

Utjecaj kondicioniranja i reciklata na mehanička svojstva injekcijski prešane tvorevine

Mališ, Josip

Master's thesis / Diplomski rad

2021

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **University of Zagreb, Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture / Sveučilište u Zagrebu, Fakultet strojarstva i brodogradnje**

Permanent link / Trajna poveznica: <https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:235:274621>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2024-12-28**

Repository / Repozitorij:

[Repository of Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture University of Zagreb](#)



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

DIPLOMSKI RAD

Josip Mališ

Zagreb, 2021.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

DIPLOMSKI RAD

Voditeljica rada:

Doc. dr. sc. Ana Pilipović

Josip Mališ

Zagreb, 2021.



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE



Središnje povjerenstvo za završne i diplomske ispite

Povjerenstvo za diplomske radove studija strojarstva za smjerove:

proizvodno inženjerstvo, računalno inženjerstvo, industrijsko inženjerstvo i menadžment,
inženjerstvo materijala te mehatronika i robotika

Sveučilište u Zagrebu Fakultet strojarstva i brodogradnje	
Datum:	Prilog:
Klasa: 602 - 04 / 21 - 6 / 1	
Ur. broj: 15 - 1703 - 21 -	

DIPLOMSKI ZADATAK

Student: **JOSIP MALIŠ** Mat. br.: 0035185814

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **Utjecaj kondicioniranja i reciklata na mehanička svojstva injekcijski prešane tvorevine**

Naslov rada na engleskom jeziku: **The influence of conditioning and recycled material on mechanical properties of injection moulded product**

Opis zadatka:

Jedan od dva glavna postupka praoblikovanja polimernih materijala je injekcijsko prešanje. Injekcijskim prešanjem moguće je dobiti poluproizvode ili gotove proizvode ubrizgavanjem polimerne tvari potrebne smične viskoznosti u temperiranu kalupnu šupljinu.

Kad se primjenjuje u postupku injekcijskog prešanja poliamid (PA) potrebno je voditi računa o njegovoj higroskopnoj strukturi jer se mogu javiti određene nepravilnosti, koje se najčešće očituju u promijenama dimenzija, mase i mehaničkih svojstava. To se može djelomično otkloniti ostavljanjem tvorevine u vodi na određeno vrijeme pri određenoj temperaturi.

Prilikom izrade također se javlja otpad kojeg nazivamo čisti otpad jer nije otišao u daljnju primjenu. Takav čisti otpad može se reciklirati i ponovno upotrijebiti za izradu istih ili drugih tvorevina.

U sklopu rada potrebno je obraditi postupak injekcijskog prešanja i opisati pojedine faze prerade.

U eksperimentalnom dijelu rada potrebno je izabrati stvarnu tvorevinu te ju izraditi postupkom injekcijskog prešanja s različitim postocima recikliranog materijala. Nakon prerade potrebno je ispitati utjecaj kondicioniranja (temperature i vremena izlaganja tvorevine vodi) na mehanička svojstva, te izmjeriti apsorpciju vode putem mase.

U radu je potrebno navesti korištenu literaturu i eventualno dobivenu pomoć.

Zadatak zadan:
12. studenog 2020.

Rok predaje rada:
14. siječnja 2021.

Predviđeni datum obrane:
18. siječnja do 22. siječnja 2021.

Zadatak zadao:
doc. dr. sc. Ana Pilipović

Predsjednica Povjerenstva:
prof. dr. sc. Biserka Runje

ZAHVALA

Ovaj diplomski rad izrađen je pod stručnim vodstvom doc. dr. sc. Ane Pilipović kojoj ovim putem posebno zahvaljujem za pruženu pomoći i savjetima koji su pomogli kod izrade ovog rada. Zahvaljujem izv. prof. dr. sc. Željku Alaru i Ivanu Martinku za pomoć kod ispitivanja žilavosti.

Zahvaljujem se *MPR Mališ Željko*, obrtu koji mi je omogućio da u sklopu njihovog proizvodnog pogona izvedem eksperimentalni dio ovog diplomskog rada.

Također se zahvaljujem svojoj obitelji na bezuvjetnoj podršci i razumijevanju tijekom studija.

IZJAVA

Izjavljujem da sam ovaj rad izradio samostalno uz pomoć navedene literature i konzultacija.

JOSIP MALIŠ

SAŽETAK

U diplomskom radu opisana je analiza utjecaja parametara kondicioniranja i postotka reciklata u osnovnom materijalu na injekcijski prešanu tvorevinu. Mjerena su mehanička svojstva žilavosti te postotak apsorpcije vode.

Opisani su polimerni materijali, ponajviše poliamid (PA) od kojeg je izrađena odabrana tvorevina za analizu. Injekcijsko prešanje kao jedan od najvažnijih cikličkih postupaka prerade polimera detaljno je opisan kao i ubrizgavalice. Dan je pregled modernih pogona za injekcijsko prešanje koji omogućuju manji utrošak energija i bolja svojstva ubrizgavanja. Također u radu su opisane mogućnosti recikliranja plastomernih materijala, koje su vrlo bitan čimbenik u daljnjem razvoju industrije plastomera zbog sve veće konkurencije materijala koji su ekološki prihvatljiviji.

Eksperimentalni dio rada sadrži analizu i optimizaciju parametara kod izrade i kondicioniranja otpreska načinjenog od PA 6.6. Utvrđeno je da svi ulazni parametri, postotak reciklata, temperatura kondicioniranja i vrijeme kondicioniranja utječu na žilavost i apsorpciju vode otpreska. Oba svojstva žilavost i apsorpcija vode nakon analize opisana su matematičkom jednadžbom I. reda.

