



[www.rsd.tfbor.bg.ac.rs](http://www.rsd.tfbor.bg.ac.rs)

Pregledni rad

## RECIKLAŽA ŠTAMPANOG PAPIRA PRIMENOM PROCESA PRIPREME MINERALNIH SIROVINA

### *THE APPLICATION OF MINERAL PROCESSING TECHNIQUES FOR THE PRINTED PAPER RECYCLING*

Maja S. Trumić<sup>#</sup>, Milan Antonijević, Milan Ž. Trumić, Grozdanka Bogdanović

University of Belgrade, Technical faculty of Bor, Serbia

---

**IZVOD** U radu je opisan proces reciklaže otpadnog papira. Poseban akcenat je stavljen na opis tehnoloških faza (dezintegracija ili mlevenje, prosejavanje, prečišćavanje, pranje i/ili flotacija, tretman voda i odlaganje mulja), koje su generalno neophodne u procesu prerade otpadnog papira, a koje takođe predstavljaju i osnovne faze procesa pripreme mineralnih sirovina. S obzirom da papir kao potencijalna sekundarna sirovina zbog degradacije fizičkih karakteristika celuloze koje nastaju tokom procesa prerade, može se reciklirati ograničen broj puta, u radu je data i analiza uticaja mehaničkog i hemijskog tretmana na poboljšanje kvaliteta vlakana sekundarne celuloze.

**Ključne reči** celuloza, otpadni papir, reciklaža, mehanički tretman, hemijski tretman

**ABSTRACT** This paper describes the waste paper recycling process. Special emphasis is placed on the description of technological phase (disintegration or grinding, screening, cleaning, washing and/or flotation, water treatment and disposal of sludge), which are generally required in the processing of waste paper, and which also represent the main phases in the mineral processing. The waste paper is a potential secondary raw materials but due to degradation of cellulose physical properties which occur during the recycling, the cellulose fibers can be recycled a limited number of times. Because of this, the impact analysis of mechanical and chemical treatment on the secondary fiber quality is also given in the paper.

**Key words:** cellulose, waste paper, recycling, mechanical treatment, chemical treatment

---

---

<sup>#</sup> Kontakt adresa autora: Maja S. Trumić, Tehnički fakultet u Boru, Univerzitet u Beogradu, Vojske Jugoslavije 12, 19210 Bor, Srbija. E-mail: [majatrubic@tfbor.bg.ac.rs](mailto:majatrubic@tfbor.bg.ac.rs)

## UVOD

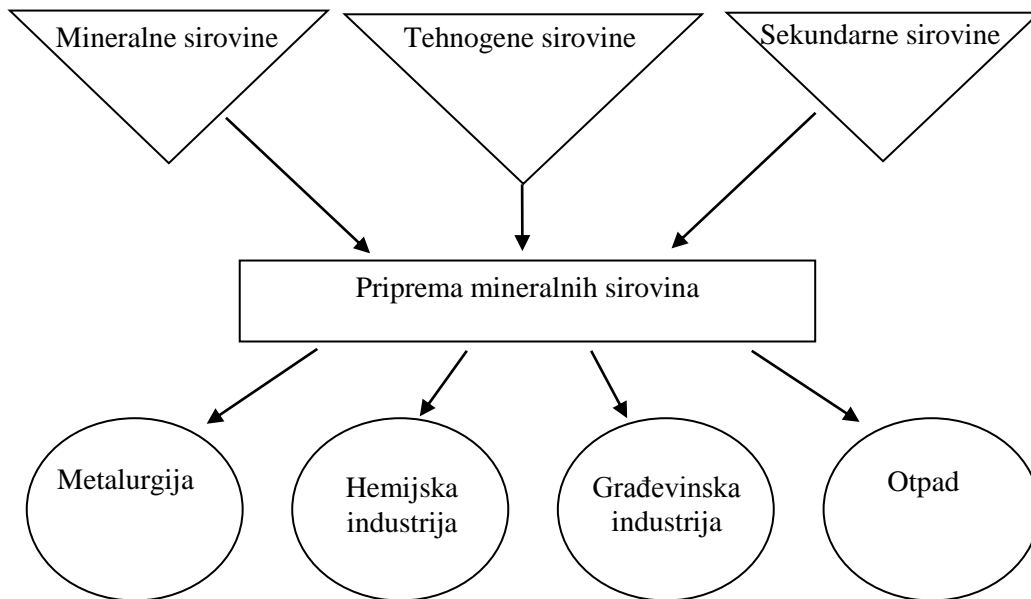
Procesi prerade mineralnih sirovina predstavljaju granu nauke i tehnologije koja prvenstveno blisko saraduje sa rudarskom i hemijskom industrijom, ali i sa drugim granama industrije. Takođe, priprema mineralnih sirovina se pored prerade industrijskog otpada bavi i preradom komunalnog otpada. Dobijeni međuproizvodi se dalje mogu tretirati u metalurškim, hemijskim, građevinskim i drugim industrijama (slika1) [1].

Definicija termina "otpad" može se iskazati na više načina na osnovu razlike u razumevanju i koncepta vrednosti resursa. Na osnovu fizičkog sastava otpad može biti u tečnom, čvrstom i gasovitom stanju. Sastav otpada se razlikuje u zavisnosti od izvora generisanja, tako da se "otpad" može podeliti i na industrijski, institucionalni, komercijalni i stambeni. Međutim, ukoliko se pod pomenutim terminom misli na otpad koji može imati potencijalnu ekonomsku vrednost, onda takav otpad nazivamo potencijalna sekundarna sirovina koja predstavlja ulaznu sirovinu za određeni tehnološki postupak.

Otpadni štampani papir, jedna od komponenti koja može biti sadržana u otpadu, predstavlja tehnološki i

ekonomski izazov za industriju papira odnosno za reciklere papira.

U poslednjih nekoliko godina objavljeno je nekoliko studija iz oblasti upravljanja otpadnim štampanim papirom, sa osvrtom na ocenu životnog ciklusa LCA (Life Cycle Assessment) i cost-benefit analizu CBA (cost-benefit analysis), koje upoređuju proces reciklaže otpadnog štampanog papira sa drugim procesima obnavljanja (insineracija) ili deponovanja otpadnog štampanog papira [2-7]. Rezultati LCA analiza prikazani u navedenim radovima ukazuju da je proces reciklaže bolja opcija u poređenju sa procesom inseneracije i deponovanja, nakon sagledavanja uticajnih parametara izabranog procesa na životnu sredinu. Upoređujući procese reciklaže sa deponovanjem, dobijeni rezultati LCA analize ukazuju da je proces reciklaže 100 % otpadnog štampanog papira bolja opcija u odnosu na kombinovani proces spaljivanja (20-30 %) i deponovanja (70-80 %), koji se najčešće primenjuje u praksi. Sveobuhvatni zaključak ovih istraživanja ukazuje da je potrošnja energije kao i emisija gasova manja, u poređenju sa potrošnjom energije i emisijom gasova koji nastaju u procesu proizvodnje papira od primarnih resursa, kao i da će stvarna ušteda zavisiti od izbora tehnologije za reciklažu.

