Postupci recikliranja PET boca

Fišter, Nikolina

Undergraduate thesis / Završni rad

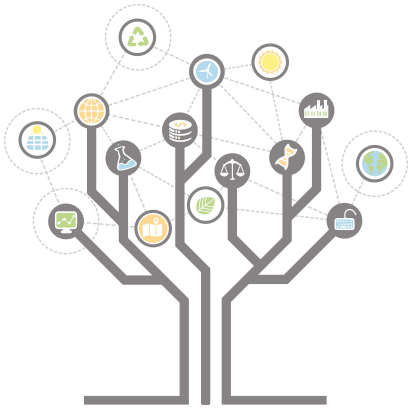
2016

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **University of Zagreb, Faculty of Geotechnical Engineering / Sveučilište u Zagrebu, Geotehnički fakultet**

Permanent link / Trajna poveznica: https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:130:421816

Rights / Prava: Attribution-NonCommercial-NoDerivs 3.0 Unported/Imenovanje-Nekomercijalno-Bez prerada 3.0

Download date / Datum preuzimanja: **2024-03-29**



Repository / Repozitorij:

Repository of Faculty of Geotechnical Engineering - Theses and Dissertations

zir.nsk.hr

dabar
DIGITALNI AKADEMSKI ARHIVI I REPOZITORIJI

Postupci recikliranja PET boca

Fišter, Nikolina

Undergraduate thesis / Završni rad

2016

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **University of Zagreb, Faculty of Geotechnical Engineering / Sveučilište u Zagrebu, Geotehnički fakultet**

Permanent link / Trajna poveznica: https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:130:421816

Rights / Prava: Attribution-NonCommercial-NoDerivs 3.0 Unported

Download date / Datum preuzimanja: **2020-11-10**

Repository / Repozitorij:

Repository of Faculty of Geotechnical Engineering



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU

GEOTEHNIČKI FAKULTET

NIKOLINA FIŠTER

POSTUPCI RECIKLIRANJA PET BOCA

ZAVRŠNI RAD

VARAŽDIN, 2016.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU

GEOTEHNIČKI FAKULTET

ZAVRŠNI RAD

POSTUPCI RECIKLIRANJA PET BOCA

KANDIDAT: MENTOR:

NIKOLINA FIŠTER doc. dr. sc. ANITA PTIČEK SIROČIĆ

VARAŽDIN, 2016.

IZJAVA O AKADEMSKOJ ČESTITOSTI

Izjavljujem i svojim potpisom potvrđujem da je završni rad pod naslovom

POSTUPCI RECIKLIRANJA PET BOCA

(naslov završnog rada)

rezultat mog vlastitog rada koji se temelji na istraživanjima te objavljenoj i citiranoj literaturi te je izrađen pod mentorstvom **doc.dr.sc. Anite Ptiček Siročić**.

Izjavljujem da nijedan dio rada nije napisan na nedozvoljen način, odnosno da je prepisan iz necitiranog rada te da nijedan dio rada ne krši bilo čija autorska prava. Izjavljujem također, da nijedan dio rada nije iskorišten za bilo koji drugi rad u bilo kojoj visokoškolskoj, znanstvenoj ili obrazovnoj ustanovi.

U Varaždinu, 01.07.2016.

NIKOLINA FIŠTER

(Ime i prezime)

Nikolina Fišter

(Vlastoručni potpis)

SAŽETAK

Ime i prezime autora: Nikolina Fišter

Naslov rada: Postupci recikliranja PET boca

Poli (etilen – tereftalat), PET polimerni je materijal širokog područja primjene. Najčešće se koristi u kućanstvu, građevinarstvu, kemijskoj industriji te kao ambalažni materijal za izradu boca. PET je nelomljiv materijal, lagan, proziran i nepropustan za većinu plinova, ali se dugo zadržava u okolišu jer nije biorazgradiv. Prije samog postupka recikliranja potrebno je provesti postupak predobrade koji uključuje prikupljanje, usitnjavanje i pranje otpadnog PET-a. Otpadna PET ambalaža može se reciklirati mehaničkim ili kemijskim postupcima u svrhu dobivanja polazne sirovine ili novog materijala.

KLJUČNE RIJEČI: *polimeri, poli (etilen - tereftalat), zbrinjavanje, recikliranje*

Sadržaj

1. UVOD 1
2. OPĆI DIO 2
2.1. Polimeri i polimerni materijali 2
2.1.1. Podjela polimera i polimernih materijala 3
2.1.2. Ambalažni polimerni materijali 7
2.1.3. Metode zbrinjavanja ambalažnog polimernog otpada 8
2.2. Poli (etilen – tereftalat), PET 11
2.2.1. Postupci dobivanja i svojstva PET-a 12
2.2.2. Stabilnost i degradacija PET-a 16
2.3. Postupci recikliranja PET-a 17
2.3.1. Predobrada PET- a 17
2.3.2. Mehaničko recikliranje PET-a 20
2.3.3. Kemijsko recikliranje PET-a 22
2.3.4. Svojstva i primjena recikliranog PET-a 24
3. ZAKLJUČAK 27
4. LITERATURA 28
5. POPIS SLIKA 31
6. POPIS TABLICA 32

1. UVOD

Stalnim porastom primjene polimernih materijala porasle su i količine polimernog otpada što je dovelo do sve većih problema njegova zbrinjavanja. Polimerni materijali nisu biorazgradivi i u okolišu se dugo zadržavaju.

Poli (etilen – tereftalat), PET izuzetno je lagan, izdržljiv, otporan na mehanička oštećenja, nelomljiv i nepropustan za većinu plinova. Zahvaljujući svojim svojstvima ima vrlo veliku primjenu u raznim područjima ljudske djelatnosti. U svakodnevnoj je upotrebi kao ambalažni materijal, a time se povećava i njegov udio u ukupnoj količini krutog otpada i potrebno ga je smanjiti.

Recikliranje poli (etilen - tereftalata) je najrašireniji i najuspješniji primjer recikliranja. Najčešće metode koje se upotrebljavaju za recikliranje PET-a su mehaničko i kemijsko recikliranje. Prije postupka recikliranja provodi se postupak predobrade polimernog otpada koji uključuje organizirano prikupljanje, razvrstavanje, usitnjavanje te pranje otpadnog PET-a, nakon čega slijedi postupak recikliranja.

Recikliranje je svaki postupak materijalne oporabe koji uključuje prikupljanje i izdvajanje korisnih materijala koji će se zatim upotrijebiti za izradu novih proizvoda. Nijedan način zbrinjavanja nije idealan te svaki od njih može biti štetan za okoliš i zdravlje ljudi pa je neophodno ocijeniti njegov učinak te mogući rizik svesti na minimum.

U ovom radu opisani su postupci mehaničkog i kemijskog recikliranja ambalažnog otpada na primjeru recikliranja PET boca.

