

Proizvodnja, svojstva i recikliranje poli(etilen-tereftalatnih) boca

Hudoletnjak, Helena

Undergraduate thesis / Završni rad

2024

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **University of Zagreb, Faculty of Chemical Engineering and Technology / Sveučilište u Zagrebu, Fakultet kemijskog inženjerstva i tehnologije**

Permanent link / Trajna poveznica: <https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:149:492613>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2025-01-14**



Repository / Repozitorij:

[Repository of Faculty of Chemical Engineering and Technology University of Zagreb](#)



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET KEMIJSKOG INŽENJERSTVA I TEHNOLOGIJE
SVEUČILIŠNI PREDDIPLOMSKI STUDIJ

Helena Hudoletnjak

ZAVRŠNI RAD

Zagreb, rujan 2024.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET KEMIJSKOG INŽENJERSTVA I TEHNOLOGIJE
POVJERENSTVO ZA ZAVRŠNE ISPITE

Kandidatkinja Helena Hudoletnjak

Predala je izrađen završni rad dana: 5. rujna 2024.

Povjerenstvo u sastavu:

izv. prof. dr. sc. Ljerka Kratofil Krehula, Sveučilište u Zagrebu Fakultet
kemijskog inženjerstva i tehnologije
prof. dr. sc. Emi Govorčin Bajsić, Sveučilište u Zagrebu Fakultet
kemijskog inženjerstva i tehnologije
doc. dr. sc. Iva Movre Šapić, Sveučilište u Zagrebu Fakultet kemijskog
inženjerstva i tehnologije
izv. prof. dr. sc. Vladimir Dananić, Sveučilište u Zagrebu Fakultet
kemijskog inženjerstva i tehnologije (zamjena)

povoljno je ocijenilo završni rad i odobrilo obranu završnog rada pred
povjerenstvom u istom sastavu.

Završni ispit održat će se dana: 10. rujna 2024.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET KEMIJSKOG INŽENJERSTVA I TEHNOLOGIJE
SVEUČILIŠNI PREDDIPLOMSKI STUDIJ

Helena Hudoletnjak

**PROIZVODNJA, SVOJSTVA I
RECIKLIRANJE
POLI(ETILEN-TEREFTALATNIH) BOCA**

ZAVRŠNI RAD

Voditelj rada: izv. prof. dr. sc. Ljerka Kratofil Krehula, FKIT

Članovi ispitnog povjerenstva:

izv. prof. dr. sc. Ljerka Kratofil Krehula, FKIT

prof. dr. sc. Emi Govorčin Bajsić, FKIT

doc. dr. sc. Iva Movre Šapić, FKIT

Zagreb, rujan 2024.

PROIZVODNJA, SVOJSTVA I RECIKLIRANJE

POLI(ETILEN-TEREFTALATNIH) BOCA

SAŽETAK

Poli(etilen-tereftalat) jedan je od najviše primjenjivanih polimera u posljednja dva desetljeća, a potražnja za njim kroz godine sve više raste. Odlična svojstva, kao što su visoko talište, niska propusnost na plinove (vodenu paru, O₂, CO₂), inertnost prema otapalima i kemikalijama, čvrstoća i tvrdoća, žilavost i toplinska stabilnost, omogućuju mu primjenu u brojnim industrijskim granama. Široka mu je primjena u prehrambenoj, tekstilnoj, automobilskoj i građevinskoj industriji pa i u medicini, ali najvažniju primjenu nalazi u izradi PET boca koje su tijekom godina postale najvažnijim proizvodom PET-a. Proizvodnja PET boca odvija se dvama procesima, a oni su injekcijsko prešanje PET predoblika i razvlačno puhanje PET boca koji se mogu odvijati u jednoj ili dvije zasebne faze. Injekcijskim prešanjem rastaljeni se PET ubrizgava u kalupne šupljine gdje poprima oblik predoblika te se kao takav izbacuje iz kalupa, a potom se razvlačnim puhanjem formira u PET boce. Tako nastale boce imaju primarnu ulogu u pakiranju obične i mineralne vode te bezalkoholnih gaziranih pića, no vremenom su postale i ambalaža za pakiranje drugih proizvoda poput mlijeka i mliječnih proizvoda, voćnih sokova, piva, lijekova, kemikalija, kozmetičkih proizvoda, sredstava za čišćenje, umaka, začina i sl. Jedan od glavnih razloga tako široke primjene PET boca mogućnost je njihovog potpunog recikliranja koje je izrazito bitno s obzirom da PET sudjeluje u stvaranju velike količine plastičnog otpada. Prije samog postupka recikliranja, potrebno je provesti pripremu za recikliranje koja se sastoji od sakupljanja, razvrstavanja, usitnjavanja, pranja i sušenja PET boca. Najzastupljeniji postupci recikliranja su mehaničko i kemijsko recikliranje, a kemijsko se recikliranje može provesti metanolizom, hidrolizom ili glikolizom.

KLJUČNE RIJEČI: poli(etilen-tereftalat), boce, ambalaža, recikliranje

PRODUCTION, PROPERTIES AND RECYCLING OF POLYETHYLENE TEREPHTHALATE BOTTLES

SUMMARY

Polyethylene terephthalate is one of the most used polymers in the last two decades, with its demand increasing over the years. Its excellent properties, such as high melting temperature, low gas permeability (water vapor, O₂, CO₂), inertness to solvents and chemicals, strength and hardness, toughness and thermal stability, allow it to be used in numerous industrial branches. It is widely used in food, textile, automotive and construction industries as well as in medicine but its most important application is in the production of PET bottles, which have become the most important PET product over the years. The production of PET bottles is carried out by two processes: injection molding of PET preforms and stretch blow molding of PET bottles, which can take place in one or two separate phases. In the injection molding process, molten PET is injected into mold cavities where it takes the shape of a preform. These preforms are then ejected from the mold and formed into the PET bottles through stretch blow moulding. These bottles have a primary role in the packaging of still and mineral water and soft carbonated drinks, but over time they have also become packaging for other products such as milk and dairy products, fruit juices, beer, pharmaceuticals, chemicals, cosmetic products, cleaning agents, sauces, spices etc. One of the main reasons for the widespread use of PET bottles is their ability to be fully recycled, which is extremely important considering that PET is involved in generating large amounts of plastic waste. Before the actual recycling process, it is necessary to carry out preparation for recycling, which consists of collecting, sorting, shredding, washing and drying of PET bottles. The most common recycling methods are mechanical and chemical recycling, with chemical recycling being carried out through methanolysis, hydrolysis or glycolysis.

KEY WORDS: polyethylene terephthalate, bottles, packaging, recycling

SADRŽAJ

1. UVOD	1
2. OPĆI DIO.....	2
2.1. POLIMERNI MATERIJALI.....	2
2.2. POLI(ETILEN-TEREFTALAT)	4
2.2.1. Proizvodnja poli(etilen-tereftalata)	4
2.2.2. Svojstva poli(etilen-tereftalata)	6
2.2.3. Primjena poli(etilen-tereftalata)	9
2.2.3.1. Poli(etilen-tereftalatne) boce	11
2.2.4. Recikliranje poli(etilen-tereftalata)	12
3. METODIKA.....	15
4. REZULTATI I RASPRAVA	16
4.1. Proizvodnja poli(etilen-tereftalatnih) boca.....	16
4.1.1. Injekcijsko prešanje PET predoblika.....	16
4.1.2. Razvlačno puhanje PET boca.....	17
4.2. Svojstva poli(etilen-tereftalatnih) boca	20
4.3. Primjena poli(etilen-tereftalatnih) boca.....	21
4.4. Recikliranje poli(etilen-tereftalatnih) boca	22
4.4.1. Priprema za recikliranje	23
4.4.2. Mehaničko recikliranje.....	25
4.4.3. Kemijsko recikliranje	25
5. ZAKLJUČCI	28
6. LITERATURA.....	29
7. POPIS SIMBOLA	32
8. ŽIVOTOPIS	33

1. UVOD

Polimeri se mogu podijeliti na prirodne ili biopolimere te sintetske polimere, od kojih prvi nastaju biosinteziom u živim organizmima, a drugi različitim sintetskim metodama polimerizacije u kojima niskomolekulski spojevi (monomeri) međusobnim povezivanjem kovalentnim vezama tvore polimere. S obzirom da je proizvodnja sintetskih polimera i plastomera bila znatno veća od dobivene količine prirodnih polimera i čelika, 20. stoljeće je nazvano polimernim dobom [1,2]. Od tada, potrošnja i primjena polimera neprestano raste, a polimerni su materijali vrlo važne tehničke upotrebljive tvari. Primjena polimera sastavni je i nezamjenjivi dio svakodnevice. Osim što se primjenjuju gdje i standardni materijali poput stakla ili drva, zbog svojih su iznimnih svojstava omogućili napredak raznih tehnologija, posebice nanotehnologije, razvoj građevinske industrije kao konstrukcijski materijali, napredak u medicini, poboljšanje u pakiranju i trajanju hrane te razvoj mnogih drugih djelatnosti [2,3,4].

Jedan od najviše primjenjivanih polimera je poli(etilen-tereftalat), PET, zasićeni poliester koji se dobiva stupnjevitom polimerizacijom tereftalne kiseline i etilen-glikola. Prvenstveno su se tom reakcijom dobivala PET vlakna, a tek su se kasnije krenule proizvoditi PET boce koje su danas najvažniji proizvod PET-a. PET ambalaža najviše se primjenjuje za proizvodnju boca za vodu te gazirana i negazirana bezalkoholna pića, a zamijenile su brojne staklene i metalne spremnike. Zbog njegovih odličnih svojstava, poput prozirnosti, žilavosti, čvrstoće, nepropusnosti na kisik i ugljikov dioksid, male mase, nelomljivosti, otpornosti na visoke tlakove i sl., potražnja za PET-om kroz godine sve više raste. PET ima mogućnost recikliranja tijekom kojega se svojstva recikliranog PET-a mogu održati bliskima svojstvima čistog PET-a, a iz otpadne se PET boce recikliranjem može dobiti nova PET boca [1,2,4].

Cilj ovog rada je dati pregled o proizvodnji, svojstvima i načinima recikliranja poli(etilen-tereftalata) s naglaskom na poli(etilen-tereftalate) boce kao najznačajniji proizvod PET-a.

2. OPĆI DIO

2.1. POLIMERNI MATERIJALI

Polimeri su visokomolekulski spojevi izrazito velikih molekulskih masa. Naziv polimer prvi put je spomenuo švedski znanstvenik Jöns Jakob Berzelius 1833. godine kada je polimerima nazvao kemijske spojeve koji se razlikuju veličinom molekulske mase, a sastoje se od istovrsnih ponavljanih jedinica, mera. Najčešće se dobivaju sintetskim metodama procesima polimerizacije, a znatno manje modifikacijama prirodnih makromolekulskih tvari. Prvu polimerizaciju u laboratoriju proveo je Eduard Simon 1839. godine zagrijavajući tekućinu nastalu destilacijom prirodnog balzama, storaksa, pri čemu je kao produkt dobio krutu, prozirnu masu. U današnje se vrijeme sve sintetske i modificirane prirodne makromolekule smatraju polimerima [1].