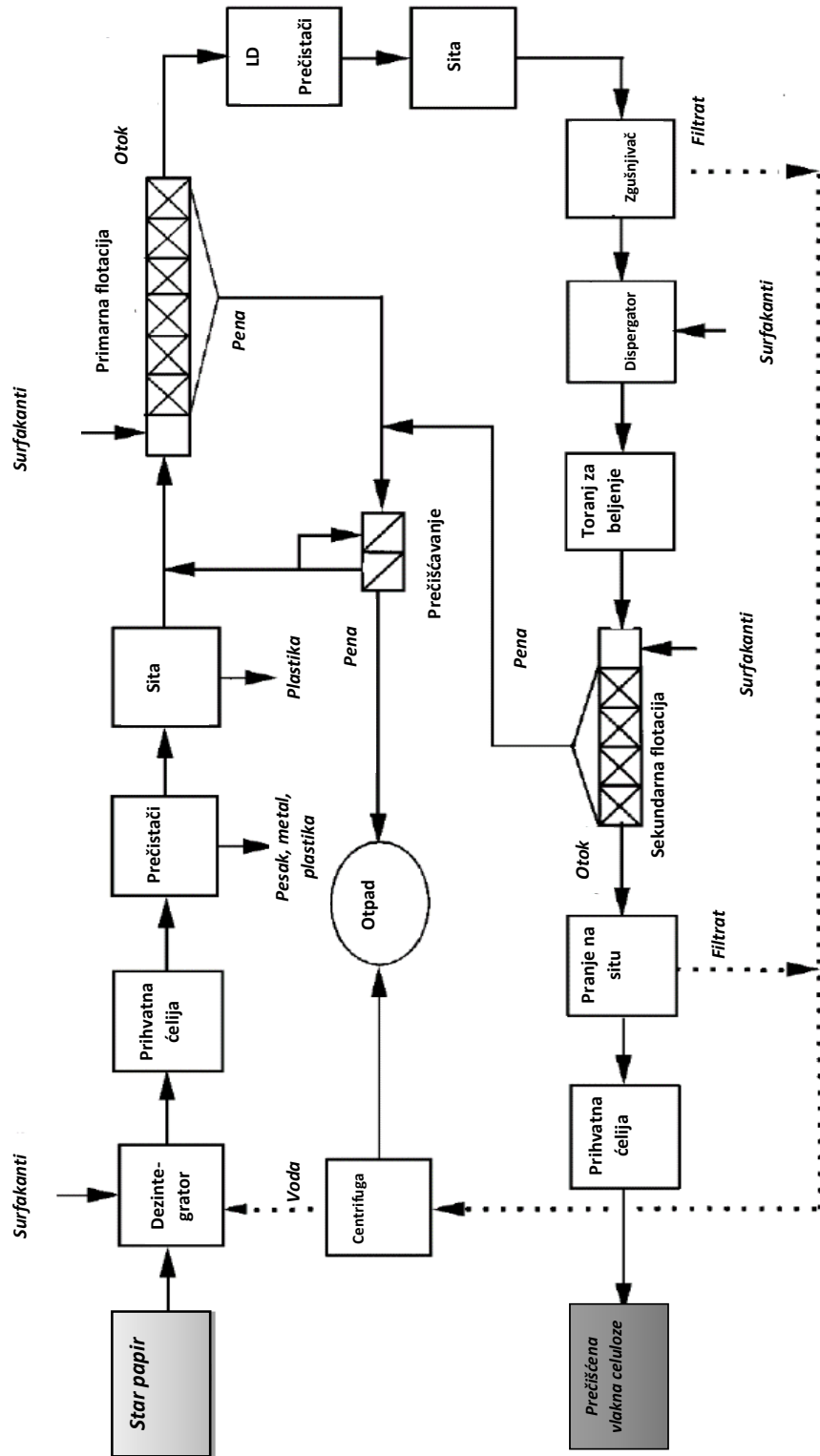


Slika 1. Mesto pripreme mineralnih sirovina u nauci i praksi [1]

## TEHNOLOGIJA PRERADE OTPADNOG ŠTAMPANOG PAPIRA

Na slici 2. prikazane su faze tehnološkog procesa prerade otpadnog štampanog papira. Iako nije uvek potrebno primeniti sve faze obrade jer njihova primena

zavisu od prethodnog sortiranja, vrste i stepena čistoće starog papira kao i kvaliteta proizvoda koji se želi dobiti, postoje nekoliko faza koje su generalno neophodne. To su faza dezintegracije, prosejavanja, prečišćavanja, pranja i/ili flotacije, dispergacije, beljenja, tretmana voda i odlaganja mulja [8-11].



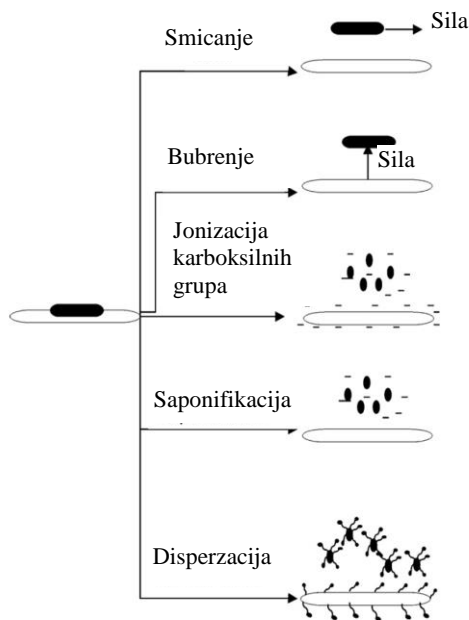
Slika 2. Tipična tehnološka šema prerade otpadnog papira [8]

## Dezintegracija

U ovoj fazi dolazi do odvajanja vlakana iz isprepletane strukture papira u pojedinačna vlakna kao i do odvajanja čestica grafičkih boja i drugih nečistoća sa vlakana papira.

