

**SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
GRAFIČKI FAKULTET ZAGREB**

ZAVRŠNI RAD

Ana Kraljević

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
GRAFIČKI FAKULTET ZAGREB

Smjer: Tehničko - tehnološki

ZAVRŠNI RAD

**TEHNOLOGIJA IZRADE I
SVOJSTVA RECIKLIRANIH
PAPIRA**

Mentor:

Doc.dr.sc. Maja Strižić Jakovljević

Student:

Ana Kraljević

Zagreb, 2022.

SAŽETAK

Ograničeni resursi primarnih sirovina za proizvodnju papira, kao i najnovija geopolitička situacija u Europi znatno su utjecale na porast cijena. Recikliranje papira i korištenje ostalih sekundarnih sirovina u proizvodnji papira trendovi su koji će se zadržati. Uvjet tome su svakako zadržavanje visokih standarda i zahtjeva tiskovnih papira. To se između ostaloga odnosi na opća, optička i mehanička svojstva papira. Definirane su karakteristike papira, njihova uloga i svojstva, vrste papira koje su obrađene u radu i njihova svojstva, gospodarenje istim te sami proces izrade recikliranog papira. U eksperimentalnom dijelu rada provedena su ispitivanja svojstava recikliranih vrsta papira u odnosu na standardne nerekiclirane te definirane razlike između tih vrsta papira dobivene na osnovu obavljenih mjerenja.

SADRŽAJ

1. UVOD	1
2. TEORIJSKI DIO	2
2.1. Tehnologija proizvodnje papira	2
2.1.1. Sastojci za izradu papira.....	4
2.2. Industrijsko recikliranje papira.....	6
2.3. Svojstva tiskovnih recikliranih papira	11
3. EKSPERIMENTALNI DIO	13
3.1. Papiri korišteni u istraživanju.....	13
3.2. Korišteni uređaji	14
3.3. Metode ispitivanja	17
3.3.1. Ispitivanje općih svojstava papira.....	17
3.3.2. Ispitivanje optičkih svojstava papira.....	18
3.4. Rezultati ispitivanja	20
3.4.1. Opća svojstva.....	20
3.4.2. Optička svojstva.....	22
4. ZAKLJUČAK	24
5. LITERATURA	25

1. UVOD

Neodgovornim ljudskim ponašanjem okolina u kojoj živimo postaje sve ugroženija. Jedan od načina na koji možemo pomoći održivosti u području grafičke struke je recikliranje papira. Ovim postupcima moguće je postići smanjenje količine otpada na odlagalištima, štednju energije, te redukciju sječe šuma. Recikliranje papira je od iznimne važnosti s obzirom na to da iskorišteni papirni materijal čini visoki udio potencijalnog otpada. Prednost starog papira kao sirovine je mogućnost recikliranja istog materijala čak nekoliko puta, naravno u određenim uvjetima. Svojstva recikliranih papira se razlikuju od nerekicliranih papira iz primarnih vlakana, a cilj ovoga rada je prikazati te razlike, te objasniti u kojoj mjeri razlika u određenim svojstvima papira ne narušava kvalitetu i mogućnost primjene u grafičkoj struci.

U ovom radu utvrdit će se eventualna odstupanja u svojstvima recikliranih tiskovnih papira u odnosu na papir proizveden iz primarnih sirovina, kroz kratki osvrt na samu povijest i tijek nastanka papira do eksperimentalnog dijela gdje se ispituju određena svojstva papira.

2. TEORIJSKI DIO

2.1. Tehnologija proizvodnje papira

Riječ papir izvedena je iz imena trskaste biljke papirus koja u izobilju raste uz rijeku Nil u Egiptu. U davnim vremenima, vlaknasti slojevi unutar stabljike ove biljke uklanjani su, stavljeni jedan do drugoga i križani pod pravim kutom s drugim nizom slojeva koji su bili slično raspoređeni. Tako oblikovana ploča je navlažena i prešana. Nakon sušenja, ljepljivi sok biljke, djelujući kao ljepilo, spajao je slojeve. Potpuno razvlaknjivanje, neizostavan element u modernoj proizvodnji papira, nije se dogodio u pripremi listova papirusa. Papirus je bio najrašireniji materijal za pisanje u antičko doba, a mnogi zapisi na papirusu još su sačuvani [2].

Proizvodnja papira može se pratiti do otprilike 105. godine nove ere, kada je Ts'ai Lun, dužnosnik na kineskom carskom dvoru, izradio list papira od duda i drugih vlakana koristeći ribarske mreže, stare krpe i otpad od konoplje. Kako se njihova tajna o proizvodnji papira počela otkrivati svijetu, preko Azije i Afrike došla je čak do Europe. Zahvaljujući brznoj i jeftinoj proizvodnji prestigao je dotadašnje materijale korištene za pisanje poput papirusa, pergamenta [1]...

Do 14. stoljeća u Europi je postojao niz tvornica papira, posebice u Španjolskoj, Italiji, Francuskoj i Njemačkoj. Izumom tiska 1450-ih znatno je povećana potražnja za papirom [2]. Kroz 18. stoljeće proces proizvodnje papira ostao je uglavnom nepromijenjen, koristeći se lanenim i pamučnim krpama kao osnovnim sirovinama. Sam taj proces koji je trebao da se krpa pretvori u papir je bio iscrpljujuć i dugotrajan [1].

Godine 1800. objavljena je knjiga koja je pokrenula razvoj praktičnih metoda za proizvodnju papira od drvne pulpe i druge biljne pulpe. Postupno je razvijeno nekoliko glavnih procesa proizvodnje celuloze koji su industriju papira oslobodili ovisnosti o pamučnim i lanenim krpama i omogućili modernu proizvodnju velikih razmjera. Ovaj razvoj slijedio je dva različita puta. U jednom su vlakna i fragmenti vlakana mehanički odvojeni od strukture drva, a u drugom je drvo bilo izloženo djelovanju kemijskih otopina koje su otapale i uklanjale lignin i druge komponente drva, ostavljajući za sobom celulozna vlakna. Mljevena pulpa proizvedena mehaničkim metodama sadrži sve komponente drva i zbog toga nije odgovarajuća za papire kod kojih je zahtijevana visoka

bjelina i postojanost. Kemijska drvena pulpa kao što je soda i sulfitna pulpa koristi se kada je potrebna visoka svjetlina, čvrstoća i postojanost [2].