Polimeri se mogu podijeliti prema porijeklu i to na prirodne i sintetske polimere. Prirodni polimeri nastaju biosintezom u prirodi ili se sintetiziraju iz monomera prirodnog porijekla [5]. Prirodni polimeri najčešće su biopolimeri od kojih su izgrađeni živi organizmi, posebice bjelančevine, polisaharidi, nukleinske kiseline, potom hormoni, fermenti i sl., a neki koji se upotrebljavaju kao materijali su celuloza, škrob, svila, prirodna koža, prirodni kaučuk i guma [1,5]. Za razliku od prirodnih polimera koji se primjenjuju još od samog postanka ljudskog roda, sintetski polimeri se upotrebljavaju tek od druge polovice 19. stoljeća. Dobivaju se procesima polimerizacije i predstavljaju osnovu za proizvodnju polimernih materijala. Mogu se podijeliti na polimere organskog i anorganskog porijekla pri čemu se ovi organskog porijekla znatno više primjenjuju zbog relativno niskih cijena polaznih sirovina [1,3].

Polimerni materijali danas se ubrajaju u najvažnije tehničke materijale i njihov je razvoj, posebice u 20. stoljeću, ubrzao napredak mnogih područja ljudske djelatnosti. Osim toga, polimerni su materijali zamijenili uobičajene materijale kao što su metali, drvo, keramika i staklo. Polimerne tvari često se ne upotrebljavaju izravno nakon procesa polimerizacije, već im se dodaju razni aditivi kao što su antioksidansi, antistatici, bojila te svjetlosni ili toplinski stabilizatori čija je funkcija poboljšanje jednog ili više njihovih svojstava, a kao rezultat nastaju tehnički upotrebljivi polimerni materijali [1].

S obzirom na njihova svojstva koja mogu biti plastična ili elastična, polimerni se materijali razvrstavaju u poliplaste (plastomeri i duromeri) i elastomere [2].

Plastomeri ili termoplasti polimerni su materijali velikih molekulskih masa izgrađeni od linearnih ili razgranatih molekula od kojih oko 75 % nastaje procesima radikalnih polimerizacija [1]. Kemijska im se struktura ne mijenja zagrijavanjem do temperature taljenja ili mekšanja što im omogućava višestruko taljenje bez degradacije prilikom prerade. Topljivi su u organskim otapalima, mogu se oblikovati u željene oblike te im uzastopno hlađenje ili zagrijavanje ne mijenja ključna svojstva. Neki od najpoznatijih plastomera su polietilen (PE) (uključujući LDPE i HDPE), polipropilen (PP), polistiren (PS), poli(vinil-klorid) (PVC) i PET [1,6].

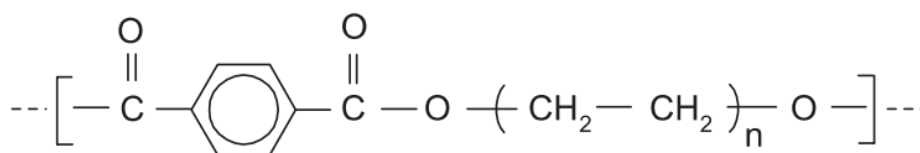
Duromeri ili termoseti polimerni su materijali koji se dobivaju kondenzacijskom polimerizacijom i u krajnjem obliku imaju trodimenzijske, umrežene strukture. Zbog tako nastalih struktura, prilikom zagrijavanja se ne tale, već dolazi do pucanja kemijskih veza i degradacije materijala. U važnije duromere ubrajaju se nezasićeni poliesteri te epoksidne, melaminske, urea-formaldehidne i fenol-formaldehidne smole [1].

Elastomeri su materijali čije je osnovno svojstvo elastičnost, odnosno sposobnost podnošenja deformacija uslijed naprezanja i ponovnog vraćanja u početni oblik nakon prestanka djelovanja istog. U skupinu elastomera pripadaju kaučuci i guma. Kaučuci su prirodne ili sintetske polimerne tvari koje se kemijskim reakcijama prevode u umrežene strukture te uz određene dodatke daju gumu. Guma je žilav materijal koji ima sposobnost reverzibilne elastične deformacije u širokom temperaturnom području [1,2].

Od samog postanka ljudskog roda pa sve do danas, polimerni materijali imaju veliki značaj u svakodnevnoj primjeni. Prvenstveno su se koristili prirodni polimeri kao što su celuloza, škrob, vuna, koža i sl., i to za odjeću, obuću, hranu, ogrjev te za konstrukcijske materijale, a tek u drugoj polovici 19. stoljeća primjenu nalaze i sintetski polimeri [1]. Danas polimerni materijali imaju široko područje primjene pa se koriste za izradu odjeće i obuće, za izradu sportske opreme (lopte, sportska odjeća, podloge terena, skije, tenisice), kao ambalaža (kutije i folije za pakiranje hrane, različiti spremnici i boce), u elektroničkoj industriji (kao izolatori, izrada kabela, kućišta aparata), u medicini (kontaktne leće, naočale, umjetni zubi, kapsule lijekova), u građevini (boje za zidove, prozori, vrata, izolacija), za izradu dijelova za automobile, avione itd. [2].

2.2. POLI(ETILEN-TEREFTALAT)

Poli(etilen-tereftalat) (PET) plastični je polimerni materijal koji pripada skupini zasićenih poliestera i na svom osnovnom lancu sadrži esterske skupine $-\text{CO}\cdot\text{O}-$ [4]. Sintetizirali su ga 1941. godine kemičari J. R. Whinfield i J. T. Dickson kondenzacijom tereftalne kiseline i etilen-glikola [1], a njegova komercijalna primjena kao tekstilno vlakno započela je 1953. godine. Kasnih sedamdesetih godina 20. stoljeća PET se počeo upotrebljavati za proizvodnju boca za piće što je dovelo do velikog porasta primjene i potrošnje PET ambalaže [4].



Slika 1. Strukturna formula poli(etilen-tereftalata) [7]

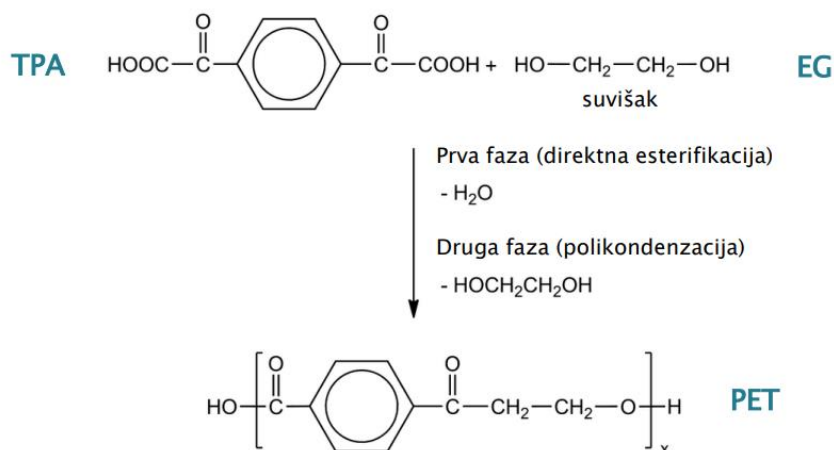
Smatra se da je PET jedan od najvažnijih polimernih materijala primjenjivanih u posljednja dva desetljeća zbog kontinuiranog rasta te širokog raspona primjene, a u raznim zemljama svijeta upravo se od PET-a izrađuju najveće količine ambalaže za pića [4,8].

2.2.1. Proizvodnja poli(etilen-tereftalata)

PET se može proizvesti primjenom dvije različite metode u kojima se kao reaktanti koriste tereftalna kiselina (TPA, $\text{C}_8\text{H}_6\text{O}_4$) ili dimetil-tereftalat (DMT, $\text{C}_{10}\text{H}_{10}\text{O}_4$) te etilen-glikol (EG, $\text{C}_2\text{H}_6\text{O}_2$) [9]. Prva metoda uključuje reakciju esterifikacije etilen-glikola (EG) i tereftalne kiseline (TPA), a druga reakciju transesterifikacije dimetil-tereftalata (DMT) i etilen-glikola (EG) [6]. U obje reakcije nastaje PET kao konačni produkt [10].

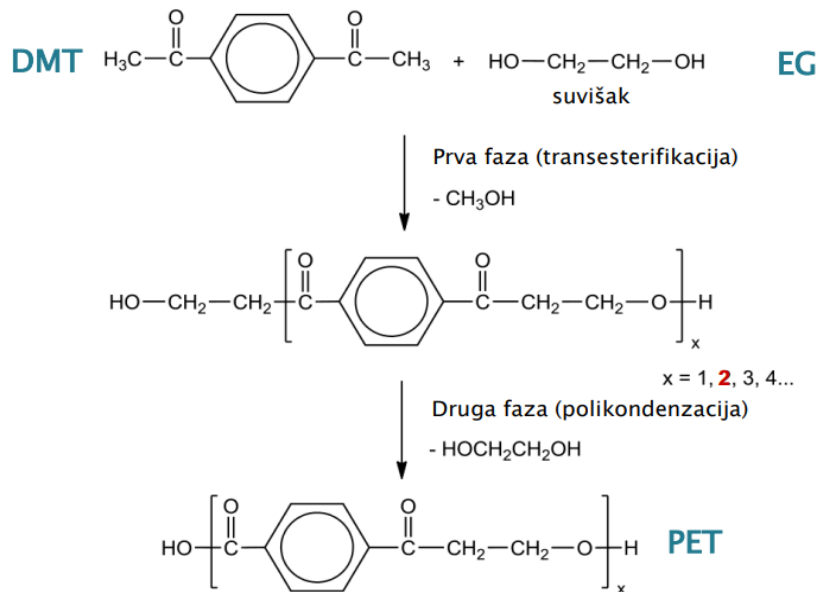
Prva faza kod sinteze PET-a iz tereftalne kiseline (TPA) i etilen-glikola (EG) je proces direktne esterifikacije kod kojeg zagrijavanjem tih reaktanata na temperaturi između 240 i 260 °C te tlaku između 300 i 500 kPa dolazi do nastajanja bis(2-hidroksietil)tereftalata (BHET) zajedno sa oligomerima, polimerima s malim stupnjem polimerizacije. Voda, koja nastaje kao nusprodukt, uklanja se iz procesa kako bi se postigao visoki stupanj konverzije [9]. U drugoj fazi, fazi polikondenzacije, slijedi daljnje zagrijavanje smjese pri povišenoj temperaturi između 275 i 290 °C i sniženom tlaku prilikom čega se višak etilen-glikola uklanja destilacijom, a

ravnoteža se pomiče u korist reakcije polikondenzacije [10]. Pri završetku reakcije, dobiveni PET je viskozna polimerna taljevina koja se može dalje prerađivati u željene oblike [9]. Kisele grupe TPA autokataliziraju reakciju što omogućava vođenje reakcije bez dodatka katalizatora, no mogu se dodati metalni katalizatori kada dođe do smanjenja koncentracije spomenutih TPA grupa [6].



Slika 2. Sinteza PET-a reakcijom esterifikacije tereftalne kiseline (TPA) i etilen-glikola (EG) [6]

Proizvodnja PET-a metodom u kojoj su reaktanti dimetil-tereftalat (DMT) i etilen-glikol (EG) odvija se u dva stupnja. U prvom stupnju odvija se transesterifikacija smjese dimetil-tereftalata i etilen-glikola pri temperaturi od 150 do 220 °C i tlaku od 100 kPa uz prisutnost katalizatora poput magnezijevog ili cinkovog acetata, titan-alkila ili alkoksida [1]. Pritom se temperatura održava niskom, a nastali metanol destilacijom se uklanja iz procesa u svrhu dobivanja međuprodukta bis(2-hidroksietil)tereftalata [9]. U drugom stupnju proces polikondenzacije odvija se pri temperaturi između 265 i 290 °C, pri sniženom tlaku i uz konstantno uklanjanje oslobođenog viška etilen-glikola. Nakon završetka polikondenzacije, nastala polimerna taljevina se ekstrudira, hladi i prerađuje u granule. Kod ovog procesa dolazi do pojave sporednih reakcija nastajanja glikolnih etera i toplinske razgradnje nastalog polimera i etilen-glikola [1].