Dezintegracija ili mlevenje može biti kontinualni ili diskontinualni proces. U postrojenjima za proizvodnju novinskog papira koristi se kontinualni proces dezintegracije pri sadržaju čvrstog od 4-8 % [8]. Druga postrojenja uglavnom koriste diskontinualni proces dezintegracije pri većem sadržaju čvrstog od 8-18 % [8, 11, 12].

Dejstvom hemijskih, termičkih i mehaničkih procesa u fazi dezintegracije oslobađaju se čestice grafičkih boja i druge nečistoće od vlakana usled smanjenja adhezije [13, 14]. Mogući mehanizmi, po naučniku Johanssonu [15, 16], koji dovode do procesa odvajanja čestica grafičkih boja od vlakana, ali i samih vlakana međusobno, prikazani su na slici 3.



Slika 3. Mehanizmi odvajanja čestica boja od vlakana [15, 16]

Mehanizmi se zasnivaju na mehaničkim procesima usled sila smicanja ili bubrenja vlakna celuloze ili hemijskim procesima usled jonizacije karboksilnih grupa na površini vlakana celuloze čime se povećava elektrostatičko odbijanje negativno naelektrisanih vlakana celuloze i poboljšava disperznost, ali i usled procesa saponifikacije [15-17].

Naučnici Behin and Vahed [13], Johansson [15, 16] i Ferguson [18] pokazali su u svojim istraživanjima da dodatak natrijum hidroksida povećava intenzitet sile smicanja ali dovodi i do hidrolize boja koje u svom sastavu imaju za vezivo biljno ulje i tako pospešuje proces odvajanja grafičkih boja od vlakana.

Pretpostavka ovih naučnika je da peroksidi koji se pored faze dezintegracije uglavnom dodaju u fazi dispergacije, kao što se može videti na slici 2, dovode do efikasnijeg odvajanja čestica boja koje u svom sastavu imaju vezivo na bazi alkidnih smola.

Takođe, površinski aktivne supstance, masne kiseline, u ovoj fazi procesa ne učestvuju u dispergovanju boje sa vlakana jer dolazi do formiranja sapuna masnih kiselina usled prisutnosti jona kalcijuma u vodenj fazi. Koncentracija jona kalcijuma zavisi od tvrdoće vode.

Generalno pH vrednost u fazi dezintegracije se kreće oko 9-11, u zavisnosti od vrste papira koji se dezintegriše (alkalni ili kiseli papir), i koncentracije NaOH [9, 11, 13, 17-19].

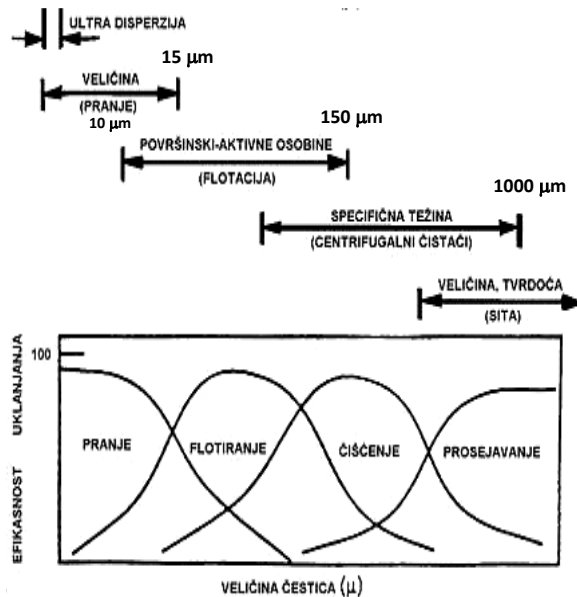
Miller [20] i Azevedo [21] su u svojim eksperimentima pokazali da krupnoća slobodnih čestica boja nakon dezintegracije zavisi od pH vrednosti suspenzije odnosno od koncentracije NaOH. Dezintegracijom štampanog papira laserskom i fotokopir štampom bez dodatka NaOH (pH 5), pri sadržaju čvrstog od 12 % i temperaturi tečne faze oko 80 °C, generisale su se čestice grafičkih boja-tonera srednjeg prečnika oko 188 µm (10-400 µm), dok dodatak NaOH (pH 10) je prouzrokovao generisanje krupnijih čestica srednjeg prečnika 390 µm (45-600 µm). Konstatacija naučnika Millera i Azeveda, da povećanje bazičnosti dovodi do smanjenja abrazije ali i do boljeg bubrenja vlakana celuloze što dovodi do oslobađanja krupnijih čestica boja, podržava mišljenja predhodno navedenih naučnika.

Takođe, mnogi naučnici ističu da i temperatura tečne faze i sadržaj čvrstog imaju značajan uticaj na krupnoću generisanih čestica boja u fazi dezintegracije. Dezintegracija pri višim temperaturama (> 40 °C) se primenjuje kod papira sa slabom moći upijanja kao što su papiri za kopir štampu, koji takođe zahtevaju i veći sadržaj čvrste faze (8-18 %) i duže vreme dezintegracije da bi se generisale sitnije čestice [8, 9, 13, 20]. Generalno sadržaj čvrstog u procesu dezintegracije se kreće od 2-20 % [8, 14, 19] a temperatura tečne faze od 20-90 °C [8, 14, 17, 18, 20, 22] u zavisnosti od vrste papira i grafičkih boja.

Na osnovu pregleda literature može se reći da dezintegracija kao prva faza tehnološkog procesa prerade otpadnog štampanog papira predstavlja ključni korak jer dozvoljava određenu kontrolu krupnoće oslobođenih čestica grafičkih boja, i samim tim diktira redosled sledećih faza u procesu reciklaže.

Na slici 4. prikazane su moguće faze odnosno procesi prerade otpadnog štampanog papira na osnovu date krupnoće oslobođenih čestica grafičkih boja u fazi dezintegracije. Precizno određen i definisan granulometrijski sastav čestica boja nakon dezintegracije je dobra osnova za izbor odgovarajuće opreme odnosno narednih faza u procesu reciklaže otpadnog štampanog papira. Kao što se sa slike 4. može uočiti, prosejavanje i

čišćenje su faze koje su neophodne kada su čestice krupnije od 100  $\mu\text{m}$ . Flotacijom se mogu izdvojiti čestice (10-150  $\mu\text{m}$ ) čija je krupnoća mala da bi se efikasno izdvojile procesom prosejavanja ali u isto vreme i velika da bi ih izdvojio proces pranja koji je najefikasniji za izdvajanje čestica boja krupnoće <15  $\mu\text{m}$  [10, 17, 22-25].