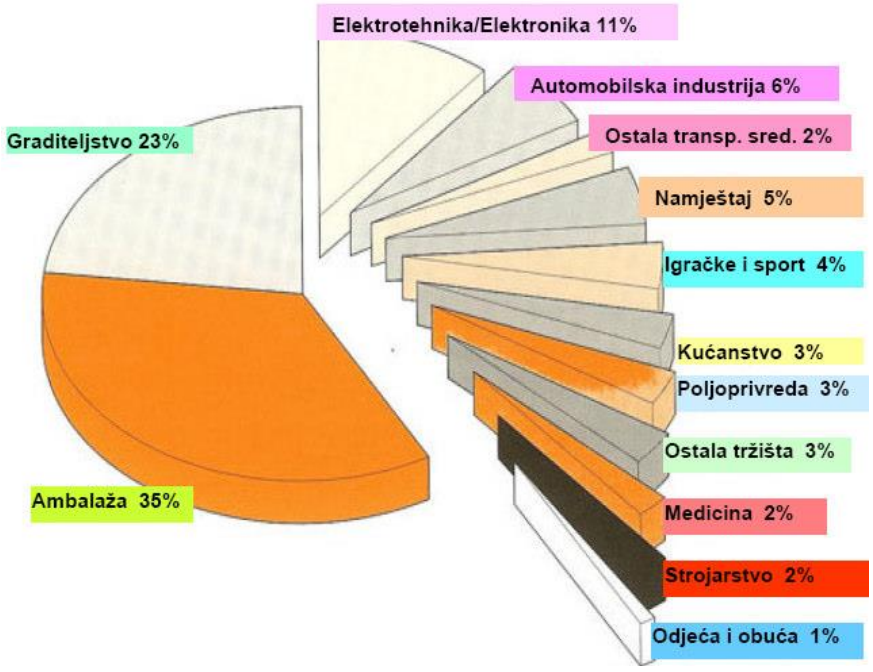
2. OPĆI DIO

2.1. Polimeri i polimerni materijali

Naziv polimer grčkog je podrijetla, a nastao je od dvije riječi, *poli* (grč. πολγ) - mnogo i *meros* (grč.μερος) – dio [1]. Polimeri su visokomolekulski spojevi koji nastaju procesima polimerizacije gdje dolazi do povezivanja velikog broja niskomolekulskih spojeva, monomera, kovalentnim kemijskim vezama. Polimeri su spojevi vrlo velikih relativnih molekulskih masa koje mogu biti u rasponu od nekoliko tisuća do nekoliko milijuna. Švedski kemičar, Jöns Jakob Berzelius 1833. godine prvi je put upotrijebio riječ polimer, nazvavši tako kemijske spojeve koji imaju jednaki sastav, a razlikuju se veličinom molekulne mase. Danas se pod tim pojmom podrazumijevaju sve sintetske i prirodne makromolekule [2].

Polimernim materijalima dodaju se brojni aditivi s ciljem poboljšanja određenih svojstava. Mala količina aditiva bitno poboljšava jedno ili više svojstava te se dobivaju tehnički upotrebljivi materijali. Nadalje, različiti dodaci štite polimer od raznih vanjskih utjecaja i smanjuju cijenu gotovog proizvoda. Poboljšanje određenog svojstva polimera dodatkom aditiva vrlo često utječe na neka druga svojstva pa je za odabir aditiva važno njegovo ukupno djelovanje [1].

Ranije se za proizvodnju polimera koristio ugljen, a danas su osnovne sirovine sirova nafta i zemni plin. Preradom nafte i plina dobiva se kemijska osnova za izradu ambalaže i različitih tipova polimera [3]. Danas, polimerni materijali nalaze veliku primjenu u raznim područjima ljudske djelatnosti: u kućanstvu, kao ambalažni materijali, u automobilskoj i avio-industriji, građevinarstvu, elektrotehnici kao i raznim drugim djelatnostima (slika 1) [4].



Slika 1. Područja primjene polimernih materijala

2.1.1. Podjela polimera i polimernih materijala

Polimeri se mogu podijeliti prema podrijetlu, strukturi, svojstvima i primjeni.

Prema podrijetlu polimeri se dijele na prirodne i sintetske [1].

Prirodni polimeri, za razliku od sintetskih, ne mogu se proizvoditi, nego se za industrijske potrebe uzgajaju na plantažama.

Prirodni polimeri su škrob, celuloza, kaučuk, svila, vuna, pamuk i različiti biopolimeri kao što su: bjelančevine, nukleinske kiseline, hormoni, posebni polisaharidi - prirodni polimeri koji izgrađuju žive organizme (slika 2) [5,6].



Slika 2. Prirodni polimeri – a) celuloza, b) svila, c) kaučuk i d) pamuk

Sintetski polimeri nastaju procesima polimerizacije i potom se uz različite dodatke kao što su punila, stabilizatori prerađuju u gotove materijale. Prema reakcijskom mehanizmu nastajanja sintetski polimeri se dijele na lančane i stupnjevite polimere [1].

Lančani polimeri dobivaju se reakcijama lančanih polimerizacija.

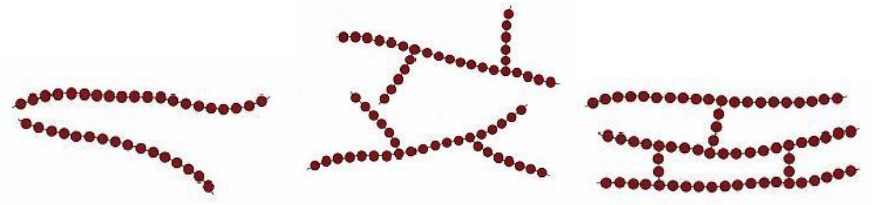
Stupnjeviti polimeri dobivaju se reakcijama stupnjevitih polimerizacija koje se zbivaju u velikom broju međustupnjeva, s postupnim povećanjem stupnja polimerizacije tijekom dugotrajnog procesa.

Za ove polimerizacije karakteristično je da, osim polimera, uvijek nastaju i sporedni, niskomolekulski produkti kao što je voda, alkohol, amonijak, kloridna kiselina [1].

Prema strukturi makromolekula dijele se prema vrsti ponavljajućih jedinica i prema oblicima makromolekula.

Prema vrsti ponavljajućih jedinica polimeri se dijele na homopolimere i kopolimere. Homopolimeri imaju jednu, a kopolimeri dvije ili više vrsta ponavljajućih jedinica.

Prema oblicima makromolekula polimeri se dijele na linearne, razgranate i umrežene (slika 3) [7].



a) linearni b) razgranati c) umreženi

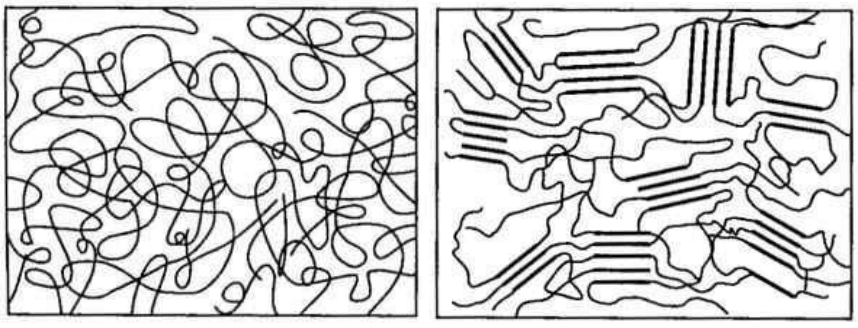
Slika 3. Podjela polimera prema oblicima makromolekula

Prema svojstvima polimeri se dijele na poliplaste (plastomeri i duromeri), elastomere i termoplastične elastomere.

Poliplasti (plastika, plastične mase) polimerni su materijali koji se tijekom prerade nalaze u kapljevitom ili gumastom stanju. S obzirom na ponašanje u uvjetima prerade i primjene, dijelimo ih na plastomere i duromere.

Plastomeri (termoplastične mase) polimerni su materijali s linearnim i granatim makromolekulama. Topljivi su i taljivi, a zagrijavanjem do temperature mekšanja ili taljenja ne mijenjaju kemijsku strukturu i mogu se oblikovati. Uzastopnim zagrijavanjem i hlađenjem ne mijenjaju osnovna svojstva.

Mogu biti amorfni (nesređena struktura) i kristalni (uređena faza s pravilno raspoređenim molekulama) (slika 4) [1].

a)  b)

Slika 4. Amorfna (a) i kristalna (b) struktura polimera

Duromeri (duroplasti, termoreaktivne plastične mase) polimerni su materijali s gusto prostorno umreženim makromolekulama. Imaju povećanu čvrstoću, a mehanička svojstva im se mijenjaju s temperaturom. Zagrijavanjem do visokih temperatura se ne tale, već se kemijski razgrađuju pucanjem primarnih kemijskih veza.

Elastomeri pri sobnoj temperaturi imaju vrlo fleksibilne lance, elastični su i podnose velike deformacije. Najpoznatiji elastomeri su kaučuk i guma. Kaučuci su prirodne ili sintetske polimerne tvari koje se kemijskim reakcijama umrežavanja (vulkanizacije) prevode u umrežene strukture tj. gumu. Guma je izvanredno žilav materijal koji se u širokom temperaturnom području može reverzibilno elastično deformirati.

Termoplastični elastomeri (elastoplastomeri) su tvari koje se pri sobnoj temperaturi ponašaju poput elastomera, a pri povišenim temperaturama, poput plastomera, što omogućava njihovu preradu i doradu. Mogu se više puta taliti i oblikovati [1].

