



www.ror.edu.rs

Stručni rad

UDK 628.477.6.043

POSTUPCI RECIKLAŽE PLASTIČNOG OTPADA SA POSEBNIM OSVRTOM NA MEHANIČKI TRETMAN

METHODS OF PLASTIC WASTE RECYCLING WITH EMPHASIS ON MECHANICAL TREATMENT

Milan Trumić[#], Maja Trumić, Grozdanka Bogdanović

Univerzitet u Beogradu, Tehnički fakultet u Boru, Bor, Srbija

Primljen: 31. oktobar 2012.

Prihvaćen: 29. novembar 2012.

IZVOD – Potrošnja proizvoda od plastike je značajno povećana tokom poslednjih nekoliko decenija. Ovaj trend ima za posledicu stvaranje ogromnih količina otpada sa kojim treba pravilno upravljati da bi izbegli uništenje životne sredine. Proces reciklaže je opcija sa velikim potencijalom za rešavanje ovog problema. Ovaj proces je osmišljen da transformiše plastični otpad u nove materijale za proizvodnju plastike i obuhvata različite metode kao što su: Re-ekstrudiranje, mehaničke metode, hemijske metode i iskorišćenje energije. U ovom radu dat je pregled trenutne situacije generisanja plastičnog otpada u Evropi i opšti pregled alternativnih metoda za reciklažu.

Ključne reči: reciklaža, plastičan otpad, mehanički tretman

ABSTRACT - Consumption of plastic products shows a dramatic increase over the past few decades. This upward trend is generating large amounts of waste that must be properly managed to avoid environmental damage. An option, with great potential, for resolving this problem is recycling process. This process is designed to transform plastic waste into new material for plastics productions and includes a variety of methods like re-extrusion, mechanical method, chemical method and energy recovery. This paper summarizes the current situation regarding the generation of plastic waste in Europe and provides a general view of alternative recycling methods.

Key words: recycling, plastic waste, mechanical treatment

1. UVOD

Plastika predstavlja organski polimer koji se sastoji od grupa monomera koji sadrže ugljenik i vodonik. Prirodni polimeri se koriste od nastanka sveta dok su sintetički polimeri znatno mlađi. Prvi sintetički polimer

koji je proizveden za industrijsku primenu nazvan je Parkesin po prezimenu istraživača Aleksandra Parkesa. Prvi put je predstavljen 1862. godine na izložbi u Londonu da bi kasnije promenio naziv u celulozid [1]. To je organski materijal dobijen iz celuloze koji ima sposobnost lakog modeliranja na određenoj povišenoj

[#] Kontakt adresa autora: M. Trumić, Univerzitet u Beogradu, Tehnički fakultet u Boru, Vojske Jugoslavije 12, 19210 Bor, Srbija.
E-mail: mtrumic@tf.bor.ac.rs

temperaturi i sposobnost zadržavanja tog oblika prilikom hlađenja. U to vreme, koristio se za proizvodnju ukrasa, korica noževa, manžetni, ogrlica itd.

Hemičar Leo Hendrik Baekelund, Belgijanc rođen u Americi, mešavinu fenola pronašao je mešavinu fenola (C_6H_5OH) i formaldehida ($HCOH$) koji kada se pomešaju i zagrevaju daju lepljivu masu, pri čemu ista postaje izuzetno čvrsta-tvrda kada se ohladi i osuši. On je objavio svoje otkriće 1909. godine, i dao mu naziv "Bakelit". On se prvobitno koristio za elektro i mehaničke delove, da bi najzad ušao u široku upotrebu 1920. [1]. Bakelit je bio prva prava plastika. To je potpuno sintetički materijal, koji nije baziran ni na jednom materijalu ili čak molekulu pronađenom u prirodi. To je takođe prva "termoset" plastika.

Bakelit je jeftin, jak i trajan. Najzainteresovanija je bila vojna industrija jer je bakelit bio sastavni deo velikog broja korišćenog oružja u drugom svetskom ratu [2].

Rad nemačkog hemičara Hermana Staudingera na tumačenju strukture plastičnih materijala pokrenulo je čitavu lavinu naučnih istraživanja koja su doprinela stvaranju velikog broja novih proizvoda od plastike.

Veštačka svila-Raylon predstavlja drugi tip modifikovane celuloze koja je pronađena 1891. u Parizu od strane Louis Marie Hilaire Bernigaut-a [1].

Švajcarac Jacques Edwin Brandenberger je otkrio celofan 1900. godine, i došao na ideju da proizvede čist, zaštitni ambalažni omot.

Poliamid (PA), poznatiji kao najlon bio je "zvezda" plastične industrije 1930. godine. Najlon je prvo, potpuno sintetičko vlakno, koje je proizvedeno od strane Du Pont korporacije pred prvi svetski rat u Njujorku [1]. Najlon je do danas ostao važna vrsta plastike i to ne samo za proizvodnju tkanine. On je veoma otporan i zato se koristi za proizvodnju opreme i za druge mehaničke delova.

Laborant Ralph Wiley 1933. godine je slučajno otkrio još jedan tip plastike: poliviniliden hlorid (poznatiji kao Saran). Saran se prvobitno koristio kao zaštita za vojnu opremu, ali je kasnije otkriveno da je on odličan kao ambalaža za hranu.

Sredinom tridesetih pojavili su se pored najlona i polivinil hlorid (PVC) i polistirenske smole.

Istraživači Fawcett i Gibson su pronašli polietilen (PE), a hemičar DuPont-a, Roy Plunkett, otkrio je 1938. novi materijal, Teflon. Teflon se danas najviše koristi u proizvodnji kuhinjskog posuđa. Plunkett je ovaj materijal otkrio slučajno, prilikom pumpanja gasa freona kroz cilindar hladne baterije. Gas se raspršio u beli prah.

Teflon je jedinstven zbog toga što je nepropusan za kiseline pri dodavanju u toplom ili hladnom stanju [3].

Od 1950, proizvodnja plastike beleži industrijski rast, a od 1976, plastika postaje najprimenljiviji materijal u svetu.

U novije vreme aktivno istraživanje i razvoj usmereni su na tzv. biorazgradivu plastiku. Prema definiciji Američkog društva za testiranje i materijale (ASTM), biodegradabilna plastika je svaka plastika koju mogu da razgrade mikroorganizmi, kao što su bakterije, gljivice i alge, koje postoje u životnoj sredini.

Plastika bazirana na skrobu postoji već neko vreme, a popularna je zbog relativno jednostavnog procesa dobijanja i niske cene. Ona se može dobiti od kukuruza ili krompira, odnosno od nus-proizvoda poljoprivredne proizvodnje. Ovi materijali najčešće se koriste za ambalažu, ali problem je u tome što se u dužem kontaktu sa vodom i na toploti razgrađuju [4]. Konstantno se sprovode istraživanja radi unapređenja osobina ove vrste plastike.

Poslednjih decenija, svoju popularnost, plastika je stekla upravo zbog zadržavanja svojih mehaničkih osobina nakon modeliranja, gnječenja, izvlačenja u niti i reciklaže nakon upotrebe.

Struktura i stepen polimerizacije utiče na karakteristike polimera. Linearni polimeri (jedinstven linearni lanac monomera) i Razgranati polimeri (linearni lanac sa bočnim lancima), nazivaju se termoplastika i nakon zagrevanja i omekšavanja, hlađenjem se vraćaju u čvrsto stanje (npr. polivinilhlorid, polietilen, polistiren). Poprečno vezani polimeri (dva ili više linearna lanca vezanih poprečnim lancima monomera) nazivaju se termoset (termoreaktivna) plastika koja je otporna na visoke temperature, tako da na povišenoj temperaturi očvrstne i ne može biti ponovo oblikovana (bakelit, aminoplasti). Termoplastični materijali čine skoro 80% od svih vrsta plastike koja se koristi u Evropi, veoma se lako mogu reciklirati za razliku od termoset plastike, i zato posebnu pažnju treba obratiti da se ove dve vrste plastičnih materijala sakupljaju odvojeno [2, 5].

Plastične mase se prerađuju valjanjem u folije, ubrizgavanjem, istiskivanjem pod pritiskom, itd. Zbog svojih mehaničkih i hemijskih svojstava i mogućnosti oblikovanja, plastične mase su potisnule mnoge druge materijale. Plastični materijali se već godinama upotrebljavaju za izradu ambalaže, iako predstavljaju problem sa aspekta zaštite životne sredine. Razlozi za sve veću primenu su između ostalih, niska cena sirovina, mala masa i različite mogućnosti prerade. Specifična potrošnja energije pri proizvodnji plastičnih materijala,

koji se koriste za izradu ambalaže, mnogo je manja nego pri proizvodnji ambalaže od npr. stakla ili aluminijuma.

