: tona, zasićenja i svjetline. Ove osobine su subjektivne (ovise o promatraču, uvjetima promatranja i dr.) pa se zbog toga mjere fizikalne veličine koje se na njih nadovezuju. Tako tonu odgovara dominantna valna duljina, zasićenju čistoća pobude i svjetlini luminancija.

## 7 STARENJE PAPIRA

Mehaničke osobine papira ovise o celuloznim vlaknima od kojih su građena. Raspad celuloznih vlakana može biti uzrokovan oksidacijom celuloze, djelovanjem kiselina, razvojem mikroorganizama (bakterija i plijesni). Bakterije razaraju celulozu u lužnatoj sredini, plijesni u kiseloj, a i jednima i drugima potrebna je vlaga. Djelovanjem topline proces starenja i propadanja papira se ubrzava: papir žuti, postaje krut, gubi otpornost na savijanje.

Prirodno starenje papira je rezultat mnogih elemenata koji djeluju na starenje papira. Ti elementi uključuju svjetlost, toplinu, kemijske reakcije (utjecaj na pH vrijednost), zagađivače iz zraka.

Cijepanjem molekula celuloze, oksidacijom i u kiselom mediju, celulozna vlakna se razgrađuju i postaju krta pa papir propada. Cijepanje molekula uzrokovano je oksidacijom kisikom iz zraka koja je potpomognuta djelovanjem vidljivog svjetla i UV zračenjem (fotooksidacijom).

U papiru dobivenom iz drva prisutan je i lignin. Lignin doprinosi kiselosti papira zbog aromatskih spojeva koji imaju -OH grupu vezanu na benzenovu jezgru (fenoli). Lako se oksidira u obojane (žuto do smeđe) spojeve i kisele produkte, koji dovode do hidrolize celuloze. Visoko kvalitetni papir proizvodi se od celuloze koja je oslobođena lignina.

Čista celuloza lana i pamuka je stabilna ako nije izložena djelovanju vlage, plijesni i insekata. Papir dobiven od krpa ili prirodnih vlakana biljaka je zbog toga kvalitetniji i trajniji. Papir od drvene celuloze, zbog uklanjanja drvenastih materija kemijskom preradom drva, postaje manje elastičan jer se i molekule celuloze razgrađuju, vlakna postaju kraća, a time i manje elastična.

Veziva se papiru dodaju da bolje povežu celulozna vlakna te sprječavaju upijanje i razlijevanje boje (filtar papir ne sadrži vezivo). U boljim vrstama papira veziva su škrob, dekstrin, tutkalo, derivati celuloze topivi u vodi (metilceluloza). Najlošije vezivo je kolofonij u obliku smolnog sapuna kojemu se dodaju

aluminijevi spojevi da se smola istaloži (koagulira) na vlaknima, jer aluminijev ion  $Al^{3+}$  hidrolizira i daje vodikove ione koji uzrokuju razgradnju celuloze.

Propadanje papira uzrokuju oksidi sumpora i dušika koji nastaju izgaranjem različitih goriva. Oni s vlagom stvaraju kiseline koje uzrokuju kiselost papira i njegovo daljnje propadanje.

Ubrzano starenje papira se koristi kako bi se ispitali tri cilja. Prvi je uspostaviti u povoljno kratkom vremenu relativnu kvalitetu materijala, fizičke kombinacije materijala, s obzirom na njihovu kemijsku stabilnost ili fizičku izdržljivost. Drugi je procijeniti ili "predvidjeti" potencijalno dugoročnu koristivost materijala pod određenim uvjetima uporabe. Treći, procesi propadanja se ubrzavaju u laboratoriju kako bi se razjasnile kemijske reakcije i njihove fizičke posljedice. Krajnji cilj trećeg područja istraživanja je razvoj tehnika koje mogu pratiti opseg razgradnje i načina na koji se može produžiti vijek trajanja materijala.

Prirodne značajke koje bi trebale biti zastupljene u ubrzanoj izloženosti su širokopojasno osvjetljenje i ograničavanje intenziteta emisije ispod 340 nm. Budući da su mnogi dijelovi vidljivog spektra fotokemijski aktivni s papirom, cijeli vidljivi spektar trebao bi biti uključen u ubrzanom starenju. Drugo, jer prozorsko staklo počinje apsorbirati valne duljine ispod 360 nm, količina zračenja s valnim duljinama ispod 320 nm po minuti. Te kratke valne duljine mogu uzrokovati fotokemijske reakcije koje nisu moguće s više valne duljine.

Čista celuloza upija vidljivo svjetlo u manjem dijelu, dok je apsorpcija u UV području spektra izraženija. To je, dakle, uglavnom svjetlost u spektru 300-550 nm, koja uzrokuje najviše štete u celulozi tijekom izlaganja dnevnom svjetlu. U zatvorenom prostoru, gdje se sunčeva svjetlost filtrira pod prozorima stakla, spektar sadrži valne duljine veće od 340 nm. Razgradnja pomoću svjetla može se podijeliti u dvije glavne skupine, izravna fotoliza i fotoosjetljiva degradacija.

Do fotolize može doći kada energija apsorbiranog fotona je dovoljno visoka da potakne izravnu disocijacije veze.

U procesu fotoosjetljive degradacije, energija iz elektronski pobuđenog stanja je prebačena u inicijator ili u kisik, što rezultira u naknadno propadanje celuloze.

Mehanizam degradacije je takav da se tokom reakcije, kiseline ne troše već kataliziraju. Od trenutka kada je stvorena kiselina, unutar kiselokatalitičke reakcije, nastala degradacija je u stvari autokatalitička. Ostaci kiseline u papiru na kraju rezultiraju kiselom hidrolizom, što pospešuje: povišena temperatura, povišena vlažnost zraka, UV zračenje, i zagađivala iz zraka. Takav papir postaje žućkasto-smeđ, lomljiv i raspada se.

Osnovni procesi u degradaciji papira su kiselna ili alkalna hidroliza, proces oksidacije, termoliza, mehanička i biološka razgradnja. Mehanizam starenja papira i otisaka obuhvaća veći broj interakcija između tvari u papiru i okoline. Interakcije mogu biti vidljive, a mogu se očitovati u smanjivanju mehaničkih svojstava papira, gubitku kemijske stabilnosti, promjeni optičkih karakteristika papira i otisaka.

## 8 EKSPERIMENTALNI DIO

Ispitivani su višenamjenski uredski papiri MAESTRO color 80 gm<sup>-2</sup>, po jedan od 5 različitih pastelnih boja (plavi, zeleni, crveni, žuti, krem). Pritom je korišten spektrofotometar X-Rite Digital Swatchbook.

Spektrofotometar je uređaj za analizu spektra elektromagnetskog zračenja. Sastoji se od izvora zračenja, monokromatora i detektora. Spektrofotometar svjetlošću izabranog standarda osvjetljava obojani uzorak. Svjetlo se reflektira s uzorka i sustavom leća dolazi do filtra. Nakon što svjetlost prođe kroz filter vrijednosti elektromagnetskog zračenja se iz analognog zapisa pretvaraju u digitalni te se matematičkim proračunima pretvaraju u koordinate određenog prostora boja.



Slika 4 Spektrofotometar X-Rite Digital Swatchbook  
Izvor: <http://minimumproject.ru/>

Ispitivani uzorci su obojani (pigmentirani) papiri, a neka je tvar obojana ako selektivno apsorbira dio elektromagnetskog zračenja valnih duljina između 380 i 780nm, a propušta ili reflektira elektromagnetsko zračenje ostalih valnih duljina u tom dijelu spektra. Boja koju doživljava promatrač upravo je reflektirani dio spektra, dok apsorbirani ostaje u sustavu u obliku topline. Tvari čije molekule apsorbiraju fotone valnih duljina izvan područja vidljivog svjetla, bilo u ultraljubičastom ili infracrvenom području izgledaju ljudskom oku bezbojne, ali se takva apsorpcija energije zračenja može mjeriti pogodnim instrumentima.

Apsorpcija je proces koji uključuje interakciju svjetlosti i čestice, ali u ovom slučaju čestica je molekula ili dio molekule koji apsorbira svjetlost, a zovemo je kromofor (chromophore). Kromofori su skupina atoma unutar molekule koji su odgovorni za „boju“ molekule. Pigmenti, dye-vi i ostala sredstva za bojanje sadrže kromofore.