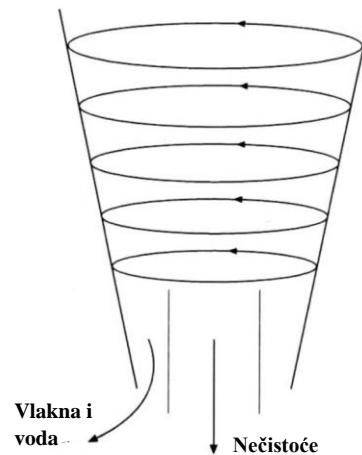
**Slika 4.** Teoretske vrednosti efikasnosti izdvajanja čestica grafičkih boja u zavisnosti od njihove krupnoće procesima prosejavanja, čišćenja, flotiranja i pranja [23]

### Prečišćavanje

U fazi prečišćavanja iz suspenzije se izdvajaju nečistoće kao što su smole, pesak, metali, glina (prečišćavači retke mase), polietilen, polistiren, lepkovi i čestice grafičkih boja (prečišćavači guste mase).

Efikasnost ovog procesa ne zavisi samo od krupnoće čestica već i od njihove specifične težine jer se prečišćavanje vrši u polju centrifugalnih sila uz pomoć centrifugalnih prečišćavača. Veličina čestica koje se mogu izdvojiti iz suspenzije u ovoj fazi procesa je u granicama vidljivosti ljudskim okom. Najmanje vidljive čestice su veličine oko 40  $\mu\text{m}$ , a najkrupnije mogu iznositi i 4000  $\mu\text{m}$ , napr. polimeri. Specifična težina tih čestica je u rasponu od 0,5 do 2,0  $\text{g}/\text{cm}^3$  [26, 27].

Kao što je grafički prikazano na slici 5, suspenzija (voda, vlakna i nečistoće) se pod dejstvom centrifugalne sile kreće po obodu cilindričnog prečišćavača, dok se čestice sa većom specifičnom težinom akumuliraju u centralnom delu uređaja i tako separisane odvoje iz Sistema [27].

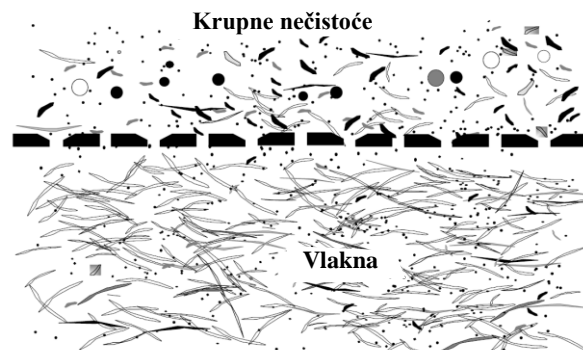


**Slika 5.** Princip rada centrifugalnog prečišćavača [27]

### Prosejavanje

Faza prosejavanja podrazumeva izdvajanje nečistoća (sraslaci vlakana i boje, plastika) koje su krupnije od vlakana celuloze u suspenziji, tako da krupnije čestice ostaju na situ dok vlakna zajedno sa tečnom fazom (suspenzija), prolaze kroz otvore na situ [27, 28]. Sito otvora 7-8 mm može se nalaziti na izlazu iz uređaja za dezintegraciju, palpera (uklanjanje krupnih komada plastike), dok sito otvora 2 mm se najčešće nalazi nakon faze prečišćavanja, (prečišćavači guste i retke mase).

Princip prosejavanja je prikazan na slici 6.

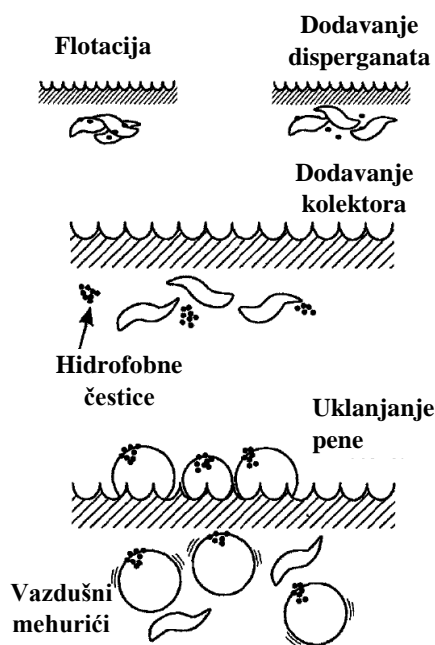


**Slika 6.** Princip prosejavanja [29]

Proces prosejavanja otežava ponašanje vlakana, koja su sklona stvaranju sloja na situ (formiranje mreže od vlakana) uprkos otvorima na situ koja su veća od dimenzije vlakana. Naime, voda i deo vlakana iz suspenzije prolaze kroz otvore na situ ostavljajući deo vlakna u nadrešetni proizvod, i zbog toga je potrebno tako formirani sloj vlakana ukloniti sa površine sita i vratiti u suspenziju. S obzirom da se time smanjuje efikasnost uređaja, prosejavanje se često vrši pod pritiskom tako da se vlakna potiskuju kroz otvore na situ [29].

## Flotacija

Flotacija je složen fizičko-hemijski proces pri kojem se vrši uklanjanje hidrofobnih suspendovanih, koloidnih i delom rastvorenih čestica, uz pomoć mehurića gasa. Na površini tečnosti formira se pena (izdvojene nečistoće) koja se kontinualno odvodi skimerima [8, 27]. Kod flotacije egzistira izuzetno složen sistem tečno-čvrsto-gas, tako da se dešava i veliki broj složenih fenomena. S obzirom da su čestice prisutne u suspenziji često hidrofилne, da bi proces flotacije bio efikasan potrebno je prethodno promeniti svojstva kvašljivosti prisutnih čestica uz pomoć površinski aktivne hemikalije sa polarno-nepolarnim molekulima. Molekuli se adsorbuju na površinu hidrofилnih čestica tako što se ugljovodonični deo molekula orijentiše prema zapremini tečnosti čineći tako nastale komplekse hidrofobnim (slika 7.) [23, 30].



Slika 7. Princip flotiranja [23]

Flotacija se uglavnom odvija u alkalnim sredinama (pH 7-10), pri sadržaju čvrstog 0,7-1,5 %, a hemikalije koje se koriste u procesu flotacije su masti i smeše proizvoda pri preradi nafte, drveta i uglja, kiseline ugljovodoničnog niza (C<sub>4</sub> - C<sub>20</sub>) ili organska jedinjenja sa sulfatnim jonom [11, 21, 23, 30].