Plastični otpad se u velikim količinama odlaze na deponije, a vrlo često i van deponija. Odlaganje otpada na deponije je naročito nepovoljan za plastični ambalažni otpad zbog zauzimanja velikog prostora zbog voluminoznosti, nerazgradivosti pod uticajem atmosferilija i odlaganja iskorišćenja tih materijala kao sirovinke ili energetske vrednosti.

Smanjenje otpada kroz ponovnu upotrebu ili reciklažu doprinosi očuvanju i zaštiti životne sredine, uštedi prirodnih resursa i ekonomskom razvoju što predstavlja osnovu održivog razvoja [6].

Od reciklirane plastike dobija se sintetički materijal koji može da se upotrebi za proizvodnju odevnih predmeta, folija, nove ambalaže (flaša, kanti, burića...) i drugih proizvoda.

Za neke vrste plastike, ambalažna industrija je glavno tržište. Ostatak se upotrebljava u drugim granama industrije. Evropska industrija plastike opredelila se za maksimizaciju upotrebe otpadne plastike kao resursa i minimizaciju odlaganja otpadne plastike na deponije. Ovo podrazumeva iskorišćenje plastike kroz mehaničku ili hemijsku reciklažu ili kao

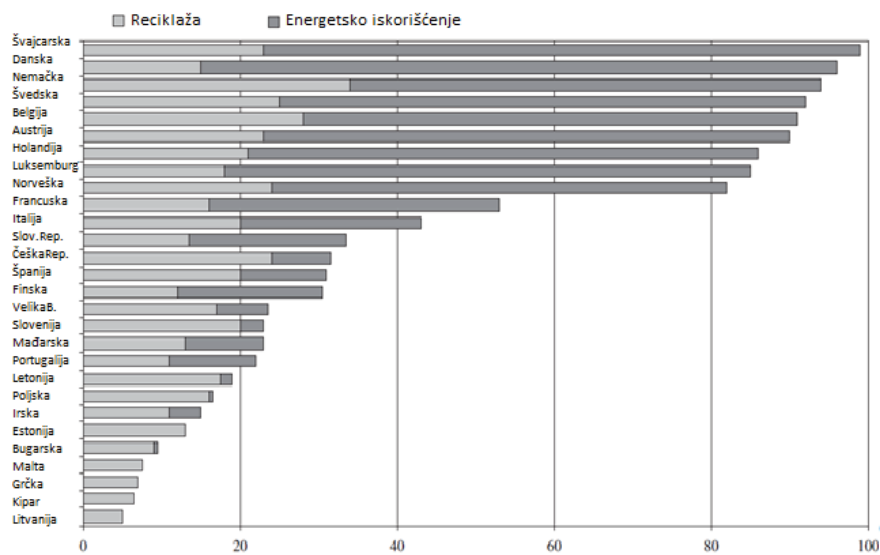
energetsku sirovinu, na putu prilaza integralnom upravljanju otpadom. Ovakva politika je u skladu sa Direktivom Evropske unije za ambalažu i ambalažni otpad koja je postavila za cilj da ukupno iskorišćenje otpada od ambalaže bude minimum 45% od kojih 15% materijala mora biti recikliran [3].

2. UPRAVLJANJE PLASTIČNIM OTPADOM U EU

Prosečno generisanje komunalnog čvrstog otpada u EU je 520 kg po osobi godišnje i projektovano je da se poveća do 680 kg po osobi po godini do 2020 godine [7]. U Srbiji se u proseku generiše 0,87 kg komunalnog otpada po glavi stanovnika, što predstavlja 320 kg otpada po osobi godišnje. [8].

Plastični ambalažni materijal je ambalažni materijal sa najvećom stopom rasta u poslednjoj deceniji.

Čak i unutar EU postoji širok spektar prioriteta u upravljanju čvrstim komunalnim otpadom, od onih koji su u velikoj meri usmereni ka deponovanju do onih usmerenih prvenstveno ka insineraciji, dok procenat reciklaže značajno varira. (Slika 1).

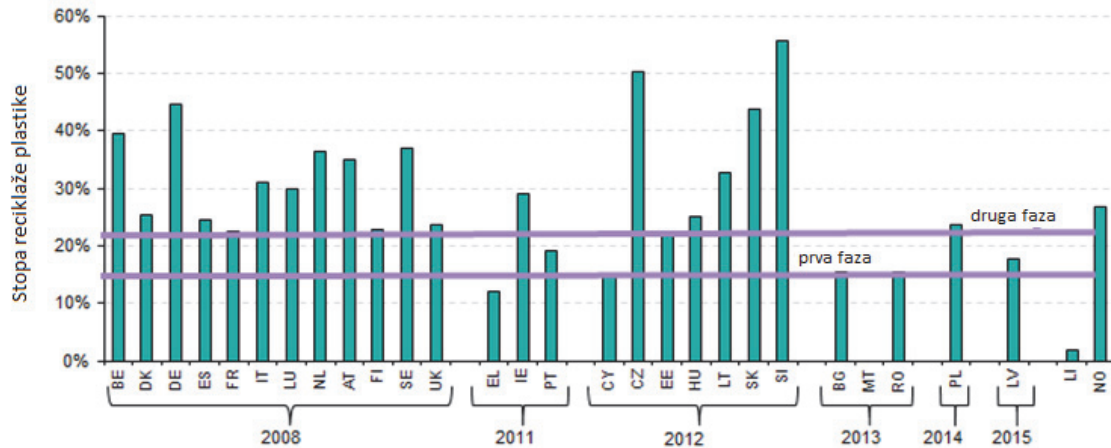


Slika 1. Stopa mehaničke reciklaže i energetskog iskorišćenja otpadne plastike u zemljama EU [9]

Sa slike 1 se jasno uočava da su visoke stope ponovnog korišćenja plastike postignute zahvaljujući procesima dobijanja energije spaljivanjem. Neke države članice EU pokrivene su opštinskim postrojenjima za spaljivanje otpada uz dobijanje energije i one su automatski postigli stopu od skoro 100% (npr. Danska,

Nemačka, Holandija, Austrija, Luksemburg).

Na slici 2. se može videti stopa reciklaže, odnosno samo procenat mehaničke reciklaže materijala koji se ponovo koristi za proizvodnju proizvoda od plastike, u državama u EU.



Slika 2. Stopa reciklaže za ambalažnu plastiku [10]

Na slici su prikazane i ciljne vrednosti reciklaže za prvu (15%) i drugu (22,5%) fazu. Sve zemlje EU su morale da ispune ciljne vrednosti prve faze do kraja 2007, osim Malte i Bugarske (kraj 2009) i Rumunije (kraj 2011). Stopa reciklaže prikazana na slici 2 pokazuje da Grčka (12%) i Kipar (14,8%) nisu postigli ciljeve prve faze. Bugarska (15,6%) i Rumunija (15,5%) su postigli cilj pre odgovarajućeg roka. Sve države članice koje su imale rok kraj 2008 za ispunjenje drugog cilja su to i ostvarile, a neke zemlje koje su imale kasniji rok su već postigle zadati cilj: Irska (29%), Češka (50%), Mađarska (25%), Litvanija (33%), Slovačka Republika (44%), Slovenija (56%) i Poljska (24%)[10].

Kao pozitivan primer u oblasti upravljanja otpadom u Srbiji je donošenje seta zakona o ambalažnom otpadu. Nakon usvajanja zakona definisani su i ciljevi za reciklažu ambalažnog otpada: 4% u 2010, 8% u 2011, 13% u 2012, 19% u 2013. i 25% u 2014. godini [8, 11]. Na osnovu podataka Agencije za zaštitu životne sredine Republike Srbije može se zaključiti da je Nacionalni cilj za Republiku Srbiju za 2011. godinu (14,55%) ispunjen i premašen. [12]

3. VRSTE I KARAKTERISTIKE PLASTIKE

Podela i označavanje plastičnih proizvoda je od izuzetnog značaja za sam proces recikliranja plastike, naročito za proces sortiranja, a zatim i za dalji tretman. Iako se u svetu koristi više sistema označavanja prema određenim standardima, može se reći da se svi oni uglavnom baziraju na standardu ISO 1043-1 i sa malim modifikacijama izgledaju kako je prikazano na slici 3.