### 8.1 SOLARBOX 1500 E

Solarbox je uređaj za degradaciju materijala u kojem se nalazi ksenonska lampa. Ona emitira elektromagnetsko zračenje intenziteta od 250 do 1100 W/m<sup>2</sup> u intervalu od 290 do 800 nm. Radijacija se kontrolira *radiometrom*. Osim toga, u uređaju se nalaze i UV filteri koji u kombinaciji s ksenonskom lampom simuliraju spektar zračenja ekvivalentan realnom vanjskom dnevnom svjetlu. Komora se sastoji od reflektivnih ploha koje usmjeravaju zračenje na uzorak. Temperatura se također može nadzirati i kontrolirati, a toplina koja se stvara je od ksenonske lampe. Temperatura se kontrolira preko *standardnog crnog termometra* koji se nalazi u blizini uzoraka. Temperature koje se mogu definirati unutar komore su od 35°C do 100°C. Površina za smještanje uzoraka u komori je (280x200)mm<sup>2</sup>. Uzorke smo izlagali i pod zračenje UV lampe.



Slika 5 Solarbox 1500 e  
Izvor: <http://pimg.tradeindia.com/>

## 8.2 Plan rada

Pigmentiranim papirima A4 formata izmjerene su spektralne reflektancije, nakon čega su izrezani na 10 dijelova. Svaki od tih dijelova je označen brojem sati koliko je izlagan zračenju.

Prvi uzorak nije izložen zračenju. Drugi uzorak je uklonjen sa zračenja nakon 10 sati, treći nakon 20 sati, četvrti nakon 40 sati, peti nakon 60 sati i šesti nakon 80 sati.

Spektrofotometrom su izmjerene spektralne reflektancije svih uzoraka u vidljivom dijelu spektra svakih 10 nm (390-700 nm). Podaci su uneseni u ColorShop. Svaki je uzorak izmjeren 10 puta, a za izvor svjetla odabran je standard A-Incandescent. Zatim su preneseni u program Microsoft Excel u kojem je izvršena statistička obrada eksperimentalnih podataka te su srednje vrijednosti mjerenja korištene za grafički prikaz.

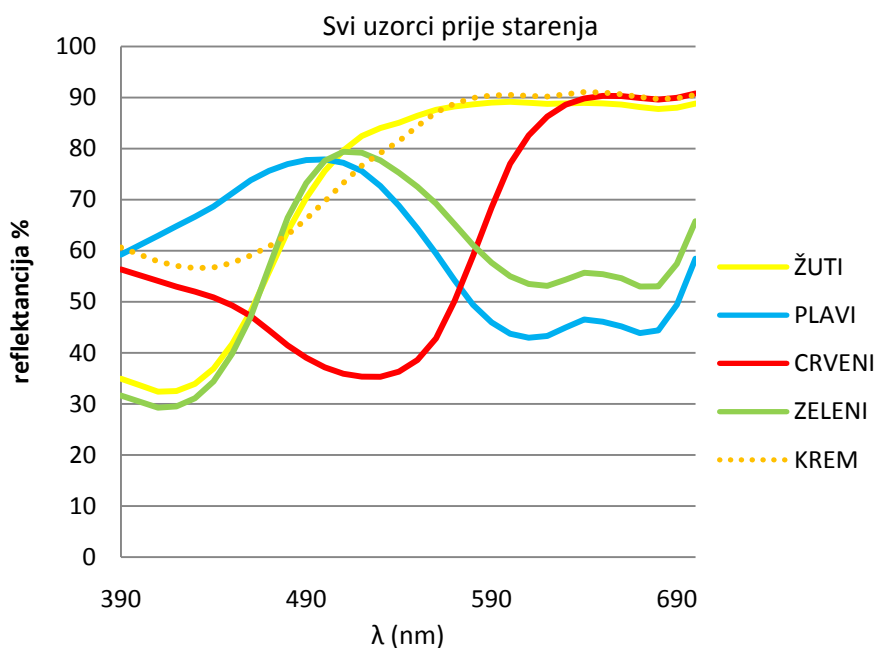


## 9 REZULTATI I RASPRAVA

Za sve ispitivane uzorke pigmentiranog papira grafički su prikazane spektralne reflektancije, promjene reflektancija kroz sve sate zračenja, te promjene i nakon 80 sata zračenja. Grafički su prikazane razlike spektralnih reflektancija nestarenih i starenih uzoraka.

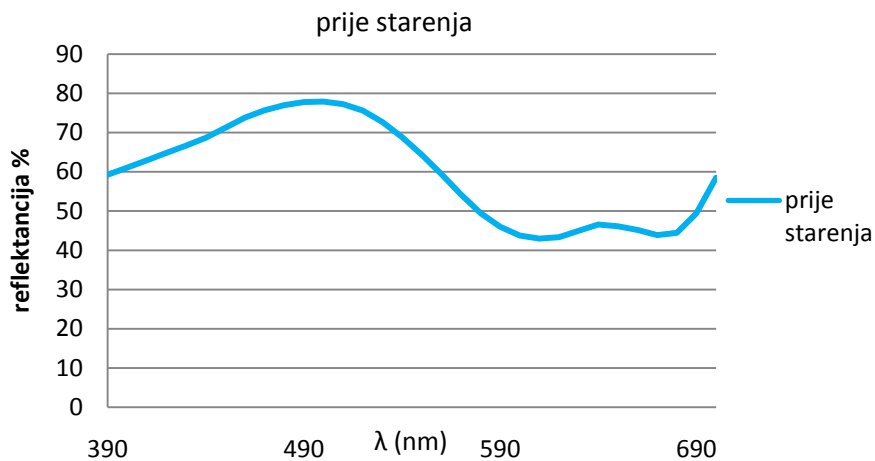
Prikazane su i razlike spektralnih reflektancija ozračenih i neozračenih uzoraka svih uzoraka za sve sate izlaganja zračenju kako bi se utvrdilo da je na određenim vremenima zračenja došlo do izvjesnog ponavljanja te koje je vrijeme najkritičnije za starenje uzoraka.

### 9.1 UZORCI OSVJETLJENI SA UV LAMPOM



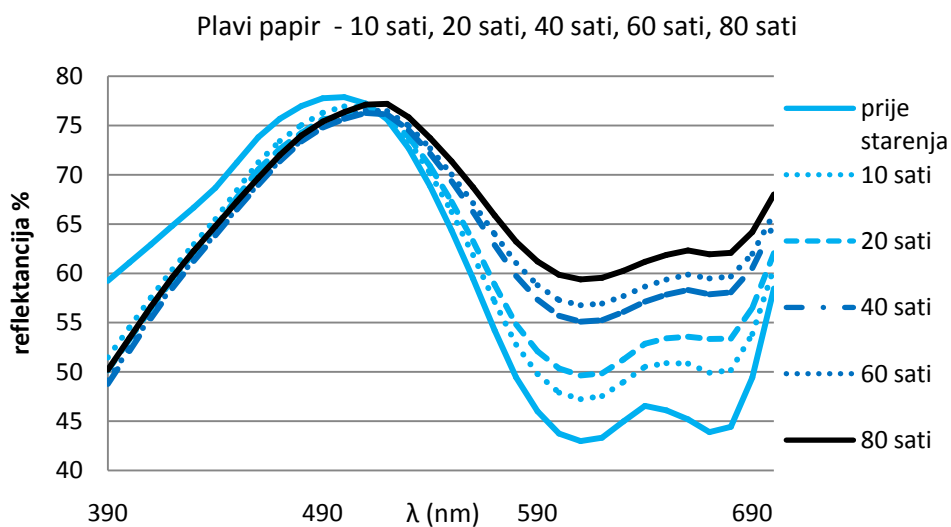
Graf 1. prikazuje spektralne reflektancije svih pigmentiranih papira prije starenja.

Iz grafa 2. je vidljivo da plavi papir reflektira svjetlost između 390 i 560 nm, dok između 560 i 700 nm dolazi do dominantne selektivne apsorpcije. Maksimalna refleksija je na 490 nm i iznosi oko 77 %.



Graf 2 – spektralna osjetljivost plavo pigmentiranog papira prije izlaganja elektromagnetskom zračenju

Starenjem plavo pigmentiranog papira već kod izlaganja UV zračenju od 10 sati (graf 3.) nastale su vidljive promjene u cijelom području vidljivog dijela spektra. Refleksija se smanjila u području ljubičasto-plavog spektra, a povećala u području dominantne selektivne apsorpcije u području crvenog dijela spektra.