Prema području primjene

S obzirom na područje primjene polimerni materijali upotrebljavaju se kao ambalaža, vlakna, premazi, ljepila, veziva i konstrukcijski materijali (slika 5) [1].



Slika 5.Područje primjene: a) ljepilo i b) premaz na ambalaži

2.1.2. Ambalažni polimerni materijali

Pod pojmom „ambalaža" podrazumijeva se sve što u odnosu na proizvod ima zaštitnu, transportnu, uporabnu, informativnu i ekološku funkciju [8]. Pakiranjem se namirnica štiti od različitih vanjskih utjecaja te se na taj način omogućava njezina distribucija do potrošača, a da se pritom sačuvaju sva njezina svojstva i zdravstvena ispravnost. Važnost ambalaže je u tome što o njezinoj kvaliteti ovisi i kvaliteta samog proizvoda.

Polimerni ambalažni materijali imaju funkciju zaštite proizvoda, a imaju značajnu ulogu i u pakiranju hrane te zbog toga moraju udovoljavati zadanim specifičnim uvjetima. Uslijed primjene, izloženi su mehaničkim naprezanjima, klimatskim utjecajima te insektima i glodavcima. Važno je da posjeduju svojstvo smanjene propusnosti na vlagu, kisik, ugljikov dioksid (CO_2), sumporov dioksid (SO_2), čime se produljuje vijek trajanja zapakiranog proizvoda i sprječava se onečišćenje proizvoda koja potiče razvoj mikroba, a samim time i kvarenje. Polimerni ambalažni materijali moraju posjedovati dobra mehanička svojstva, od kojih su najvažnija savitljivost, elastičnost, žilavost i čvrstoća. Djelovanje svjetla na namirnicu uzrokuje kvarenje masti, bjelančevina i razgradnju vitamina. Kisik iz zraka snažno potiče, ali i ubrzava proces degradacije. Kisik može utjecati na razgradnju ambalažnog materijala, ali i proizvoda, pri čemu se smanjuje kvaliteta, dugotrajnost i hranjivost namirnica [9].

Za plastičnu ambalažu često su od presudnog značaja toplinska svojstva jer uslijed promjene temperature dolazi do promjene strukture materijala, pojave kristalnosti te zamućenja. Ambalaža štiti proizvod od razlaganja, ali i podnosi veliku temperaturnu razliku, primjerice kod zagrijavanja smrznute hrane.

Prednost plastične ambalaže je u tome što se uz vrlo mali utrošak rada, energije i vremena lako oblikuje u različite oblike. Ne zahtijeva dodatnu površinsku obradu na kraju procesa proizvodnje, olakšano je bojanje, vrlo je lagana i cijenom vrlo pristupačna. Važno svojstvo je inertnost u dodiru s hranom. Zahvaljujući velikoj kemijskoj inertnosti, većina polimera je otporna na djelovanje vanjskih utjecaja u normalnim uvjetima primjene.

Za izradu ambalažnih materijala tj. ambalaže najčešće se koriste plastomeri, polimeri linearne i razgranate strukture, koji su topljivi pri povišenim temperaturama. Ne mijenjaju kemijsku strukturu zagrijavanjem do temperature taljenja te njihova prerada predstavlja samo promjenu fizičkog stanja. Sastoje se od jednog homogenog polimera ili od polimera koji u strukturi ima dvije ili više vrsta ponavljajućih jedinica i dodataka čija je svrha poboljšanje fizičkih i kemijskih svojstava polimernog materijala [9].

2.1.3. Metode zbrinjavanja ambalažnog polimernog otpada

U današnje vrijeme otpad je izrazito velik društveni problem jer onečišćenje okoliša donosi brojne negativne posljedice: narušava se prirodna ravnoteža, ugrožava ljudsko zdravlje i život, dolazi do klimatskih poremećaja i problema u gospodarstvu [10].

Glavni ciljevi recikliranja polimernog otpada kao načina zbrinjavanja su: smanjivanje upotrebe prirodnih resursa, smanjivanje količine otpada i u konačnici, zaštita okoliša [11].

Udio ambalažnog otpada stalno raste i iznosi oko jedne trećine kućanskog otpada, ali bez ambalaže nije moguće zamisliti život suvremenog čovjeka, tj. pakiranja namirnica i ostalih važnih potrepština.
Otpad u kojem se nalaze i polimerni materijali može se klasificirati u šest kategorija [12]:

- otpad iz kućanstva i drugih područja, npr. komercijalne djelatnosti tj. trgovine
- otpad iz automobilskih dijelova
- otpad od konstrukcijskih materijala (građevinska industrija)
- otpad iz distribucije i krupni industrijski otpad
- otpad iz poljoprivrede
- otpad od električnih uređaja i dijelova

Donošenjem Pravilnika o ambalaži i ambalažnom otpadu (“Narodne novine” br. 88/15) uspostavljen je sustav prikupljanja otpadne PET ambalaže uz povratnu naknadu. Glavni cilj

Pravilnika je smanjenje količina ambalažnog otpada, jer oko 40 % otpada na odlagalištima čini upravo ambalaža [13].

Zbrinjavanje otpada uključuje njegovo prikupljanje, sortiranje, usitnjavanje, recikliranje i odlaganje [14].

Prikupljanje polimernog otpada započinje dobrom organizacijom, a najpogodnije je na izvoru njegova nastajanja, na početku i kraju proizvodnog procesa te na kraju uporabnog vijeka u kućanstvu i industriji. Smanjenje nastajanja otpada u proizvodnom dijelu te njegovim povratkom u proizvodni proces dovelo je do znatnog smanjenja troškova proizvodnje, tj. pokazalo se ekonomski isplativo.

Sortiranje polimernog otpada predstavlja osnovni dio predobrade u postupku recikliranja. Zbog jednostavnijeg prikupljanja, sortiranja i recikliranja, proizvodi od različitih vrsta polimernih materijala označavaju se prema Normi ISO 14000, brojevima i simbolima plastičnih ambalažnih proizvoda od jedan do šest, a broj sedam se odnosi na sve ostale vrste (slika 6) [15].

			
POLI (ETILEN-TEREFTALAT), PET	POLIETILEN VISOKE GUSTOĆE, HDPE	POLI (VINIL-KLORID), PVC	POLIETILEN NISKE GUSTOĆE, LDPE

		
POLIPROPILEN, PP	POLISTIREN, PS	OSTALI PLASTIČNI MATERIJELI

Slika 6. Simboli pojedinih vrsta polimernih materijala

Na temelju svojstava polimera razlikujemo ručno i automatizirano sortiranje. Kod ručnog sortiranja, odvajanje se vrši na osnovi vizualne identifikacije otisnutog reciklacijskog broja na ambalaži te na osnovi nijansi i različitih obojenja. Automatizirano sortiranje bazira se na metodi identifikacije otpadnih plastičnih materijala [9].

Kako bi otpadna ambalaža bila prikladnija za transport i punjenje reciklažnog postrojenja, zbog njene voluminoznosti neophodno je ***usitnjavanje***. Mehaničke tehnike usitnjavanja su mrvljenje i granuliranje, zgušćivanje i zbijanje te mljevenje u prah. Često se ovi postupci usitnjavanja kombiniraju sa procesom recikliranja. Postupak usitnjavanja otpadne ambalaže omogućuje odstranjivanje ostalih materijala sa proizvoda.

Pod pojmom ***recikliranje*** podrazumijeva se sakupljanje, razvrstavanje i oblikovanje polimernog otpada u nove materijale s ciljem izrade novih proizvoda slične ili iste namjene. Slika 7. prikazuje simbol koji je prihvaćen kao opći simbol za postupak recikliranja, a sastoji se od tri strelice koje su usmjerene u smjeru okretanja sata čineći trokut u kojem se nalazi broj. Kada nema broja, simbol predstavlja univerzalni simbol recikliranja i predstavlja materijal koji je moguće reciklirati [12].



Slika 7. Simbol za recikliranje materijala

Mehaničko recikliranje predstavlja toplinsku preradu materijala, taljenje i ekstruziju polimera u svrhu dobivanja novih polimernih materijala. Reciklirani materijal koristi se samo kao smjesa s originalnim polimerom za primarnu namjenu, jer sam ne bi udovoljio mehaničkim zahtjevima konačnog proizvoda.