Američko udruženje plastične industrije ASPI razli-

kuje sedam kategorija polimera iz procesa recikliranja. Reciklirana plastika se svrstava u kategorije prema osnovnom hemijskom sastavu.



Slika 3. Simboli za označavanje plastike

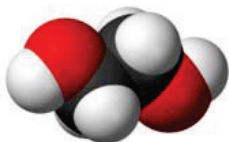
Simboli imaju dvostruku ulogu. Potrošačima oni uglavnom ukazuju da se ambalaža može reciklirati, a onima upućenijima i onima koji se bave reciklažom ukazuju i na vrstu primenjene plastike [13].

PET- Polietilen Tereftalat $(-(C_{10}H_8O_4)_n)$

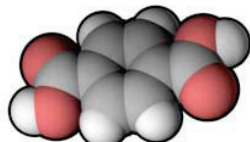
Polietilen Tereftalat je polimer koji je oformljen kombinacijom dva monomera nazvani modifikovani ethylene glycol-A i prečišćena terephthalic kiselina-B [2,14,15].

Osobine:

- amorfan ili delimično kristalan prah bele boje
- gustina 1330-1455 kg/m³
- molarna masa 10 000 do 40 000 g/mol
- otporan na dejstvo hladne vode, ulja, masti, nepolarnih i slabo polarnih rastvarača
- neotporan na vruću vodu, vodenu paru, koncentrovane kiseline i baze, polarne rastvarače
- poseduje dobre mehaničke osobine, otpornost na dejstvo svetla, dobre elektroizolacione osobine.



A



B

PET je popularno pakovanje za prehrambene i neprehrambene proizvode. Proizvođači koriste PET plastiku za pakovanje proizvoda zbog svoje čvrstoće, termo stabilnosti i providnosti. Potrošači biraju PET zato što je jeftin, lak, otporan na udarce i može da se reciklira.

Ova vrsta plastike se danas najviše reciklira i ujedno je najtraženija na tržištu.

PE – Polietilen (-(-C₂H₄-)n)

Polietilen je izveden polimerizacijom etilen monomera-C [2,14,15]. Polietilen je veoma raznovrstan i služi kao osnova za različite materijale koji se koriste u pakovanju. To su plastične mase providne ili neprovidne. U zavisnosti od dužine lanca polimera i njegove gustine razlikujemo sledeće varijetete: LDPE (polietilen niske gustine) i HDPE (polietilen visoke gustine). Razlika nastaje usled korišćenja različitih pritisaka pri proizvodnji.

Osobine:

- bele boje,
- dobre elektroizolacione osobine,
- dobra hemijska otpornost,
- providnost tankih filmova



C

PE - HDPE – Polietilen Visoke Gustine

Linearni polimer, High Density Polyethylene (HDPE) se pravi od etilena (ethylene) katalitičkim procesom. Definiše se gustinom većom ili jednakom 0,941 g/cm³. HDPE ima nizak stepen grananja, karakteriše ga jača međumolekularna sila tj. zatezna snaga i potrebno je uložiti velike napore prilikom

istezanja. Smanjenje grananja obezbeđuje se primenom odgovarajućih katalizatora i uslova prilikom polimerizacije. HDPE je neproziran i može da izdrži veće temperature, u odnosu na LDPE (može izdržati temperaturu od 120 °C u kratkom periodu, a 110 °C u stalnom zagrevanju).

HDPE pruža naročito dobre karakteristike za proizvodnju flaša i balona. Glavne prednosti su mala cena i dobra hemijska otpornost. Koristi se za veliki broj različitih proizvoda[2,14,15].

PE - LDPE – Polietilen Niske Gustine

To je rastegljiva smola bolja od HDPE u providnosti i jačini ali slabija u hemijskoj otpornosti. Prvi poliolefini su pravljani pre oko pedeset godina polimerizacijom etilena pod visokim pritiskom. LDPE ima visok stepen kako kratkih tako i dugih lanaca što znači da lanci nisu efikasno upakovani u kristalnu strukturu. Ovo rezultuje manjom zateznom čvrstoćom i povećanom rastegljivošću. LDPE je korisna i široko primenjiva plastika. Delimično je providna ili neprovidna. Gustina se kreće u opsegu 0.910 - 0.940 g/cm³. Može se koristiti na temperaturi od 90 °C u kratkim vremenskim intervalima a na temperaturi od 80 °C konstantno.

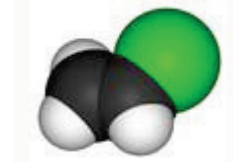
LDPE je najviše pogodan za proizvodnju laboratorijskog posuđa uključujući flaše za pranje, pipete opreme za pranje i rezervoare [2,14,15].

PVC – Polivinil Hlorid (-(-C₂H₂Cl)-)n)

Strukturno PVC je vinilni polimer. Sličan je polietilenu samo što je svaki drugi ugljenični atom u kičmenom lancu zamenjen atomom hlora. Proizvodi se pomoću slobodnih radikala polimerizacijom vinila hlorida-D [2,14,15].

Osobine:

- čvrst beli prah, gustine 1350- 1460 kg/m³
- molarna masa 50 000–150 000 g/mol
- otporan na kiseline i baze
- rastvorljiv u alkoholu i mnogim rastvaračima
- omekšava na 92 -94 °C, a topi se na 170 °C
- poseduje dobre elektroizolacione i toplotno izolacione osobine



D

PVC je koristan jer je otporan i na vatru i na vodu, zbog nepropustljivosti vode najširu primenu je našao za proizvodnju cevi za vodu. Otporan je na vatru pošto

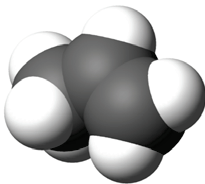
sadrži hloride. Kada pokušate da zapalite PVC oslobađa se hlor koji guši vatru.

PP – Polipropilen ((-C₃H₆)-(n))

Polipropilen je linearni ugljovodonični polimer, izražava se kao C_nH_{2n} (kao polietilen) i polibutan (PB) i predstavlja poliolefin ili zasićen polimer. Polipropilen je strukturno vinilni polimer, sličan je polietilenu osim što se za svaki drugi atom ugljenika u osnovnom lancu vezuje metil grupa. Polipropilen je izveden polimerizacijom propilena-E [2, 14, 15].

Osobine:

- čvrst polimer bez ukusa i mirisa, sa vrlo malom gustinom, 900 -910 kg / m³
- molarna masa 60 000–200 000 g/mol
- temperatura topljenja 164 -170 °C
- izvredna hemijska otpornost
- poseduje dobre elektroizolacione i mehaničke osobine
- visoko izražena hemijska otpornost



E

Polipropilen je jedan od najrasprostranjenih polimera koji je pogodan za upotrebu, kao plastika i kao vlakno. Kao plastika koristi se za posuđe za hranu, zato što može da se koristi u mašinama za pranje sudova jer je izdržljiv na temperaturama do 160 °C. Polyethylene koji se češće sreće počinje da se topi na oko 100 °C što ograničava njegovu upotrebu.

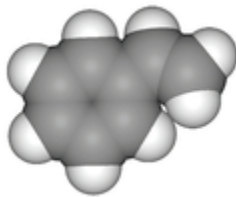
Kao vlakno koristi se za pravljenje podloga za oblaganje oko unutrašnjih ili spoljašnjih bazena ili malih golf terena. Pogodan je za oblaganje spoljašnjih terena pošto ne apsorbuje vodu kao što je to slučaj sa najlonom.

PS – Polistiren ((-C₆H₅CH=CH₂)-(n))

PS je vinilni polimer. Strukturno to je dugačak ugljovodonični lanac, sa fenilnom grupom na svakom drugom ugljenikovom atomu. PS je proizveden pomoću slobodnih radikala vinilnom polimerizacijom od monomera stirena-F [2,14,15].

Osobine:

- čvrst amorfan prah, gustine 1052-1060 kg/m³
- molarna masa 50 000–200 000 g/mol
- otporan na soli i kiseline
- neotporan na aromatične ugljovodonike, ketone, estre i aldehide



F

- u benzinu bubri
- čvrst polistirol ima visoku zateznu čvrstoću, dobre elektroizolacione osobine
- lako se prerađuje
- omekšava već na 80 °C, a topi se na 170 °C

PS je jeftina, tvrda plastika i jedino je polietilen više zastupljen u svakodnevnoj upotrebi. Koristi se za kućišta kompjutera, makete kola i aviona, plastične čaše, unutrašnjost automobila, igračke, kućne aparate itd.