List papira koji se sastoji samo od celuloznih vlakana upija vodu, i zbog toga tinte na bazi vode i druge vodene tekućine prodiru i šire se u njemu. Impregniranje papira raznim tvarima koje usporavaju takvo vlaženje i prodiranje naziva se dimenzioniranje.

Prije 1800. listovi papira su se impregnirali koristeći životinjsko ljepilo ili biljne gume, što je bio skup i zamoran proces. Godine 1800. Moritz Friedrich Illig u Njemačkoj otkrio je da se papir može impregnirati u bačvama s kolofonijem i stipsom. Iako je Illig objavio svoje otkriće 1807., metoda nije ušla u širu upotrebu oko 25 godina [2].

Otkrićem elementa klora 1774. došlo je do njegove uporabe prilikom izbjeljivanja papira. U to vrijeme, nedostatak kemijskog znanja, doveo je do proizvodnje lošijeg papira takvom metodom, obezvrijeđivši ga narednih godina [2]. Izbjeljivanje klorom je danas sve manje zastupljeno zbog ekoloških razloga, te se papir danas uglavnom oksidativno bijeli.

Prije izuma papirnog stroja, papir se izrađivao jedan po jedan list uranjanjem okvira ili kalupa s rešetkastim dnom u posudu s materijalom. Dizanjem kalupa voda bi istekla, ostavljajući plahu na mrežici. List je zatim prešan i osušen. Veličina pojedinog lista bila je ograničena na veličinu okvira i kalupa koje je čovjek mogao podići iz bačve sa zalihama [2].

Godine 1798. Nicolas-Louis Robert u Francuskoj konstruirao je pokretnu sito traku za koju je dobio patent od strane francuske vlade [1].

Papirni stroj nije postao praktična stvarnost, sve dok dva inženjera u Engleskoj, upoznata s Robertovim idejama, nisu izradila poboljšanu verziju za svoje poslodavce, Henryja i Sealyja Fourdriniera, 1807. godine. Dvije godine kasnije, John Dickinson, engleski proizvođač papira, osmislio je cilindrični papirni stroj. Do 1875-ih papir s premazom za tisak polutonova uz novi postupak fotograviranja izrađivao se pomoću stroja, a 1884. Carl F. Dahl izumio je sulfatnu celulozu u Danzigu u Njemačkoj. Pojava papirnog stroja dovela je do smanjenja potrebe za ljudskim radom. Unatoč modernizaciji osnovni koraci za proizvodnju papira su ostali isti sve do danas. Koraci u procesu su sljedeći: suspenzija celuloznih vlakana priprema se mućenjem u vodi tako da su vlakna temeljito odvojena i zasićena vodom; papirnati materijal se filtrira na tkanom situ kako bi se formirao matirani list vlakana; mokra ploča se preša i zbija kako bi se istisnuo veliki udio vode; preostala

voda se uklanja isparavanjem; i ovisno o zahtjevima upotrebe, list suhog papira se dalje komprimira, presvlači ili impregnira [2].

2.1.1. Sastojci za izradu papira

Vlakna (ili vlakanca) i dodaci pripadaju osnovnim sastojcima potrebnim pri izradi za papir (karton ili ljepenku).

Vlakna po svom sastavu mogu biti biljnog ili životinjskog porijekla, te mineralna i sintetička, dok su najčešće upravo biljnog porijekla.

Biljna vlakna najviše potječu iz višegodišnjih biljaka, tj. drva ili slame koja potječe iz jednogodišnjih biljaka. Prema tvrdoći drva se dijele na tvrda i mekana. Mekanim drvima pripadaju crnogorična stabla odnosno četinari, a tvrdim drvima pripadaju bjelogorična stabla odnosno lišćari.

Vunena vlakna pripadaju vlaknima životinjskog porijekla. Mineralna vlakna su staklena vlakna, a azbest se više ne koristi nakon uočavanja njegovih štetnih posljedica po zdravlje čovjeka.

Sintetska vlakna nastaju od raznih sintetskih polimera koja imaju oblik vlakana, te se koriste za izradu papira kao i ostala vlakna, samo potrebno razlikovati njih i sintetske folije koje umjesto vlaknaste imaju homogenu strukturu. Za proizvodnju papira se prvenstveno koriste vlakna životinjskog i mineralnog porijekla, a za izradu specijalnih papira kombiniraju se biljnim vlaknima, dok se sintetska vlakna mogu upotrebljavati za cijelu samostalnu izradu papira [1].

Uz osnovne sastojke, pri izradi papira rabe se i dodaci od kojih su najvažniji punila, keljiva i bojila. To nisu jedini dodaci koji se koriste, ali se ostali koriste u malim količinama ili samo za posebne potrebe. Svaki dodatak zahvaljujući svojoj funkciji djeluje na svojstva dobivenog papira.

Upotreba dodataka nije nužna za izradu svakog papira, te njihovo doziranje je promjenjivo ovisno o potrebi.