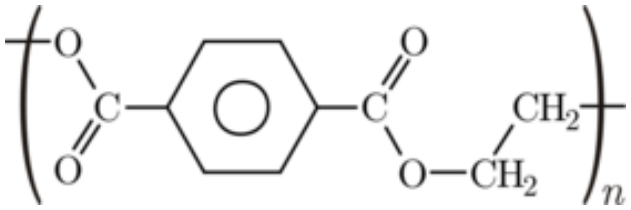
Kemijsko recikliranje materijalni je oporavak pri kojem se polimerna ambalaža tretira kemijski ili toplinski sve do polazne sirovine, tj. monomera. Kemijsko se recikliranje znatno razlikuje od mehaničkog recikliranja, a koje daje konačan produkt polimera. Kemijski se mogu oporaviti plastomeri, duromeri i elastomeri.

Energetski oporavak najčešći je način recikliranja polimernog materijala, a podrazumijeva spaljivanje i iskorištavanje energije sadržane u njemu, a na taj se način obrađuje 13,4 % ukupnog otpada. Energetskim recikliranjem oporabljuju se polimerni i gumeni otpad spaljivanjem na roštilju i u vrtložnom sloju, oporavkom u cementnim pećima i toplinskom oporabom uz dodatak mulja.

Odlaganje polimernog otpada znači ekonomsku, ali ne nužno i ekološku štetu, jer je polimerni otpad neutralan i pridonosi stabilnosti odlagališta. Prednost polimernog otpada je u njegovoj nerazgradljivosti, jer nema emisije štetnih plinova i kapljevitih oštećenja, koje su posljedica bioraspada materijala u odlagalištu. Budući da se polimerni materijali upotrebljavaju oko 60-tak godina, još uvijek nema dovoljno informacija o njegovom djelovanju na odlagalištima, osim da pokazuje vrlo male promjene i nakon niza godina [9].

2.2. Poli (etilen – tereftalat), PET

Poli (etilen - tereftalat), PET, čija je strukturna formula prikazana na slici 8, pripada skupini poliestera, s osnovnom ponavljajućom jedinicom koja se sastoji od tereftalne i etilenske skupine, razvijen u SAD-u još 1941. godine [16]. Početkom pedesetih godina prošloga stoljeća počeo se koristiti kao osnova za vrlo kvalitetna umjetna vlakna u tekstilnoj industriji, a sedamdesetih godina počela je njegova primjena za izradu spremnika pića, hrane i ostalih tekućina [17].



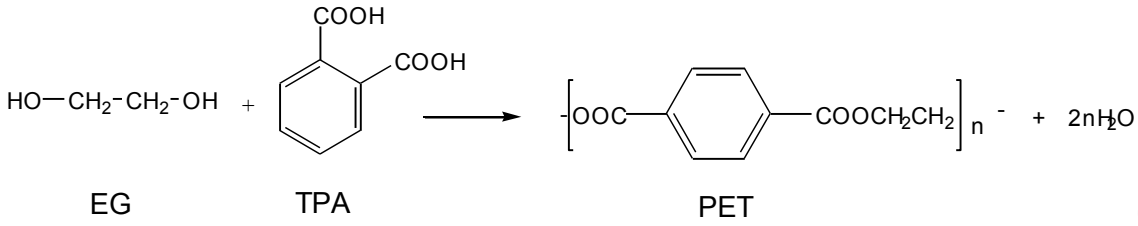
tereftalna skupina etilenska skupina

Slika 8. Strukturna formula poli (etilen - tereftalata)

2.2.1. Postupci dobivanja i svojstva PET-a

PET se proizvodi postupcima direktne esterifikacije i esterske izmjene.

Postupak dobivanja PET-a direktnom esterifikacijom obuhvaća reakciju etilen – glikola (EG) i tereftalne kiseline (TPA) pri temperaturi između 240 i 260 °C, jednadžba 1 [18].



(1)

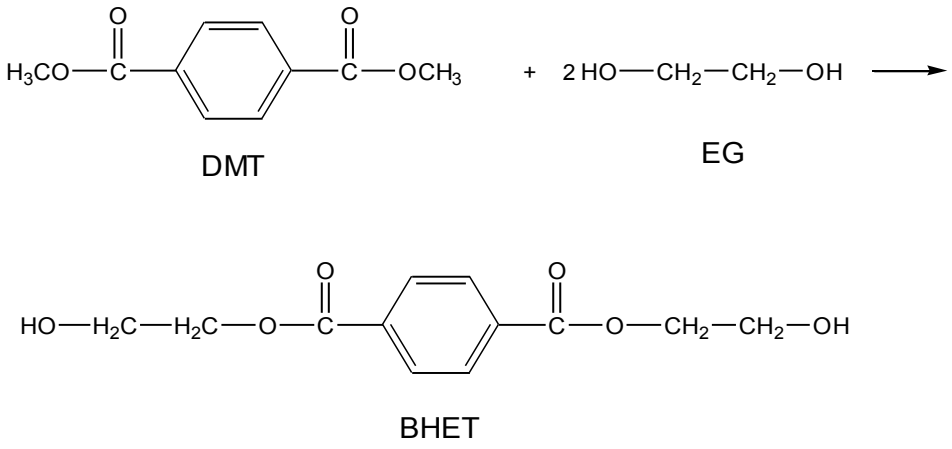
Pri provođenju ovog procesa kao katalizatori upotrebljavaju se antimonov (III) oksid, fosforna kiselina, antimonov pentafluorid i p - toluensulfonska kiselina.

Direktnom esterifikacijom dobiva se PET intrinzične viskoznosti 0,95 dl/g i stupnja polimerizacije do 200. Ovim postupkom dobiva se poliester s niskim sadržajem krajnjih karboksilnih skupina i tijekom ovog procesa nema nepoželjnih sporednih reakcija [18].

Esterska izmjena odvija se u dva stupnja:

I stupanj: reakcija transesterifikacije

U prvom stupnju reagira dimetil-tereftalat (DMT) i etilen-glikol (EG) uz katalizator manganov acetat pri temperaturi od 150 do 220 °C i pri tlaku od 100 kPa. Reakcijom dimetil-tereftalata i etilen-glikola nastaje metil-2-hidroksietil-tereftalat, MHET, koji daljnjom reakcijom s etilen-glikolom stvara monomer 1,4-bis-hidroksietilentereftalat, BHET, jednadžba 2.



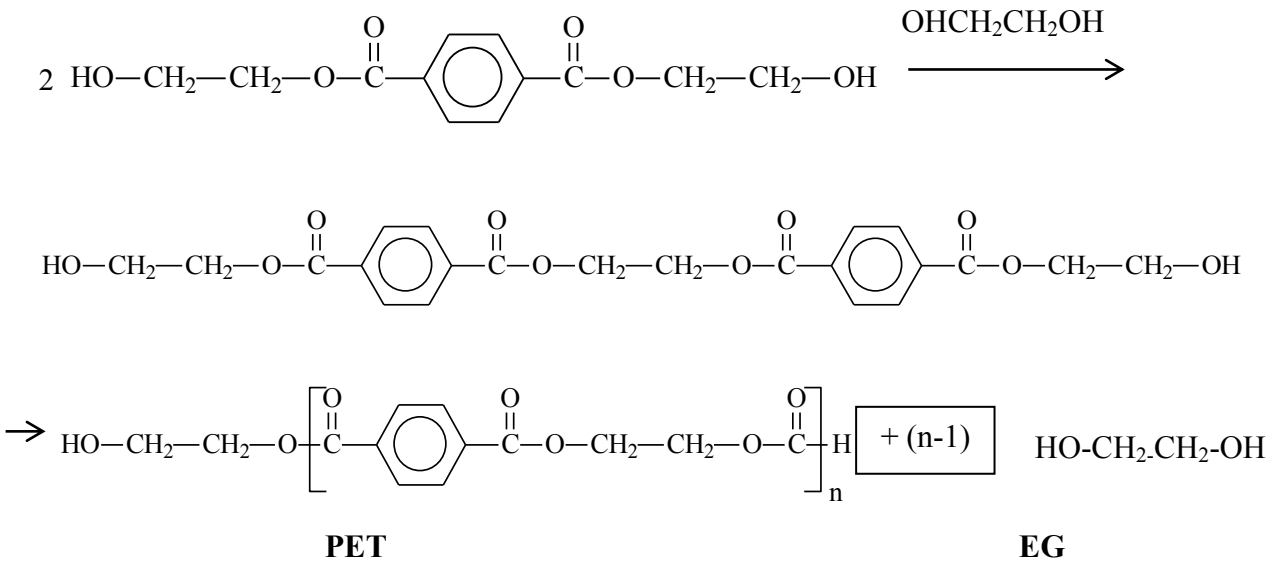
(2)

Metanol isparava tijekom reakcije i kontinuirano se odvodi što je vrlo važno jer bi u slučaju ne odvođenja metanola došlo do povratne reakcije. Nakon što se metanol izdvoji, intenzitet grijanja se pojačava i započinje izdvajanje suviška etilen-glikola [19].