4. TEHNOLOGIJE RECIKLAŽE OTPADNE PLASTIKE

Efikasno sortiranje plastike, kao i kontinualno praćenje različitih tokova plastičnog otpada, su dva ključna pitanja za razvoj optimalne strategije za reciklažu plastičnog čvrstog otpada. Posmatrano iz ovog ugla tehnologije za reciklažu plastike mogu se podeliti u četiri osnovne kategorije [16, 17, 18].

- Primarna: Re-ekstrudiranje, odnosno ponovno vraćanje plastike istih karakteristika u sam proizvodni proces
- Sekundarna: Mehanička, razvijena u cilju reciklaže različitih proizvoda od plastike fizičkim postupcima
- Tercijarna: Hemijska, namenjena da proizvede sirovine za hemijsku industriju
- Kvarterna: Dobijanje energije, odnosno, potpuna ili delimična oksidacija plastičnih otpadnih materijala u cilju proizvodnje toplote, i / ili gasovitih goriva, ulja, i / ili materijala koji se odlaže (na primer, pepeo)

U nastavku, obratiće se posebna pažnja na sekundarnu tj. mehaničku reciklažu. Mehanička reciklaža je jedina od četiri pomenutih pristupa koja maksimizira "iskorišćenje plastičnog otpada", uz minimiziranje negativnog uticaja na životnu sredinu.

4.1. Re-ekstrudiranje

Osnovna pretpostavka za Re-ekstrudiranje je da iskorišćeni komadići otpada moraju u osnovi biti polimeri koji imaju iste karakteristike kao prvobitni proizvod [16,19]. Gotovi proizvodi koji proizilaze iz ovog procesa nemaju zadovoljavajuću strukturu pa se najčešće upućuju na upotrebu gde su mehanička svojstva važnija od sastava (npr. plastične gajbe).

Primarna reciklaža, tj. re-ekstrudiranje je izvodljivo samo sa polu-čistim otpadom, što je nepopularno kod reciklera. Na primer, proizvodnja plastičnih gajbi od LDPE plastike dobijene Re-ekstrudiranjem često ne zadovoljavaju standarde i moraju da se presuju i ponovo

vrate u proces proizvodnje [16,19].

4.2. Mehanička reciklaža plastike

Kod primene mehaničke reciklaže važno pitanje predstavlja izbor načina sortiranja i raličitih faza prerade plastike. Uprkos ubrzanom tehnološkom razvoju, i dalje je najčešće ručno sortiranje plastike. Ručno sortiranje je jednostavan proces koji zahteva vrlo malo tehnologije. To je radno intenzivna, skupa i neefikasna metoda za sortiranje materijala a posebno plastike. Iz tog razloga, kao što je u prethodnom tekstu navedeno, uveden je sistem označavanja sa kodovima za šest najčešće korišćenih tipova plastike, kao što je prikazano na slici 3. Čak i sa ovim sistemom označavanja, još uvek je teško ručno odvajati različite tipove polimera zbog stanja plastike koja dođe u pogon na razdvajanje. Plastične posude mogu biti slomljene, napukle ili sa pokrivenim oznakama, čineći oznaku plastike praktično neupotrebljivom. U svakom slučaju, sistematsko i intenzivno ručno sortiranje plastičnih delova, flaša, može biti kontraproduktivno imajući u vidu da postoji brža i tačnija tehnologija sortiranja plastike. U poslednjih nekoliko godina istraživane su, razvijane i sprovedene brojne metode za automatsko razvrstavanje plastike. One se mogu podeliti u dve kategorije u skladu sa veličinom plastičnih predmeta za sortiranje[13]:

- *Makro sortiranje*, koje se bavi razdvajanjem celih boca i posuda. Ovakav pristup ima tu prednost da ne zahteva nikakvu posebnu pripremu uzorka pre sortiranja. Ovaj metod se zasniva na prepoznavanju specifičnih osobina plastike i odvajanja plastike po vrstama najčešće vazдушnim udarom.
- *Mikro sortiranje*, koje se primenjuje nakon što se plastični materijal samelje u komade. Ovaj sistem ima prednost zbog nižih troškova rukovanja i većeg obima prerade. Mora da se uspostavi i primenjuje sofisticirana (prefinjena) tehnologija koja sadrži niz mehaničkih procesa (npr. usitnjavanje, klasifikacija, razdvajanje, itd)

4.2.1. Makro sortiranje

Makro sortiranje plastike se odnosi na separaciju proizvodnih dobara od plastike nakon njihove upotrebe. Strategije moraju da se postave na taj način da prepoznaju zadate ciljeve. U suštini glavni problem, prateći ovaj pristup, je da se uspostavi odgovarajuća linija za preradu koja je u stanju da obradi krupne komade i samim tim smanji velike i gabaritne zalihe. U poslednjih nekoliko godina istraživane su različite tehni-

ke i trenutno se koriste neke od dole navedenih[13]:

- infracrvena spektroskopija (infrared)
- rentgenska analiza (X-ray)
- identifikacija uz pomoć lasera
- sistem markiranja (označavanja)

4.2.1.1. Infracrvena Spektroskopija (NIR-Near Infrared Spectroscopy)

Ova tehnika je jedna od najviše korišćenih za izvršavanje automatizovanog sortiranja upotrebljenih plastičnih posuda. Prednost NIR-a je što nije potreban direktan ili bliski kontakt između detektora i uzorka. Takođe, NIR instrumenti su kompatibilni sa fleksibilnim optičkim sondama. Ona se zasniva na predaji energije neklasifikovanoj, neidentifikovanoj plastici pomoću infracrvene svetlosti talasnih dužina (600 - 2,500 nm). Kada se infracrveno svetlo reflektuje sa površine plastike, može se izmeriti apsorbcioni opseg karakterističan za različite vrste plastika. Otkriven opseg se upoređuje sa spektrom poznatih polimera u opsegu istih talasnih dužina, i tako utvrđuje tip plastike. Ovu tehniku karakterišu mnoge prednosti. Najznačajnija je brzina detekcije/identifikacije. Zbog mogućnosti spektroskopskih uređaja da skeniraju velikom brzinom, može se u kratkim vremenskim intervalima izvršiti veliki broj očitavanja jednog uzorka, što omogućava višestruku proveru istog objekta i postavljanje pravih i pouzdanih identifikacionih strategija. Brzina detekcije omogućava povećanje obima razvrstavanja plastike u kraćim vremenskim intervalima. Druga prednost je odsustvo pripreme uzoraka. Etikete ili druge prepreke, kao što su prljavština ne ometaju bitno očitavanje zahvaljujući opciji obavljanja višestruke provere. Konačno ovaj način detekcije daje još jednu prednost: boja ne ometa pravilnu identifikaciju polimera. Osim crne, očitavanja su nezavisna od boje plastike. Crne posude predstavljaju problem, jer je njihova boja jak apsorber u blizini infracrvenog oseg. Kao rezultat toga, crna plastika proizvodi prazan spektar koji, u mnogim slučajevima, ne dozvoljava pravilnu identifikaciju [20, 21].

4.2.1.2. Rentgenska Analiza (X-Rays analysis)

Ova tehnika sortiranja je zasnovana na proučavanju prenosa ili refleksije talasnih dužina X zračenja. Ova tehnologija se uglavnom primenjuje za sortiranje PVC-a. Atom hlora u PVC-u daje jedinstven pik u rentgenskom spektru koji je lako otkriti. Rentgenska fluorescencija (XRF), zasnovana na promeni energetskih nivoa

elektrona jezgra atoma, može da se koristi za otkrivanje elemenata u plastici, osim za H, C, N i O, koji su obično detektovani korišćenjem infracrvene spektroskopije. XRF ima mnoge prednosti: jednostavnost korišćenja, brza izrada i analiza uzorka, mogućnost detektovanja velikog broja elemenata, itd. Moguće je on-line korišćenje. Takođe, ona omogućava da se odredi prisustvo, količina i karakteristike punila i pigmenta [22].