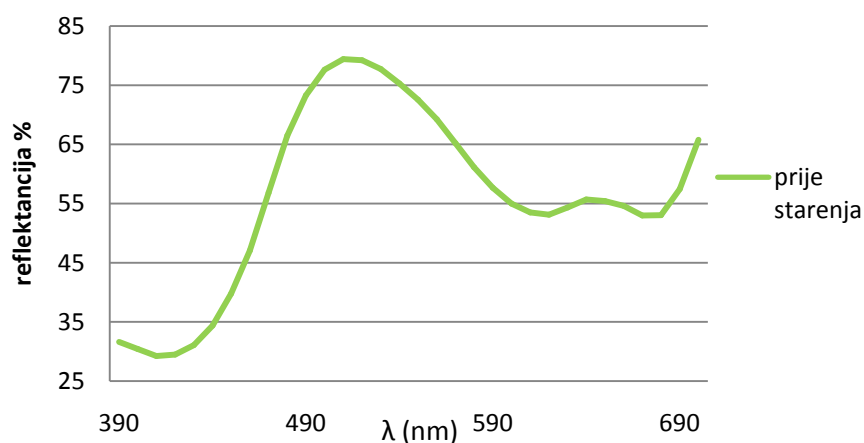
Graf 3 - spektralna osjetljivost plavog pigmentiranog papira poslije višesatnog izlaganja elektromagnetskom zračenju

Promatrajući sve grafičke prikaze i sve uzorke nakon zračenja, uočavamo da se prva promjena događa u ljubičasto – plavom spektru, gdje se smanjuje

refleksija. Nakon što je uzorak bio ozračen 10 sati pokazuju se promjene refleksije, a duljim izlaganjem uzorka zračenju, promjena u refleksiji se ne mjenja bitno, s tendencijom smanjivanja za 1%. Bitne promjene se događaju u području dominantne selektivne apsorpcije, u crvenom dijelu spektra, tj od 560 nm do 700 nm. Duljim izlaganjem uzorka UV zračenju povećava se refleksija te možemo uočiti da je nakon 10 satnog izlaganja minimum refleksije oko 55% (na 600nm), a nakon 80- satnog izlaganja vrijednost refleksije na istoj valnoj duljini narasla je na 66%.

U području vidljivog dijela spektra u kojem plavi papir dominantno reflektira svjetlost nastale su najmanje promjene spektralne reflektancije.

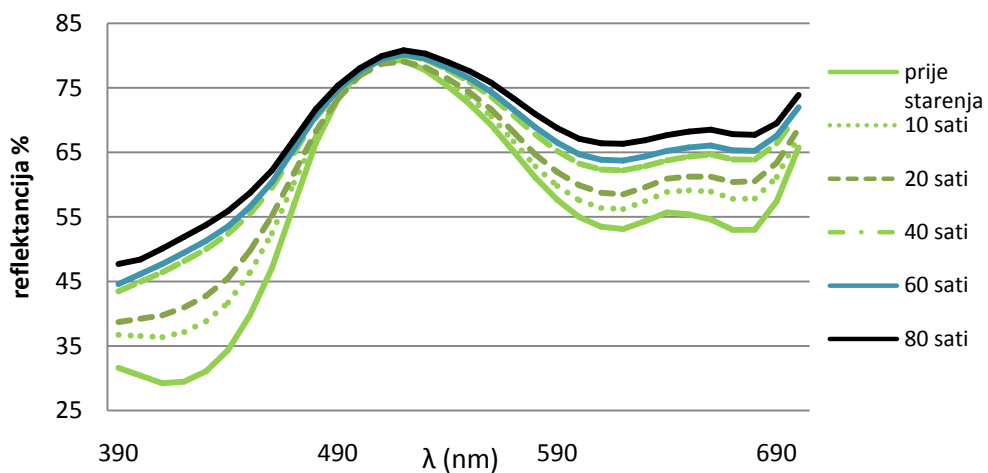
Na području gdje je iznos refleksije minimalan (600 nm), pri izlaganju od 10 sati refleksija se povećala u odnosu na nestareni uzorak za oko 4 %, te za još 3 % tijekom 20 satnog izlaganja zračenju. Izlaganjem od 40 sati reflektancija se povećal za 12 % u odnosu na nestareni uzorak, a kod 60 satnog zračenja razlika iznosila oko 14 %. Nakon 80 satnog izlaganja uzorka zračenju vide se najveće promjene u odnosu na nestareni uzorak od 16%. Može se zaključiti da je najmanja razlika u promjeni reflektancije kod izlaganja od samo 10 sati, a svako veće izlaganje dolazi do sve većih promjena, zbog kojih dolazi do degradacije plavo pigmentiranog papira.



Graf 4 - spektralna osjetljivost zeleno pigmentiranog papira prije izlaganja elektromagnetskom zračenju

Iz grafa 4. je vidljivo da zeleno pigmentirani papir dominantno reflektira svjetlost između 450 i 610 nm, dok na područjima od 390-450 nm i 610-700 nm dolazi do selektivne apsorpcije. Maksimalna refleksija je na 510 nm i iznosi oko 76 %.

Starenjem zeleno pigmentiranog papira već prilikom izlaganja UV zračenju od 10 sati (graf 3.) nastale su vidljive promjene u cijelom području vidljivog dijela spektra. U području dominantne refleksije zeleno pigmentiranog papira nema promjene, ali se povećala refleksija u području selektivne apsorpcije od 390 nm do 450 nm i u području od 610 nm do 700 nm.



Graf 5 - spektralna osjetljivost zeleno pigmentiranog papira poslije višesatnog izlaganja elektromagnetskom zračenju

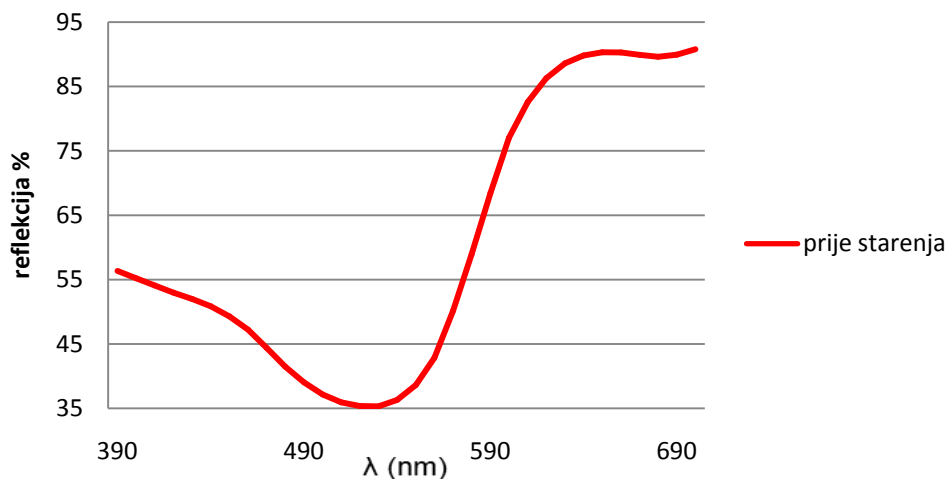
Pregledom spektralnih reflektancija dobivenih nakon izlaganja uzorka i do 80 sati uočavamo bitne promjene za razliku od neizlaganog uzorka. Uočavamo da bitnih promjena nema u području dominantne refleksije. Prva promjena se događa u ljubičasto-plavom dijelu spektra, području selektivne apsorpcije, gdje dolazi do porasta reflektancije. Nakon 10-satnog izlaganja uzorka UV zračenju, reflektancija je porasla za 5%, a kod 80-satnog izlaganja reflektancija u području ljubičasto – plavog dijela spektra je porasla za 21% tj. iznosi 51%.

U području selektivne apsorpcije u crvenom djelu spektra također dolazi do tendencije porasta refleksije i razlika nestarenih uzorka i onih uzorka izloženih 80-satnom zračenju iznosi 13 % kod 610 nm, tj minimuma refleksije.

Najveće razlike zeleno pigmentiranog papira uočavamo kod minimuma refleksije u ljubičasto - plavom dijelu spektra. Minimum refleksije za nestarene uzroke iznosi oko 16% kod 410 nm, a za uzorak zračen 10 sati imamo povećanje 6%, a najveća razlika se očituje kod uzorka izloženog 80 sati gdje se pojavljuje razlika od 21%.