II stupanj: reakcija polikondenzacije

Procesom polikondenzacije monomera 1,4-bis-hidroksietilentereftalata, BHET - a dobiva se poli (etilen – tereftalat), PET. Reakcija se odvija na visokim temperaturama, od 285 do 290 °C uz katalizator antimonov oksid, Sb_2O_3, jednadžba 3. Tijekom reakcije izdvaja se etilen – glikol koji se mora kontinuirano odvoditi kako ne bi došlo do reakcije depolimerizacije PET– a, čime bi se dobio PET nedovoljno visokih vrijednosti molekulskih masa i nezadovoljavajućih primjenskih svojstava [18].

Radi sprečavanja djelomične razgradnje poliestera dodaje se stabilizator, fosforna kiselina. Esterska izmjena poželjnija je metoda dobivanja PET - a od direktne esterifikacije jer se dobiveni materijal lakše pročišćava. Ovako dobiveni PET prikladan je za primjene koje ne zahtijevaju visoku molekulsku masu, a to su vlakna i folije [19].



(3)

Poli (etilen-tereftalat), PET polimer je kristalične strukture, nelomljiv materijal, otporan na mehanička oštećenja, bez mirisa, izuzetno lagan, izdržljiv te otporan na vlagu.

Proziran je poput stakla i nepropustan za većinu plinova kao što su ugljikov dioksid, kisik i vodena para i zahvaljujući tome se koristi u pakiranju gaziranih pića. Podatan je za dizajniranje i dekoriranje te je popularan kao ambalažni materijal [17].

Karakterizira ga otpornost prema velikom broju otapala, kao što su: voda, slabe kiseline i lužine, alkoholi, glikoli, eteri, alifatski ugljikovodici, benzin te motorna ulja.

Gornja temperaturna granica za kontinuiranu upotrebu PET-a je 140 °C dok pri višim temperaturama (iznad 290 °C), PET degradira [20].

PET je higroskopni materijal koji se mora sušiti prije prerade da bi se spriječila hidrolitička degradacija koja uzrokuje smanjenje molekulske mase i pogoršava mehanička svojstva.

Fizička i kemijska svojstva dana su u tablici 1 [20].

Tablica 1. Osnovna svojstva PET-a

Temperatura stakliša, T_g	76 °C
Temperatura tališta, T_m	255 °C
Gustoća, ρ	1,33 gcm^{-3}
Molekulska masa ponavljajuće jedinice, M	192,2 $gmol^{-1}$

Zbog niske cijene, PET je primjeren za široku uporabu: kao vlakna, folije, filmovi, konstrukcijski plastomerni materijal u brodogradnji, građevinarstvu, kemijskoj industriji, industriji vozila i elektro industriji (slika 9) [21].

a) b)



c)



Slika 9. Upotreba PET-a: a) folije, b) vlakna i c) boce

Najviše se upotrebljava kao ambalažni materijal, većinom za izradu boca za pakiranje raznovrsnih napitaka. Danas se PET boce sve više upotrebljavaju umjesto staklenih boca jer su čvrste, otporne na udarce i gotovo nelomljive, imaju manju masu i nižu cijenu od staklenih.

Zbog niske temperature staklišta PET boce nije moguće sterilizirati poput staklenih pa ih je potrebno reciklirati već nakon prve upotrebe te se zbog toga organizira njihovo prikupljanje [9].

2.2.2. Stabilnost i degradacija PET-a

Stabilnost polimernih materijala na različite utjecaje tijekom proizvodnje i primjene naziva se otpornost materijala. Ispituje se postojanost polimernih materijala na toplinske i atmosferske utjecaje, na UV-zračenje, kemikalije, ulja, benzin kao i otpornost na mehanička naprezanja. Prisustvo kemijskih procesa tijekom razgradnje mijenja strukturu polimera, odnosno dolazi do degradacije [22].

Degradacija polimera obuhvaća cijepanje polimera na kraće lance, potpuno nestajanje polimera depolimerizacijom i nastajanje monomera, a u oba slučaja dolazi do gubitka osnovnih svojstava polimera. Polimerni materijali izloženi su raznim degradacijskim djelovanjima tijekom prerade, skladištenja i upotrebe. Degradacija uključuje kemijsku modifikaciju polimera pod utjecajem okoliša, odnosno modifikaciju koja mijenja svojstva polimernog materijala.

Mehanizam degradacije značajan je za postojanost materijala tijekom primjene, kao i tijekom recikliranja polimera, odnosno tijekom njegovog zbrinjavanja. Poli (etilen-tereftalat) sadrži karakteristične esterske skupine koje su podložne razgradnji na povišenim temperaturama, a naročito u prisustvu vlage. Tijekom postupka predobrade, prerade te recikliranja, PET je izložen djelovanju povišene temperature, mehaničkog naprezanja (mljevenje u pahulje) te djelovanju lužine tijekom pranja, koja inicira reakciju hidrolize, tj. depolimerizaciju [18].

2.3. Postupci recikliranja PET-a

Recikliranje PET-a jedan je od najuspješnijih i najraširenijih procesa recikliranja polimera, te se neprestano bilježi porast količine PET-a koji se reciklira. Za recikliranje PET-a primjenjuju se tri metode: mehaničko, kemijsko i energijsko recikliranje. Da bi se reciklirani PET mogao upotrijebiti za visoko vrijednu namjenu mora sadržavati minimalnu količinu onečišćenja [23].

Pri recikliranju PET-a javljaju se poteškoće koje uključuju [22]:

- obezbojenje PET-a zbog prisutnosti tragova adheziva i gubljenje njegove prozirnosti
- degradaciju PET-a uslijed vlage pa je potrebno sušenje
- velike troškove sakupljanja PET boca
- pojavu žutoće i slabljenje mehaničkih svojstava kao posljedica produkata degradacije

2.3.1. Predobrada PET- a

Predobrada PET-a uključuje njegovo prikupljanje, razvrstavanje, usitnjavanje, pranje i sušenje.

Uklanjanje nečistoća iznimno je važan korak u pripremi za recikliranje jer je njihov, što manji udio, vrlo važan za očuvanje dobrih fizičkih i kemijskih svojstava PET-a tijekom recikliranja tj. za dobivanje recikliranog PET-a zadovoljavajuće kvalitete. Boce je potrebno razvrstati po boji jer prisutnost boca različitih boja može uzrokovati neželjenu boju recikliranog PET-a (slika 10) [12].



Slika 10. Prikupljanje (a) i razvrstavanje (b) PET boca

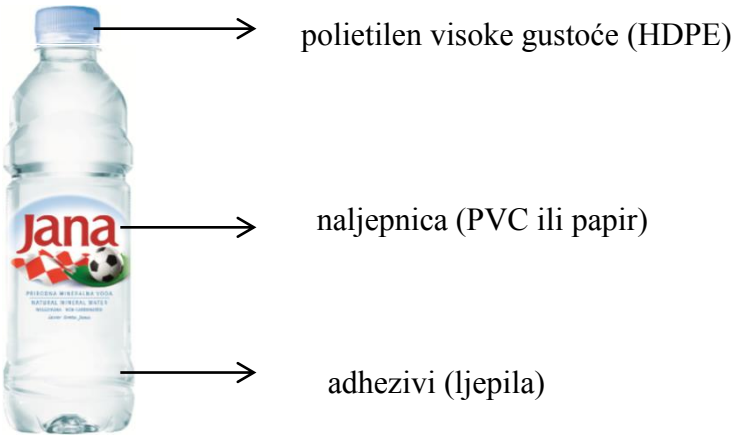
Prisutnost poli (vinil - klorida), PVC-a, posebno je štetna u procesu recikliranja PET-a jer PVC tijekom recikliranja degradira i uzrokuje nastajanje kiselih produkata koji uzrokuju pucanje lanaca PET-a i smanjenje njegove molekulske mase tj. nastanak recikliranog materijala slabijih svojstava.