4.2.1.3. Identifikacija uz pomoć lasera

Način detekcije i identifikacije materijala zasnovan je na emitovanju laserskog zraka na površinu materijala a zatim se identifikuje i analizira odgovor. Korišćenjem infracrvenog termografičkog sistema, mogu se utvrditi različite osobine materijala, uključujući koeficijent apsorpcije, toplotna provodljivost, toplotni kapacitet i distribucija površinske temperature. Analizom detektovanih osobina može se identifikovati tip plastike. Sistem je pogodan za brzu analizu i identifikaciju različitih vrsta plastike. Pristup ima i određene prednosti i to: (1) različite debljine, oblik i površinska struktura plastičnih posuda ne igraju nikakvu ulogu u identifikaciji i (2) štampa i različiti dodaci (omekšivači) takođe ne igraju nikakvu ulogu. Ograničenja se odnose na: (1) prisustvo punila, u smislu kvantiteta i kvaliteta (posebno ugljenika), (2) teškoće u klasifikaciji plastike zbog procene maksimalne temperature neposredno posle laserskog zračenja, i kao posledica (1) i (2), manja brzina identifikacije, u poređenju sa spektroskopijom i rentgenskom analizom, gde se proverava plastične ambalaže može obaviti u roku od samo 1/10 s [13].

4.2.1.4. Sistem markiranja (označavanja)

Ovaj pristup podrazumeva obeležavanje bilo koje posude ili samog polimera sa nečim lako vidljivim. Ne postoje prepreke koje stoje na putu automatizovanom sistemu za sortiranje koji bi pročitao skriven marker i identifikovao tip polimera. Sprovedene su mnoge studije i pokušaji u 1990, ali sa slabim uspehom, uglavnom zbog problema koji nastaju kako na proizvodnim tako i na reciklažnim nivoima. Svaka proizvodna linija za pakovanje bi trebalo da instalira sistem označavanja na njihovoj liniji. Takođe, svaki pogon za reciklažu bi trebalo da instalira mašine za skeniranje obeležja na posudama [13].

4.2.2. Mikro sortiranje

Mikro-sortiranje plastike nastupa nakon kombina-

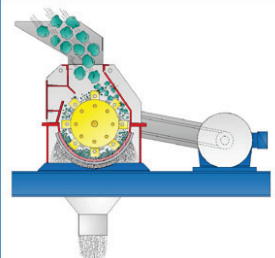

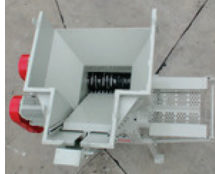
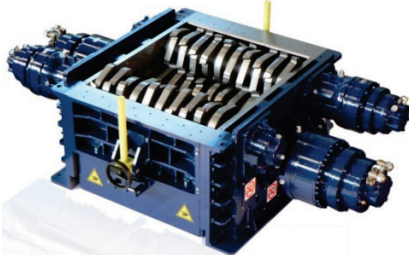

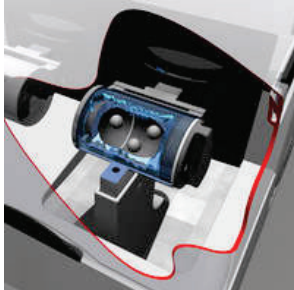
cije procesa usitnjavanja i separacije. Primarni proces usitnjavanja i separacije je usmeren ka uklanjanju nečistoća (npr. ne plastični materijal), kao i povećanju nasipne mase, poboljšanju uslova skladištenja i smanjenju troškova isporuke i transporta, lakoći rukovanja materijalom i prenošenju i oslobađanju materijala. Usitnjavanje je stoga osnovni i ključni korak u složenim tokovima prerade plastičnog otpada. Smanjenje ulazne krupnoće otpada usitnjavanjem, u stvari, mora da zadovolji zahteve za oslobađanjem materijala a da istovremeno ne stvori previše finih frakcija, koje u daljim fazama separacije predstavljaju problem. U skladu sa karakteristikama ulazne sirovine u reciklažno postrojenje moraju biti izabrane i različite strategije usitnjavanja (npr. broj stadijuma usitnjavanja, vrste opreme i operativnih uslova: suvo ili vlažno usitnjavanje). U tabeli 1 dat je opis uređaja koji se obično koriste za usitnjavanje (seckanje) plastičnog otpada [23, 24, 25].

Posle usitnjavanja smanjena je dimenzija plastičnog otpada ali je jasno zadržan originalni sastav. Pored plastike prisutne su i nečistoće (npr. crni i obojeni metali, nemetali, filmovi, gume, nalepnice, boje i lakovi, metalne folije, staklo, kamenje, pesak, prljavština, itd.) Uklanjanje nečistoća se postiže različitim klasifikacionim i separacionim procesima koji uzimaju u obzir granulometrijski sastav materijala, kapacitet i karakteristike nečistoća uz maksimalno iskorišćenje polimera. Da bi se poboljšala efikasnost procesa separacije plastičnog otpada, za razliku od onoga što se obično sprovodi u sektoru reciklaže, neke faze separacije se izvode u vlažnim uslovima, to jest, korišćenjem tečnosti, obično vode a ponekad i teških tečnosti. U nekim slučajevima, kada želimo prvo da odvojimo nečistoće, proces reciklaže počinje sa vodom ili teškim tečnostima u cilju razdvajanja faza i uklanjanja što je moguće veće mase nečistoća, kao što su metal, kamenje, staklo i pesak koji mogu da oštete opremu za usitnjavanje i da negativno utiču na dalje faze reciklaže.

Da bi se ispunili prethodno pomenuti ciljevi trenutno se u svetu koriste sledeći procesi:

- Vazdušni klasifikacija
- Magnetna separacija i separacija u vrtložnim strujama (EDDY current)
- Separacija na bazi razlike u gustinama:
 - Pliva - tone separacija (mokri postupak)
 - Separacija u mašinama taložnicama (mokri postupak)
 - Separacija u hidrociklonima (mokri postupak)

Tabela 1. Karakteristike uređaja koji se obično koriste za usitnjavanje (seckanje) plastičnog otpada

Uređaj za usitnjavanje	Karakteristike
Udarni mlin (<i>Hammer Mills(HM)</i>) 	Pokretni čekići postavljeni na rotirajućem vratilu udaraju i bacaju plastiku prema oblogama mlina ili drugom otpadnom materijalu koji se nalazi u mlinu. Kao rezultat udara ostvaruje se usitnjavanje. Čestice se usitnjavaju unutar mlina dok se ne postigne veličina manja od otvora na mreži koja je postavljena na izlazu iz komore mlina. HM može da obradi bez problema metal, neophodna je znatna energija, samlevene čestice nisu ujednačene i proces proizvodi mnogo buke.
Prstenasti mlin (<i>Ring Mills (RM)</i>) 	RM je obično konstruisan od čeličnih rotirajućih sečiva. Ovi noževi seckaju i melju plastiku koja se nalazi unutar valjka. Nakon što se usitni do željene veličine, ona pada kroz otvore koje se nalaze ispod sečiva valjka.
Seckalica (<i>Shear Shredders (SS)</i>) 	Šreder koristi jedan ili više rotirajućih osovina, svaka sa setom diskova za rezanje ili noževa vezanih za vratilo koje je postavljeno u komori na dnu levka. Prilikom rotacije vratila diskovi ili noževi povlače materijal naniže kroz prostor između diskova za sečenje ili između noževa i okolne komore.
Dvo ili četvero osovinski šreder Two or Four Shaft Shear Shredders (TSSS or FSSS) 	Oprema za usitnjavanje može da se sastoji od dve ili četiri osovine sa rotacionim noževima (npr. diskovi sa kukicama) i kućištem koje drži alat. Kada se materijal dopremi u koš, šreder zahvata materijal i usitnjava ga. Zahvaljujući visokom obrtnom momentu i robusnim i čvrstim sekačima moguće je iseckati komade izrađenih od različitih materijala. FSSS može da usitni metalne nečistoće, potrebna je relativno niska energija, čestice su dobro oslobođene, visok nivo kontrole, visoki troškovi održavanja.
Granulator (<i>Granulators (Gn)</i>) 	Osnovni sklop granulatora predstavlja rotor koji je usaglašen sa kratkim lopaticama koje su stepenasto postavljene. Tokom rotacije svaki alat seče materijal i dovodi do usitnjavanja. Granulatori su posebno efikasni kada mora da se iseče materijal koji se odlikuje visokom gustinom i otpornosti. Oni obezbeđuju dobro oslobađanje materijala, visoku propusnost, ne mogu da usitne metale (nečistoće), a odlikuju se i visokim troškovima održavanja.
Kriogeno usitnjavanje (<i>Cryogenic Comminution Units (CCU)</i>) 	Kriogen postupak omogućuje fino usitnjavanje pomoću tečnog azota, obično se materijal meša sa tečnim azotom da se obezbedi nivo temperature do -150°C , da bi se ohladio materijal u mlinu. Kriogen proces proizvodi veoma glatke površine preloma. Čak i ako cena tečnog azota se znatno smanji, proces se još uvek odlikuje visokim operativnim troškovima. Kriogeni postupak je idealan za fino usitnjavanje termo plastike i materijala osetljivih na toplotu a takođe omogućava da se postigne odlično oslobađanje materijala.