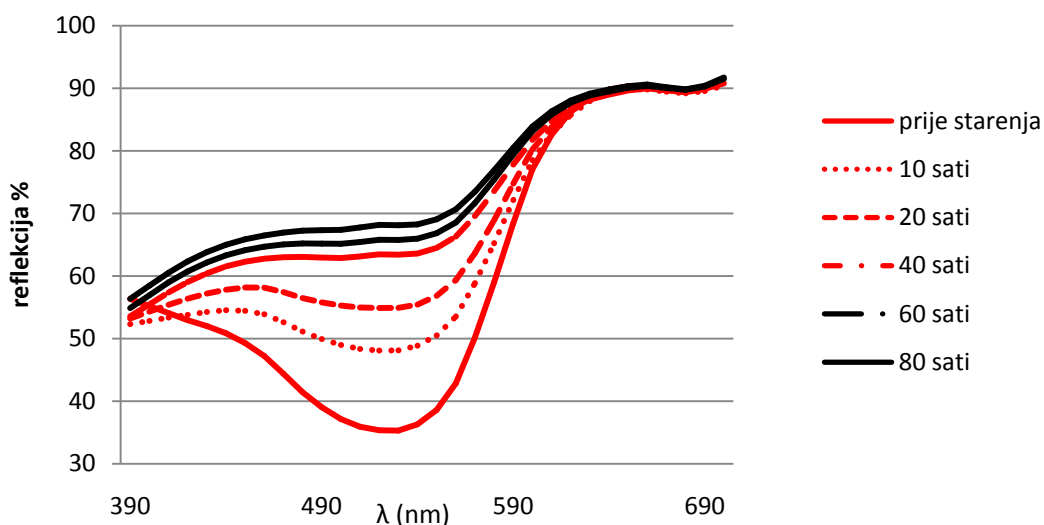
Iz grafa 6. je vidljivo da crveni papir dominantno reflektira svjetlost između 590 i 700 nm, dok na područjima 490-540 nm dolazi do selektivne apsorpcije.

Maksimalna refleksija je na 700 nm i iznosi oko 90 %.



Graf 6 - spektralna osjetljivost crveno pigmentiranog papira prije izlaganja elektromagnetskom zračenju

Starenjem crveno pigmentiranog papira već prilikom izlaganja UV zračenju od 10 sati nastale su vidljive promjene u zelenom području vidljivog dijela spektra. Refleksija se povećala za otprilike 15% u području od 470 nm do 560 nm.

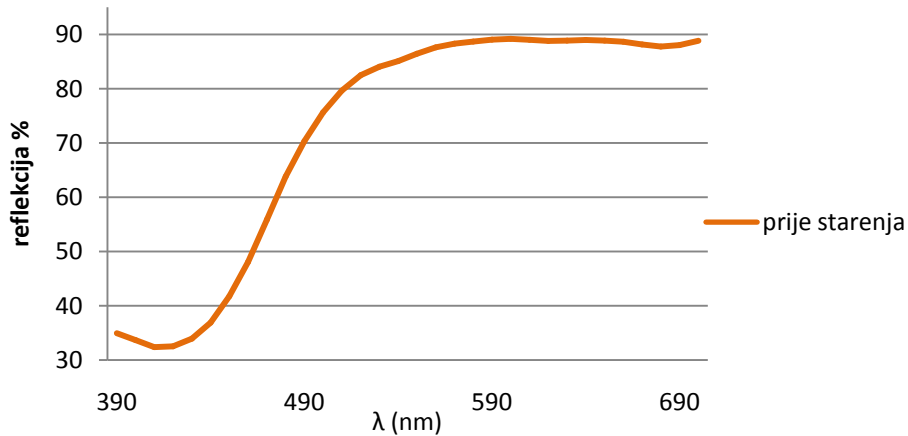


Graf 7 - spektralna osjetljivost zeleno pigmentiranog papira poslije višesatnog izlaganja elektromagnetskom zračenju

Pregledom spektralnih reflektancija dobivenih nakon izlaganja uzorka i do 80 sati uočavamo bitne promjene za razliku od neizlaganog uzorka. Uočavamo da bitnih promjena nema u području dominantne refleksije, tj. u području crvenog dijela spektra. Prva promjena se događa u zelenom dijelu spektra, području dominantne selektivne apsorpcije, gdje dolazi do porasta refleksije. Nakon 10-satnog izlaganja uzorka UV zračenju, reflektancija je porasla za 15%, a kod 80-satnog izlaganja reflektancija u području zelenog spektra je porasla za 30% tj. iznosi 68%.

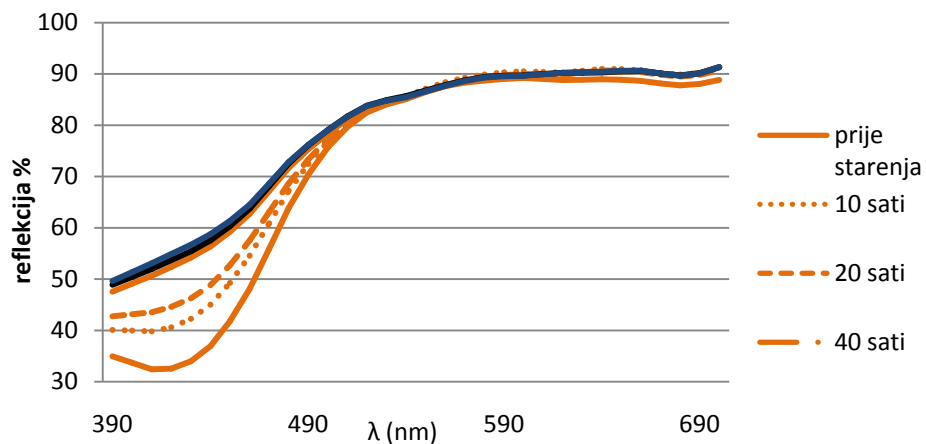
U području selektivne apsorpcije u ljubičasto-plavom djelu spektra dolazi do konstantog povećanja refleksije. Najveće razlike u refleksiji crveno pigmentiranog papira su izmjerene na 520 nm u zelenom dijelu spektra. Minimum refleksije za nestarene uzroke iznosi oko 35% kod 520 nm, a za uzorak zračen 10 sati imamo povećanje 13%, a najveća razlika se očituje kod uzorka izloženog 80 sati kod 520 nm gdje se pojavljuje razlika od 33%.

Iz grafa 8. je vidljivo da žuto pigmentirani papir dominantno reflektira svjetlost između 500 i 700 nm, dok na područjima 400 do 450 nm dolazi do dominantne selektivne apsorpcije. Maksimalna refleksija je na 600 nm i iznosi oko 89%.



Graf 8 - spektralna osjetljivost žuto pigmentiranog papira prije izlaganja elektromagnetskom zračenju

Starenjem žuto pigmentiranog papira već kod izlaganja UV zračenju od 10 sati (graf 15.) nastale su vidljive promjene u ljubičasto-plavom području vidljivog dijela spektra. Refleksija se povećala za otprilike 10% u području od 400 nm do 450 nm.



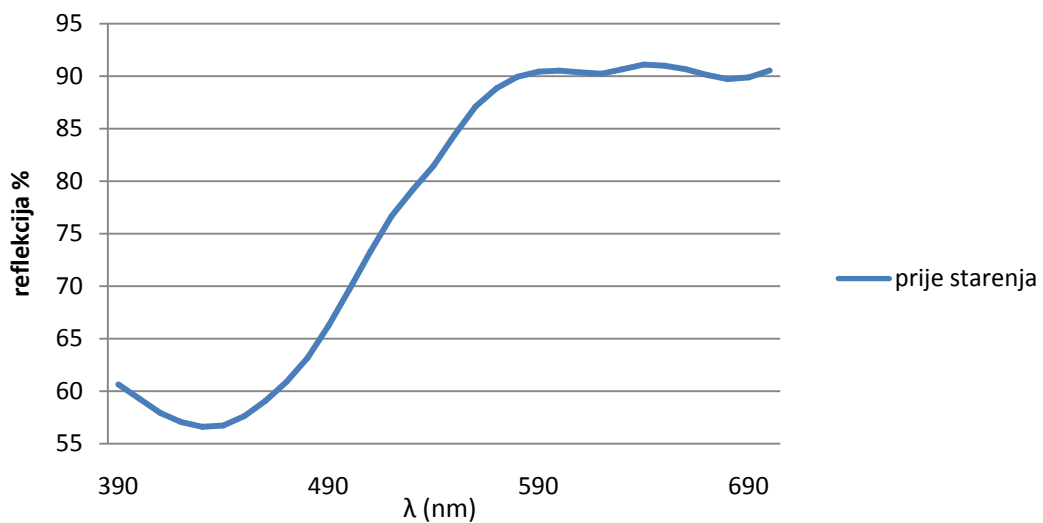
Graf 9 - spektralna osjetljivost zeleno pigmentiranog papira poslije višesatnog izlaganja elektromagnetskom zračenju

Pregledom spektralnih reflektancija dobivenih nakon izlaganja uzorka i do 80 sati uočavamo bitne promjene za razliku od neizlaganog uzorka. Uočavamo da bitnih promjena nema u području dominantne refleksije tj. u području zelenog i crvenog dijela spektra. Prva promjena se događa u ljubičasto-plavom spektru, području dominantne selektivne apsorpcije, gdje dolazi do porasta refleksije. Nakon 10-satnog izlaganja uzorka UV zračenju, reflektancija je porasla za oko 10%, a kod 80-satnog izlaganja reflektancija u području zelenog spektra je porasla za 20% tj. Iznosi 54%. Promjene u refleksiji u području ljubičasto-plavom spektru prestaju nakon 40 satnog izlaganja zračenju, tj. nema znatnijih promjena refleksije između 40 satnog i 80 satnog izlaganja.