Na tehnološkoj šemi prerade otpadnog štampanog papira (slika 2.) može se uočiti da se proces flotacije odvija kroz dve faze kao primarna flotacija i sekundarna flotacija. U primarnoj flotaciji redno vezane 6 do 10 ćelija su neophodne za efikasno odvajanje grafičkih boja i drugih nečistoća iz sistema, dok u sekundarnoj flotaciji, najčešće kroz 2 flotacione ćelije, se prečišćava pena (isflotirane nečistoće) da bi se smanjio gubitak

vlakana. Između dve faze flotacije postoji međufaza dispergacija (sadržaj čvrstog 22-32%), koja ima ulogu dodatne dezintegracije grafičkih boja i izbeljivanja vlakana radi postizanja odgovarajuće beline [8, 12]. Kao optička sredstva za beljenje vlakana celuloze najčešće se koriste natrijum hipohlorit (NaOCl) i hidrogen peroksid (H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>). Upotreba silikata i helata je takođe neophodna u cilju deaktivacije jona metala (prisutnih u otpadnom papiru), koji bi mogli da katalitički razlože perokside. Ukoliko se reciklirana vlakna celuloze mešaju sa vlaknima dobijenim od prerade drveta nakon refinacije (kombinovani postupak dobijanja celuloze), faza beljena celuloze nije neophodna [31].

## Pranje

U zavisnosti od krupnoće generisanih slobodnih čestica u međufazi dispergacije, često se u procesu reciklaže, sekundarna faza flotacije kombinuje sa fazom pranja. Faza pranja je mehanički proces uklanjanja čestica sitnijih od 15 μm koje se nisu izvojile u fazi sekundarne flotacije [8, 17, 22, 27]. Princip pranja se ogleda u ispiranju suspenzije na situ većih otvora od prečnika čestica nečistoće, tako da na situ u nadrešetnom proizvodu ostaju prečišćena vlakna a nečistoće zajedno sa prekraćenim vlaknima prolaze kroz sito u podrešetni proizvod (slika 8).



Slika 8. Princip pranja [27]

Proces pranja zahteva potrošnju velike količine vode što ovaj proces čini neekonomičnim u poređenju sa drugim predhodno opisanim fazama. S obzirom da mehanički (uklanjanje čestica boja i punioca) i hemijski (uklanjanje hemikalija) tretman voda dodatno utiče na ekonomske faktore, u zemljama u Evropi ova faza nije sastavni deo tehnološkog procesa prerade starog papira. U ovim zemljama sitne nečistoće se ukupnjuju procesom aglomeracije i uklanjaju u fazi flotacije [22, 27].

## Tretman mulja

Na osnovu šeme prerade starog papira (slika 2), mogu se definisati mesta nastajanja otpada-mulja. U fazama prosejavanja i prečišćavanja nastaje otpad koji generalno ima sledeći sastav: 40-50 % sraslaci vlakna i boje, 20-40 % plastika, do 6 % staklo, keramika, pesak, do 2% metalni delovi, do 3% ostale nečistoće. Mulj (flotaciona pena) koji nastaje u fazama primarne i sekundarne flotacije uglavnom se sastoji od: 40-60 % mineralni punioci kao što su kaolin, kalcijum karbonat, kreč i dr., 20-40 % prekraćena vlakna, do 8 % sraslaci vlakno i čestice boja. Takođe, nakon tretiranja otpadnih voda stvara se određena količina mulja čiji sastav zavisi od vrste tretmana koji može biti mehanički, hemijski ili biološki. Sve vrste muljeva se ugušćuju do koncentracije 1-2 % čvrstog, suše do odstranjivanja 50 % vlage i zatim se spaljuju ili odlažu na deponijama [32-34]. U nekim zemljama se mulj koristi kao kompost, za razliku od zemalja EU gde zakonski propisi to ne dozvoljavaju zbog mogućnosti prisustva teških metala [35, 36].

## KARAKTERISTIKE VLAKANA CELULOZE NAKON PROCESA RECIKLAŽE

Efikasnost opisanog procesa reciklaže procenjuje se testiranjem karakteristika recikliranih celuloznih vlakana. Izbor odgovarajuće kontrole papira vrši se prema zahtevima njegove kasnije primene, odnosno dalje prerade i treba da daje jasan iskaz o kvalitetu.

Svaka zemlja svojim propisima, odnosno standardima, utvrđuje najvažnije elemente kvaliteta papira, kartona i lepenke. Za zaštitu kvaliteta papira, kartona i lepenke od velikog značaja su zajednički JUS-standardi, koji propisuju opšte odredbe o ispitivanju pojedinih svojstava papira. Ovi standardi propisani su pod brojevima JUS HN8.124 do JUS HN8.261 [37].

Sva svojstva papira koja se ispituju i na osnovu kojih se utvrđuje kvalitet papira, mogu se sistematizovati u više grupa i to: opšta, strukturna, kapilarna i hidroskopna, optička, štamparska, mehanička, elektroizolaciona, hemijska i posebna. Za navedene parametre kvaliteta postoje standardi ali bitno je

naglasiti da se ne rade ispitivanja svih parametara za svaku vrstu papira, već samo ona ispitivanja koja su karakteristična i bitna za standardni kvalitet date vrste papira koji se proverava.

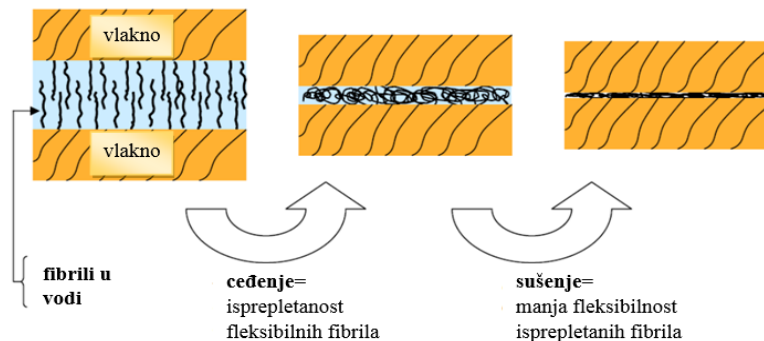
U praksi se kvalitet recikliranih vlakana celuloze generalno prati preko određivanja optičke karakteristike - beline, zaostale koncentracije čestica boja - ERIC, a ukoliko se process flotacije odvijao u baznim uslovima meri se i obojenje (žutilo) celuloznih vlakana [38].

Vlakna celuloze se mogu reciklirati više puta i koristiti kao sirovina za novi proizvod od papira koji bi imao zadovoljavajuće standardne kvalitete. Nakon višestrukog ponavljanja procesa recikliranja dolazi do promena osobina samih vlakana celuloze što se odražava na krajnji kvalitet papira.