- Separacija na bazi centrifugiranja (mokri postupak)
- Separacija na vazdušnom klatnom stolu (suvi postupak) i gravitacijskom klatnom stolu (mokri postupak)
- Separacija na osnovu razlike u površinama
 - Elektrostatička separacija
 - Flotacijska koncentracija
- Selektivno rastvaranje

4.2.2.1. Vazдушna klasifikacija

Vazдушna klasifikacija se obično koristi za uklanjanje lakih zagađivača u suvim uslovima kao što su prašina, male penaste čestice, papir, staklena prašina, itd. Obično se koriste aspiratori ili vazdušni cikloni [26]. Vazdušni klasifikatori su, u principu, jednostavni uređaji, njihova kontrola može da varira u zavisnosti od karakteristika materijala. Oprema mora biti pravilno podešena za svaki protok materijala. Razdvajanje materijala zasniva se na razlikama u aksijalnim brzinama u vazdušnoj struji i zavisi od gustine čestica, kao i morfoloških i morfometrijskih karakteristika. Vazdušni ciklon pruža jednostavan i ekonomičan način za prikupljanje većine srednjih do krupnih i / ili težih čestica plastičnog otpada. Centrifugalna i gravitaciona sila su osnovne sile koje deluju u ciklonu. Čestice sa vazdušnom strujom velikom brzinom prolaze kroz dovodnu cev pri čemu dolazi do prilepljivanja čestica za zid ciklona i kretanja po spiralnoj putanji. Gravitaciona sila teže čestice povlači naniže dok se lakše čestice unutrašnjim vrtlogom usmeravaju naviše i preko izlazne cevi na vrhu odvođe izvan ciklona. Vazдушna klasifikacija predstavlja osnovnu operaciju u postrojenjima za reciklažu plastičnog otpada a naročito za složene otpadne plastične delove (npr. auto delove, električne i elektronske uređaje i aparate itd.)

4.2.2.2. Magnetna separacija i separacija u vrtložnim strujama (EDDY current)

Magnetna separacija i separacija u vrtložnim strujama se koriste i na početku procesa reciklaže, kao i nakon rukovanja različitim fazama. Obično se gvožđe (npr. nerđajući čelik, legure nikla, itd) i obojeni metali (npr. aluminijum) uklanjaju pomoću magnetna i vrtložnih struja odnosno elektrostatičkim separatorom [24]. Najčešće korišćeni magnetni separatori su trakasti magneti, belt (kaišni) magneti i bubnjasti magneti.

Prečišćavanje ili kontrola finalnih proizvoda se obično sprovodi stalnim magnetima visokog intenziteta.

4.2.2.3. Separacija na bazi razlike u gustinama

Odvajanje po gustinama je najčešće primenjivana tehnika kod separacije plastike iz mešavine različitih vrsta plastike. Ovaj pristup može biti rentabilan ako se koristi za separaciju polimera koji pripadaju istoj vrsti, ali imaju različite sadržaje aditiva. Procesi separacije na bazi gustina su pouzdaniji od procesa koji se zasnivaju samo na osnovu razlike površinskih karakteristika plastike. Procesi separacije zasnovani na razlici po gustinama su manje osetljivi na moguće promene nastale dejstvom spoljašnjih faktora osvetljenja i oksidacije ili na prisustvo ulja i prašine jer se otpadni materijal izdvaja po gustinama u sredini čija je gustina između dve ili više gustina čestica plastike i otpadnog materijala. Nakon ovakvog procesa, otpadne tečnosti i razdvojene čvrste frakcije morati dalje da se tretiraju u cilju zaštite životne sredine.

Pliva-tone separacija

Pliva tone separacija se veoma često primenjuje. Predstavlja jednostavan i snažan pristup posebnim materijalima koje karakterišu različite gustine. Metod jednostavno obuhvata deponovanje materijala u rezervoar ispunjen vodom ili drugom tečnošću određene gustine. Lakši materijali isplivaju na površinu a teži potonu. Da bi separacija po principu pliva tone bila efikasna neophodno je da se gustine materijala koje želimo da razdvojimo veoma razlikuju (npr., polipropilen, PP: 0.96 g/cm³, polietilen visoke gustine, HDPE: 0,94 g/cm³, polietilen srednje gustine, MDPE: 0.926-0.940 g/cm³, polietilen niske gustine, LDPE: 0.915-0.925 g/cm³, linearni polietilen niske gustine, LLDPE: 0.91-0.94 g/cm³). Upravljanje ovim procesom je jako teško, jer moraju da se dodaju hemikalije u vodu zbog regulacije gustine, ili korišćenje određenih teških tečnosti [27], kao što su bromoform (CHBr₃) (2.87 g/cm³), tetrabrometan C₂H₂Br₄ (2,95 g/cm³) i metilen jodid (3.31 g/cm³). Teške tečnosti su veoma toksične, zahtevaju stroge uslove zaštite na radu, zahtevaju smanjenje izloženosti radnika i dobijeni prečišćeni plastični otpad je kontaminiran tim tečnostima i treba se dodatno očistiti [27, 28]. Osim toga, na proces separacije snažno utiče i eventualno prisustvo zagađivača i mehurića na površini plastike, zatim veličina i oblik čestica plastike, kao i karakteristike punila i aditiva.

Separacija u mašinama taložnicama

Separacija u mašinama taložnicama zasniva se na saznanju da vertikalno pulsiranje vode kroz sloj čestica plastičnog otpada prouzrokuje raslojavanje (stratifikaciju) tih čestica po njihovoj gustini. Proces je cikličan i sastoji se iz četiri faze: dovod, širenje, izduvavanje i kompresija. U ulaznoj fazi sito podiže materijal koji je na njemu (posteljicu). Pri kraju podizanja pritisak čestica na dno posteljice počinje da pada što rezultuje slabljenjem posteljice što dovodi do njenog rastresanja. Tokom treće i četvrte faze ciklusa, čestice ponovo prolaze kroz tečnost i posteljica propada i vraća se u svoj prvobitni položaj. Uzastopnim strujanjem vode gore dole kroz posteljicu postiže se njeno rastresanje, što omogućuje raslojavanje materijala prema gustini. Zrna veće gustine istaložiće se na situ, a zrna manje gustine iznad njih.

Separacija u hidrociklonima

Hidrocikloni su ekonomičan i efikasan uređaj za odvajanje različitih vrsta plastike iz mešavine plastike, kao i za uklanjanje nečistoća. Uvođenjem fluida i materijala pod pritiskom u hidrociklon dolazi do intenzivnog kružnog kretanja. Rotacija izaziva relativno kretanje materijala suspendovanog u tečnosti i odvajanja materijala jedan od drugog [25]. Mešavina materijala i fluida ulazi tangencijalno u hidrociklon, što prouzrokuje rotiranje materijala unutar cilindričnog dela i formiranje vrtloga. Pod dejstvom centrifugalne sile krupne i teške čestice se raspoređuju uz zidove hidrociklona i kreću se po spiralnoj putanji naniže kroz konusni deo do otvora za pražnjenje. Lake i sitne čestice povučene vazдушnim stubom koji se stvara u središnjem delu hidrociklona sa većim delom tečnosti odlaze naviše. Za razliku od primene hidrociklona u pripremi mineralnih sirovina, prehrambenoj i farmaceutskoj industriji, kada se koriste za reciklažu plastičnog otpada, moraju da se uzmu u obzir dva faktora: Prvo, da čestice reciklirane plastike imaju uglavnom pločast oblik i drugo da su razlike u gustinama različitih vrsta reciklirane plastike jako male.