Celuloza je najbitniji sastojak vlakana biljnog porijekla pri izradi papira, te je to razlog zbog kojeg se često upotrebljava pojam „celulozna vlakna“ kada je riječ o sastavu papira. Stjenke biljnih vlakana sastavljene se od više slojeva, od koji su tri najčešća: primarna, sekundarna i tercijarna stjenka. Poveznice između biljnih vlakna su lamele koje isto imaju

višeslojnu građu. Vanjska stjenka predstavlja primarnu stjenku vlakna i ona je u dodiru s lamelama, dok je unutarnja stjenka tercijska i u dodiru je s lumenom. Mikrofibriili čine srednju stjenku drvnog vlakna. U mikrofibriile su smješteni miceli, kristalične nitaste tvorevine koje u svom sastavu imaju više celuloznih molekula. Celuloza je prirodni polimer, po vrsti polisaharid, a meri $(C_6H_{10}O_5)_n$ se povezuju u lančane tvorevine. Duljina molekule celuloze određena je brojem mera. Broj mera (n) je stupanj polimerizacije i njegov raspon može biti između nekoliko stotina i više tisuća. Lanci celuloze koji se grupiraju u micelle grade mikrofibriile, a mikrofibriili tvore sekundarnu stjenku biljnih vlakana. Duljina vlakna može biti do nekoliko milimetara, dok svi ostali slojevi u poprečnom presjeku skupa čine manje od 0,1 mm debljine vlakna. Vlakna mekih drva su za razliku od vlakana tvrdog drva dosta dulja i deblja. Biljna vlakna u svom sastavu osim celuloze ima i hemiceluloze, lignin, te u malim količinama smole, eterična ulja, kaučuk, nekad mineralne tvari i neke druge.

Hemiceluloze su isto ugljikohidrati koji su po svom sastavu različiti, a nalaze se pretežito u primarnoj i tercijskoj stjenki građe drvnog vlakna. S obzirom da njihova struktura nije kao kod celuloze treba ih izdvojiti do neke mjere prilikom prerade celuloze. Hemiceluloze su spojevi koji se lako tope što je prednost prilikom njihovog uklanjanja [1].

Lignin se nalazi u lamelama, najčešće u srednjoj lameli, i ima oblik amorfnih molekula, a njegova je uloga da povezuje vlakna i u velikoj mjeri doprinosi čvrstoći drva. Prilikom postupka prerade celuloze bitno je u što više moguće izdvojiti lignin s obzirom da on lako oksidira, postaje tamniji i tako djeluje na promjene u tonu boje gotovog papira. Koje god metode da se koristile, lignin se nikada ne može u potpunosti izdvojiti pa svaki papir ima sklonost promjenama tona boje u određenom razdoblju i određenoj mjeri. Sirovine biljnog porijekla koje se u najvećoj mjeri koriste prilikom izrade papira i čine oko 90% ukupne sirovine za izradu papira su: celuloza (i podvrste celuloze), drvenjača, stari papir, te polutvorina [1].

2.2. Industrijsko recikliranje papira

Recikliranje papira odnosi se na procese ponovne prerade starog papira za ponovnu upotrebu. Otpadni papiri se dobivaju iz papirnog otpada tvornice papira, odbačenog papirnog materijala i starog papira odbačenog nakon potrošačke upotrebe. Primjeri općenito poznatih recikliranih papira su stare novine i časopisi.

Ostali oblici poput valovitog papira, papira za omatanje i pakiranja među ostalim vrstama papira obično se prije procesa provjeravaju na prikladnost za recikliranje. Papiri se prikupljaju s lokacija za otpad i šalju u pogone za recikliranje papira. U nastavku su opisani koraci u recikliranju papira [3].

Korak 1: Preuzimanje i prijevoz

Ovo je prvi proces u procesu recikliranja papira. Ovaj značajan korak uključuje prikupljanje papira koji se može reciklirati. To podrazumijeva skupljanje papirnog otpada s raznih prodajnih mjesta poput vašeg doma, ureda i poslovne blizine. Reciklatori i trgovci papirom prikupljaju papirne materijale sa sabirnih mjesta kao što su kante za smeće, skladišta papira, odlagališta papirnog otpada i komercijalna mjesta koja stvaraju otpadni papir. Ovaj papirni otpad skupljaju reciklaži i stavljaju ga u veliku kantu za recikliranje. Papir se skuplja iz spremnika i odlaže u veliki spremnik za recikliranje zajedno s papirom iz ostalih spremnika za recikliranje. Nakon prikupljanja, zatim se mjere, ocjenjuju po kvaliteti i odvoze u tvornicu papira za recikliranje. Zatim se prevozi u pogon za reciklažu gdje se razvrstava stari papir i odvaja na vrste i stupnjeve [3].



Slika 1: Prikupljanje i transport otpada

(<https://www.dreamstime.com/stock-illustration-garbage-collector-work-series-illustrations-smiling-recycling-waste-collecting-worker-street-cleaning-trash-image89298914>), pristup: 13.8.2022.

Korak 2: Razvrstavanje i sortiranje

U pogonu za reciklažu papiri se sortiraju i odvajaju. Ovaj postupak pomaže identificirati papire koji bi se reciklirali i one koje je potrebno odbaciti. U ovoj fazi se također uklanjaju svi drugi vanjski materijali iz zbirke papira. Nakon prihvaćanja u pogonu za reciklažu, papiri se dalje razvrstavaju na temelju količine i vrijednosti papira procjenom materijala koji su korišteni za izradu papira. U većini slučajeva papiri se klasificiraju prema površinskoj obradi i strukturi. Na primjer, vrlo tanki lagani papirnatih materijali poput novina stavljaju se odvojeno od debelih papirnatih materijala poput onih koji se koriste kao papirne mape. Razvrstavanje je važno budući da tvornice papira proizvode različite vrste papirnih materijala na temelju materijala koji se obnavljaju [3].



Slika 2: Sortiranje papira

(<https://www.no-waste-technology.com/en/sorting/paper-sorting>), pristup: 13.8.2022.

Korak 3: Usitnjavanje i razvlaknjivanje

Nakon što je sortiranje završeno, sljedeći korak uključuje usitnjavanje nakon čega slijedi pulpiranje. Usitnjavanje se vrši kako bi se papirni materijal razbio na male komadiće. Nakon što je materijal fino usitnjen na komadiće, miješa se s vodom i kemikalijama za razgradnju materijala od papirnih vlakana. Razvlaknjivanje je proces koji pretvara papirnate materijale u kašu. Ovo je točka gdje se podvrgava procesu zagrijavanja koji ga pretvara u pulpu, što se postiže dodavanjem vode i kemikalija kao što su kaustična soda i vodikov peroksid [3].