Slika 3. Sinteza PET-a reakcijom transesterifikacije dimetil-tereftalata (DMT) i etilen-glikola (EG) [6]

Proizvodnja PET-a transesterifikacijom, odnosno reakcijom dimetil-tereftalata i etilen-glikola, poželjniji je proces od direktne esterifikacije zbog lakšeg pročišćavanja dobivenog materijala [8]. Tijekom takve proizvodnje nije nužno korištenje opasnijih kemikalija poput octene kiseline ili bromida, a samim time ni reaktora koji su otporni na koroziju [6].

2.2.2 Svojstva poli(etilen-tereftalata)

Fizikalna svojstva

PET je vrlo lagan semikristalni polimerni materijal kojemu se, ovisno o uvjetima prerade i proizvodnje, nadmolekulska struktura može mijenjati, pa može postojati i kao amorfni polimer [9]. S obzirom na takvo svojstvo, PET može biti proziran, mutan ili bijel, no prozirnost je jedno od bitnijih svojstava kod njegove primjene kao ambalažnog materijala [4]. Proziran, amorfan polimer dobiva se brzim hlađenjem rastaljenog PET-a na temperaturu ispod temperature staklastog prijelaza, koja se nalazi između 67 i 80 °C. Sporim hlađenjem, rastaljeni PET tvori kristalnu strukturu uz stvaranje kristalnih sferulita na kojima se svjetlost raspršuje te kao posljedica nastaje neproziran i bijel polimerni materijal uz postizanje stupnja kristalnosti od otprilike 30 %. PET kristalizira vrlo malim brzinama, a pritom postoje različiti čimbenici koji utječu na samu brzinu kao što su temperatura, molekulska masa, priroda katalizatora i sl. [8,11].

Karakterizira ga niska apsorpcija vode, dobro prianjanje, gustoća veća od vode te higroskopnost zbog koje se ne smije prerađivati bez prethodnog sušenja jer može doći do hidrolitičke razgradnje i pogoršanja njegovih svojstava.

PET ima vrlo nisku propusnost na plinove kao što su vodena para, kisik i ugljikov dioksid što omogućuje njegovu primjenu u proizvodnji boca za gazirana pića, dok mu je propusnost za vodu i otapala nešto veća. Jedan od najutjecajnijih parametara na propusnost, odnosno na barijerna svojstva PET-a je kristalizacija čijim se porastom propusnost smanjuje [4,9,11].

Jedno od najvažnijih svojstava PET-a intrinzična je viskoznost koja raste zajedno s porastom dužine i zapetljanosti polimernih lanaca. Tako za PET koji se koristi za boce za piće ona iznosi 0,7–0,9 dL/g [4,6].

Tablica 1. Fizikalna svojstva PET-a [8,9,12]

Svojstvo	Vrijednost
Molekulska masa ponavljajuće jedinice	192 g mol ⁻¹
Prosječna molekulska masa	30,000–80,000 g mol ⁻¹
Propusnost za O ₂	0,1–0,4 %
Propusnost za CO ₂	0,46 %
Apsorpcija vode (nakon 24h)	0,3–0,5
Intrinzična viskoznost	0,45–1,2 dl g ⁻¹
Gustoća	1,33–1,45 g cm ⁻³

Kemijska svojstva

PET karakterizira inertnost prema raznim otapalima i kemikalijama poput metanola, sumporovog dioksida, heksana i nisko koncentriranih otopina, ali nije otporan na jake kiseline, jake i slabe baze te ugljikovodike. Spomenuta otpornost na djelovanje kemikalija i otapala raste s porastom kristalnosti te mu ide u korist kao ambalažnom materijalu. Topljiv je u nekim organskim otapalima kao što su orto-klorfenol, heksafluoroizopropanol, tetrakloretnan, fenol i trifluoroctena kiselina. Na temperaturi većoj od temperature staklastog prijelaza, PET je podložan hidrolizi [9,11].

Mehanička svojstva

Zbog svojih odličnih mehaničkih svojstava, koja su ujedno bolja od svojstava brojnih drugih polimera, PET se primjenjuje u raznim područjima industrije. Na njegova mehanička svojstva znatno utječu parametri poput uvjeta obrade i stupnja kristalnosti polimera. Odlikuje se velikom čvrstoćom i tvrdoćom, žilav je, nelomljiv i krut te mu nije potrebno dodavati omekšavala ili neke druge tvari. Ima odličnu dimenzijsku stabilnost kao i otpornost na trenje, puzanje i zamor, a kroz dulje razdoblje može sačuvati otpornost prema takvim deformacijama. Unatoč mnogim dobrim mehaničkim svojstvima, upotreba PET-a može biti ograničena zbog problema prilikom obrade kao i visoke temperature njegova oblikovanja [4,9,11].

Tablica 2. Mehanička svojstva PET-a [9]

Svojstvo	Vrijednost
Modul pohrane za 25 °C	2000–4200 MPa
Modul pohrane za 80 °C	242 MPa
Youngov modul	1000–3500 MPa
Vlačna čvrstoća	40–60 MPa
Savojna čvrstoća	55–100 MPa
Udarna čvrstoća	4,6 kJm ⁻²
Indeks loma	1,58–1,64
Prekidna istezljivost	19–46 %

Toplinska svojstva

PET se odlikuje dobrom toplinskom stabilnošću kojoj pridonose polarne grupe i aromatski prsteni od kojih mu se sastoji glavni lanac. Taljenje, kod kojeg materijal prelazi iz čvrstog u tekuće stanje, odvija se na temperaturi između 255 i 265 °C, a entalpija taljenja (ΔH_m) ima vrijednost od 35 do 50 Jg⁻¹. Temperatura staklastog prijelaza (T_g) utječe na svojstva samog materijala i pritom dolazi do prijelaza polimera iz staklastog u viskoelastično stanje. Za amorfni PET, ona se nalazi na otprilike 67 °C dok je za semikristalni nešto viša i to na otprilike 80 °C. PET karakterizira i temperatura na kojoj se može primjenjivati kroz duži vremenski period, T_{max} , koja je za amorfni PET od 55 do 65 °C, a za semikristalni od 115 do 120 °C. Toplinska vodljivost PET-a iznosi 0,3 Wm⁻¹K⁻¹, a specifična toplina 1250 Jkg⁻¹K⁻¹. Iznad 340 °C dolazi do toplinske razgradnje PET-a [9,11,13].

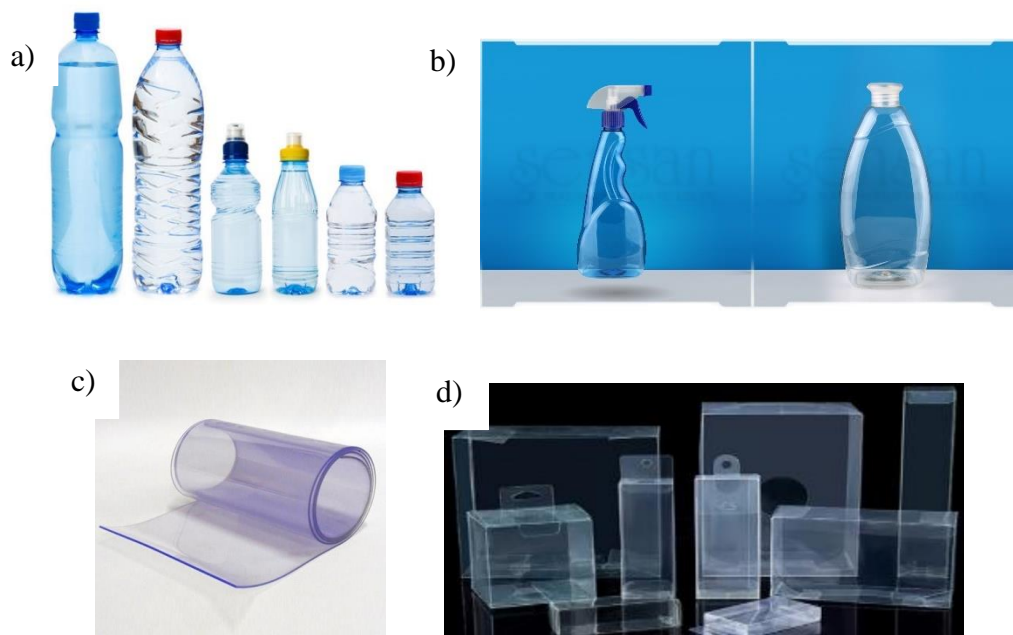
2.2.3. Primjena poli(etilen-tereftalata)

Poli(etilen-tereftalat) primjenjuje se još od 1941. godine kada se proizvodio i upotrebljavao isključivo u obliku vlakana. Kasnije se počeo koristiti u obliku filma i folija za pakiranje hrane, a 70-ih godina došlo je do razvitka tehnike za puhanje biaksijalnih boca što je dovelo do vrhunca primjene PET-a kao primarnog materijala za izradu boca za piće [2]. Zbog svoje niske cijene i iznimnih svojstava poput čvrstoće, dimenzijske stabilnosti, male težine, kemijske postojanosti, prozirnosti i sl., danas je jedan od najviše upotrebljivanih polimernih materijala s raznim primjenama u mnogim industrijskim granama [14].

Primjena PET-a za proizvodnju boca za piće započela je krajem sedamdesetih godina prošlog stoljeća, no tek devedesetih godina dolazi do njegove široke upotrebe. Od 1990. do 2000. godine, PET je zamijenio staklo, PVC i aluminij kao materijale za izradu ambalaže, čime je u tom razdoblju potrošnja i potražnja za PET-om izrazito narasla. Tako je prema podacima poznato da je 1990. godine potrošnja PET-a iznosila 322 tisuće tona, 2004. 2,5 milijuna tona, a 2012. godine visokih 19,8 milijuna tona [2,15]. Potražnja za PET-om svakodnevno raste posebice zbog povećanja broja raznovrsnih pića te ekološkog aspekta jer se PET može potpuno reciklirati. Najveća primjena PET-a je u pakiranju obične vode, mineralne vode i brojnih bezalkoholnih gaziranih pića u PET boce. Kasnije se, osim spomenutih pića, u boce počinju pakirati i razni začini, umaci, jestiva ulja i konzervirana hrana, a u novije se vrijeme sve više pakiraju alkoholna pića (posebice piva), mlijeko i mliječni proizvodi. Ovakvoj primjeni PET-a kao materijala za izradu boca, pridonijela su njegova odlična svojstva poput čvrstoće, žilavosti, prozirnosti, otpornosti na UV zračenje te dobra barijerna svojstva, odnosno nepropusnost za kisik i ugljikov dioksid [2,4,15].