Mnogi istraživači su ispitivali šta bi se moglo smatrati fundamentalnim problemima u procesu reciklaže otpadnog papira, odnosno kako na vlakna celuloze utiče proces reciklaže, kao i kakav je uticaj tako dobijenih vlakana celuloze na novonastali formirani papir.

Naučnik R. C. McKee je ukazao da mehaničke osobine vlakana, kao što su na primer otpornost na cepanje, a koje su obrnuto proporcionalne potencijalu međusobnog vezivanja vlakana, rastu uporedo broju ponavljanja procesa reciklaže. Takođe rastu i vrednosti optičkih karakteristika vlakana kao što su belina i opacitet, ali generalno se može reći i da do najvećih promena svih osobina koje definišu kvalitet vlakana, dolazi kod prva dva ciklusa reciklaže [39-41].

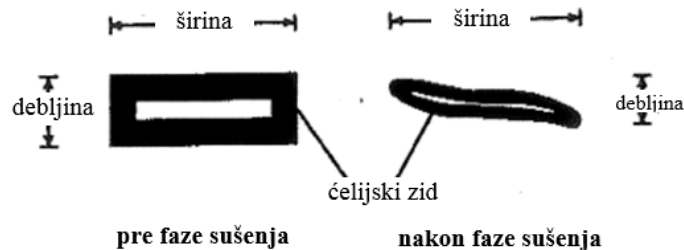
U istraživanjima Sheikh i sar., 2010, se ističe da veliki sadržaj ksilana (do 30 %) u pulpi od nedrvenaste celuloze ukazuje na dobar potencijal reciklaže celuloze odnosno otpadnog papira. Promene u svojstvima vlakana celuloze nakon višestrukog procesa reciklaže (hemijski tretman), uglavnom se odnose na kornifikaciju, smanjenje fleksibilnosti i stepen bubrenja vlakana i mogućnost njihovog međusobnog vezivanja usled slabljenje međuvlaknastih veza ili smanjenje broja tih veza, nakon odstranjivanja vlage odnosno uzastopnog sušenja vlakana nakon svakog procesa reciklaže [42-44].



Slika 9. Orijentacija fibrila celuloze u procesu izrade papira [40]

U vodenoj suspenziji (pulpi), vlakna imaju tendenciju da se raslojavaju otvaranjem pora između lamela i fibrila, prouzrokujući bubrenje vlakana. Tokom faze sušenja, uklanja se tečna faza – voda i pore se zatvaraju, prouzrokujući ireverzibilno fizičko skupljanje ćelijskog zida vlakana. Ponovnim kvašenjem vlakana u procesu

reciklaže u fazi dezintegracije, vlakna nemaju isti koeficijent adsorpcije vode, zbog ireverzibilne kornifikacije koji dovodi do gubitka fleksibilnosti vlakana, a samim tim i do redukovano gubitka bubrenja vlakana [41, 45, 46].



**Slika 10.** Šematski prikaz poprečnog preseka vlakana celuloze a) pre faze sušenja i b) nakon faze sušenja i kvašenja [47]

U mnogim radovima [47-50], preko koeficijenta zadržavanja vode, WRV (water retention value), koji predstavlja odnos vode i suvih vlakana nakon procesa centrifugiranja vlakana u standardnim uslovima, sagledava se uticaj višestrukog ponavljanja procesa reciklaže na kapacitet bubrenja vlakana, fleksibilnost vlakana i fibrilaciju. Takođe, u literaturi [41, 46, 47], se mogu naći i tumačenja istraživača o uticaju reciklaže otpadnog papira na kristaličnost celuloze, parametar koji pokazuje strukturu celuloze odnosno opisuje deo celuloze koji se nalazi u kristalnom uređenom stanju.

Analizom svih ovih radova može se konstatovati da smanjenje fleksibilnosti i plastičnosti vlakana je uslovljeno smanjenom sposobnošću bubrenja celuloze, povećanjem stepena kristaličnosti odnosno smanjenjem kontaktne površine između vlakana koja direktno utiče na potencijal vezivanja vlakana odnosno na potencijal vodonikovih veza.

Analizom svih pomenutih istraživanja, može se generalno reći da celulozna vlakna koja predstavljaju ulaz u ponovni proces dobijanja papira, tretiraju se određenim postupcima što prouzrokuje promene u karakteristikama vlakana. U fazi dezintegracije i dispergacije (u palperima i dispergatorima), dolazi do promene u dimenzijama vlakana celuloze (dužina vlakana se smanjuje mlevenjem a poprečni presek vlakana se smanjuje pod uticajem trenja pri dispergaciji). S obzirom da se u fazi dispergacije često dodaju agensi za beljenje, u ovoj fazi dolazi i do promena na površini vlakana. Sama struktura vlakna se može promeniti uticajem mehaničkih sila u fazama dezintegracije i dispergacije, ali i hemijskim dejstvom u fazi beljenja. Međutim, kako se ističe u predhodno pomenutoj literaturi, najveće deformacije u strukturi vlakana dešavaju se u fazi sušenja.

Sa druge strane, na fizičko-hemijske karakteristike sekundarne celuloze se može uticati dodavanjem određenih hemikalija u pojedinim fazama procesa reciklaže. Naučnici Howard i Bichard u svojim istraživanjima [50] konstatovali su da alkalna sredina u procesu reciklaže može uticati na poboljšanje fizičkih karakteristika vlakana, jer dolazi do povećanja kapaciteta bubrenja vlakana celuloze ali i do povećanja potencijala vezivanja vlakana. Mnogi naučnici [46, 51, 52] su potvrdili ovu konstataciju naglašavajući, da dodavanje natrijum hidroksida u fazi dezintegracije utiče na povećanje sposobnosti bubrenja celuloze, što dovodi do povećavanja fleksibilnosti vlakana a samim tim se sprečava i prekraćivanje vlakana celuloze u fazi mlevenja. Naučnik Sahin [41] je u svojim istraživanjima stavio akcenat na takozvano masno mlevenje celuloze (mlevenje manjeg inteziteta koje sprečava prekraćivanja vlakana jer se vlakna raslojavaju gnječenjem), kojim se mogu poboljšati fizičke karakteristike kao što su koeficijent prskanja, prekidna dužina ili broj dvostrukih savijanja. S obzirom da alkalni uslovi u fazi flotacije mogu uticati na optičke karakteristike vlakana celuloze (belina i opacitet), naučnici [46, 53-55] su pokazali da se pored optimalnih uslova pH sredine, pojava obojenja vlakana (žućenje celuloze u jako alkalnoj sredini), može se eliminisati dodavanjem agensa za beljenje u fazi dezintegracije i/ili dispergacije ali i punioca nakon faze flotacije (punioci prisutni u pulpi flotiraju zajedno sa česticama boje).