Slika 3: Uređaj za usitnjavanje papira

(https://www.ssiworld.com/en/applications/industrial_paper_mill_waste), pristup: 13.8.2022.

Korak 4: Pročišćavanje

U ovom trenutku prosijava se kašasta masa. Pulpa se gura u sita s prostorom i rupama različitih oblika i veličina. Kraj ovog procesa je da se ukloni onečišćenje iz pulpe, te filtriraju neželjene objekti [3].



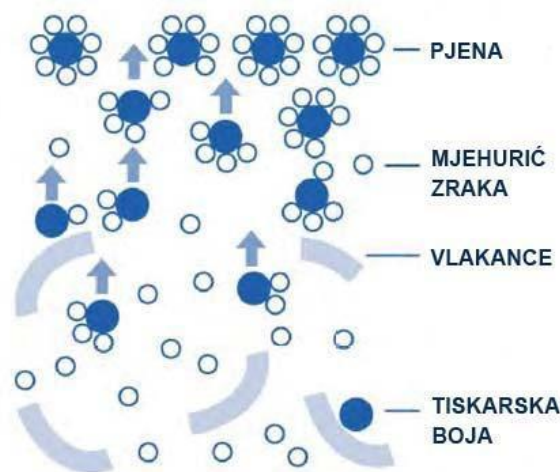
Slika 4: Uređaj za pročišćavanje

(<http://www.pulpequipment.com/culture-paper-making-line-faq/pulp-screening-pressure-screen-equipment/>), pristup: 13.8.2022.

Korak 5: Deinking flotacija

Deinking flotacija predstavlja proces selektivne separacije koji uz pomoć mjehurića zraka odstranjuje čestice boje iz razvlaknjene suspenzije. U flotacijskoj ćeliji mjehurići zraka nose prema površini čestice boje koje se za njih prihvaćaju. Povećanje hidrofobnosti čestica boje i povećanje efikasnosti flotacije postiže se dodavanjem flotacijskih kemikalija (natrijev hidroksid, vodikov peroksid, natrijev silikat, kelatni agensi i kolektori) u pulpu. Nastala pjena na površini se mora ukloniti. Za efikasnost flotacije bitna su tri uvjeta koja se trebaju ispuniti za svaku česticu boje, a to su: sudar čestice i mjehurića, prihvaćanje čestice na mjehurić, i na koncu uklanjanje mjehurića sa česticom boje iz pulpe. Ostali parametri koji utječu na efikasnost flotacije su svojstva čestica i mjehurića, stupanj miješanja, te procesni uvjeti.

Efikasnost flotacije određena je slikovnom analizom, gdje se može veličina prisutnih čestica boje i njihov broj, te veličina površine koju one pokrivaju u laboratorijskom listu poslije flotacije [4].



Slika 5: Deinking flotacija

(<https://docplayer.net/92487003-Evaluacija-prikladnosti-razli-utih-klasa-recikliranih-papira-za-izradu-zdravstveno-ispravne-prehrambene-ambalaze.html>), pristup: 13.8.2022.

Korak 6: Izbjeljivanje

Ova faza se koristi kada se izrađuje bijeli papir. U ovoj fazi koristi se vodikov peroksid za povećanje svjetline, čistoće i bjeline. Alternativno, može se koristiti kisik ili klor dioksid.

Međutim, ako se reciklira u karton, celuloza se ne mora podvrgavati procesu izbjeljivanja. Može se proizvoditi i od papira s bojama, a potom se vlaknima mogu dodati materijali za skidanje boje kako bi se uklonila boja s papira.

Cijeli korak nazvan je izbjeljivanje jer obavlja čišćenje celuloze iznova i iznova kako bi se osiguralo da ona bude spremna za završnu fazu obrade [3].

Korak 7: Rolanje

Ovo je završna faza cjelokupnog procesa recikliranja papira. Priprema se čista celuloza za početak obrade u novi papir. Međutim, potrebno je izrazita opreznost zbog toga što se mora pomiješati papirna masa s kemikalijama i vrućom vodom. Vruća voda koja se dodaje mora biti u većoj količini od pulpe i kemijskih tvari. Ova se smjesa zatim postupno stavlja u stroj s valjcima za prešanje u njemu. To omogućuje da se uklone svi oblici vlage iz pulpe. Zatim, da bi se potpuno osušio list pulpe, koristi se zagrijani metalni valjak. Očišćena pulpa se miješa s novim proizvodnim materijalima nakon čega se suši na ravnoj

pokretnoj traci i grijanim cilindričnim površinama. Kako se pulpa suši, prolazi kroz automatizirani stroj koji istiskuje višak vode. Dok pulpa ne postane čvrsta, prolazi kroz cilindre grijane parom koji olakšavaju formiranje spljoštenih dugih rola kontinuiranih listova papira. Na kraju, kada voda potpuno iscure, rezultira obnovljenim listom papira. Zatim se list papira može izrezati u željene oblike i veličine.

Dobiveni listovi papira zatim se obrezuju, motaju i šalju raznim poslovnim mjestima ili proizvođačima koji koriste papir za izradu svojih proizvoda. Tiskanje novina, papiri za omatanje, papiri za tiskanje i puhani celulozni izolatori samo su neki od primjera područja u kojima se koristi reciklirani papir [3].

2.3. Svojstva tiskovnih recikliranih papira

Svojstva tiskovnih recikliranih papira razlikuju se od svojstava papira proizvedenih iz primarnih sirovina. Poznato je da reciklirani papir gubi na svojoj kvaliteti i svom izgledu, ali i dalje je pogodan za daljnju uporabu i recikliranje. Najjednostavnija karakteristika po kojoj je moguće prepoznati reciklirani papir je njegova tamnija boja. Najčešće se razlike u svojstvima razvrstavaju na fizikalne i optičke. Do razlika u svojstvima dolazi prvenstveno zbog promjena koje se događaju na vlaknima odnosno njihova umanjena sposobnost da vežu vlakanca, te zbog nečistoća koje zaostaju. Postupcima prosijavanja i čišćenja pulpe tijekom recikliranja nije moguće ukloniti sve nečistoće. Ako su velik dio tih nečistoća ljepljive čestice, one uzrokuju sljepljivanje papira namotanih na rolu, te njihovo cijepanje. Ljepljive čestice često uzrokuju nastajanje rupa i pukotina u papir zbog njihova lijepljenja na sito papir stroja [4].