Ostale primjene PET-a:

PET je iznimno dobar materijal za korištenje u industriji pakiranja, primjerice za pakiranje hrane, farmaceutskih i kozmetičkih proizvoda, deterdženata ili sredstava za čišćenje zbog dobre kemijske stabilnosti i niske propusnosti za vodu, plinove ili vlagu. Koristi se u obliku folija, filmova, boca i kutija za pakiranje [9]. Također se umjesto stakla primjenjuje za pakiranje meda, džemova, raznih namaza, dječje hrane, slatkiša i sl. [15].



Slika 4. Primjena PET-a u industriji pakiranja: a) boce [16], b) sredstva za čišćenje [17], c) folije [18], d) kutije za pakiranje [9]

Široka mu je primjena u tekstilnoj industriji gdje se PET vlakna, koja su fleksibilna, lagana, jaka i otporna na blijedenje, koriste za proizvodnju odjeće, sportske odjeće, tepiha, jastuka, užadi i sl. [9,19,20].

Zbog svoje dimenzijske, strukturne i toplinske stabilnosti te dobrih izolacijskih svojstava, PET se primjenjuje u elektroničkoj i električnoj industriji za proizvodnju tiskanih ploča, izolatora, rasvjetnih uređaja, kazeta za snimanje, kablova, žica, membranskih tipkovnica itd.

Ima široku primjenu u automobilskoj industriji u proizvodnji mnogih unutarnjih komponenti (sigurnosni pojasevi, kućišta mjenjača, poklopci motora, kućišta konektora). Sastavni je dio brojnih dijelova automobila poput tkanine za sjedala, tepiha, guma, zračnih jastuka i panela za vrata [9, 20].

Ostale primjene PET-a uključuju primjenu u medicini za pakiranje raznih lijekova, medicinskih uređaja i opreme te se PET vlakna koriste u izradi umjetnih tetiva, ligamenata, srčanih zalistaka i sl. U građevini se primjenjuje za proizvodnju krovnih membrana, izolacijskih materijala, zvučnih barijera. Koristi se za izradu zupčanika, plastičnih čahura i mnogih mehaničkih dijelova koji pokazuju dobru otpornost na kiseline te za printanje 3D predmeta [9,14].

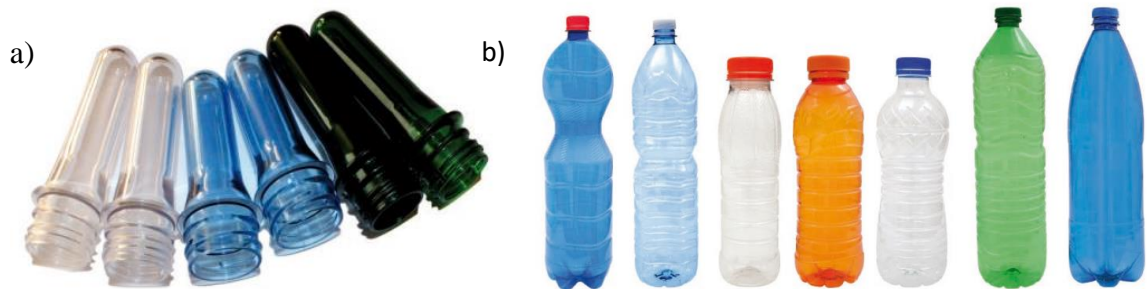
2.2.3.1. Poli(etilen-tereftalatne) boce

Kao što je već spomenuto, PET boce su najvažniji i najkorišteniji proizvod poli(etilen-tereftalata) u koje se primarno pakiraju obična i mineralna voda te gazirana bezalkoholna pića. Od 2001. do 2006. godine, godišnja stopa rasta područja za običnu i mineralnu vodu bila je 6 %, a za bezalkoholna gazirana pića nešto manje od 8 %. S obzirom na takvu veliku potražnju za PET bocama, samo u Europi se oko 53 % potrošenog poli(etilen-tereftalata) prerađuje u boce i spremnike za pića [15].

Proizvodnja PET boca sastoji se od 2 dijela tj. procesa, a to su injekcijsko prešanje PET predoblika i razvlačno puhanje PET boca. Injekcijsko prešanje je proces koji podrazumijeva prešanje PET predoblika nakon kojeg se razvlačnim puhanjem u kalupima formiraju u konačni proizvod tj. spremnik (bocu) za piće [21].

Tijekom injekcijskog prešanja, rastaljeni materijal ubrizgava se unutar kalupnih šupljina stroja za kalupljenje pri čemu kalup ima oblik konačnog predoblika. Slijedi hlađenje ubrizgane taline ispod točke leđišta kako bi se materijal unutar kalupa učvrstio i nastao predoblik nalik prozirnomo amorfnom staklu. Naposljetku se kalup otvara i gotovi se predoblik iz njega izbacuje [11,21].

Razvlačno puhanje PET boca može uslijediti direktno nakon dobivanja gotovih predoblika ili tek nakon njihovog skladištenja. S obzirom na spomenuto, proces izrade boca može biti jednofazni ili dvofazni. Kod jednofaznog procesa injekcijsko prešanje i razvlačno puhanje su slijedni procesi izvedeni na istom stroju tijekom kojih se dobiveni vrući predoblik odmah izvlači iz kalupa i odvodi do jedinice za puhanje zraka gdje se razvlačnim puhanjem prerađuje u bocu. Dvofazni proces provodi se na dva različita stroja od kojih je prvi za injekcijsko prešanje predoblika, a drugi za ponovno zagrijavanje predoblika i puhanje boca. Tijekom tog procesa predoblik se ponovno zagrijava na temperaturu otprilike 10 °C iznad temperature staklišta nakon čega slijedi puhanje i razvlačenje u konačni oblik tj. bocu [8, 22].



Slika 5. a) Predoblici i b) PET boce [23]

2.2.4. Recikliranje poli(etilen-tereftalata)

Polimerni se materijali aktivno upotrebljavaju kao ambalaža, tj. za pakiranje raznih proizvoda kako prehrambenih tako i neprehrambenih, a jedan od vodećih polimernih ambalažnih materijala upravo je poli(etilen-tereftalat). Zbog njegove učestale i široke upotrebe, nastaju iznimno velike količine otpada kojeg je potrebno zbrinuti, a to je moguće s obzirom da je PET materijal koji je moguće reciklirati. Najčešće metode recikliranja PET-a su mehaničko, kemijsko i energijsko recikliranje [4, 24].

Prije provedbe procesa recikliranja, PET je potrebno obraditi te je prvi korak u tom procesu sakupljanje PET ambalaže. Sakupljanje predstavlja važan preduvjet za uspješnost kasnijeg recikliranja, a neki od sustava sakupljanja su sustav sakupljanja po kućanstvima, sustav kontejnera na lokacijama te sustav pologa [2].

Nakon sakupljanja slijedi razvrstavanje prikupljene otpadne ambalaže koje se može provoditi ručno ili automatizirano. Ručno razdvajanje obuhvaća razdvajanje prema prozirnosti i boji proizvoda dok se automatizirano razdvajanje zasniva na različitim svojstvima otpadnih materijala (fizikalnim, kemijskim, električnim, optičkim) [25]. Osim sortiranja prikupljene ambalaže prema vrsti materijala, sakupljena PET ambalaža razdvaja se u četiri grupe s obzirom na boju: zelena, plava, prozirna i miješana boja, a potom se balira radi lakšeg transporta [26]. Sortirana PET ambalaža dalje se usitnjava u tzv. PET pahuljice te se uklanjaju sve prisutne nečistoće koje uzrokuju slabljenje mehaničkih svojstava i nižu kvalitetu recikliranog PET-a. Pritom se uklanjaju nečistoće poput pijeska, šljunka, ljepila i papira, odvajaju se etikete te se zaostale čestice metala detektiraju pomoću magneta i tako uklanjaju [24, 26].

PET pahuljice zatim se podvrgavaju pranju koje se može provesti na dva načina. Prvi je način toplo pranje pomoću 2 %-tne vodene otopine natrijevog hidroksida i deterdženta na temperaturi od 80 °C nakon kojeg slijedi hladno pranje vodom. Takav se način većinom koristi za uklanjanje ljepila. Drugi je način pranje otapalima pri čemu se tetrakloretilen pokazao pogodnim za pranje PET pahuljica [8].

Zadnji i ključni korak je sušenje PET-a kako zaostala vlaga ne bi uzrokovala hidrolitičku razgradnju tijekom procesa ekstruzije ili toplinskog oblikovanja, a pritom je dopuštena koncentracija vode do najviše 20 ppm [2].

Mehaničko recikliranje

Mehaničko recikliranje predstavlja toplinsku preradu materijala kako bi se dobili novi polimerni proizvodi. U slučaju PET-a, mehaničko se recikliranje provodi ekstrudiranjem, tj. preradom prethodno dobivenih osušenih komadića PET-a taljenjem u granule koje se dalje mogu preraditi injekcijskim prešanjem ili prešanjem u gotov proizvod [2,25]. Dobivene granule imaju nisku molekulsku masu zbog visokih temperatura provođenja ekstruzije što predstavlja jedan od glavnih nedostataka ovakvog tipa recikliranja [2,8]. S druge strane, jednostavnost procesa, niska ulaganja i ekološka prihvatljivost pozitivne su strane mehaničkog recikliranja. Ovakvo recikliranje može se provoditi i za dobivanje vlakana pa potom i PET tkanina iz otpadnih boca ili laminiranjem kojim se sloj otpadnog PET-a stavlja između slojeva čistog PET-a [2].

Kemijsko recikliranje

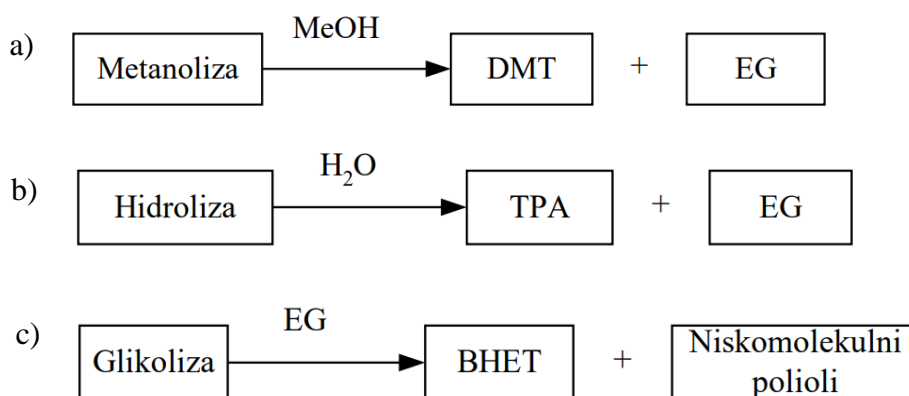
Kemijsko recikliranje PET-a proces je kojim se dugački lanci PET-a kidaju i pritom se PET depolimerizira do svojih monomera (tereftalne kiseline i etilen-glikola) ili se djelomično depolimerizira do novih oligomera. Tri najčešće korištene metode za kemijsko recikliranje PET-a su metanoliza, hidroliza i glikoliza [14,24]. Odabir metode kojom će se provesti kemijsko recikliranje ovisi o kvaliteti otpadnog PET-a i kvaliteti proizvoda koji se želi dobiti [4]. S obzirom da se PET može razgraditi na svoje polazne komponente, ovakav tip recikliranja, za razliku od mehaničkog, omogućuje proizvodnju raznovrsnih proizvoda. S druge strane kemijsko je recikliranje puno kompleksniji i skuplji postupak od mehaničkog recikliranja [14].