Hidrociklon se može smatrati uređajem za razdvajanje na srednjim gustinama. Sa svojim karakteristikama može da se postavi između klasičnog pliva tone procesa i centrifugiranja. Rad sa hidrociklonima ima i prednosti i nedostatke: zauzimaju vrlo malo prostora, veoma su efikasni, sa druge strane, oni zahtevaju prisustvo pumpi i strožu kontrolu odnosa čvrsto-tečno.

Separacija na bazi centrifugiranja

Centrifuge su veoma efikasni uređaji. One uravno-

težuju optimalni kvalitet sa razumno visokim iskorišćenjem. Morfološke i morfometrijske karakteristike čestica su limitirajući faktor u ovoj separaciji zato što su prisutne visoke vrednosti ubrzanja u centrifugalnom polju. Ova tehnika je posebno efikasna kod reciklaže čestica u obliku vlakana i filmova. Njihov osnovni nedostatak je brzo habanje.

Separacija na vazдушnom klatnom stolu i gravitacijskom klatnom stolu

Ovi uređaji dolaze iz postrojenja za pripremu mineralnih sirovina i reciklažne industrije metala (npr. automobilski otpad koji sadrži plastiku). Njihova primena je prilično ograničena u reciklaži plastike.

4.2.2.4. Separacija na bazi razlike u površinama

Elektrostatička separacija

Kada se primenjuje ovaj vid separacije obično se način naelektrisanja čestica zasniva na triboelektričnom efektu. Takav efekat se zasniva na jednostavnom principu: kada različita vrsta materijala, na primer, čestice dve različite vrste plastike, međusobno protrljaju one prenose naelektrisanje što rezultuje razlikama u površinskim naelektrisanjima koje se koriste za razdvajanje dve vrste plastike u električnom polju; obično naelektrisane čestice plastike padaju slobodno u prostor između dve elektrode. Čestice su privučene ili na pozitivnu ili na negativnu elektrodu u zavisnosti od naelektrisanja. U skladu sa njihovom putanjom čestice se prikupljaju i odvajaju. Ovom tehnikom mogu da se odvoje različite vrste plastičnih materijala: ABS (Acrylonitrile Butadiene Styrene) plastika i HIPS (High Impact Polystyrene) stiropor iz otpadnih električnih uređaja, zatim ABS i PMMA (polimethyl metakrilat) iz automobilskog otpada, PE (polietilen) i PP (polipropilen); PET (polietilen terephthalate) i najlon; PVC (polivinil hlorid) i PE iz otpadnih kablova; PVC i PC (polikarbonat) od flaša, itd. [29]. Elektrostatičko odvajanje ima dve glavne prednosti: može se vršiti na suvom i proces separacije i oprema su relativno jednostavni. Osnovni nedostaci odnose se na oblik čestica, zbog uticaja na njihovo površinsko naelektrisanje i efekat razdvajanja. Osim toga, kod primene elektrostatičke separacije strogo mora da se kontroliše sadržaj vlage u uzorku.

Flotacijska koncentracija

Flotacijska koncentracija je još jedan mogući metod za mikro-sortiranje plastike. Princip flotacije je sličan principu pliva tone separacije. Flotacija čestica plastike

se zasniva na hemijsko-fizičkim karakteristikama površine, i iz tog razloga je naročito pogodna kada treba da se razdvoje plastike sličnih gustina ali različitim površinskih karakteristika. Kao što je navedeno u literaturi [30] posebne vrste plastike mogu da se odvoje od složenog otpada nakon tretiranja otpada flotacijom u alkalnoj sredini [17, 31]. Razdvajanje mešane plastike, prema različitim tipovima plastike, može se postići korišćenjem odgovarajućih reagenasa. Specifični reagensi (kolektori) se koriste da bi površinu jedne vrste plastike učinile hidrofobnom (nekvašljivom sa vodom). Postoji veliki broj istraživanja i publikovanih radova koji se bave ovom temom [30,31, 32, 33]. Uduvavanjem vazduha, dolazi do sudaranja mehurića vazduha sa česticama, pripajanja hidrofobnih čestica za mehurić i levitiranja ka površini, dok čestice drugih vrsta plastike čije su površine hidrofilne (kvašljiva) padaju na dno. Sakupljanjem i odvajanjem čestica sa površine i sa dna dobijamo razdvojene vrste plastičnog otpada. Ostali parametri koji utiču na flotaciju su veličina i oblik čestica. Glavne prednosti vezane za korišćenje flotacije u reciklaži plastike su da je ova tehnika dobro poznata i istražena sa tehnološkog aspekta i da je prilično fleksibilna u smislu mogućnosti primene. Ograničenja se pre svega odnose na stanje površine čestica plastike (npr. prljavština i zagađivači) i teškoća u definisanju precizne kontrole procesa zbog raznolikosti plastičnog otpada.

4.2.2.5. Selektivno rastvaranje

Selektivno rastvaranje je opcija sortiranja plastike koja je temeljno ispitivana, kao marker za potrebe makro-razvrstavanja, u ranim 1990-im. To je proces razdvajanja izmešanog skoro čistog plastičnog otpada koji se može ponovo koristiti bez upotrebe bilo kakve tehnologije prethodnog mehaničkog sortiranja. Selektivno rastvaranje se zasniva na dva različita principa: zavisnost temperature na rastvorljivost različitih plastičnih masa u jednom rastvaraču i zavisnost vrste rastvarača na rastvorljivost različitih plastičnih masa na određenoj temperaturi. Ove tehnologije nisu isplative za sve polimere, ali su ponekad jedino rešenje za skidanje različitih premaza na PP plastici, kao što su boje ili lepkovi.

4.3. Hemijska reciklaža plastike

Hemijska (tercijarna) reciklaža je termin koji se koristi za označavanje naprednih tehnologija i procesa, kojima se plastični materijali razlažu u polimere manjih

molekulskih masa (obično tečnosti ili gasovi), koji se koriste kao sirovina za proizvodnju novih petrohemijskih proizvoda ili plastike [16]. Termin "hemijska" se koristi jer promena obavezno dolazi u hemijskoj strukturi polimera. U poslednjih nekoliko godina, mnogo pažnje je posvećeno ovom pristupu reciklaže (npr. ne katalitički krekning termo katalitički krekning i parna degradacija) u cilju da se proizvedu različite vrste goriva od plastičnih otpada. Neki polimeri mogu biti profitabilno obrađeni usvajanjem ovog pristupa. Polietilentereftalat (PET), pojedini poliamidi (najlon 6 i 6,6), i poliuretani mogu se efikasno depolimerizovati. Dobijene hemikalije se zatim mogu koristiti za proizvodnju nove plastike koja se ne razlikuje bitno od početnog netaknutog polimera. Polietilen (PE) je takođe prepoznat kao potencijalna sirovina u tehnologijama proizvodnje goriva (benzina). Dva navedena slučaja su samo primer potencijala hemijske reciklaže. Veliki deo literature postoji na ovu temu, jer je mnogo istraživačkih napora i razvojnih tehnologija uloženo u poboljšanje korišćenja ove tehnologije za reciklažu. Hemijska reciklaža, u stvari, predstavlja, veliku prednost sa mogućnošću tretiranja heterogenih i kontaminiranih polimera sa ograničenim korišćenjem predtretmana. Odličan pregled i analizu ove tehnike je u svom radu dao Al-Salem et al. [19].

4.4. Energetsko iskorišćenje plastike

Energetsko iskorišćenje plastike se zasniva na upotrebi otpadne plastike za proizvodnju energije u obliku toplote, pare ili električne energije. S obzirom da je otpadna plastika produkt sirove nafte, spaljivanjem generiše visoku kalorijsku vrednost. Osim toga, kontrolisanim spaljivanjem plastike, dobijaju se isti produkti sagorevanja kao kod drugih naftnih derivata: voda i ugljen dioksida [34]. Takvo rešenje se može smatrati tehnički i ekonomski ispravnim kada se ne mogu profitabilno primeniti druge strategije reciklaže (npr. sortiranje, mehanička, hemijska, itd).

Sva prethodna razmatranja odnose se na termoplastiku. Međutim, problem nastaje kod reciklaže termoset plastike. Termoset plastika se ne može lako rastvoriti, istopiti, ponovo izmešati i preoblikovati kao termoplastika. Treba postaviti specifičnu strategiju reciklaže. Mehanička reciklaža se prvenstveno svodi na fino mlevenje radi ponovne upotrebe, kao punila u novim termoset smolama ili kao dodatak termoplastici, ili da se ponovo dobije prirodni filer ili vlakno koje je prvobitno korišćeno u proizvodnji originalne termoset plastike. U svakom slučaju, hemijska reciklaža kao i

proces iskorišćenja energije ne mogu biti primenjeni na širok spektar termoset materijala.