U recikliranim papirima nalazi se određena količina sitnih čestica koje svojom prisutnošću mogu znatno utjecati na svojstva lista. Sitne čestice definirane su dimenzijom, te je njihov maseni udio u papiru moguće odrediti po TAPPI 261. Sve čestice koje mogu proći kroz sito od 200 žica po inchu nazivaju se sitne čestice. Nakon što je izvršena dimenzionalna klasifikacija sitne čestice se razvrstavaju po porijeklu odnosno vrsti. Mogu biti sama kratka vlakna nakon mljevenja, krhotine vlakana i dijelci stijenki vlakana (1-100 μm). Također sitnim česticama pripadaju i punila jer su njihove čestice obično sitnije od 0,1. Promatranjem sitnih čestica makroskopom dokazano je da su vlaknate sitne čestice različite drugih sitnih čestica po teksturi, te da se one pulpi mogu grupirati u

flokule i nakupine. Duga vlakna sklona su stvaranju flokula u pulpi, te postoji mogućnost da se taj proces događa pri većim omjerima duljine i širine vlakana ili vlaknastih materijala odnosno. Takva vrsta sitnih vlaknastih čestica doprinosi međusobno boljem vezivanju vlakana, jer popunjavaju međuvlaknate prostore smještanjem unutar njih. Sitne čestice punila imaju potpuno drugačiji utjecaj u odnosu na sitne vlaknate čestice. Povećana količina sitnih čestica uzrokuje izraženije čupanje kod recikliranih papira [4]. Optička svojstva igraju veliku ulogu s obzirom da izgled proizvoda uvelike ovisi o samoj podlozi. Optička svojstva su lako prepoznatljiva uvježbanim očima stručnjaka. Kod recikliranih papira svjetlina opada, a opacitet raste što može biti razlog povećanja gustoće ili prisutnosti neuklonjenih čestica tiskarske boje. Svjetlina recikliranih papira se smanjuje porastom količinom tiskarske boje. Utjecaj tiskarske boje koji djeluje na smanjenje svjetline dominantan je u odnosu na punila koja djeluju na povećanje svjetline. Čimbenici koji određuju opacitet su raspršenje i apsorpcija svjetla, te njihovim porastom raste i opacitet. Za razliku od svjetline koja nakon flotacije raste, opacitet nakon flotacije opada. Za poboljšanje optičkih svojstava recikliranih papira dodaju se punila tijekom proizvodnje [4].

Iako punila imaju pozitivan utjecaj na optička svojstva, ista stvar se ne događa ko mehaničkih svojstava. Mehanička svojstva kao što su indeks cijepanja, prskanja i kidanja prije postupka flotacije opadaju zbog prisutnosti punila. Nakon flotacije se događa poboljšanje tih mehaničkih svojstava, najviše za indeks cijepanja. Na porast mehaničkih svojstava djeluje i prisustvo celuloznih vlakana, ali su i ona pod negativnim utjecajem punila. Na mehanička svojstva djeluju i uvjeti sušenja papira u prethodnom ciklusu. Ako je temperatura prethodnog ciklusa bila visoka, idućim razvlaknjivanjem nastaje veći broj sitnih čestica zbog čega su papiri mehanički slabiji [4].

Za jakost papira presudnu ulogu ima vezivanje vlakna s vlaknom. Vlakana, izdvojena iz listova papira koji su se često podvrgavali recikliranju, svakim daljnjim postupkom se slabije istežu, ali imaju veću čvrstoću. Listovi papira od takvih vlakana bilježe pad jakosti svakim daljnjim postupkom. Da bi se postigla jakost papira uz čvrstoću vlakana potrebna je njihova međusobna povezanost i isprepletenost [4].

3. EKSPERIMENTALNI DIO

3.1. Papiri korišteni u istraživanju

Prilikom ispitivanja korišteno je pet vrsta papira, od kojih su tri reciklirana papira, a dva su nereciklirana, odabrani kako bi se provela usporedba ispitivanih svojstava.

Korišteni papiri i njihove karakteristike:

- **NAUTILUS Classic** – 80 g/m², 100% reciklirani papir, klasična bijela boja, papir za laser, inkjet pisače i fotokopirne strojeve, CO₂ neutralan

certifikati: Blue Angel, FSC™ recycled i EU Ecolabel

- **Evercopy plus** - 80 g/m², 100% reciklirani papir, 95 CIE bjelina, papir za laser i inkjet pisače, CO₂ neutralan, bez plastike, ekološki prihvatljiva proizvodnja

Certifikati: Blue Angel i Ecolabel

- **Recyclingpapier Weissegrad ISO 70** - 80 g/m², bjelina ISO 70, papir za laser, inkjet, faks i kopiranje

Certifikat: Blue Angel

- **NAVIGATOR Office Card** – 160 g/m², velika bjelina i glatkoća, pogodan za sve vrste uređaja i sve režime rada, idealan za obostrani InkJet i laser ispis u boji. Idealan za visokokvalitetni ispis ispisa certifikata, brošura, licenca, diploma, menija, korica, posjetnica, podržava rezolucije do 2400 dpi-a

Certifikati: ISO 9001 i ISO 14001

- **IQ PREMIUM** - 80 g/m², bjelina 170 CIE, CO₂ neutralan, papir za kopiranje, laser i inkjet

Certifikati: FSC™ , EU Ecolabel, Green range



Slika 6: Uzorci papira (Autorska slika)

3.2. Korišteni uređaji

Giljotina

Giljotina je uređaj za rezanje papira čija je gornja i donja oštrica od brušenog kvalitetnog čelika. Ima prednji stol s graničnikom i laserski modul. Vrhunska sigurnost je zajamčena rotacijskim štitnikom. Posjeduje vodilice s oznakama u centimetrima i inchima.