Metanoliza je postupak kojim se PET depolimerizira u dimetil-tereftalat i etilen-glikol uz pomoć metanola. Reakcija se provodi uz prisutnost katalizatora poput cinkova, magnezijeva ili

kobaltova acetata pri visokom tlaku od 2 do 4 MPa i temperaturi od 180 do 280 °C. Proces se sastoji i od pročišćavanja nastalog DMT-a kristalizacijom i destilacijom [14, 27]. Nedostaci metanolize su skupa ulaganja i veliki troškovi rada postrojenja [2].

Hidroliza je proces depolimerizacije PET-a u tereftalnu kiselinu i etilen-glikol koji se odvija pri visokim tlakovima i temperaturama u kiselim, bazičnim ili neutralnim uvjetima. Nedostatak metode je niska čistoća tereftalne kiseline nastale neutralnom hidrolizom te velika količina anorganskih soli koje je potrebno sanirati kao otpad [2, 27].

Glikoliza je depolimerizacijski proces transesterifikacije između esterskih skupina PET-a i etilen-glikola uz nastajanje bis(2-hidroksietil-tereftalata) (BHET) i poliesterskih poliola. Reakcija se najčešće provodi u uvjetima atmosferskog tlaka te pri temperaturama od 180 do 240 °C [27]. Kako bi se ubrzala reakcija dobivanja BHET-a, koriste se brojni katalizatori poput organokatalizatora, acetata, klorida, enzima itd., a njihov je odabir bitan zbog učinkovitosti, cijene i daljnjeg vođenja procesa. Nedostaci ovakvog procesa su toksičnost i nemogućnost biorazgradnje nekih korištenih katalizatora, visoka temperatura i tlak te teško odvajanje i pročišćavanje oligomera [11,14].



Slika 6. Pojednostavljeni prikaz a) metanolize b) hidrolize i c) glikolize [2]

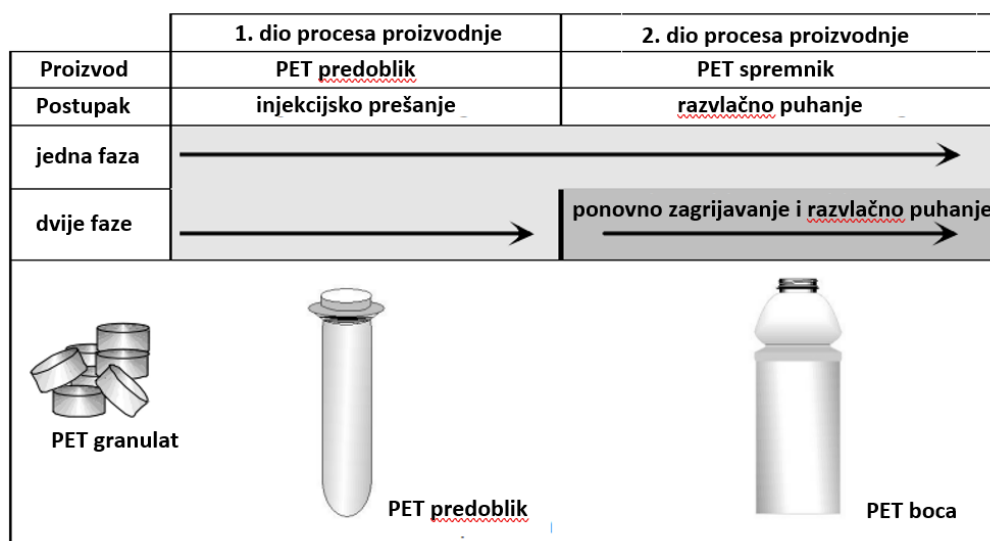
3. METODIKA

U ovome radu dan je pregled znanstvenih istraživanja i tehnoloških procesa koji se odnose na proizvodnju, svojstva, primjenu i recikliranje poli(etilen-tereftalatnih) boca. U radu se obrađuju postupci proizvodnje PET boca kao i njihovog mehaničkog i kemijskog recikliranja uz osvrt na prednosti i nedostatke tih procesa. Također se analiziraju različiti načini primjene PET boca i njihova svojstva koja doprinose širokoj primjeni PET-a diljem svijeta.

4. REZULTATI I RASPRAVA

4.1. Proizvodnja poli(etilen-tereftalatnih) boca

Kao što je ranije spomenuto, proizvodnja PET boca provodi se procesima injekcijskog prešanja PET predoblika i razvlačnog puhanja samih PET boca. Ti se procesi proizvodnje mogu odvijati u jednoj ili dvije odvojene faze. Kod jednofaznog procesa, proizvodnja krajnjeg proizvoda, PET boca, odvija se izravno iz PET granulata na jednom stroju dok dvofazni proces uključuje izradu PET predoblika na jednom stroju te ponovno zagrijavanje prethodno dobivenih predoblika i razvlačno puhanje boca na drugom stroju [21,22].



Slika 7. Faze proizvodnje PET boca [21]

4.1.1. Injekcijsko prešanje PET predoblika

Tri općenita problema, koja se mogu javiti tijekom procesa injekcijskog prešanja PET predoblika, uključuju nastajanje acetaldehida, pad intrinzične viskoznosti materijala te nedovoljnu bistrinu predoblika, a takav proces izrade predoblika podrazumijeva pet proizvodnih faza [21]:

1. Granulat PET-a prije taljenja mora se osušiti do sadržaja vlage od 20 do 30 ppm kako previsoka količina vode ne bi uzrokovala hidrolitičku degradaciju poliesterskih lanaca i time dovela do smanjenja intrinzične viskoznosti materijala. Intrinzična se viskoznost, ovisno o sadržaju vlage, smanjuje za određeni postotak od PET granulata do predoblika što je ujedno popraćeno i smanjenjem veličine molekula polimernih lanaca. Takav proces može imati

negativne posljedice na konačni proizvod poput brže kristalizacije i smanjene žilavosti neorijentiranih dijelova izrađene boce.

2. Nakon provedenog sušenja, PET granulat se tali pri čemu značajan utjecaj na proces taljenja ima okolina taline koja može uzrokovati toplinsku i oksidacijsku razgradnju PET-a. S obzirom da tijekom razgradnje PET-a dolazi do smanjenja njegove intrinzične viskoznosti, parametri poput vremena zadržavanja, temperature taljenja i stanja okoline tijekom taljenja mogu se podesiti kako bi se takvo smanjenje izbjeglo. Osim toga, najbolje su metode taljenja PET-a, u pogledu minimalizacije smanjenja intrinzične viskoznosti, taljenje pod vakuumom ili strujom dušika. Problem koji se može javiti tijekom taljenja PET-a stvaranje je acetaldehida koje je intenzivnije što su temperatura taljenja i vrijeme zadržavanja veći.

3. U trećoj se fazi akumulirani rastaljeni PET-a ubrizgava u kalupne šupljine stroja za injekcijsko prešanje predoblika.

4. Nakon ubrizgavanja rastaljenog PET-a, odvija se njegovo brzo hlađenje pomoću ohlađenih kalupnih šupljina i površina šipki jezgre čime nastaje predoblik amorfne strukture nalik staklu. Zbog takve strukture nastalih predoblika, kvaliteta im se mjeri prema njihovoj bistrini.

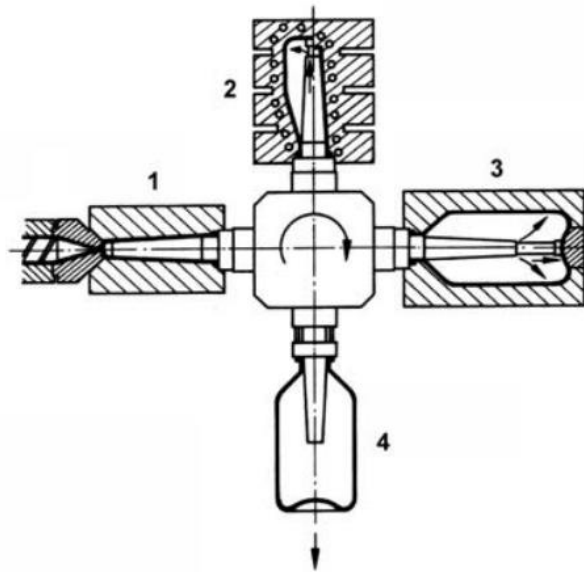
5. U posljednjem koraku, provodi se otvaranje kalupa i izbacivanja gotovih predoblika.

4.1.2. Razvlačno puhanje PET boca

Razvlačno puhanje proces je proizvodnje PET boca kod kojeg su prethodno nastali predoblici podvrgnuti istežanjima koji dovode do stvaranja biaksijalno orijentirane PET boce kao konačnog proizvoda. Istezanja kojima su predoblici podvrgnuti su aksijalno istežanje, tj. istežanje paralelno s osi predoblika pomoću rastezljive šipke koja se pomiče prema dnu predoblika, te radijalno istežanje koje je izazvano protokom zraka pod povišenim tlakom te uzrokuje rastežanje u smjeru okomitom na os predoblika [11,28].

Ovim postupkom biaksijalnog razvlačenja boca dolazi do poboljšanja svojstava materijala pa je omogućena proizvodnja lakših boca i primjena PET-a manje cijene. Biaksijalnom orijentacijom materijal postaje jači zbog gusto zbijenih lanaca i zajedničkog djelovanja molekula. Tijekom takvog tipa razvlačenja boca, dolazi do promjene različitih svojstava poput povećanja vlačne čvrstoće i žilavosti, poboljšanja kemijske otpornosti i otpornosti na udarce te smanjenja propusnosti na razne plinove [4,22].

Kod jednofaznog postupka izrade PET boca, prešanje predoblika i razvlačno puhanje boca odvija se na jednom stroju pri čemu se nastali predoblik izvlači iz kalupa dok je još dovoljno vruć kako bi se mogao razvlačnim puhanjem oblikovati u bocu [22]. Jedna od varijanti jednostupanjskog stroja za izradu boca stroj je koji sadrži rotirajući stol s četiri stanice prikazan na slici 8. Na prvoj stanici takvog stroja, odvija se injekcijsko prešanje predoblika koji se na drugoj stanici toplinski obrađuje grijanjem ili hlađenjem nekih dijelova unutar samog predoblika. Na sljedećoj se stanici događa razvlačenje i puhanje predoblika, a na posljednjoj, tj. četvrtoj stanici dolazi do izbacivanja gotovih proizvoda odnosno PET boca [4,28].



Slika 8. Jednofazni proces izrade PET boca [4]

Kod ovakvog postupka, predoblici se dalje oblikuju odmah nakon izvlačenja iz kalupa pa njihovo dodatno zagrijavanje nije potrebno. Time se postiže ušteda energije i manji troškovi, a takva metoda najprikladnija je za proizvodne linije malih do srednjih razmjera. Toplina zaostala iz procesa injekcijskog prešanja koristi za daljnje puhanje predoblika, a isto tako ne dolazi do pojave ogrebotina ili drugih površinskih oštećenja boca jer se predoblici ne skladište niti se transportiraju nakon izrade [22,29].