U području dominantne refleksije u crvenom dijelu spektra nema značajnijih promjena i refleksija je konstantna oko 88%. Najveće razlike žuto pigmentiranog papira su uočene u minimumu refleksije u ljubičasto-plavom dijelu spektra. Minimum refleksije za nestarene uzroke iznosi oko 35% na 520 nm, a za uzorak zračen 10 sati imamo povećanje 13%, a najveća razlika se očituje kod uzorka izloženog 80 sati kod 520 nm gdje se pojavljuje razlika od 33%.

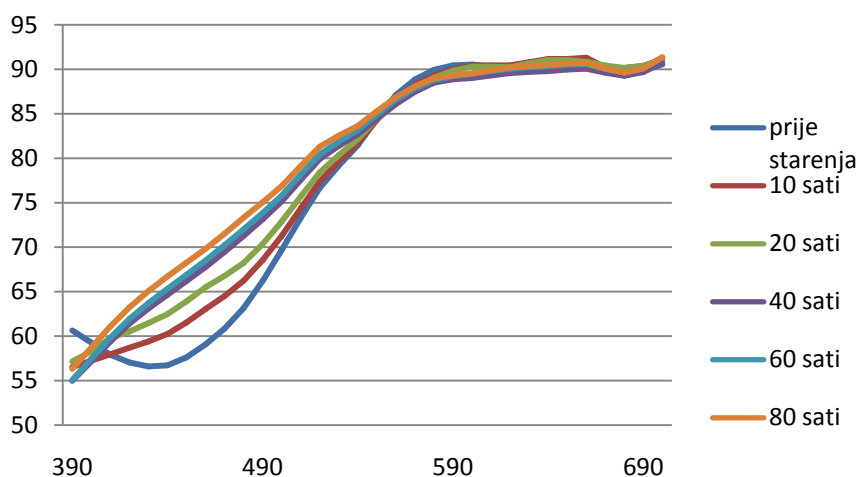


Iz grafa 10. je vidljivo da blijedo žutopigmentirani papir dominantno reflektira svjetlost između 500 i 700 nm, dok na područjima 400 do 450 nm dolazi do dominantne selektivne apsorpcije. Maksimalna refleksija je na 600 nm i iznosi 90%. Refleksija je slična kao i kod žuto pigmentiranog papira, razlika je u području selektivne apsorpcije koja je kod žuto pigmentiranog papira ima minimum refleksije od 32%, a kod blijedo žuto pigmentiranog papira ima 23% veću refleksiju.



Graf 10 - spektralna osjetljivost blijedo žuto pigmentiranog papira prije izlaganja elektromagnetskom zračenju

Starenjem blijedo žuto pigmentiranog papira već kod izlaganja UV zračenju od 10 sati nastale su vidljive promjene u ljubičasto-plavom području vidljivog dijela spektra. Refleksija se povećala za otprilike 4% u području od 400 nm do 450 nm.



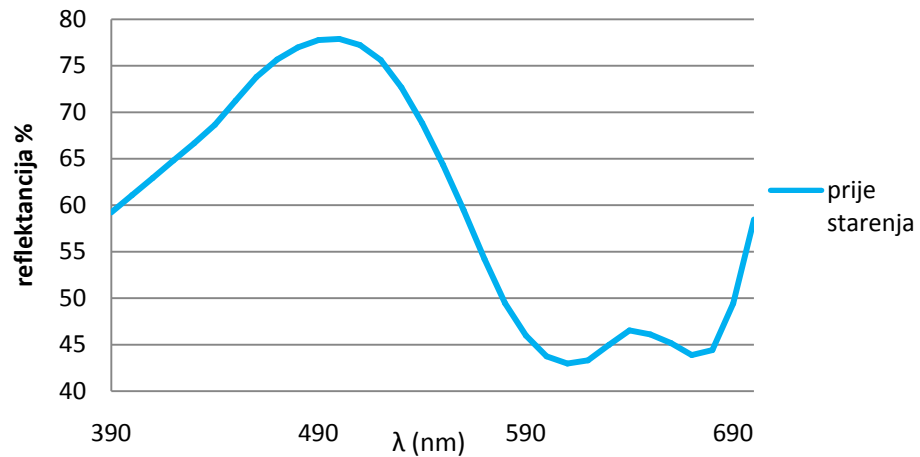
Graf 11 - spektralna osjetljivost blijedo žuto pigmentiranog papira poslije višesatnog izlaganja elektromagnetskom zračenju

Pregledom spektralnih reflektancija dobivenih nakon izlaganja uzorka i do 80 sati uočavamo bitne promjene za razliku od neizlaganog uzorka. Uočavamo da bitnih promjena nema u području dominantne refleksije tj. u području zelenog i crvenog dijela spektra. Prva promjena se događa u ljubičasto-plavom spektru, području selektivne apsorpcije, gdje dolazi do porasta refleksije. Nakon 10-satnog izlaganja uzorka UV zračenju, reflektancija je porasla za oko 4%, a kod 80-satnog izlaganja reflektancija u području zelenog spektra je porasla za 10% tj. iznosi 69%. Promjene u refleksiji u području dominantne selektivne apsorpcije prestaju nakon 40 satnog izlaganja zračenju, tj. nema znatnijih promjena refleksije između 40 satnog i 80 satnog izlaganja.

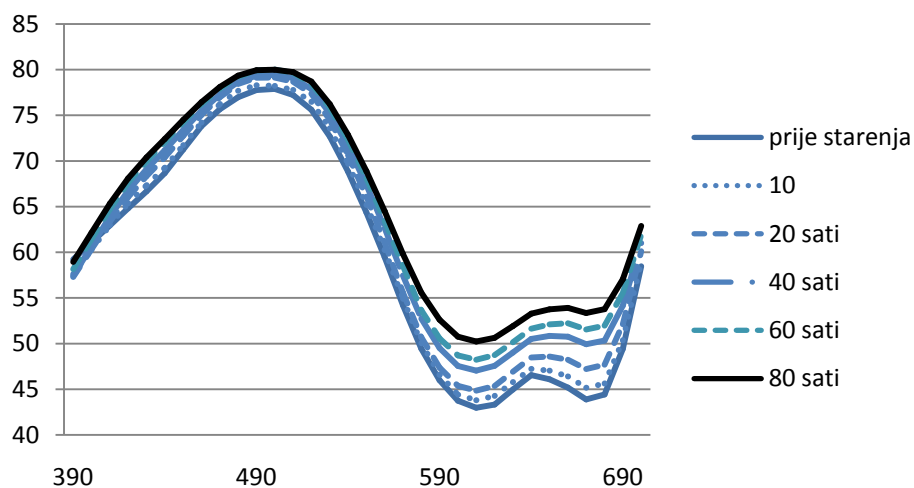
U području dominantne refleksije u crvenom dijelu spektra nema značajnijih promjena i refleksija je konstantna oko 90%. Najveće razlike koje mogu utjecati na degradaciju blijedo žuto pigmentiranog papira su uočene u minimumu refleksije u području selektivne apsorpcije. Najzanimljivija promjena se događa na 390 nm. Kod nestarenog blijedo-žutog pigmentiranog papira refleksija na 390 nm iznosi 60 %, a kod izlaganja već i o 10 sati pada na 55%.

## 9.2 Uzorci osvijetljeni sa Solar boxom

Iz grafa 12. je vidljivo da plavi papir reflektira svjetlost između 390 i 560 nm, dok između 560 i 700 nm dolazi do dominantne selektivne apsorpcije. Maksimalna refleksija je na 490 nm i iznosi oko 77 %.