Papirnate naljepnice potrebno je ukloniti prije procesa pranja jer raspadnuti papir, zaostao nakon procesa pranja, može osloboditi celulozna vlakna koja je poslije teško odvojiti od polimera.

Naljepnice, bilo da su od papira ili polimera (PVC), sadrže tintu i boje koje mogu sadržavati teške metale. Pigmenti i boja dodatno onečišćuju polimer bilo da se dodaju samom polimeru ili dijelovima proizvoda (čepovi, naljepnice) [22].

Razne nečistoće poput stakla i ostalih krutih nečistoća zaostale u PET-u mogu uzrokovati lomljivost vlakana. Acetaldehid, CH_3CHO glavni je produkt degradacije PET-a te ga je važno reducirati jer njegova prisutnost može utjecati, npr. na okus hrane [24].

Polietilen visoke gustoće (HDPE) nemješljiv je s PET-om pa je, u svrhu dobivanja recikliranog PET- a dobre kvalitete, nužno odvojiti HDPE čepove s PET boca (slika 11) prije provođenja postupka recikliranja [18].



Slika 11. Dijelovi PET boce koji se uklanjaju prije recikliranja

Usitnjavanje

Nakon odvajanja nečistoća PET se melje u sitne komadiće. Jedan od najčešće korištenih strojeva za usitnjavanje otpadne plastike je rezač s rotirajućim noževima. Razmak između noževa postavlja se ovisno o željenoj veličini granula materijala (slika 12) [18].



Slika 12. Rezač s rotirajućim noževima

Pranje

Najčešće se koristi postupak alkalnog pranja koji se sastoji od dva koraka: toplog pranja s natrijevim hidroksidom (NaOH) i deterdžentom na temperaturi od 80 ºC te hladnog pranja koje uključuje ispiranje vodom. Kod alkalnog je pranja važno temeljito isprati PET nakon pranja jer alkalni ostaci (NaOH) utječu na pojavu degradacije tijekom postupka mehaničkog recikliranja.

Pranjem se također odvajaju i nečistoće koje nije bilo moguće odvojiti prije postupka pranja: ostaci ljepila na bocama te ostaci stakla i metala (staklo i metal uklanjaju se filtracijom nakon procesa pranja).

Adhezivi koji se ne tope uobičajenim pranjem vodom, uklanjaju se pranjem otapalima. Otapala poput tetrakloretilena i heksana su prikladna za uklanjanje ljepila [18].

PET boce također se često upotrebljavaju za pohranjivanje različitih tekućina od deterdženata, pesticida do lož ulja, koji su štetni za zdravlje ljudi ukoliko zaostanu u materijalu nakon recikliranja. Ovako onečišćene PET boce nije moguće u potpunosti oprati, tj. ukloniti zaostale nečistoće, stoga ih treba strogo razdvojiti i reciklirati zasebno [22].

Sušenje

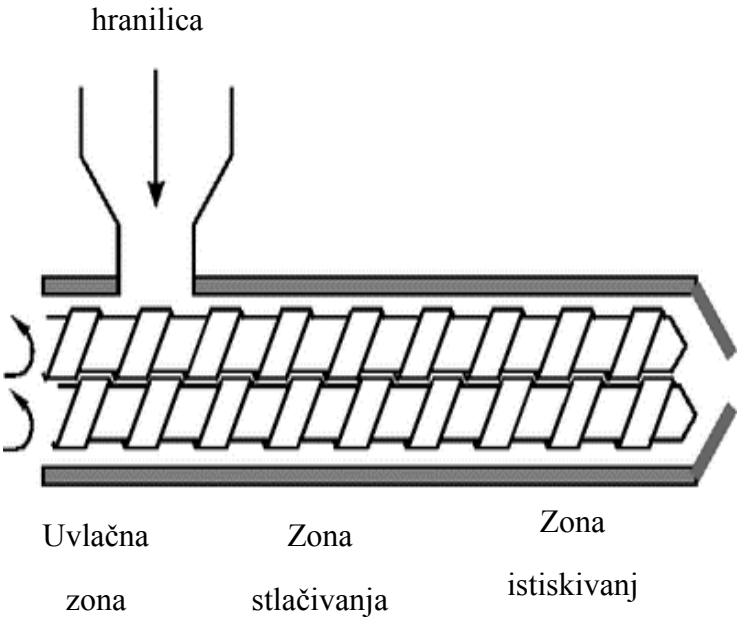
Sušenje je važan korak pripreme PET-a jer se tako smanjuje udio vlage i sprečava pojava hidrolitičke degradacije, pada molekulske mase i slabljenja svojstava PET-a. Uglavnom se uvjeti sušenja kreću od 140 do 170 °C u trajanju od 3 do 7 sati ili se postupak sušenja provodi pri nižoj temperaturi, ali s produljenim vremenom sušenja tj. pri 120 °C u trajanju od 24 sata [19].

2.3.2. Mehaničko recikliranje PET-a

Mehaničko recikliranje predstavlja toplinsku preradu materijala, taljenje i ekstruziju polimera u svrhu dobivanja novih polimernih materijala. Tako dobiveni reciklirani polimerni materijal umješava se u različitim postocima s originalnim polimerom. Mehaničko recikliranje dijeli se na primarno recikliranje čistog polimernog otpada radi ponovne prerade te na sekundarno recikliranje upotrebljenog proizvoda [25].

Mehaničko recikliranje provodi se ekstrudiranjem. Ekstrudiranje je proces kontinuiranog protiskivanja zagrijanog i omekšanog polimera kroz mlaznicu.

Pomoću lijevka za doziranje materijala (hranilicu) unosi se smjesa polimera ili polimera i aditiva u cilindar obložen grijačima u kojem se pomoću pužnog vijka smjesa umješava i homogenizira te zagrijavanjem prevodi u talinu. Pužni vijak rotira, a u slučaju dvaju pužnih vijaka rotacija se odvija najčešće u suprotnom smjeru. Promjer pužnog vijka nije jednak u cijelom cilindru već se povećava prema izlazu, a visina navoja puža je veća tamo gdje je promjer manji tj. na početku cilindra. Dobivena talina se uz odgovarajući pritisak rotacijom pužnog vijka usmjeruje kroz sito prema dizi i istiskuje iz dize. Sito zadržava određene nečistoće ili nedovoljno homogeniziranu talinu. Istisnuti polimer očvršćuje hlađenjem u ekstrudat, potom se suši i može se dalje prerađivati (slika 13) [12].



Slika 13. Shema dvopužnog ekstrudera

Ovim postupkom izrađuju se proizvodi ili poluproizvodi tj. ekstrudati koji mogu biti folije, filmovi, vlakna [12].

Mehaničko recikliranje, u odnosu na postupke kemijskog recikliranja relativno je jednostavno i zahtijeva niske investicije te ima neznatan utjecaj na okoliš.

Nedostaci mehaničkog recikliranja su smanjenje molekulske mase i slabljenje mehaničkih svojstava zbog visokih temperatura i naprezanja. Također, tijekom mehaničkog recikliranja dolazi i do degradacije materijala te se kao takav ne može koristiti u primarne svrhe jer ne bi zadovoljio određene zahtjeve i izgled konačnog proizvoda [26].

Mehaničko recikliranje provodi se i za dobivanje vlakana iz kojih se dobivaju PET tkanine. Otpadne boce prvo se suše te ekstrudiraju. Taljevina iz ekstrudera se filtrira te nastaju mreže od PET niti koje se koriste za filtre, adsorbente, opremu za sport i kampiranje te u novije vrijeme za punjenje automobilskih sjedala [27].

2.3.3. Kemijsko recikliranje PET-a

Kemijsko recikliranje materijalni je oporavak pri kojem se polimerni otpad tretira kemijski ili toplinski sve do polazne sirovine, tj. monomera [25].