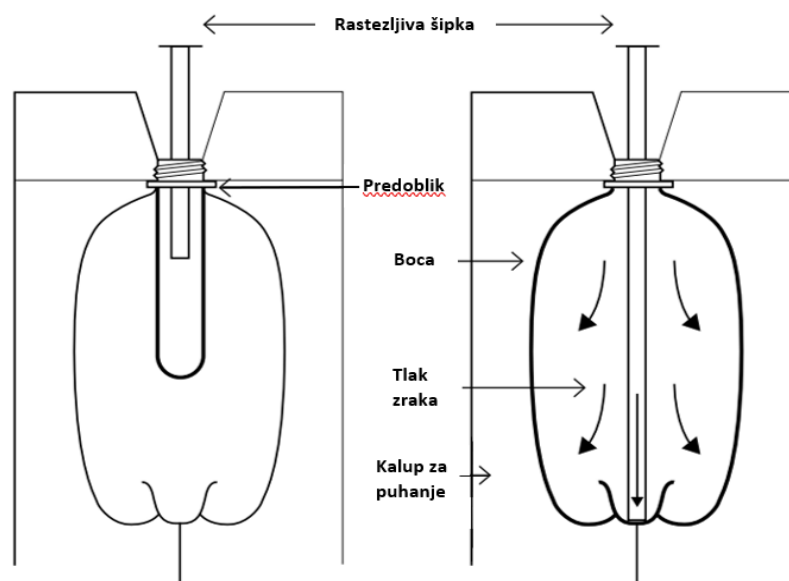
Dvofazni postupak proizvodnje PET boca izvodi se u tri koraka:

1. Ponovno zagrijavanje prethodno nastalih PET predoblika
2. Uravnoteženje temperature
3. Završno razvlačno puhanje PET boca

Hladni PET predoblici stavljaju se u sustav grijaćih peći gdje se pomoću infracrvenog zračenja zagrijevaju na temperaturu njihovog oblikovanja. Osim što se povećava temperatura stijenki predoblika kako bi se olakšalo njihovo razvlačno puhanje, iznimno je važno postići i kontrolirati temperaturni profil u aksijalnom smjeru. Ukoliko postoje značajne razlike u temperaturnom profilu predoblika, mogu nastati nejednolike dimenzije PET boce. Prilikom zagrijavanja predoblika, jedan dio zračenja prolazi kroz materijal dok se drugi dio apsorbira na površini i ne može se brzo po njoj rasporediti. U skladu s time, dolazi do pregrijavanja površine i brze kristalizacije PET-a pa je uz zagrijavanje potrebno hladnim zrakom hladiti površinu predoblika [4,21].

U drugom koraku dvofaznog procesa, odvija se uravnoteženje temperature koje opisuje vrijeme potrebno da se temperatura materijala predoblika ujednači dok se pritom temperaturni profil u aksijalnom smjeru, postignut u prethodnom koraku, i dalje održava konstantnim [21].

U posljednjem se koraku provodi razvlačno puhanje pri kojem se predoblik zagrijan na temperaturu između 80 i 125 °C mehanički rasteže pomoću rastezljive šipke u aksijalnom smjeru, a potom se puhanjem s dvjema razinama tlaka konačno oblikuje. Tlakom od 12 do 25 bara nastaje 90 % oblika boce, a završni oblik nastaje puhanjem uz primjenu tlaka od 40 bara pri čemu se dobiva biaksijalno orijentirana PET boca. U toj završnoj fazi puhanja, PET materijal pritisne se uz kalup za puhanje i naglim hlađenjem dobiva se boca koja je poprimila oblik kalupa [21].



Slika 9. Razvlačno puhanje u kalupu [30]

Dvofazni postupak najčešće se primjenjuje za masovnu proizvodnju PET boca. Kako ovaj postupak zahtijeva ponovno zagrijavanje nastalih predoblika nakon njihova skladištenja da bi se mogli obraditi razvlačnim puhanjem, toplinska mu je učinkovitost niža od proizvodnje boca jednofaznim procesom. Ovakav postupak ima veću učinkovitost rada jer je injekcijsko prešanje predoblika odvojeno od razvlačnog puhanja. Također se postiže veća fleksibilnost s obzirom da se predoblici mogu izrađivati ili već izrađeni kupiti za daljnju obradu. Zbog uštede novca, kupnja gotovih predoblika ima prednost u odnosu na njihovu izradu [21,29].

4.2. Svojstva poli(etilen-tereftalatnih) boca

Postoje ključni zahtjevi koje ambalaža mora ispunjavati kako bi bila prikladna za pakiranje različitih proizvoda. Neki od njih obuhvaćaju zaštitu zapakiranog proizvoda od mogućih kontaminacija ili oštećenja, pružanje informacija o proizvodu te osiguravanje sigurnog transporta. Također, ambalaža bi trebala biti ekološki prihvatljiva i sigurna za odlaganje, a isto tako mora biti pogodna za recikliranje. Jedan od polimernih materijala koji ispunjava sve navedene zahtjeve je PET pa se upravo zbog svojih odličnih svojstava PET boce široko primjenjuju kao ambalaža [4].

Na tržištu plastike, PET boce predstavljaju najviše korišteni plastični proizvod. Jedan od ključnih razloga za to je mogućnost recikliranja PET boca i ponovnog korištenja za proizvodnju novih boca ili drugih proizvoda. Ovo svojstvo čini PET boce ekološki povoljnijim od primjerice staklenih boca te pozitivno utječe na odluke potrošača za kupnju proizvoda u upravo takvim bocama [4,7,9].

PET boce imaju dobru otpornost na udarce i malu masu, posebice u usporedbi sa staklenim bocama, što ih čini jednostavnijima i financijski povoljnijima za transport i skladištenje. PET boce, posebice jednokratne, često se u punionice šalju kao predoblici što također pozitivno utječe na njihov transport [7,23].

Zbog nepropusnosti na CO₂ i O₂, PET boce odlične su za pakiranje raznih bezalkoholnih pića i prehrambenih proizvoda. Kasnije je došlo do razvoja raznih načina poboljšanja njihovih barijernih svojstava pa se na PET boce mogu nanositi unutarnje i vanjske prevlake ili se mogu proizvoditi višeslojni predoblici koji se puhanjem oblikuju u bocu s različitim polimernim slojevima. S druge strane, njihova loša otpornost na svjetlo, posebice kod tankih i prozirnih boca, može negativno utjecati na zapakirani sadržaj i dovesti do pogoršanja mirisa i okusa te promjene u boji. To je ipak znatno manje prisutno kod obojenih boca te onih koje imaju

naljepnice, a ključnu ulogu u sprečavanju negativnog utjecaja svjetla ima i njihovo pravilno skladištenje [4].

Fleksibilnost PET boca omogućuje proizvođačima proizvodnju boca različitih oblika, veličina, boja i dizajna koji će privući potrošače na njihovu kupnju [31, 32]. U odnosu na boce izrađene od drugih plastičnih materijala (PP, PVC i sl.), PET boce imaju veću prozirnost, izdržljivost i toplinsku stabilnost, nižu cijenu, lakše su, inertnije, dostupnije i ekološki povoljnije [22].

4.3. Primjena poli(etilen-tereftalatnih) boca

Primjena PET boca započela je kasnih sedamdesetih godina 20. stoljeća kada su se prvi put proizvele boce za gazirana pića. Tek oko dvadeset godina kasnije započela je njihova intenzivna primjena, a o tome govori podatak da je od 1990. do 1998. godine upotreba PET-a za proizvodnju boca porasla s 9 % na visokih 30 %. Nakon toga primjena PET boca konstantno bilježi svoj rast, a posebice u zadnjem desetljeću kada intenzivno zamjenjuju staklenu i kartonsku ambalažu te limenke za pakiranje raznih pića [23]. Njihovoj širokoj primjeni diljem svijeta pridonijela su odlična svojstva poput prozirnosti, otpornosti na udarce, nepropusnosti na CO₂ i O₂, nelomljivosti i ostalih koja su opisana u prethodnom poglavlju [27].

Proizvođači gaziranih bezalkoholnih pića poticali su potrošače na korištenje PET boca jer su im one omogućavale pakiranje pića u boce velikih volumena te su pružale ekonomičniji transport i nastanak manjih oštećenja zbog svoje fleksibilnosti. Većoj primjeni PET boca doprinose visoke ljetne temperature zbog kojih je njihova potražnja tada povećana, a i razni događaji poput koncerata i sportskih utakmica pozitivno utječu na porast njihove primjene [4,15].

Od samih početaka primjene, PET boce bile su prikladna ambalaža za pakiranje obične i mineralne vode te gaziranih bezalkoholnih pića, no kasnije su se u njih počeli pakirati i razni drugi proizvodi. Veliki korak bio je učinjen korištenjem PET boca za pakiranje mlijeka i mliječnih proizvoda koji su se do tada pakirali u ambalažu od HDPE-a. Potom je uslijedilo pakiranje voćnih sokova, a u novije vrijeme i piva pri čemu su se proizvođači susretali sa izazovima osiguravanja dobrih barijernih svojstava boca za očuvanje kvalitete piva [15]. Danas se PET boce koriste i kao ambalaža za lijekove, kemikalije, kozmetičke i higijenske proizvode, sredstva za čišćenje i deterdžente za posuđe, razne umake i jestiva ulja, konzerviranu hranu, začine i dr. [22]

4.4. Recikliranje poli(etilen-tereftalatnih) boca

Povećana primjena različitih polimernih materijala dovodi do porasta količine plastičnog otpada koji može ostaviti brojne štetne posljedice na okoliš pa je nužno provoditi njegovo kvalitetno zbrinjavanje. Zbrinjavanje plastičnog otpada podrazumijeva smanjenje količine otpada odnosno sprečavanje njegova nastajanja, a najpopularnija je metoda zbrinjavanja otpada recikliranje koje se većinom provodi mehaničkim, kemijskim ili energijskim postupkom recikliranja te omogućuje ponovnu upotrebu plastičnog otpada [24].

Poli(etilen-tereftalat) polimerni je materijal koji ima široko područje primjene, posebice kao ambalažni materijal i to najčešće u obliku boca za pakiranje vode, gaziranih i negaziranih pića, mlijeka, raznih umaka i sl. Zbog svoje opsežne upotrebe, PET velikim udjelom sudjeluje u stvaranju ukupnog plastičnog otpada. S obzirom da je prirodna razgradnja proizvoda od PET-a, poput PET boca, vrlo dugotrajan proces i ne postoje organizmi koji bi ih u normalnim uvjetima mogli razgraditi, najpovoljniji načini za smanjenje PET otpada postupci su njegova recikliranja. Prvi put je PET boca reciklirana 1977. godine metodom mehaničkog recikliranja. PET pahuljice koje se dobiju usitnjavanjem PET ambalaže moraju zadovoljavati određene minimalne zahtjeve za postizanje uspješne reciklaže koji se odnose na veličinu pahuljica, sadržaj vode, metala, boje itd. [8,24].

Pri recikliranju PET boca, glavni uzrok pogoršanja svojstava njihova je kontaminacija različitim tvarima koje mogu biti [8]:

- kontaminanti koji stvaraju kiseline – za postupak recikliranja najštetnije kiseline su octena kiselina koja nastaje razgradnjom poli(vinil-acetatnog) ljepila, abijetinska kiselina koja nastaje iz ljepila na naljepnici te klorovodična kiselina koja nastaje iz PVC naljepnice na boci.
- bojila – komadići obojanih dijelova boca i naljepnica na bocama mogu uzrokovati pojavu neželjenih boja tijekom procesa recikliranja PET boca što se može izbjeći poboljšanjem procesa sortiranja i pranja boca prije samog recikliranja.
- voda – dolazi iz procesa pranja PET pahuljica te uzrokuje smanjenje molekulske mase PET-a, a može se izbjeći odgovarajućim sušenjem PET pahuljica nakon njihovog pranja.
- acetaldehid – nastaje kao nusprodukt reakcija razgradnje PET-a te se njegova koncentracija u PET-u može smanjiti obradom pod vakuumom ili sušenjem zbog njegove visoke hlapljivosti.