Slika 7: Giljotina (Autorska slika)

Analitička vaga

Analitička vaga je uređaj koji garantira pouzdanost i točnost mjerenja s preciznošću od 0,0001 g. Sadrži komoru za vaganje gdje se odlažu predmeti koji će se vagati. Ima i LCD ekran koji omogućava jasan prikaz rezultata mjerenja.



Slika 8: Analitička vaga

*(<https://www.super-lab.com/product/analiticka-vaga-as-120-r2-plus-radwag/>), pristup:
[14.8.2022.](#)*

Mikrometar

Elektronički ručni mikrometar namijenjen je ispitivanju debljine papira, kartona i sličnih materijala. Mjeri u rasponu od 0-10 mm s točnošću od 0.001 mm. Sastoji se od dvije metalne plohe između kojih se stavlja ispitivani materijal, te se njihovim pritiskom izmjeri debljina.



Slika 9: Mikrometar (Autorska slika)

SpectroDens spektrometar

SpectroDens je višenamjenski mjerni uređaj koji se univerzalno koristi za kontrolu kvalitete u tiskarskoj industriji, kao i za druge zadatke gdje se boje moraju kritički prosuđivati. Zahvaljujući individualno podesivim funkcijama zaslona, uređaj se lako postavlja za određeni posao. Izravno postavljanje mjerne glave na mjerno polje osigurava sigurno i brzo mjerenje. SpectroDens je zapravo dva uređaja u jednom, spektrofotometar i denzitometar.

Mjerenje je spektralno, tj. cijela informacija o boji – spektralni otisak boje – precizno se registrira. Podaci se pretvaraju u podatke mjerenja za deskriptivnu analizu i prikaz:

- Denzitometrijski podaci naširoko se koriste u kontroli kvalitete tijekom procesa tiskanja.
- Kolorimetrijski podaci koriste se u procjeni probnih otisaka, stvaranju profila boja u upravljanju bojama kao i usklađivanju boja i formulaciji tiskarskih boja [12].



Slika 10: SpectroDens (Autorska slika)

3.3. Metode ispitivanja

U eksperimentalnom dijelu ispitivana su opća i optička svojstva papira.

3.3.1. Ispitivanje općih svojstava papira

Općim svojstvima papira smatraju se gramatura, debljina, prostorna masa i specifični volumen.

Gramatura

Masa jednog kvadratnog metra papira naziva se gramatura papira. U SI sustavu mjerna jedinica za gramaturu je g/m^2 .

Gramatura papira određuje se vaganjem papira na analitičkoj vagi (slika 7), uzimajući srednju vrijednost deset uzoraka papira veličine 10 x 10 centimetara. Osim analitičke vage mogu se koristiti i manje precizni uređaji kao kvadratna vaga.

$$g = \frac{m}{A} \cdot 10000$$

m – masa papira, g
 A – površina papira, cm^2
 g – gramatura papira, g/m^2

Pri izvođenju testa slijede se standardi ISO 536, te Tappi T 410.

Prema gramaturi imamo podjelu na papir, karton i ljepenku. Prema Klemmu gramatura papira se kreće od 6 do 150 grama po kvadratnom metru, kartona od 250 do 500 grama po kvadratnom metru, a ljepenke između 600 i 5000 grama po kvadratnom metru [9].

Debljina papira

Debljina lista papira (kartona ili ljepenke) predstavlja udaljenost između dviju paralelnih stranica lista.

Za određivanje debljine materijala koristi se elektronički mikrometar (slika 8), čiji je mjerni raspon 0 - 10 mm s rezolucijom od 0,001 mm.

Materijal se postavlja između dvije ravne metalne površine i vrši se mjerenje. a debljina je izražena u milimetrima.

Za mjerenje se koristi standard Tappi T 411 ili ISO 534:2011. Ako je uzorak lista deblji od 0,04 mm, onda se uzorak mora izmjeriti pojedinačno. Tanki listovi debljine manje od

0,04 mm mjere se u snopovima od obično pet listova [9].

Prostorna masa

Prostorna masa (gustoća) papira (kartona ili ljepenke) predstavlja masu jednog centimetra kubnog uzorka koji se ispituje.

Ona je omjer gramature i debljine papira, a izražena je u g/cm³ [9].

$$\gamma = \frac{x}{d \cdot 1000}$$

γ – prostorna masa, g/cm³
 x – gramatura, g/m²
 d – debljina, mm

Specifični volumen

Volumen koji u prostoru zauzima gram papira (kartona ili ljepenke) koji se ispituje nazvan je specifični volumen.

On je omjer debljine papira i gramature, a izražen je u cm³/g [9].

$$\frac{1}{\gamma} = \frac{d}{x} \cdot 1000$$

$1/\gamma$ – specifični volumen, cm³/g
 d – debljina, mm
 x – gramatura, g/m²

3.3.2. Ispitivanje optičkih svojstava papira

Optička svojstva papira su svjetlina (engl. brightness), bjelina (engl. whiteness), transparentnost, opacitet (neprozirnost, engl. opacity) i sjaj.

Važnost optičkih svojstava papira je od iznimne važnosti jer izgled grafičkog proizvoda ovisi o svojstvima podloge.

Koristeći spektrofotometar mjerimo optička svojstva papira. Spektrofotometrom možemo odrediti svjetlinu, bjelinu, transparentnost, te opacitet. Ispitivanja na spektrofotometru provode se u snopu (osim za specifično mjerenje opaciteta) da budu neprozirni kako njihova prozirnost ne bi utjecala na mjerenje [10].

Svjetlina papira

Svjetlinu papira mjerimo spektrofotometrom prema standardu u ISO 2470:1999.