Poli (etilen-tereftalat) primjeren je za kemijsko recikliranje (kemolizu). Uslijed kemijskog recikliranja PET se ponovno razlaže na reaktante od kojih je dobiven: tereftalnu kiselinu (TPA) i etilen-glikol (EG). Zbog toga se produkti dobiveni ovim postupkom mogu koristiti pri ponovnoj proizvodnji PET-a [22].

Kemijsko recikliranje (kemoliza) PET-a provodi se na tri načina, metanolizom, hidrolizom i glikolizom [19].

Metanoliza

Kemijsko recikliranje PET-a postupkom metanolize rezultira nastajanjem monomera dimetil - tereftalata (DMT) i etilen - glikola (EG), jednadžba 4.

$$\text{PET} \xrightarrow{\text{Metanol}} \text{DMT} + \text{EG} \qquad (4)$$

Tijekom postupka može doći do povećane kristaliničnosti pa je za izdvajanje DMT-a neophodan destilacijski postupak pri visokoj temperaturi. Nedostatak postupka su velika ulaganja i visoki troškovi rada postrojenja te iz tog razloga, postojeća postrojenja na industrijskom nivou imaju tendenciju zatvaranja [19].

Hidroliza

Hidroliza je postupak kemijskog recikliranja PET-a kada djelovanjem vode dolazi do depolimerizacije PET-a na monomere tereftalnu kiselina (TPA) i etilen-glikol (EG), jednadžba 5.

$$\mathrm{PET} \xrightarrow{H_2O} \mathrm{TPA} + \mathrm{EG} \tag{5}$$

Da bi se hidroliza PET-a provela u razumnom vremenskom periodu za odvijanje reakcije potrebni su ekstremni uvjeti visokog tlaka i temperature. Nedostatak postupka velika je količina soli koju je potrebno sanirati kao otpad, a takav postupak je skup [22].

Glikoliza

Glikoliza PET-a najčešće se provodi pod sniženim tlakom te na temperaturama od 180 °C – 220 °C, u inertnoj atmosferi dušika da bi se izbjegla oksidacija poliolnih produkata i kontrolirano dobile sirovine visoke kvalitete. Glavni produkt depolimerizacije PET-a glikozom je monomer BHET (1,4-bis-hidroksietilentereftalat) i oligomeri PET-a, jednadžba 6.

$$\mathrm{PET} \xrightarrow{EG} \mathrm{BHET} + \mathrm{OLIGOMERI} \tag{6}$$

Procesom glikolize PET-a, osim BHET-a, nastaju i oligomeri koji su važne sirovine za mnoge kemijske reakcije, npr. za proizvodnju nezasićenih poliestera i poliuretana. Postupak glikolize u usporedbi s ostalim postupcima ima znatno nižu cijenu jer za postupak nisu

potrebni ekstremni uvjeti. U odnosu na metanolizu, prednost glikolize je u tome što se PET lakše otapa u glikolu u odnosu na metanol.

Druga prednost je relativno visok sadržaj energije krajnjih produkata koji se kasnije vraćaju u proces dobivanja novog polimera. Tijekom procesa kemijskog recikliranja može doći do različitih sporednih reakcija esterifikacije pa nastaje voda ili dietil-glikol (DEG) [19].

Nakon depolimerizacije nastali se monomeri ili oligomeri najprije pročišćavaju vakuum destilacijom, a zatim se vraćaju u proces i ponovno polimeriziraju u svrhu dobivanja čistog PET-a. Od navedenih procesa kemijskog recikliranja PET-a, glikoza se pokazala najboljim procesom u ekonomskom, tehnološkom i ekološkom smislu. Svi navedeni procesi kemijskog recikliranja upotrebljavaju se u praksi, ali se i dalje istražuju i razvijaju [22].

2.3.4. Svojstva i primjena recikliranog PET-a

U usporedbi s čistim PET-om, mehanički reciklirani PET ima manju molekulsku masu zbog toplinske degradacije, smanjuje se prozirnost odnosno mehanički PET je žućkast. Svojstva čistog i mehanički recikliranog PET-a prikazana su u tablici 2 [22].

Tablica 2. Svojstva čistog i mehanički recikliranog PET-a

Svojstvo	PET	Mehanički reciklirani PET
Intrinzična viskoznost, *dl/g*	0,72 – 0,84	0,46 – 0,76
Žutoća	0 – 15	0,4 – 4,0
Temperatura staklišta, *°C*	244 – 254	247 - 253
Acetaldehid, *%*	1,2 – 5,5	9,9 – 10,7

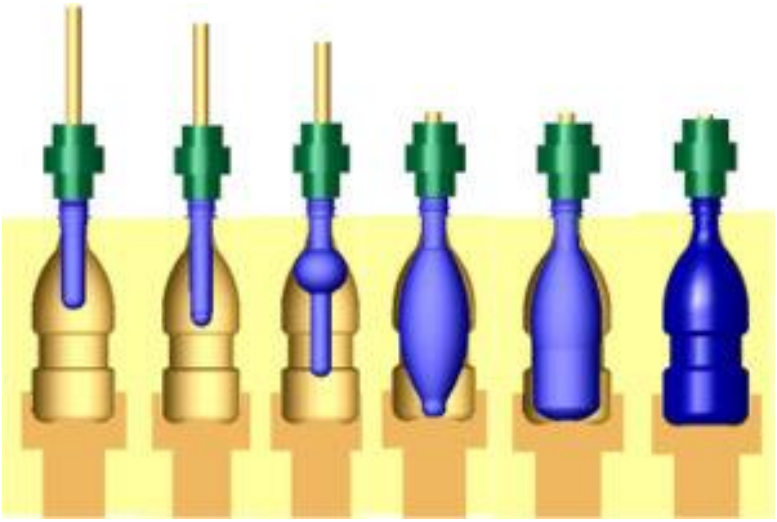
Mehanički reciklirani PET ima široku upotrebu, 56 % recikliranog PET-a koristi se za proizvodnju vlakana, ambalažu, inženjerske smole, kao materijal za punjenje jastuka, automobilskih sjedala, vreća za spavanje te za izradu sportske opreme.
Sve češće se koristi za proizvodnju odjeće. Primjerice, za izradu jedne jakne potrebno je oko 25 boca. Reciklat se može koristiti i za proizvodnju ograda, klupa u parku te kao oznaka u prometu. Reciklirani PET u udjelu od 15 % koristi se za proizvodnju novih boca koje se sve više koriste u prehrambenoj industriji (slika 14) [28].



Slika 14. Upotreba recikliranog PET-a

Reciklirani PET se kao ambalažni materijal najviše upotrebljava u prehrambenoj industriji. Međutim, nužno je između prehrambenog proizvoda i recikliranog PET-a osigurati sloj nekog drugog materijala u svrhu sprečavanja prelaska štetnih tvari i nečistoća iz recikliranog PET-a [18].

Nadalje, oko 40 – 50 % recikliranog PET-a koristi se kod proizvodnje višeslojnih boca. Čisti PET prvo se injektira u perforirane šupljine formirajući sloj na zaleđenim površinama. Drugi ekstruder injektira reciklirani PET koji struji između zaleđenih površina i potiskuje preostali materijal ispred. Konačno injektiranje čistog PET-a popunjava šupljine i osigurava početak novog ciklusa s novim čistim materijalom (slika 15) [22].



Slika 15. Postupak dobivanja višeslojnih boca

Glavne prednosti procesa dobivanja višeslojnih boca su ušteda materijala zbog upotrebe recikliranog PET-a i neznatna migracija nečistoća i štetnih tvari iz recikliranog PET-a.
"Super Cycle Washing Process" (poseban proces pranja) još je jedan proces u kojem se primjenjuje reciklirani PET [18].

"Super Cycle Washing Process" provodi se intenzivnim pranjem na visokim temperaturama (do 250 °C) kako bi se dobile poliesterske smole prikladne za kontakt sa hranom. Uz visoke temperature potreban je visoki tlak, dugo zadržavanje u vakuumu uz prisutnost katalizatora te na kraju filtriranje nastale taljevine.
Boce oprane ovim postupkom imaju slabija mehanička svojstva od industrijskog PET-a, ali su još uvijek u prihvatljivim granicama primjene. Ovim postupkom dobiva se PET s nižim udjelom acetaldehida što se može pripisati tretmanu u vakuumu pri čemu se acetaldehid oslobađa isparavanjem [18].