- ostali kontaminanti – tragovi tvari poput deterdženata, goriva, pesticida itd. mogu zaostati u materijalu i nakon recikliranja te imati negativan utjecaj na ljudsko zdravlje.

4.4.1. Priprema za recikliranje

Sakupljanje PET boca

Prvi korak koji vodi do recikliranja PET boca njihovo je sakupljanje pa je od iznimne važnosti organizacija sustava sakupljanja boca u različitim naseljima i područjima. Sakupljanje upotrijebljenih PET boca može se provoditi različitim sustavima od kojih su najznačajniji sustav sakupljanja po kućanstvima, sustav kontejnera na određenim lokacijama te sustav pologa. Sustav sakupljanja po kućanstvima predstavlja sakupljanje PET boca odvojenih od strane potrošača u svom kućanstvu dok se sustavom kontejnera sakupljaju boce koje potrošači odnose na mjesta gdje su kontejneri smješteni. Sustav pologa provodi se na principu davanja novčane naknade potrošačima nakon povrata PET boca u određeni centar za njihovo sakupljanje, trgovine koje prihvaćaju povratnu PET ambalažu ili automatske uređaje za povrat boca. Takav sustav sakupljanja boca motivira potrošače na povećano odvajanje otpada te se pokazao pozitivnim u brojnim zemljama u kojima stope recikliranja, zbog ovakvog sustava sakupljanja, značajno rastu [2,25,27].

Razvrstavanje PET boca

Boce koje su prethodno sakupljene različitim sustavima sakupljanja razvrstavaju se prvenstveno prema vrsti materijala (PET, HDPE, PVC itd.). Takvo razvrstavanje plastičnog otpada olakšano je označavanjem plastične ambalaže brojevima (1-7) i simbolima karakterističnim za pojedinu vrstu polimernog materijala. Jedan od načina razvrstavanja je ručno razvrstavanje temeljeno na različitim bojama i nijansama ambalažnih proizvoda te spomenutim identifikacijskim brojevima i simbolima. Automatizirano razvrstavanje predstavlja drugi način odvajanja plastične ambalaže koje se provodi na osnovi njihovih različitih fizikalnih, kemijskih, optičkih ili električnih svojstava te se sve više upotrebljavaju X-zrake za njihovo prepoznavanje [2].



Slika 10. Simboli pojedinih vrsta polimernih materijala [31]

Nakon razvrstavanja prema vrsti materijala, boce se baliraju kako bi im se smanjio volumen i time olakšao transport do različitih postrojenja koja se bave recikliranjem ambalaže. Daljnje razvrstavanje PET boca započinje raspakiravanjem bala u kojima se one nalaze. Pritom se od PET boca odvajaju zaostale nečistoće i čvrste tvari poput pijeska, žica, folija, čepova i sl. te se pomoću optičke sortirnice odvajaju prema bojama [2].

Usitnjavanje, pranje i sušenje PET boca

Razvrstane PET boce potom se podvrgavaju usitnjavanju na tzv. PET pahuljice mljevenjem u mlinu. U ovoj se fazi mehanički uklanjaju manje nečistoće i komadići etiketa, a odvija se i ispiranje PET pahuljica kojim se uklanjaju pijesak i šljunak te se odvajaju papirnate i plastične etikete s boca. Na temelju razlika u specifičnoj težini, PET pahuljice razdvajaju se u dvije skupine pri čemu se materijali poput čepova i drugih plastičnih primjesa koji su lakši od vode odvajaju od PET-a koji tone. PET pahuljice peru se natrijevom lužinom na temperaturi od 80 °C pri čemu se uklanja zaostalo lijepilo, a naposljetku prolaze kroz sustav detektora metala koji odvajaju zaostale čestice metala. Ključan korak u pripremi za recikliranje je sušenje PET pahuljica nakon njihova pranja na sadržaj vode manji od 20 ppm u svrhu sprečavanja hidrolitičke razgradnje tijekom procesa ekstruzije ili toplinskog oblikovanja. Kao zadnji korak, PET pahuljice se pakiraju u velike vreće i pripremaju za daljnji transport [24, 26].

4.4.2. Mehaničko recikliranje

Mehaničko recikliranje je toplinska prerada materijala čiji je cilj dobivanje novih polimernih proizvoda. Postupak takvog recikliranja sastoji se od svih koraka spomenutih u pripremi za recikliranje te potom postupka ekstrudiranja kojim se dobiveni suhi komadići PET-a tj. PET pahuljice taljenjem prevode u granule [2].

Ovakvim postupkom ne dolazi do promjene kemijske prirode materijala, ali se mijenja njegova molekulska masa. Tijekom postupka ekstrudiranja koji se odvija na visokim temperaturama, PET, kao hidrofilan polimer koji privlači vlagu, može biti podvrgnut hidrolitičkoj degradaciji koja rezultira smanjenjem njegove molekulske mase te time pogoršanjem svojstava recikliranog materijala. Najčešće se to očituje u smanjenju intrinzične viskoznosti PET-a koja s vrijednosti 0,80 koju ima čisti PET padne na vrijednosti između 0,68 i 0,72 [2,24,27]. Osim hidrolitičke degradacije, problem koji se može javiti kod mehaničkog načina recikliranja je prisutnost nečistoća tj. drugih polimernih materijala u PET-u. Ti materijali mogu biti PE i PP od kojih su izrađeni čepovi boca te PVC koji dolazi od etiketa na bocama. Važan je korak uklanjanje tih materijala tijekom pripreme PET-a za recikliranje jer se u slučaju recikliranja PET-a s prisutnom malom količinom tih kontaminanata dobiva reciklirani PET slabih mehaničkih svojstava i niske kvalitete. U takve polimerne mješavine mogu se dodati kompatibilizatori koji će uzrokovati poboljšanu kompatibilnost PET-a i drugih prisutnih polimera i time spriječiti pogoršanje svojstava materijala [24]. Unatoč spomenutih nedostataka, prednosti mehaničkog recikliranja očituju se u jednostavnosti postupka, ekološkoj prihvatljivosti i niskim investicijama, a tome pridonosi i činjenica da se pri recikliranju PET-a koriste postrojenja ista kao i za njegovu proizvodnju [2,8].

Mehanički reciklirani PET može se upotrebljavati u razne svrhe, a jedna od njih je ponovna upotreba kao boca za piće. Kako bi se ispitala mogućnost upotrebe recikliranog PET-a za pakiranje raznih pića, provode se testovi onečišćenja koji pokazuju zadovoljava li PET potrebne uvjete za takvu primjenu. U slučaju da ne zadovoljava zdravstvene uvjete ili potrebna mehanička i druga svojstva, reciklirani se PET koristi u obliku filmova i folija, kao vlakna za izradu odjeće i tepiha, u automobilskoj ili građevinskoj industriji itd. [24].

4.4.3. Kemijsko recikliranje

Kemijsko recikliranje PET-a proces je kojim dolazi do potpune depolimerizacije PET-a do njegovih početnih komponenata (monomera) koje su tereftalna kiselina (TPA) i etilen-glikol

(EG) ili djelomične depolimerizacije do različitih vrsta oligomera. Ovisno o kemijskom sredstvu koje se koristi za obradu PET-a, najčešće primjenjivane metode za ovakav tip njegova recikliranja su metanoliza (obrada metanolom), hidroliza (obrada vodom ili alkalijama) i glikoliza (obrada etilen-glikolom) [2,4].

S obzirom da tijekom kemijskog recikliranja dolazi do pucanja dugih lanaca PET-a, nastali monomeri mogu se koristiti za proizvodnju različitih vrsta novih PET proizvoda što predstavlja jednu od prednosti u odnosu na mehaničko recikliranje. Osim toga, ovakvim tipom recikliranja potrošnja energije može se znatno smanjiti u odnosu na tradicionalne postupke proizvodnje PET-a koji prethodno nije recikliran ni korišten, a isto tako omogućava proizvodnju visokokvalitetnog recikliranog PET-a sličnih svojstava izvornom PET-u. Upravo zbog ovih prednosti smatra se da će postupak kemijskog recikliranja PET-a biti od sve većeg interesa za istraživanje i samu primjenu. S druge strane, kemijsko je recikliranje skuplji i kompleksniji proces od mehaničkog recikliranja te je potrebna veća stručnost i posebna oprema za provedbu tog procesa [14].

Metanoliza

Metanoliza predstavlja proces prevođenja PET-a u dimetil-tereftalat (DMT) i etilen-glikol (EG) obradom metanolom koja se vrši u uvjetima visokog tlaka (2-4 MPa) te visoke temperature koja može varirati u rasponu od 180 i 280 °C [27]. Proces metanolize, osim što uključuje depolimerizaciju PET-a, sastoji se i od pročišćavanja nastalog DMT-a postupcima kristalizacije i destilacije. Iako je razvijeniji postupak u odnosu na hidrolizu, metanoliza je otežana pojavom kristaliničnosti koja iziskuje provedbu postupka destilacije na visokim temperaturama za dobivanje DMT-a [2,14]. DMT se, kao produkt metanolize, može repolimerizirati nazad u PET na dva različita načina. Prvi od njih uključuje transesterifikaciju s EG-om uz nastanjanje BHET-a kao međuprodukta, dok se drugi zasniva na hidrolizi DMT-a u TPA prije ponovnog stvaranja PET-a. U ovom procesu potrebna je upotreba katalizatora, a neki od najkorišteniji su cinkov, magnezijev i kobaltov acetat te olovov dioksid. Zbog lakšeg pročišćavanja DMT-a u odnosu na primjerice glikolizom nastali BHET, metanoliza se primjenjuje za recikliranje niskokvalitetnih sirovina koje se ne mogu učinkovito reciklirati mehaničkim načinom recikliranja. Unatoč prednosti pročišćavanja DMT-a, metanoliza je energetski zahtjevnija od glikolize, a i općenito je skup proces koji zahtijeva velika financijska ulaganja [2,27].

Hidroliza

Hidroliza je proces recikliranja PET-a kod kojeg se PET depolimerizira na tereftalnu kiselinu i etilen-glikol uz prisustvo kiselih ili bazičnih katalizatora. Postupak se provodi pri znatno visokim uvjetima temperature i tlaka pri čemu temperatura može varirati u rasponu od 200 do 250 °C, a tlak između 1,4 i 2 MPa. S obzirom da se hidroliza može provoditi u kiselim, bazičnim i neutralnim uvjetima, može se i podijeliti na kiselu, bazičnu i neutralnu hidrolizu. Proces kisele hidrolize koristi nekoliko kiselina, a neke od njih mogu biti sumporna, fosforna i dušična kiselina. Primjenom sumporne kiseline smanjuje se potreba primjene visokog tlaka i temperature, a time se smanjuje i potrošnja energije procesa. Ipak, postupak kisele hidrolize je skup te uzrokuje nastanak velikih količina anorganskih soli i vodenog otpada. Bazična hidroliza koristi vodenu otopinu NaOH i KOH te se postupak provodi prema gore spomenutim uvjetima hidrolize pri kojima se u ovom slučaju dobivaju dinatrijev ili dikalijev tereftalat, a zatim se obradom sumpornom kiselinom izdvaja TPA. Prednost ovog procesa je sposobnost podnošenja kontaminacije materijala i unatoč tome proizvodnje visokokvalitetne TPA. Treća metoda, neutralna hidroliza, primjenjuje vruću vodu ili paru, a ovim procesom mogu proizvesti visokopročišćeni TPA i EG monomeri. Prednost je stvaranje manjih količina anorganskih soli u odnosu na ostale dvije spomenute metode hidrolize što ju čini ekološki prihvatljivijom dok je nedostatak moguća niža čistoća TPA također u odnosu na kiselu i bazičnu hidrolizu [2,27].