ISO svjetlina (%) papira, kartona i pulpe definirana je omjerom stupnja refleksije difuznog plavog svjetla s površine neprozirnog uzorka papira prema stupnju refleksije idealnog reflektirajućeg tijela. Moguće je mjerenje svjetline koristeći isključenu ili uključenu UV komponentu svjetlosti. Mjerenje svjetline nastalo je kao metoda za kontrolu procesa bijeljenja papirne mase u toku proizvodnje papira. Osim svjetline, u istu svrhu, može se određivati i stupanj žutoće papira (engl. yellowness) koji ukazuje na to koliko boja papira odstupa od željene bjeline i teži žutoj. Procjena žutoće papira je jako bitna jer celuloza i poslije procesa izbjeljivanja pokazuje određeni stupanj žutoće [10].

Bjelina papira

Za izrađivanje papira s visokim stupnjem bjeline potrebno je koristiti kvalitetna bijeljena vlakna, punila s visokim stupnjem bjeline, plavila, te optička bjelila koja pojačavaju stupanj bjeline. Postotak kojem se materijal približava idealno „bijelom“, dogovorno postavljenom za magnezijev oksid je označeno kao stupanj bjeline materijala.

Stupanj difuzne refleksije svjetlosti (svih valnih duljina) na površini uzorka kroz cijeli spektar vidljive svjetlosti označava bjelinu papira koja se određuje uz standard ISO 11475:1999.

Stupanj bjeline (%) određuje se tako što se mjeri refleksija svjetlosti s površine papira u vidljivom području spektra. Prilikom osvjetljenja uzorka upotrebljava se iluminant D65 koji je predstavnik vanjskog dnevnog svjetla [10].

Opacitet

Mjera nepropusnosti papira na svjetlo izražena u postotcima naziva se opacitet. Predstavlja odnos stupnja refleksije pojedinačnog lista papira postavljenog iznad jedne crne podloge (< 0.5% refleksije) u odnosu na stupanj refleksije istog lista u snopu kroz koji svjetlost ne može proći. Određuje se koristeći standard ISO 2471:1998. Karakteristike koje utječu na opacitet: vrsta vlaknaca, stupanj bijeljenja, prisutnost bojila [10]...

Optička bjelila

Optička bjelila su tvari koje se prilikom proizvodnje dodaju u papirnu masu kako bi se postigao visok stupanj bjeline celeuloze i papira. Oni djeluju na način da za ljudsko oko nevidljivo apsorbirano UV zračenje izrače kao vidljivo. Tako se nadoknađuje žućkasti ton dodatnom emisijom plavog svjetla, što djeluje i na poboljšanje svjetline. Do poboljšanja svjetline papira dolazi jer se reflektiranim zrakama dodaju i zrake koje nastaju transformacijom iz UV zraka [10].

3.4. Rezultati ispitivanja

3.4.1. Opća svojstva

Za vrijednosti gramature uzimane su vrijednosti navedene od strane proizvođača.

Debljina papira određivana je mjerenjem na mikrometru (slika 9). Mjerenje je obavljeno tako da se uzima uzorak veličine 10x10 cm, koji je prethodno izrezan na giljotini (slika 7), postavi između dvije paralelne metalne mjerne plohe, te se njihovim pritiskom odredi debljina. Za svaki papir obavljeno je po 20 mjerenja iz kojih je izračunata srednja vrijednost.



Slika 11: Uzorci papira veličine 10x10 cm (Autorska slika)

Masa papira je mjerena uz pomoć analitičke vage (slika 8). Svaki uzorak se stavlja na vagu, te se vratašca vage zatvaraju i izmjeri se masa uzorka. Obavljeno je po 10 mjerenja za svaku vrstu papira i potom je izračunata srednja vrijednost. Korištena je ista veličina

papira 10x10 cm.

Specifični volumen je izračunat uz pomoć formule koja je spomenuta u dijelu gdje su opisana opća svojstva. Za sami izračun bila je potrebna već poznata gramatura i debljina papira, gdje su se koristile srednje vrijednosti svake veličine.

$$\frac{1}{\gamma} = \frac{d}{x} \cdot 1000$$

Tablica 1: Rezultati ispitivanja dobiveni mjerenjem općih svojstava papira

Naziv papira	Gramatura (g/m ²)	Debljina (mm)	Specifični volumen (cm ³ /g)	Prostorna masa (g/ cm ³)
NAUTILUS Classic	80	0,102	1,275	0,784
Evercopy plus	80	0,103	1,287	0,776
Recyclingpapier Weissegrad ISO 70	80	0,099	1,237	0,808
NAVIGATOR	160	0,167	1,044	0,958
IQ PREMIUM	80	0,106	1,325	0,755

Svi papiri imaju gramaturu od 80 g/m², osim NAVIGATOR-a čija gramatura iznosi 160 g/m².

Debljine svih papira međusobno se razlikuju u nekoliko mikrometara, jedino se NAVIGATOR ističe po malo većoj razlici od nekih 60-ak mikrometara u odnosu na Recyclingpapier Weissegrad.

Matematičkim izračunom dobiveni su rezultati za specifični volumen i prostornu masu. Kao i do sada, veća razlika je opet dobivena kod NAVIGATOR-a, samo što je sada njegov specifični volumen znatno manji od ostalih. S obzirom na njegovu najveću gramaturu i debljinu rezultati su pokazali na NAVIGATOR-ovu najveću prostornu masu, odnosno gustoću papira. Najmanju prostornu masu pokazao je IQ PREMIUM.

3.4.2. Optička svojstva

U ispitivanju optičkih svojstava papira korišten je SpectroDens uređaj (slika 10). Za sva mjerena svojstva podešene su određene postavke, te je za svaku vrstu papira također obavljeno po 10 mjerenja. Svaki uzorak je postavljen na kup istovrsnih papira za ispitivanje bjeline, svjetline i sadržaja optičkih bjelila, odnosno pojedinačni uzorak je postavljen na bijelu i crnu podlogu kod ispitivanja opaciteta. Postavljanjem glave uređaja na uzorke papira, te pritiskom na gumb prikazuju se tražene vrijednosti.