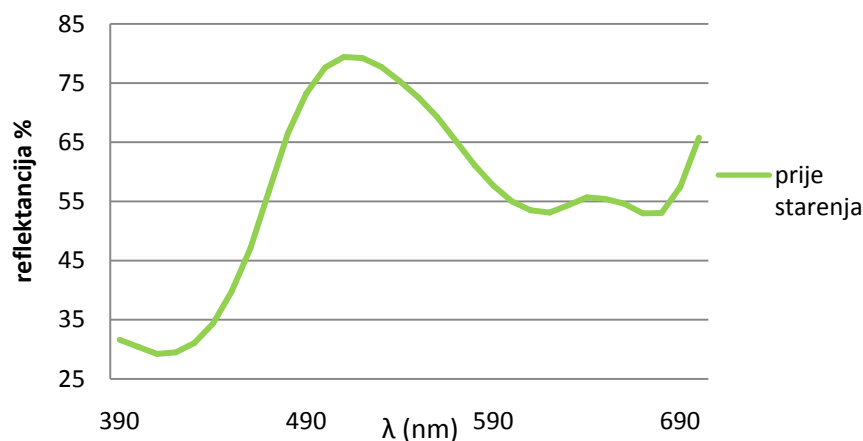
Graf 12 – spektralna osjetljivost plavog pigmentiranog papira prije izlaganja elektromagnetskom zračenju. Starenjem plavo pigmentiranog papira već kod izlaganja zračenju ksenonskom lampom od 10 sati nastale su nezamjetne promjene u cijelom području vidljivog dijela spektra i to samo u dominantne selektivne apsorpcije u području crvenog dijela spektra za 1%.



Graf 13 – spektralna osjetljivost plavo pigmentiranog papira poslije višesatnog izlaganja elektromagnetskom zračenju pod ksenon lampom

Pregledom spektralnih reflektancija dobivenih nakon izlaganja uzorka do 80 sati uočavamo promjene za razliku od neizlaganog uzorka. Uočavamo da bitnih promjena nema u području dominantne refleksije tj. u području ljubičasto plavog dijela spektra. Prva promjena se događa u crvenom dijelu spektra, području dominantne selektivne apsorpcije, gdje dolazi do porasta refleksije. Nakon 80-satnog izlaganja reflektancija u području crvenog dijela spektra je porasla za 7% tj. iznosi 53%.

Minimum refleksije za nestarene uzroke iznosi oko 42% kod 610 nm, a za uzorak izložen zračenju 10 sati imamo povećanje 1%, a najveća razlika se očituje kod uzorka izloženog 80 sati gdje se pojavljuje razlika od 8%.



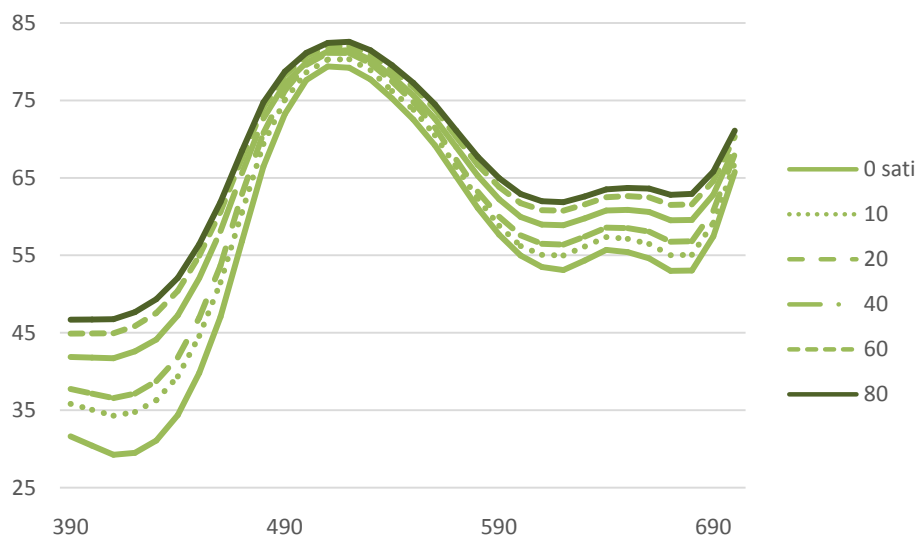
Graf 14 spektralna osjetljivost zeleno pigmentiranog papira prije izlaganja elektromagnetskom zračenju

Iz grafa 14. je vidljivo da zeleno pigmentirani papir dominantno reflektira svjetlost između 450 i 610 nm, dok na područjima od 390 do 450 nm i od 610 do 700 nm dolazi do selektivne apsorpcije. Maksimalna refleksija je na 510 nm i iznosi oko 86 %.

Starenjem zeleno pigmentiranog papira već prilikom izlaganja zračenju Xnenon lampe od 10 sati (graf 15.) nastale su vidljive promjene u cijelom području vidljivog dijela spektra. Refleksija se nije povećala, ali se povećala u području

selektivne apsorpcije u području od 390 nm do 450 nm i u području od 610 nm do 700 nm, došlo je do povećanja refleksije od 5%.

Pregledom spektralnih reflektancija dobivenih nakon izlaganja uzorka i do 80 sati uočavamo bitne promjene za razliku od neizlaganog uzorka. Uočavamo da bitnih promjena nema u području dominantne refleksije tj. u području zelenog dijela spektra. Prva promjena se događa u ljubičasto-plavom dijelu spektra, području dominantne selektivne apsorpcije, gdje dolazi do porasta refleksije. Nakon 10-satnog izlaganja uzorka UV zračenju, reflektancija je porasla za 5%, a kod 80-satnog izlaganja reflektancija u području ljubičasto – plavog dijela spektra je porasla za 18% tj. iznosi 47%.

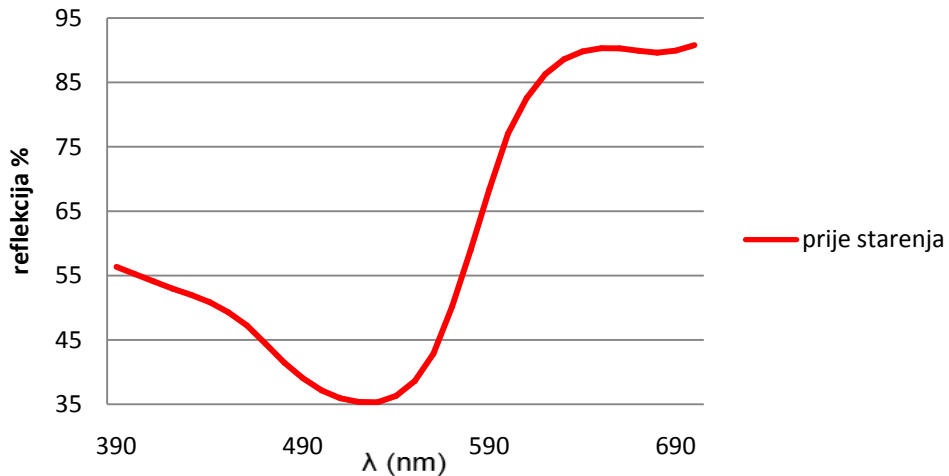


Graf 15 spektralna osjetljivost zeleno pigmentiranog papira poslije izlaganja elektromagnetskom zračenju pod ksenon lampom

U području selektivne apsorpcije u crvenom djelu spektra također dolazi do tendencije porasta refleksije i razlika nestarenih uzorka i onih uzorka izloženih 80-satnom zračenju iznosi 8% kod 610 nm.

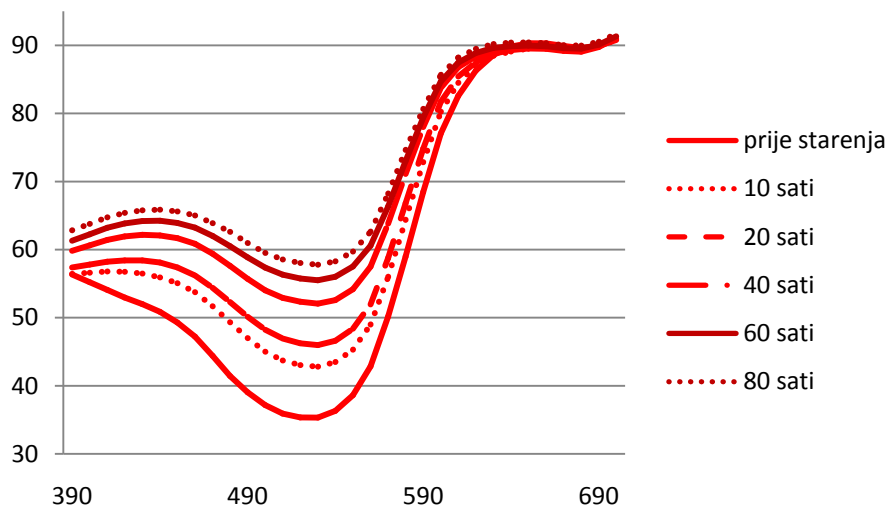
Najveće razlike zeleno pigmentiranog papira je u području minimuma refleksije u ljubičasto - plavom dijelu spektra. Minimum refleksije u području selektivne apsorpcije za nestarene uzroke iznosi oko 29% kod 410 nm, a za uzorak zračen 10 sati imamo povećanje 5%, a najveća razlika se očituje kod uzorka izloženog 80 sati gdje se pojavljuje razlika od 17%.