Glikoliza

Glikoliza je metoda kemijskog recikliranja PET-a kod koje se esterske skupine u lancu PET-a, otopljenog najčešće u etilen-glikolu, razgrađuju te nastaju BHET i poliesterski polioli. Reakcija se najčešće odvija na sniženom tlaku i temperaturama od 180 do 240 °C što daje prednost ovom procesu u odnosu na druge procese koji zahtijevaju ekstremne uvjete [2,27]. Tijekom glikolize koriste se razni katalizatori koji uključuju metalne kloride, organokatalizatore, acetate, enzime, eutektička otapala i dr. Mogu se razlikovati četiri metode depolimerizacije PET-a glikolizom, a one su katalizirana glikoliza, glikoliza pomoću otapala, superkritična glikoliza i glikoliza pomoću mikrovalova. Glikoliza je jednostavna, učinkovita, najpraktičnija i financijski najpovoljnija metoda kemijskog recikliranja PET-a koja se često koristi za recikliranje PET boca visoke kvalitete te ponekad može zamijeniti i mehanički tip recikliranja. Iako se smatra najboljom metodom kemijskog recikliranja, glikoliza se suočava s ponekim izazovima kao što su visoka temperatura ili ponekad potreban visoki tlak, korištenje katalizatora te otežano odvajanje i pročišćavanje oligomera [14,27].

5. ZAKLJUČCI

U današnje vrijeme polimerni su materijali najvažniji tehnički materijali koji su zamijenili mnoge druge do tada znatno korištene materijale. Poli(etilen-tereftalat) poznat je kao jedan od najprimjenjivanijih polimera današnjice, a tome su pridonijela njegova iznimna svojstva poput čvrstoće, žilavosti, prozirnosti, male težine, izdržljivosti, niske cijene, dobrih barijernih svojstava i mnogih drugih. Spomenuta svojstva omogućila su primjenu PET-a kao materijala za izradu boca s obzirom da ispunjava sve zahtjeve koje neki polimerni materijal mora ispunjavati da bi bio prikladan kao ambalaža.

PET boce proizvode se procesima injekcijskog prešanja PET predoblika i razvlačnog puhanja PET boca. U procesu injekcijskog prešanja bitno je podešavati parametre poput vremena zadržavanja, temperature taljenja i stanja okoline tijekom taljenja te provesti sušenje granulata PET-a prije taljenja kako bi se izbjegli problemi koji utječu na kvalitetu predoblika. Razvlačno puhanje proces je kojim nastaju biaksijalno orijentirane boce, a takav tip razvlačenja bocama daje poboljšana svojstva poput povećane vlačne čvrstoće i žilavosti, poboljšane otpornosti na udarce i boljih barijernih svojstava. Spomenuti procesi izrade PET boca mogu se provesti jednofaznim ili dvofaznim postupkom od kojih svaki ima svoje prednosti i mane. Jednofazni je postupak energetski i toplinski učinkovitiji što dovodi do manjih troškova dok je dvofazni postupak toplinski manje učinkovit, no ima veću učinkovitost rada i fleksibilnost.

Široka upotreba raznih polimernih materijala, uključujući poli(etilen-tereftalat), dovodi do nastanka velikih količina plastičnog otpada štetnog za okoliš koji je potrebno kvalitetno zbrinuti. Jedno od glavnih svojstava koje PET čini pogodnim za široku primjenu, posebice kao boca za piće, mogućnost je njegova recikliranja koje se najčešće provodi mehaničkom ili kemijskom metodom recikliranja. Mehaničko je recikliranje jednostavno, ekološki prihvatljivo te zahtijeva niske investicije dok je kemijsko recikliranje skuplji i kompleksniji proces koji zahtijeva veću stručnost i posebnu opremu, a ovisno o željenoj kvaliteti konačnog proizvoda može se provoditi metanolizom, hidrolizom ili glikolizom.

6. LITERATURA

1. Janović, Z., Polimerizacije i polimeri, Hrvatsko društvo kemijskih inženjera i tehnologa, Zagreb, 1997., str. 1–14., 62., 110., 170–172., 217.
2. Hrnjak Murgić, Z., Gospodarenje polimernim otpadom, sveučilišni priručnik, Fakultet kemijskog inženjerstva i tehnologije, Zagreb, 2016., str. 35., 36., 48., 49.
3. Jamnicki, S., Polimerni materijali, uvodno predavanje, www.grf.unizg.hr, Zagreb, 2019.
4. Rujnić-Sokele, M., Izradba ambalaže od poli(etilen-tereftalata) te njezina uporaba i primjena u prehrambenoj industriji, Polimeri: časopis za plastiku i gumu, 24 (2003) 87–93.
5. Kratofil Krehula, Lj., Polimeri i polimerizacijski procesi, predavanja, www.fkit.unizg.hr, Zagreb, 2023.
6. Katančić, Z., Polimeri i polimerizacijski procesi, predavanje, www.fkit.unizg.hr, Zagreb, 2023.
7. Radović, S., Milanović Z., Razvoj odvojenoga sakupljanja i recikliranja ambalažnoga otpada od PET-a u Republici Hrvatskoj, Polimeri: Časopis za plastiku i gumu, 25 (2004) 23–28.
8. Awaja, F., Pavel, D., Recycling of PET, European Polymer Journal, 41 (2005) 1453–1477.
9. Olam, M., PET: Production, properties and applications, Advances in Materials Science Research, 48 (2021) 131–162.
10. www.researchgate.net/publication/265112530_PET_Production#fullTextFileContent (pristup 26. ožujka 2024.)
11. Nisticò, R., Polyethylene terephthalate (PET) in the packaging industry, Polymer Testing, 90 (2020) 106707
12. Sudakov A.K., Chudyk I., Sudakova D., Dziubyk L., Innovative technology for insulating the borehole absorbing horizons with thermoplastic materials, E3S Web of Conferences, 123 (2019) 01033
13. <https://material-properties.org/pet-density-strength-melting-point-thermal-conductivity/> (pristup 30. ožujka 2024.)
14. Muringayil Joseph, T., Azat, S., Ahmadi, Z., Moini Jazani, O., Esmaeili, A., Kianfar, E., Haponiuk, J., Thomas, S., Polyethylene terephthalate (PET) recycling: A review, Case Studies in Chemical and Environmental Engineering 9 (2024) 100673

15. Barić, G., Proizvodnja, preradba i potrošnja PET-a u Europi, *Polimeri: časopis za plastiku i gumu*, 28 (2007) 4
16. <https://www.tech-long-intl.com/pet-bottles/> (pristup 10. travnja 2024.)
17. <https://www.enpackplastik.com/> (pristup 10. travnja 2024.)
18. <https://www.useon.com/guide/the-ultimate-guide-of-pet-sheet/> (pristup 10. travnja 2024.)
19. <https://omnexus.specialchem.com/selection-guide/polyethylene-terephthalate-pet-plastic/key-applications> (pristup 9. travnja 2024.)
20. <https://europas.com.vn/en-US/blog-1/polyethylene-terephthalate-what-is-it-properties-key-features-and-common-uses> (pristup 9. travnja 2024.)
21. Palzer, G., Establishment of standard test procedure for PET bottle materials with respect to chemical inertness behaviour including the preparation of a certified PET reference material, *Technischen Universität München*, 2001., str. 9–12.
22. [https://www.msmedithrissur.gov.in/assets/uploads/downloadfile/pet%20bottle%20\(Repaired\)\(1\).pdf](https://www.msmedithrissur.gov.in/assets/uploads/downloadfile/pet%20bottle%20(Repaired)(1).pdf) (pristup 12. travnja 2024.)
23. Welle, F., Packaging material made from polyethylene terephthalate (PET), DLG Expert report 4/2016.
24. Kratofil Krehula, Lj., Recikliranje plastičnog otpada, *Zaštita okoliša, Kem. Ind.* 64 (7–8) (2015) 417–420.
25. Hrnjak Murgić, Z., Zbrinjavanje polimernog otpada, predavanja, www.fkit.unizg.hr, Zagreb, 2017.
26. Zajac, P., Ejdyś, S., Dzik, R., Recycling of Polyethylene Terephthalate (PET) Bottles in the Logistics Supply Chain – Overview, *Rocznik Ochrona Środowiska* 24 (2022) 439–456.
27. Benyathiar, P., Kumar, P., Carpenter, G., Brace, J., Mishra, D. K., Polyethylene Terephthalate (PET) Bottle-to-Bottle Recycling for the Beverage Industry: A Review, *Polymers* 14 (2022) 2366
28. Irwin, C., Blow Moulding, u Yam, K. L. (ur.), *The Wiley Encyclopedia of Packaging Technology*, 3rd Edition, John Wiley and Sons, 2009, str. 145–147.
29. https://www.msmedimumbai.gov.in/assets/pdf/Pet_Bottles.pdf (pristup 12. travnja 2024.)
30. De Cort, S., Godts, F., Moreau, A., Packaging Materials: 1. Polyethylene Terephthalate (PET) for Food Packaging Applications, *International Life Sciences Institute Europe* (2017) str. 8.

31. <https://www.recycle-more.co.uk/what-can-i-recycle/recycling-symbols-explained>
(pristup 20. kolovoza 2024.)
32. https://www.msmedithrissur.gov.in/pdf/enterpreneur/pet_bottle.pdf (pristup 20.
kolovoza 2024.)

7. POPIS KRATICA I SIMBOLA

BHET – bis(2-hidroksietilen)tereftalat

CO₂ – ugljikov dioksid

DMT – dimetil-tereftalat

EG – etilen-glikol

HDPE – polietilen visoke gustoće

H₂O – voda

KOH – kalijev hidroksid

LDPE – polietilen niske gustoće

MeOH – metanol

NaOH – natrijev hidroksid

O₂ – kisik

PE – polietilen

PET – poli(etilen-tereftalat)

PP – polipropilen

PS – polistiren

PVC – poli(vinil-klorid)

TPA – tereftalna kiselina

UV – ultraljubičasto

ΔH_m – entalpija taljenja

T_g – temperatura staklastog prijelaza

T_{max} – maksimalna temperatura

7. ŽIVOTOPIS

OSOBNI PODACI

Ime: Helena
Prezime: Hudoletnjak

████████████████████

████████████████████

OBRAZOVANJE

2020. – 2024. Sveučilište u Zagrebu,
Fakultet kemijskog inženjerstva i tehnologije,
Preddiplomski studij Kemija i inženjerstvo materijala

2016. – 2020. Gimnazija Bjelovar, Bjelovar

2008. – 2016. IV. osnovna škola Bjelovar, Bjelovar

RADNO ISKUSTVO

rujan 2021. – danas Cinestar Cinemas: Zagreb

STRUČNA PRAKSA

lipanj 2024. – srpanj 2024. Institut za medicinska istraživanja i medicinu rada

OSOBNNE VJEŠTINE I KOMPETENCIJE

Strani jezik: engleski
Vozačka dozvola: B kategorija
Rad na računalu: MS Office