Tablica 2: Rezultati ispitivanja dobiveni mjerenjem optičkih svojstava papira

Naziv papira	Opacitet (%)	Optička bjelila $I\Delta b_{M_1M_2}^*I$	Whiteness $W_{E313/CIE}$	Yellowness Y_{D1925}
NAUTILUS Classic	95,11	6,79	105,265	-8,94
Evercopy plus	93,39	6,32	93,132	-7,82
Recyclingpapier Weissegrad ISO 70	97,25	4,01	59,311	4,83
NAVIGATOR	98,12	10,08	152,044	-29,93
IQ PREMIUM	93,73	10,39	158,705	-32,56

Rezultati ispitivanja dobiveni mjerenjem optičkih svojstava papira pokazuju da najveći opacitet ima NAVIGATOR koji je nerekilirani papir, a nakon njega slijedi Recyclingpapier Weissegrad ISO 70 koji je reciklirani papir što dokazuje da reciklirani papir ima bolju nepropusnost na svjetlo u odnosu na drugi nerekilirani papir korišten u istraživanju.

Najveća bjelina papira izmjerena je kod IQ PREMIUM papira koji je nerekilirani papir, a potom je najveća bjelina izmjerena kod drugog nerekiliranog papira NAVIGATOR-a. Od tri reciklirana papira samo jedan ima bjelinu veću od 100%. Rezultati mjerenja koji prikazuju bjelinu veću od 100% dokazuju prisutnost optičkih bjelila, što je u korelaciji i sa samim mjerenjem sadržaja optičkih bjelila. Ovim mjerenjem dokazana je opće poznata činjenica da reciklirani papiri postaju tamniji uslijed procesa odbojavanja, u kojem nije moguće u potpunosti odstraniti čestice zaostale tiskarske boje.

4. ZAKLJUČAK

Iako u današnjem svijetu tehnologije prevladava uporaba elektronike, stopa korištenja papira je i dalje vrlo visoka. Poznato je da proizvodnja papira ima velik utjecaj na okoliš, odnosno velik negativan utjecaj. Zahvaljujući razvoju tehnologija, postoje i one koje nastoje smanjiti negativan utjecaj na okoliš uz pozitivan ekonomski učinak. Takav postupak je i postupak recikliranja. Korištenjem recikliranog papira u svrhu sirovine za izradu papira čuvaju se prirodni resursi. Recikliranje papira svakako spada u standardne postupke uporabe ove vrste vlaknatih materijala, no uz zadržavanje visokih standarda i zahtjeva tiskovnih papira. To se između ostaloga odnosi na opća, optička i mehanička svojstva papira, koja je potrebno zadržati radi optimalne kvalitete i zahtjeva krajnje namjene.

U ovom završnom radu prikazana su svojstva nekih recikliranih papira u odnosu na papire iz primarnih vlakana, te su na osnovu mjerenja dobiveni rezultati koji pokazuju da reciklirani papiri mogu imati neka bolja svojstva, poput opaciteta, od nerekicliranih papira. Na te rezultate utječe postupak odbojavanja, tijekom kojeg nije u potpunosti moguće ukloniti zaostalu tiskarsku boju, što uzrokuje viši stupanj opaciteta u odnosu na papire proizvedene iz primarnih vlakana. Unatoč nižem stupnju bjeline i svjetline, komercijalno dostupni reciklirani papiri korišteni u istraživanju zadovoljavaju svoju krajnju namjenu i zahtjeve tržišta. Viši stupanj bjeline recikliranih papira moguće je postići dodatkom optičkih bjelila, što je pokazao i primjer jednog od ispitivanih papira. Detaljni uvid u rezultate ispitivanih svojstava recikliranog papira pokazuje da su itekako konkurentni na tržištu, te da zadovoljavaju kriterijima širokog spektra primjene.

5. LITERATURA

- [1] Lozo B., (2007.), Povijesni pregled izrade papira, Klasična gimnazija u Zagrebu, Zagreb
- [2] Papermaking, dostupno na: <https://www.britannica.com/technology/papermaking>, datum pristupa: 20.06.2022.
- [3] How Paper Is Recycled: Step-by-Step Process (and Benefits Too), dostupno na: <https://www.conserve-energy-future.com/paperrecycling.php>, datum pristupa: 20.06.2022.
- [4] Lozo B., (2014.), Papir, Nastavni tekstovi, Sveučilište u Zagrebu, Grafički fakultet, Zagreb
- [5] Čabalova I., Kačik F., Kačilova D. (2011.), Recycling of paper – Changes of mechanical and optical properties, Faculty of Wood Sciences and Technology, Slovakia
- [6] Šokman, M, (2016.), Recikliranje papira, Završni rad, Sveučilište u Zagrebu, Geotehnički fakultet, Varaždin
- [7] Golubović A., Mališić-Adomau I. (1976.), Svojstva i ispitivanje papira, Viša grafička škola, Zagreb
- [8] Yilmaz U., Tutus A., Sönmez S. FIBER CLASSIFICATION, PHYSICAL AND OPTICAL PROPERTIES OF RECYCLED PAPER
- [9] Stržić Jakovljević M. (2021.), Opća svojstva papira (Vježba 2), dostupno na: https://moodle.srce.hr/2020-2021/pluginfile.php/5026044/mod_resource/content/1/Vjezba%202%20-%20tekst%20finalno.pdf, datum pristupa: 15.08.2022.
- [10] Stržić Jakovljević M. (2021.), Optička svojstva papira (Vježba 6), dostupno na: https://moodle.srce.hr/2020-2021/pluginfile.php/5026053/mod_resource/content/1/Vjezba%206%20-%20tekst%20finalno.docx.pdf, datum pristupa: 15.08.2022.
- [11] Stržić Jakovljević M. (2021.), Mehanička svojstva papira (Vježba 4), dostupno na: https://moodle.srce.hr/2020-2021/pluginfile.php/5026048/mod_resource/content/1/Vjezba%204%20tekst%20finalno.pdf, datum pristupa: 15.08.2022.
- [12] TECHKON, Spectro-Densitometer, SpectroDens (2021.) dostupno na:

<https://www.techkon.com/files/downloads/prospekte/SpectroDens%20Manual%20Web.pdf>,

datum pristupa: 17.08.2022.