5. ZAKLJUČAK

Sa porastom životnog standarda raste i potrošnja. Sa porastom potrošnje raste i količina ambalažnog otpada, naročito plastičnog otpada. Zadatak istraživača je da pronađu, kako ekonomski tako i ekološki, najprihvatljiviji način za rešenje ovog problema. Reciklaža plastičnog otpada predstavlja jedan od načina za rešavanje problema otpada nakon upotrebe. Povećanjem ekonomske dobiti, ekološke svesti i razvojem novih tehnologija došlo se do značajnog povećanja stope iskorišćenja i reciklaže plastičnog otpada. Ovi trendovi verovatno će se nastaviti, ali neki značajni izazovi i dalje postoje, kako tehnološki tako i ekonomski, kao i pitanje društvene svesti. Povećanje stope reciklaže plastičnog otpada, i samim tim smanjenje otpada na deponijama, moguće je postići širenjem spektra prikupljanja otpadne ambalažne plastike, otpadne plastike iz domaćinstva kao i automobilske i elektronske otpada. Zajedno sa naporima da se poveća korišćenje reciklirane plastike kao zamene za primarnu plastiku, reciklaža otpadne plastike doprinosi i smanjenju negativnog uticaja industrije polimera na životnu sredinu. Zbog činjenice da naš život zavisi od okruženja, treba razmatrati pitanje izbora tretmana reciklaže otpadne plastike na međunarodnom nivou, jer svako nosi odgovornost i ima obavezu da se pridruži i pomogne u nastojanju da se program za reciklažu plastike što više razvije.

LITERATURA

- Mulder K., Knot M., PVC plastic: History of Systems Development and Entrenchment. *Technology in Society*, **2001**, 23, 265-286.
- Strong, A. Brent, *Plastics: Materials and Processing*, 3rd Edition, Englewood Cliffs: New Jersey, Prentice-Hall, Inc., 2006, 917 pages.
- Brydson, J.; *Plastics Materials*, 7th Edition, Elsevier, Amsterdam, 1999, 920 pages.
- Mohee, R.; Unmar, G.D.; Mudhoo, A.; Khadoo, P. Biodegradability of Biodegradable/Degradable Plastic Materials under Aerobic and Anaerobic Conditions. *Waste Management* **2008**, 28, 1624-1629.
- Alauddin, M.; Choudhury, I.A.; El Baradie, M.A.; Hashmi, M.S.J. Plastic and their Machining: Review. *Journal of Materials Processing Technology* **1995**, 54, 40-46.
- Jovanović, S.; Džunuzović, J.V. Održivi razvoj i polimerni materijali, *Reciklaža i održivi razvoj* **2011**, 4(1), 1-13.
- EEA 2008, Better management of municipal waste will reduce greenhouse gas emissions. Copenhagen, Denmark: European Environment Agency.
- Vujić, G.; Batinić, B.; Stanisavljević, N.; Ubavin, D.; Živančev, M. Analiza stanja i strateški okvir upravljanja otpadom u Republici Srbiji. *Reciklaža i održivi razvoj* **2011**, 4(1), 14-19.
- PlasticsEurope 2008b The compelling facts about Plastics 2007: an analysis of plastics production, demand and recovery for 2007 in Europe. Brussels, Belgium: PlasticsEurope.
(<http://www.plasticseurope.org/plastics-sustainability/resource-efficiency/plastics-recovery.aspx>)
- <http://epp.eurostat.ec.europa.eu/portal/page/portal/eurostat/home/>, preuzeto 09.10.2012.
- Mihajlov, A. Segment održivog korišćenja prirodnih resursa i integralnog upravljanja otpadom: Reciklaža. *Reciklaža i održivi razvoj* **2010**, 3(1), 1-8.
- Izveštaj o upravljanju ambalažom i ambalažnim otpadom u 2011. godini, Agencija za zaštitu životne sredine Republike Srbije, Beograd, jul 2012.
- Serranti, S.; Bonifazi, G. Post-Consumer Polyolefins (PP-PE) Recognition by Combined Spectroscopic Sensing Techniques. *The Open Waste Management Journal* **2010**, 3, 35-45.
- Nickolas, J.; Themelis, Lj. A. Identification and Assessment of Available Technologies for Materials and Energy Recovery, Report submitted to Flexible Packaging Association, New York City, October 25, 2010.
- De La Mantia, F. Handbook of Plastic Recycling, Smithers Rapra, UK, 2002, 442 pages.
- Al-Salem, S.M.; Lettieri, P.; Baeyens, J. Recycling and recovery routes of plastic solid waste (PSW): A review. *Waste Management* **2009**, 29, 2625-2643.
- Buchan, R.; Yarar, B. Recovering plastics for recycling by mineral processing techniques. *Journal of Minerals, Metals and Materials Society* **1995**, 47, 52-55.
- Kumar, S.; Panda, K.A.; Singh, R.K. Review on Tertiary Recycling of high-density Polyethylene to fuel. *Resources, Conservation and Recycling* **2011**, 55, 893-910.
- Al-Salem, S.M.; Lettieri, P.; Baeyens, J. The Valorization of Plastic Solid Waste (PSW) by

- Primary to Quaternary is Routes: From Re-use to Energy and Chemicals. *Progress in Energy and Combustion Science* **2010**, 36, 103–129.
20. Smail, V.; Fritz, A.; Wetzel, D. Chemical imaging of intact seeds with NIR focal plane array assists plant breeding. *Vibrational Spectroscopy* **2006**, 42(2), 215–221.
 21. Tachwali, Y.; Al-Assaf, Y.; Al-Ali, A.R. Automatic Multistage Classification System for Plastic Bottles Recycling. *Resources, Conservation and Recycling* **2007**, 52, 266–285.
 22. De Mesina, M.B.; Jong, T.P.R.; Dalmijn, W.L. Automatic sorting of scrap metals with a combined electromagnetic and dual energy X-ray transmission sensor. *International Journal of Mineral Processing* **2007**, 82, 222–232.
 23. Buchan, R.; Yarar, B. Recovering plastics for recycling by mineral processing techniques. *Journal of Minerals, Metals and Materials Society* **1995**, 47, 52–55.
 24. Wills, B.A. Mineral processing technology, 6th edn. Butterworth-Heinemann, Boston, 1997, pp 232.
 25. Magdalinić, N. Usitnjavanje i klasiranje, *Nauka*, Beograd, 1999, pp. 346.
 26. Shapiro, M.; Galperin, V. Air classification of solid particles: a review. *Chemical Engineering and Processing* **2005**, 44, 279–285.
 27. Kang, H.; Schoenung, J.M. Electronic waste recycling: a review of US infrastructure and technology options. *Resources, Conservation and Recycling* **2005**, 45(4), 368–400.
 28. Veit, H.M.; Pereira, C.; Bernardes, A.M. Using mechanical processing in recycling printed wiring board. *Journal of Minerals, Metals and Materials Society* **2002**, 54 (6), 45–47.
 29. Park, C.H.; Jeon, H.S.; Yu, H.S.; Han, O.H.; Park, J.K. Application of electrostatic separation to the recycling of plastic wastes: Separation of PVC, PET and ABS. *Environmental Science and Technology* **2008**, 42, 249–255.
 30. Takoungsakdakun, T.; Pongstabodee, S. Separation of mixed post-consumer PET–POM–PVC plastic waste using selective flotation. *Separation and Purification Technology* **2007**, 54, 248–252.
 31. Drelich, J.; Kim, J.H.; Payne, T.; Miller, J.D.; Kobler, R.W. Purification of polyethylene terephthalate from polyvinyl chloride by froth flotation for the plastics (soft-drink bottle) recycling industry. *Separation and Purification Technology* **1999**, 15(1), 9–17.
 32. Shen, H.; Pugh, R.J.; Forssberg, E. Floatability, selectivity and flotation separation of plastics by using a surfactant. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects* **2002**, 196(1), 63–70.
 33. Fraunholz, N. Separation of waste plastics by froth flotation – a review. Part I. *Minerals Engineering* **2004**, 17, 261–268.
 34. Zia, K.M.; Bhatti, H.N.; Bhatti, I.A. Methods for polyurethane and polyurethane composites, recycling and recovery: a review. *Reactive & Functional Polymers* **2007**, 67(8), 675–692.