Sveobuhvatnom analizom može se reći da u zavisnosti od tipa pulpe (celuloze) i od izbora tehnologije za reciklažu papira, uzimajući u obzir i celokupni reagensni režim, uticaj pojedinih faza u procesu reciklaže na kvalitet sekundarne celuloze, je manji ili veći. Takođe treba naglasiti i da se primenom odgovarajućeg reagensnog režima može postići traženi



kvalitet celuloznih vlakana za formiranje i izradu određenje vrste papira.

## ZAKLJUČAK

Otpadni papir nije homogena sekundarna sirovina jer se njegov sastav i sam kvalitet razlikuju u zavisnosti od njegove prvobitne namene (novinski i magazinski papir, kancelarijski i papir za štampanje, karton). Međutim, bez obzira na sastav ulazne sekundarne sirovine, osnovna tehnološka šema reciklaže otpadnog papira obuhvata nekoliko faza (dezintegracija, prosejavanje, prečišćavanje, pranje i/ili flotacija, dispergacija, beljenje, tretman voda i odlaganje mulja) koje su generalno neophodne kod procesa reciklaže otpadnog papira. Analizom radova iz literature, može se reći da u zavisnosti od tipa pulpe (celuloze) i od izbora tehnologije za reciklažu papira, kao i izbora pojedinih uređaja u određenim fazama procesa reciklaže, sam uticaj procesa reciklaže na kvalitet sekundarne celuloze će biti manji ili veći.

U zavisnosti od namene sekundarnih vlakana celuloze, kvalitet istih može se korigovati mehaničkim ili hemijskim tretmanom.

Mehanički tretmanom pulpom dobijaju se vlakna celuloze koja imaju veće vrednosti koeficijenta prskanja i prekidne dužine ali je i broj dvostrukih savijanja veći.

Hemijskim tretmanom pulpe se utice na povećanje kapaciteta bubrenja sekundarne celuloze a samim tim i na povećanje potencijala vezivanja vlakana.

Kombinacijom ova dva tretmana moguće je postići traženi kvalitet celuloznih vlakana za formiranje i izradu određene vrste papira.

Često postavljano pitanje, da li je reciklaža papira ekonomski i ekološki opravdan proces u poređenju sa tretmanima kao što su spaljivanje, deponovanje ili njihova kombinacija?, analizom obrađene literature u radu se dolazi do zaključka da je potrošnja energije kao i emisija gasova manja, u poređenju sa potrošnjom energije i emisijom gasova koji nastaju u procesu proizvodnje papira od primarnih resursa, ali se akcenat stavlja na to da će stvarna ekonomska dobit zavisiti od izbora tehnologije za reciklažu.

## Literatura

1. Drzymala, J., (2007) *Mineral Processing, Foundations of theory and practice of mineralurgy*, 1<sup>st</sup> English edition, Wroclaw University of Technology, Poland
2. Finnveden, G., Ekvall, T., Life-cycle assessment as a decision-support tool—the case of recycling versus incineration of paper, *Resources, Conservation and Recycling* **1998**, *24*, 235–256.
3. Ekvall, T., Key methodological issues for life cycle inventory analysis of paper recycling, *Journal of Cleaner Production* **1999**, *7*, 281–294.

4. Bjorklund, A., Finnveden, G., Recycling revisited - life cycle comparisons of global warming impact and total energy use of waste management strategies, *Resources, Conservation and Recycling* **2005**, *44*, 309–317.
5. Villanueva, A., Wenzel, H., Paper waste – Recycling, incineration or landfilling? A review of existing life cycle assessments, *Waste Management* **2007**, *27*, S29–S46.
6. Merrild, H., Damgaard, A., Christensen, T. H., Life cycle assessment of waste paper management: The importance of technology data and system boundaries in assessing recycling and incineration, *Resources, Conservation and Recycling* **2008**, *52*, 1391–1398.
7. Laurijssen, J., Marsidi, M., Westenbroek, A., Worrell, E., Faaij, A., Paper and biomass for energy? The impact of paper recycling on energy and CO<sub>2</sub> emissions, *Resources, Conservation and Recycling* **2010**, *54*, 1208–1218.
8. Jiang, C., Ma, J., (2000) *Deinking of waste paper: flotation*, Encyclopedia of Separation Science, Academic press, 2537–2544,
9. Gong, R., (2013) *New Approaches on Deinking Evaluations*, Dissertations. Western Michigan University, Paper 184.
10. Sauvé, P. C., (1999) *The Effect of Flotation Deinking Process Parameters on Air Bubble Size and Deinking Efficiency*, Dissertations. McGill University, Paper 156.
11. Dorris, G., Ben, Y., Richard, M., Overview of flotation Deinking, *Progress in paper recycling*, **2011**, *20* (1), 3-43.
12. Sarja, T., (2007) *Measurement, nature and removal of stickies in deinked pulp*, Dissertations. OULU University, Paper 79.
13. Behin, J., Vahed, Sh., Effect of alkyl chain in alcohol deinking of recycled fibers by flotation process, *Colloids and Surfaces A: Physicochem. Eng. Aspects*, **2007**, *297*, 131–141.
14. Dorris, G.M., Sayegh, N.N., The role of print layer thickness and cohesiveness on deinking of toner printed papers, *Pulping Conference Proceedings*, TAPPI PRESS, **1994**, 1273-1289.
15. Johansson, B., Pulping chemistry - Effects and adaptation to regional differences in waste paper furnish, *proceedings from the 10th PTS-CTP Deinking Symposium*, Munich, 23-25 April 2002, Paper no. 13.
16. Vashisth, S., Bennington, C.P.J., Grace, J. R., Kerekes, R. J., Column Flotation Deinking: State-of-the-art and opportunities, *Resources, Conservation and Recycling*, **2011**, *55*, 1154-1177.
17. Borchardt, J. K., Mechanistic insights into deinking, *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, **1994**, *88*, 13-25.