Iz grafa 16. je vidljivo da crveno pigmentirani papir dominantno reflektira svjetlost između od 590 do 700 nm, dok na područjima od 490 do 540 nm dolazi do selektivne apsorpcije. Maksimalna refleksija je na 700 nm i iznosi oko 90 %.



Graf 16 - spektralna osjetljivost crveno pigmentiranog papira prije izlaganja elektromagnetskom zračenju

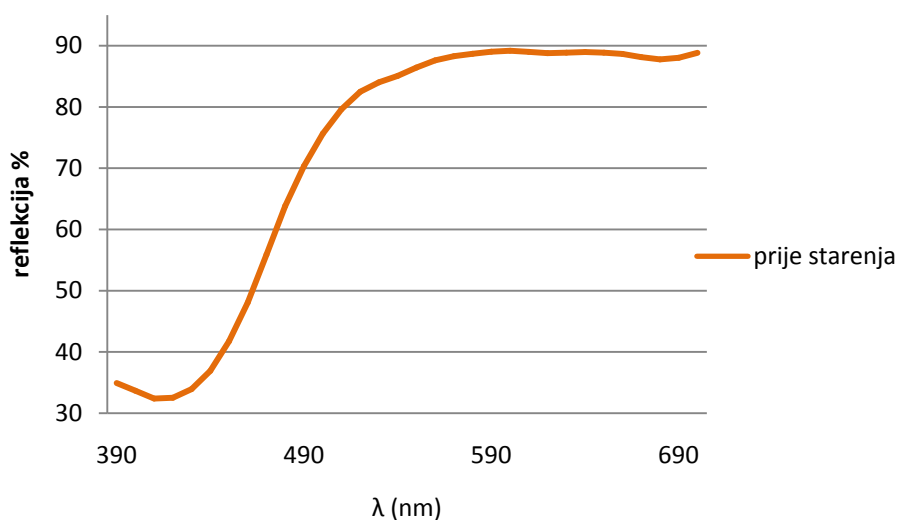
Starenjem crveno pigmentiranog papira već prilikom izlaganja zračenju Xenon lampi od 10 sati nastale su vidljive promjene u zelenom području vidljivog dijela spektra. Refleksija se povećala za otprilike 15% u području od 470 nm do 560 nm.



Graf 17 - spektralna osjetljivost zeleno pigmentiranog papira poslije višesatnog izlaganja elektromagnetskom zračenju

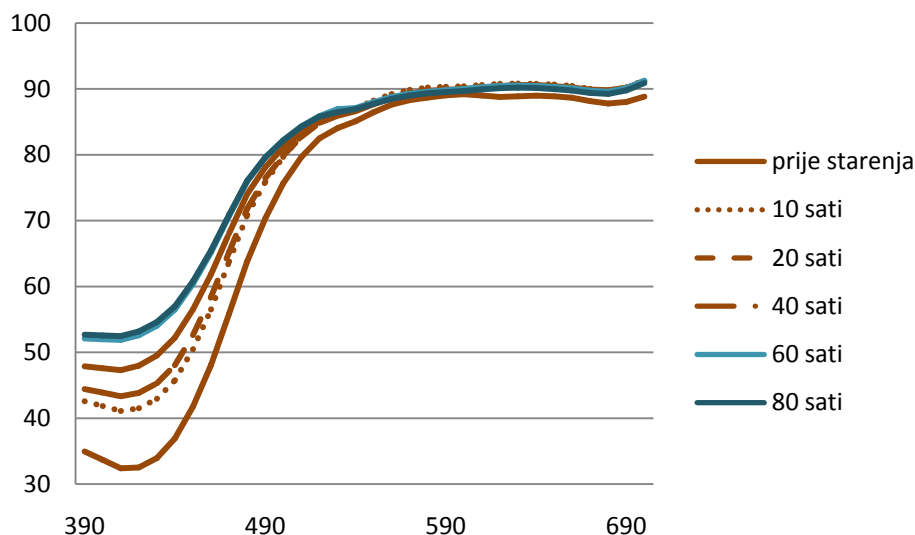
Pregledom spektralnih reflektancija dobivenih nakon izlaganja uzorka do 80 sati uočavamo bitne promjene za razliku od neizlaganog uzorka. Uočavamo da bitnih promjena nema u području dominantne refleksije. Prva promjena se događa u zelenom dijelu spektra, području selektivne apsorpcije, gdje dolazi do porasta refleksije. Nakon 10-satnog izlaganja uzorka UV zračenju, reflektancija je porasla za 8%, a kod 80-satnog izlaganja reflektancija u području zelenog spektra je porasla za 23% tj. iznosi 58%. U području selektivne apsorpcije u ljubičasto-plavom dijelu spektra dolazi do konstantnog povećanja refleksije. Najveće razlike koje mogu utjecati na degradaciju crveno pigmentiranog papira je kod minimuma refleksije u području selektivne apsorpcije.

Iz grafa 18. je vidljivo da žuto pigmentirani papir dominantno reflektira svjetlost između 500 i 700 nm, dok na područjima 400 do 450 nm dolazi do selektivne apsorpcije. Maksimalna refleksija je na 600 nm i iznosi oko 89%.



Graf 118 - spektralna osjetljivost žuto pigmentiranog papira prije izlaganja elektromagnetskom zračenju

Starenjem žuto pigmentiranog papira već kod izlaganja Xenon lampi od 10 sati nastale su vidljive promjene u ljubičasto-plavom području vidljivog dijela spektra. Refleksija se povećala za otprilike 10% u području od 400 nm do 450 nm.



Graf 119 - spektralna osjetljivost žutozeleno pigmentiranog papira poslije višesatnog izlaganja elektromagnetskom zračenju

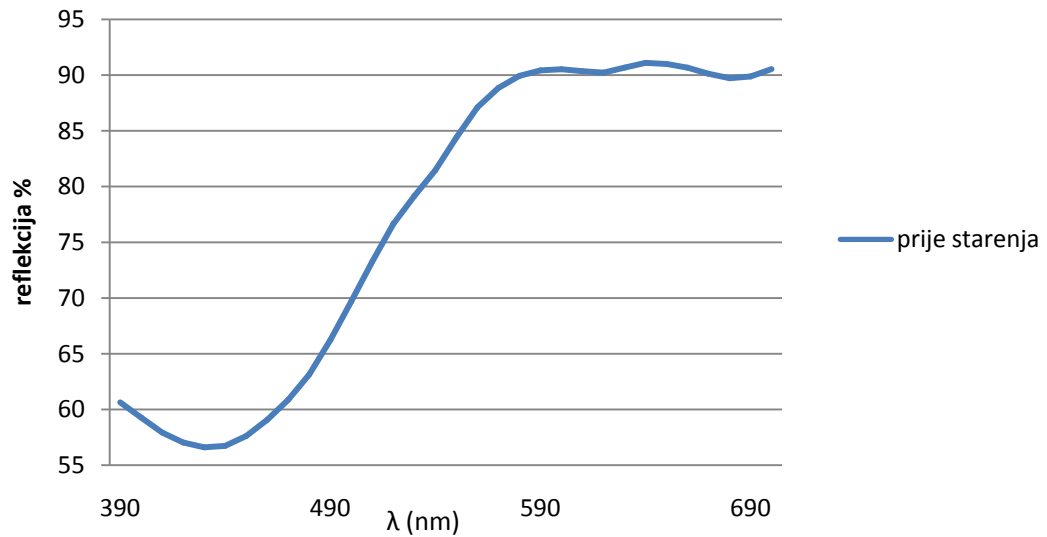
Pregledom spektralnih reflektancija dobivenih nakon izlaganja uzorka do 80 sati uočavamo bitne promjene za razliku od neizlaganog uzorka. Uočavamo da bitnih promjena nema u području refleksije tj. u području zelenog i crvenog dijela spektra. Do promjena dolazi u ljubičasto-plavom spektru, području dominantne selektivne apsorpcije, gdje dolazi do porasta refleksije. Nakon 10-satnog izlaganja uzorka UV zračenju, reflektancija je porasla za oko 10%, a kod 80-satnog izlaganja reflektancija u području ljubičasto – plavog spektra je porasla za 20% tj. Iznosi 52%. Promjene u refleksiji u području ljubičasto-plavom dijela spektra prestaju nakon 60 satnog izlaganja zračenju, tj. nema znatnijih promjena refleksije između 60 satnog i 80 satnog izlaganja.