3. ZAKLJUČAK

Otpadna PET ambalaža čini sve veći volumni udio u komunalnom otpadu gdje zauzima oko 20-30 %, što svakako predstavlja veliko opterećenje za odlagališta otpada. Neadekvatnim zbrinjavanjem, odnosno odlaganjem na odlagališta ili spaljivanjem, gube se energija i sirovine koje su za njih utrošene.

Iznimno je važno dobro organizirati sustav prikupljanja otpada te educirati i poticati potrošače na odvojeno sakupljanje različitih vrsta otpada. Polimerni otpad vrijedna je sirovina za recikliranje, a razvoj procesa recikliranja uvelike doprinosi održivom razvoju. Mehaničko recikliranje PET- a provodi se ekstrudiranjem i proizvodi tog procesa nazivaju se ekstrudati (folije, vlakna). Kemijsko recikliranje PET- a provodi se na tri načina, a to su metanoliza, hidroliza i glikoliza. Mehaničko recikliranje PET- a, u odnosu na postupke kemijskog recikliranja PET- a relativno je jednostavno i zahtijeva niske investicije te ima neznatan utjecaj na okoliš.

PET ambalaža može se u potpunosti reciklirati, stoga je neophodno njezino odvojeno sakupljanje. Recikliranjem osiguravamo očuvanje prirode i prirodnih sirovina, smanjenje onečišćenosti zraka, vode i tla, štednju energije te smanjenje deponijskog prostora.

Upravo zato izdvajanje ambalažnog otpada iz komunalnog predstavlja veliki doprinos rješavanju aktualnog problema odlaganja otpada.

.

4. LITERATURA

1. Janović Z. *Polimerizacije i polimeri*. Zagreb: Hrvatsko društvo kemijskih inženjera i tehnologa; 1997.
2. Buggy M. *Polymeric Material*. *Materials Science and Materials Engineering.* Limerick: Elsevier; 2015.
3. Pavlečić T, Radman A, Schreiber M. *Brošura „Otpad je i tvoj problem“*. VG Poduzetnički centar d.o.o.; 2009.
4. Kladarić I. *Materijali*. Dostupno na: http://brod.sfsb.hr/~ikladar/Materijali%20I/Podjela%20polimeria.pdf. Datum pristupa: 12.03.2016.
5. *Celuloza*. Dostupno na: http://www.izoliraj.me/celuloza/. Datum pristupa: 03.05.2016.
6. *Kako se pravi svila*. Dostupno na: http://www.nationalgeographic.rs/vesti/6112-kako-se-pravi-svila.html. Datum pristupa: 03.05.2016.
7. *Polimeri*. Dostupno na: http://www.kazuli.com/UW/4A/ME534/asgn1.htm. Datum pristupa: 13.03.2016.
8. *Ambalažni otpad*. Dostupno na: http://www.fzoeu.hr/hr/gospodarenje_otpadom/posebne_kategorije_otpada/ambalazni_otpad/. Datum pristupa: 15.03.2016.
9. Đurina M. *Oporaba PET ambalaže*. Završni rad. Varaždin: Sveučilište u Zagrebu, Geotehnički fakultet. 2015.
10. Kratofil Krehula Lj, Hrnjak-Murgić Z, Ptiček Siročić A. *Zbrinjavanje i recikliranje polimernog otpada*. Zagreb; 2013.
11. Kemeter D. *Održivo gospodarenje otpadom.* Čakovec: Međimursko veleučilište u Čakovcu. 2015.
12. Ptiček Siročić A. *Recikliranje i zbrinjavanje otpada*. interna skripta. Zagreb: Zavod za polimerno inženjerstvo i organsku kemijsku tehnologiju, Fakultet kemijskog inženjerstva i tehnologije; 2012.
13. *Polimerni otpad.* Dostupno na: http://www.lotus91.hr/eko-kutak/polimerni-otpad.html. Datum pristupa: 04.04.2016.

14. *Održivo gospodarenje otpadom*. Dostupno na: http://www.mzoip.hr/hr/otpad/odrzivo-gospodarenje-otpadom.html. Datum pristupa: 05.04.2016.
15. Bačun D. *Priručnik o znakovima na proizvodima i ambalaži*. Zagreb: Hrvatski poslovni savjet za održivi razvoj; 2009.
16. Perić P. *Primjena poli (etilen-tereftalata) za pakiranje napitaka osjetljivih na kisik*. Diplomski rad. Zagreb: Sveučilište u Zagrebu, Fakultet strojarstva i brodogradnje. 2008.
17. Ivanišević M. *Trendovi razvoja polimera u Republici Hrvatskoj*. Diplomski rad. Zagreb: Sveučilište u Zagrebu, Fakultet strojarstva i brodogradnje. 2011.
18. Dukić M. *Utjecaj postupka predobrade na svojstva PET pahulja*. Diplomski rad. Zagreb: Sveučilište u Zagrebu, Fakultet kemijskog inženjerstva i tehnologije. 2006.
19. Fijačko A. *Kemijsko recikliranje ambalažnog PET polimera glikolizom*. Završni rad. Zagreb: Sveučilište u Zagrebu, Fakultet kemijskog inženjerstva i tehnologije. 2010.
20. Križan I. *Jednoslojni i višeslojni spremnici od poli(etilen-tereftalat)-a*. Završni rad. Zagreb: Sveučilište u Zagrebu, Fakultet strojarstva i brodogradnje. 2008.
21. Rujnić – Sokele M. Izradba ambalaže od poli (etilen – tereftalata) te njezina uporaba i primjena u prehrambenoj industriji. *Polimeri: časopis za plastiku i gumu*. 2004. 24(2-4), pp. 87-94
22. Rešček A. *Utjecaj postupka predobrade na svojstva PET pahulja*. Diplomski rad. Zagreb: Sveučilište u Zagrebu, Fakultet kemijskog inženjerstva i tehnologije. 2008.
23. Scheirs, J. *Polymer Recycling: Science*. Technology and Applications. John Wiley & Sons. New York. 1998.
24. Hrnjak-Murgić Z.: *Zbrinjavanje polimernog otpada*. interna skripta. Zagreb. 2006.
25. Azapagic A, Emsley A., Hamerton L.: *Polymers, the environment and sustainable development*, Guildford. UK. 2003.
26. Hrnjak- Murgić Z, Katančić Z, Kratofil Krehula Lj. In: Nediljka Gaurina-Medjimurec, editor. *Plastics and Priority During the Recycling*: *Handbook of Research on Advancements in Environmental Engineering* SAD: IGI Global, 2015. pp. 257-284.

27. Pehnec Pavlović G, Sartorius I. *Plastika- previše vrijedna da bi se bacila*. Hrvatska gospodarska komora. 2010.
28. Filetin T. *Recikliranje ambalaže*. interna skripta. Zagreb: Sveučilište u Zagrebu, Fakultet strojarstva i brodogradnje. 2012.

5. POPIS SLIKA

Slika 1. Područja primjene polimernih materijala

Slika 2. Prirodni polimeri – a) celuloza, b) svila, c) kaučuk i d) pamuk

Slika 3. Podjela polimera prema oblicima makromolekula

Slika 4. Amorfna (a) i kristalna (b) struktura polimera

Slika 5.Područje primjene: a) ljepilo i b) premaz na ambalaži

Slika 6. Simboli pojedinih vrsta polimernih materijala

Slika 7. Simbol za recikliranje materijala

Slika 8. Strukturna formula poli(etilen- tereftalata)

Slika 9. Upotreba PET-a: a) folije, b) vlakna i c) boce

Slika 10. a) Prikupljanje i b) razvrstavanje PET boca

Slika 11.Dijelovi PET boce koji se uklanjaju prije recikliranja

Slika 12. Rezač s rotirajućim noževima

Slika 13. Shema dvopužnog ekstrudera

Slika 14. Upotreba recikliranog PET-a

Slika 15. Postupak dobivanja višeslojnih boca

6. POPIS TABLICA

Tablica 1. Osnovna svojstva PET-a

Tablica 2. Svojstva čistog i mehanički recikliranog PET-a