18. Ferguson, L. D., Deinking chemistry: part 1, *Tappi Journal*, **1992**, 75-83.
19. Somasundaran, P., Lei, Zhang, S., Krishnakumar and Richard Slepety, Flotation Deinking - A Review of the Principles and Techniques, *Progress in Paper Recycling*, **1999**, 22-36.
20. Miller, J.D., Azevedo, M.A.D., Nie, X., Drelich, J., Recycling office waste-recovered paper deinking, *Paper Recycling Challenge-Deinking & Bleaching*, Doshi & Associates Inc., **1997**, 2, 167-182.
21. Azevedo, M.A.D., Drelich, J., Miller, J.D., The Effect of pH On Pulping and Flotation of Mixed Office Wastepaper, *Journal of Pulp And Paper Science*, **1999**, 25(9), 317- 320.
22. Borhardt, J. K., Miller, J. D., Azevedo, M. A. D., Office Paper Deinking, *Colloid & Interface Science*, **1998**, 3, 360-367.
23. Ferguson, L. D., Deinking chemistry: part 2, *Tappi Journal*, **1992**, 49-58.
24. Carr, W. F., New trends in deinking technology - removing difficult inks from wastepaper, *Tappi Journal*, **1991**, 74 (2), 127-132.
25. Shrinath, A., Szewczak, J. T., Bowen, I. J., A review of ink-removal techniques in current deinking technology, *Tappi Journal*, **1991**, 74 (7), 85-93.
26. Merriman, K., (1993) *Cleaning for contaminant removal in recycling – fiber systems*, in *A secondary fiber recycling*, Ed. Spanenberg, R.J., TAPPI Press, Atlanta, 101– 122.
27. Fricker, A., Thompson, R., Manning, A., (2007) *Novel solutions to new problems in paper deinking, Pigment & Resin Technology*, Emerald Group Publishing Limited, 36/3, 141–152.
28. Borhardt, J. K., The use of surfactants in deinking paper for paper recycling, *Current Opinion in Colloid & Interface Science*, **1997**, 2, 402-408.
29. Bliss, T., Screening, I., (1993) *A secondary fiber recycling*, Ed. Spanenberg, R.J., TAPPI Press, Atlanta, 125 – 140.
30. Emerson, Z. I., (2007) *Particle and bubble interactions in flotation systems*, Dissertation, Auburn University, Alabama, USA, 133.
31. Roberts, J.C., (1996), *The chemistry of paper*, The Royal Society of Chemistry, Cambridge, UK, p. 190.
32. Usherson, J., Recycled paper and sludge, *Resource recycling*, **1992**, 95-100.
33. Scott, G. M., Abubakr, S., Smith, A., Sludge characteristics and disposal alternatives for recycled fiber plants, *Recycling Symposium*, TAPPI Proceedings, **1995**, 239-249.
34. Deviatkin, I., (2013) *Wastewater treatment and deinking sludge utilization possibilities for energy and material recovery in the Leningrad*, Masters Thesis, Lappeenranta University of Technology, 111.
35. Presta, M. S., (2006) *Estudi fonamental i aplicat de l'etapa d'eliminació de tinta per flotació*, Dissertation, Universitat de Girona, Girona, 325.
36. Svensson, R., (2011) *The influence of surfactant chemistry on flotation deinking*, Dissertation, University of Technology, Sweden, 52.
37. Križan, M., (1997) *Savremena proizvodnja papira*, Beograd: Mrlješ
38. Pauck, W. J., Venditti, R., Pocock, J., Andrew, J., Neural network modelling and prediction of the flotation deinking behaviour of industrial paper recycling processes, *RECYCLING Nordic Pulp & Paper Research Journal*, **2014**, 29(3), 521-532
39. McKinney, R.W.J., (1995) *Technology of Paper Recycling*, Published by Blackie Academic & Professional, an imprint of Chapman & Hall, London, Weinheim, New York, Tokyo, Melbourne, Madras.
40. Hokka, J., (2013) *Strength and drainage polymer chemistry for liner and fluting*, Master's thesis, Aalto University, School of Chemical Technology, Finland.
41. Sahin, T. H., A study on paper recycling effects on cellulose properties, *SDU Faculty of Forestry Journal*, **2013**, 14, 74-80.
42. Sheikhi, P., Talaeipour, M., Hemasi, A. H., Eslam, H. K., Gumuskaya, E., Effect of drying and chemical treatment on bagasse soda pulp properties during recycling, *BioResources*, **2010**, 5(3), 1702-1716.
43. Hamzeh, Y., Sabbaghi, S., Ashori, A., Improving wet and dry strength properties of recycled old corrugated carton (OCC) pulp using various polymers. *Carbohydrate Polymers*, **2013**, 94, 577-583.
44. Wang, X., Maloney, T. C., Paulapuro, H., Internal fibrillation in never-dried and once-dried chemical pulps, *APPTA Journal*, **2003**, 56 (6), 455-459.
45. Bhardwaj, N.K., Kumar, S., Bajpai, P.K., Effect of zeta-potential on retention and drainage of secondary fibres. *Colloids and Surfaces A: Physicochem. Eng. Aspects*, **2005**, 260, 245-250.
46. Hubbe, M., Prospects for maintaining strength of paper and paperboard products while using less forest resources: a review. *BioResources*, **2014**, 9(1), 1634–1763.
47. Brancato, A. A., (2008) *Effect of progressive recycling on cellulose fiber surface properties*, Dissertation, Georgia Institute of Technology, 131.
48. Sheikhi, P., Talaeipour, M., Comparison mechanical and chemical treatments on properties of low yield bagasse pulp during recycling, *International Scholarly and Scientific Research & Innovation*, **2011**, 5(9), 787-790.
49. Bouchard, J., Douek, M., The effects of recycling on the chemical properties of pulps, *Journal of pulp and paper science*, **1994**, 20 (5), 131-136.

50. Howard, R.C., Bichard, W., The basic effects of recycling on pulp properties. *Journal of Pulp Pap. Sci.*, **1992**, 18(4), 151-159.
51. Misman, M., Alwi, S. R. W., Manan, Z. A., State-of-the-art for paper recycling, *International Conference on Science and Technology (ICSTIE)*, **2008**, 12-13 December 2008, Universiti Teknologi MARA, Pulau Pinang, Malaysia
52. Turvey, R. W., (1995) *Chemical use in recycling*. In R. W. J. McKinney (Ed.), *Technology of paper recycling* London, U.K.: Blackie, p. 130.
53. Mahagaonkar, M., Banham, P., Effects on deinking on optical and psysical properties of secondary fiber after pulping and flotation, *APPITA*, **1995**, 48(6)
54. Shen, J. F., Springer, A. M., Abubakrv S., The influence of clay addition on flotation deinking, *Recycling Symposium*, **1995**, 257-267.
55. Bajpai, P., (2014) *Recycling and Deinking of Recovered Paper*, 1st Edition, 240.