U području dominante refleksije u crvenom dijelu spektra nema značajnijih promjena i refleksija je konstantna oko 88%. Najveće razlike žuto pigmentiranog papira su kod minimuma refleksije u ljubičasto-plavom spektru.

Iz grafa 20. je vidljivo da blijedo žuto pigmentirani papir dominantno reflektira svjetlost između 500 i 700 nm, dok na područjima od 400 do 450 nm dolazi do dominantne selektivne apsorpcije. Maksimalna refleksija je na 600 nm i iznosi 90%. Reflekcija je slična kao i kod žuto pigmentiranog papira, razlika je u području selektivne apsorpcije gdje žuto pigmentirani papir ima minimum

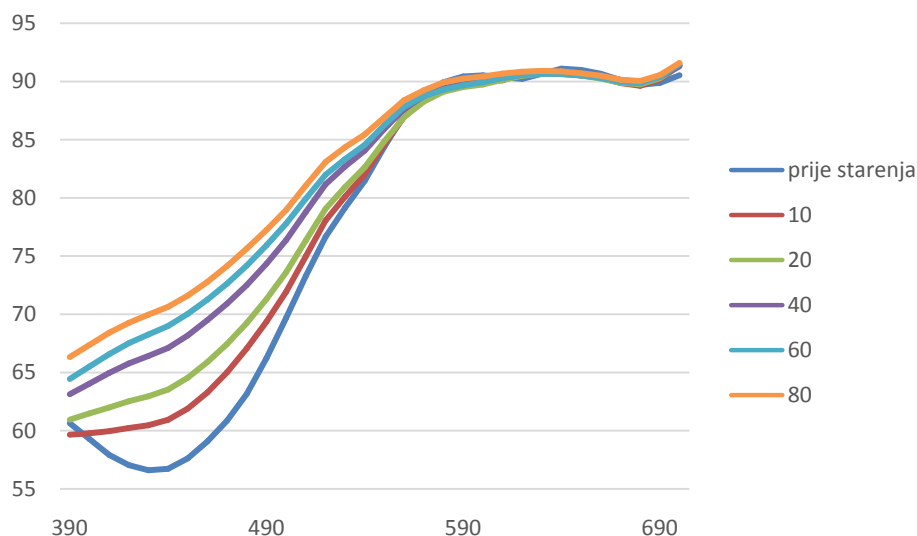


refleksije od 32%, a kod blijedo žutog pigmentiranog papira ima 23% veću refleksiju.



Graf 20 - spektralna osjetljivost blijedo žuto pigmentiranog papira prije izlaganja elektromagnetskom zračenju

Starenjem blijedo žuto pigmentiranog papira već kod izlaganja Xenon lampi od 10 sati nastale su vidljive promjene u ljubičasto-plavom području vidljivog dijela spektra. Refleksija se povećala za otprilike 4% u području od 400 nm do 450 nm.



Graf 21 - spektralna osjetljivost blijedo žuto pigmentiranog papira poslije više satnog izlaganja elektromagnetskom zračenju

Pregledom spektralnih reflektancija dobivenih nakon izlaganja uzorka do 80 sati uočavamo bitne promjene za razliku od neizlaganog uzorka. Uočavamo da bitnih promjena nema kod dominantne refleksije tj. u području zelenog i crvenog dijela spektra. Do promjena dolazi u ljubičasto-plavom dijelu spektra, području dominantne selektivne apsorpcije, gdje dolazi do porasta refleksije. Nakon 10-satnog izlaganja uzorka UV zračenju, reflektancija je porasla za oko 4%.

U području dominantne refleksije u crvenom dijelu spektra nema značajnijih promjena i refleksija je konstantna oko 90%. Najveće razlike blijedo žuto pigmentiranog papira očituju se u kod minimuma refleksije u području dominantne selektivne apsorpcije. Najzanimljivija promjena se događa na 390 nm. Za nestarene uzorke blijedo-žutog pigmentiranog papira refleksija na 390 nm iznosi 60 %, a kod izlaganja već i od 10 sati pada na 55%.

## 10 ZAKLJUČAK

Cilj ovog rada bila je procjena potencijalne dugoročnosti te upotrebljivosti materijala s obzirom na optičku stabilnost materijala. Pregledom spektralnih reflektancija svih ubrazno ostarenih uzoraka možemo zaključiti koji od mjerenih pigmentiranih papira je pokazao dugoročnu upotrebljivost s obzirom na ubrazno starenje.

Kod svih ispitivanih uzoraka najveće su promjene vrijednosti spektralne reflektancije u području ljubičastoplavog dijela vidljivog spektra, a najmanje u žutom.

Najveće promjene u spektralnoj reflektanciji za sve ispitivane uzorake očituju se tijekom izlaganja UV lampi, dok za uzorke osvijetljene sa ksenonskom lampom očituju manje razlike.

Najstabilniji uzorak osvijetljen sa UV lampom je blijedo žuto pigmentirani papir koji tijekom osvijetljavanja od 10 sati ima promjenu refleksije od 3%, dok se najnestabilniji pokazao po mjerenjima crveno pigmentirani papir koji nakon 10 satnog zračenja ima promjenu spektralne reflektancije u području minimuma apsorpcije od 13%. Također, mjerenje crveno pigmentiranog papira nakon 80 satnog zračenja pokazalo je promjenu u području minimuma apsorpcije razliku od 33% za razliku od ne starenog uzorka. Blijedo žuto pigmentirani papir nakon 80 satnog izlaganja zračenju ima najveću promjenu samo od 9%, što je od svih uzoraka najmanje, što potvrđuje njegovu stabilnost prilikom izlaganja UV lampi.

Za uzorake ozračene sa Xenon lampom u Solarbox uređaju najstabilnijim se pokazao plavo pigmentirani papir koji ima maksimalnu promjenu u refleksiji od 7%, što je od svih ispitanih uzoraka najmanje. Kao najnestabilniji opet se pokazao crveno pigmentirani papir koji ima maksimalnu promjenu refleksije od 23%. Blijedo žuto pigmentirani papir je mjerenjem također pokazao stabilnost i nakon 80 satnog izlaganja ima promjenu refleksije od 10%.

Prema pregledu grafova spektralne reflektancije svih uzoraka zaključujemo da je najstabilniji uzorak blijedo žuti pigmentirani papir koji ima najmanje razlike u

vrijednostima refleksije. Najnestabilniji, od svih ispitanih uzoraka ima crveno pigmentirani papir. Uz blijedo žuto pigmentirani papir možemo i spomenuti plavo pigmentirani papir koji pokazuje stabilnost nakon 80 satnog zračenja. Žuto i zeleno pigmentirani papir dijele iste razlike mjerenih vrijednosti tako da ih svrsatavamo u sredinu rezultata ovih mjerenja.

Zanimljivo je i zaključiti da kod ispitanih uzoraka nema promjena u području dominantne refleksije, već se promjene događaju samo u području selektivne apsorpcije.

## 11 LITERATURA

1. USDA Forest Service Forest Products Laboratory (2000.), *Quantification and Prediction for Aging of Printing & Writing Papers Exposed to Light*, Madison, Wisconsin
2. Feller, Robert L. (1994.), *Accelerated aging : photochemical and thermal aspects*, ISBN 0-89236-125-5, Library of Congress Cataloging-in-Publication Data, The J. Paul Getty Trust.
3. Majnarić, Igor, (2004.), *Kvaliteta digitalnih otisaka uvjetovana starenjem tiskovne podloge*, magistarski rad, Grafički fakultet, Zagreb
4. Prof. dr. Kulišić, Petar, prof. dr. Lopac, Vjera, (1991.), *Elektromagnetske pojave i struktura tvari*, Školska knjiga, Zagreb
5. [http://phy.grf.unizg.hr/media/download\\_gallery/10\\_11\\_interakcija%20svjetlosti%20i%20materije.pdf](http://phy.grf.unizg.hr/media/download_gallery/10_11_interakcija%20svjetlosti%20i%20materije.pdf), Nastavni materijali sa stranica kolegija Fizike u grafičkoj tehnologiji, 26. lipanj 2014
6. Drndelić, Ivana, (2011.), *Utjecaj termički izazvanih procesa na degradaciju papira i na promjenu njihovih optičkih svojstava*, diplomski rad, Grafički fakultet, Zagreb