Ključne riječi: injekcijsko prešanje, kalup, kondicioniranje, poliamid, recikliranje, ubrizgavalica

ABSTRACT

This paper describes the analysis of the influence of conditioning parameters and the percentage of recycled material in the base material on the injection moulded product. The mechanical properties of toughness and the percentage of water absorption were measured.

Polymer materials are described, in particular the polyamide from which the selected product for analysis is made. Injection moulding as one of most important cyclic process of polymer processing is described in detail as well as injection moulding machines. An overview of modern injection moulding machine drives is given, which enables lower energy consumption and better injection properties. Paper also describes the possibilities of recycling thermoplastic materials, which are very important factor in the further development of the thermoplastic industry due to the increasing competition of the materials that are more environmental friendly.

The experimental part of the paper contains the analysis and optimization of process parameters and conditioning of product made of PA 6.6. It was found that all input parameters, recycling percentage, conditioning temperature and conditioning time affect the toughness and water absorption of the product. Both the toughness and water absorption properties after analysis were described by a first-order mathematical equation.

Keywords: conditioning, injection moulding, injection moulding machine, mould, polyamide, recycling

SADRŽAJ

POPIS SLIKA	I
POPIS TABLICA.....	III
POPIS KRATICA	V
POPIS OZNAKA I MJERNIH JEDINICA FIZIKALNIH VELIČINA	VII
1. UVOD	1
2. POLIMERNI MATERIJALI	2
2.1 Plastomeri	4
2.1.1 Polipropilen (PP).....	5
2.1.2 Polietilen (PE)	6
2.1.3 Poli(vinil-klorid) (PVC).....	8
2.1.4 Polistiren (PS)	9
2.1.5 Poliamid (PA)	10
2.2 Duromeri.....	12
2.2.1 Fenol formaldehidi (PF).....	13
2.2.2. Nezasićeni poliesteri (UP).....	14
2.2.3. Epoksidne smole (EP).....	15
2.2.4. Uretani i uree.....	15
2.3 Elastomeri	15
2.3.1 Umreživi elastomeri.....	17
2.3.2 Reaktivni elastomeri.....	18
2.4 Elastoplastomeri (TPE).....	18
3. INJEKCIJSKO PREŠANJE POLIMERA	21
3.1 Definicija injekcijskog prešanja.....	22
3.2 Sustav za injekcijsko prešanja.....	22
3.2.1 Ubrizgavalica.....	23
3.2.1.1 Jedinica za pripremu taljevine.....	24
3.2.1.2 Jedinica za zatvaranje kalupa.....	25
3.2.1.3 Jedinica za vođenje procesa.....	28
3.2.1.4. Pogonska jedinica.....	28
3.2.2 Kalup za injekcijsko prešanje	33
3.2.2.1 Kućište kalupa	34

3.2.2.2. Uljevni sustav.....	35
3.2.2.3 Kalupna šupljina	35
3.2.2.4 Sustav za izbacivanje otpresaka.....	36
3.2.2.5 Sustav za ostvarivanje međusobnog dodira nepomičnog i pomičnog dijela kalupa (sustav za vođenje).....	37
3.2.2.6 Kanali za temperiranje	37
3.3 Ciklus injekcijskog prešanja.....	38
4. RECIKLIRANJE PLASTOMERA	41
4.1 Materijalna uporaba.....	42
4.1.1 Mehanička uporaba (recikliranje).....	43
4.1.2 Kemijska uporaba	45
4.2 Energijska uporaba	45
5. EKSPERIMENTALNI DIO.....	47
5.1 Ispitni materijal	48
5.2 Ispitna oprema.....	49
5.3 Centralno kompozitni plan pokusa	52
5.4 Provedba ispitivanja	54
5.5 Analiza apsorpcije vode.....	56
5.6 Optimizacija apsorpcije vode.....	60
5.7 Analiza žilavosti.....	62
5.8 Optimizacija žilavosti	67
6. RASPRAVA REZULTATA	69
7. ZAKLJUČAK.....	71
8. LITERATURA	72
9. PRILOZI.....	74

POPIS SLIKA

Slika 2.1. Kućište telefona izrađeno od bakelita	3
Slika 2.2. Makromolekularna struktura amorfnih plastomera	4
Slika 2.3. Makromolekularna struktura kristalastih plastomera	5
Slika 2.4. Struktura polipropilena	6
Slika 2.5. Boce izrađene od PE-HD	7
Slika 2.6. Vodilice za lanac izrađene od PE-UHMW	8
Slika 2.7. Struktura poli(vinil-klorida).....	8
Slika 2.8. Zaštitna ambalaža proizvedena od pjenastog polistirena	9
Slika 2.9. Usisna grana motora proizvedena od poliamida	11
Slika 2.10. Toplinom aktivirani duromerni sustavi	12
Slika 2.11. Katalizatorom aktivirani duromerni sustavi	13
Slika 2.12. Duromerni sustavi aktivirani smješavanjem	13
Slika 2.13. Promjene fizičkih stanja i molekularne strukture pri umreživanju elastomera	17
Slika 2.14. Struktura elastoplasomera (TPE)	19
Slika 2.15. Cijevi od elastoplastomera namijenjene za medicinu	20
Slika 3.1. Proizvodnja ubrizgavalica <i>Ankerwerk</i>	21
Slika 3.2. Sustav za injekcijsko prešanje	23
Slika 3.3. Univerzalni trozonski pužni vijak	25
Slika 3.4. Hidraulički sustav za zatvaranje kalupa	26
Slika 3.5. Mehanički sustav jedinice za zatvaranje	26
Slika 3.6. Hidraulička ubrizgavalica <i>Demag</i>	30
Slika 3.7. Izvedba potpuno električne ubrizgavalice	31
Slika 3.8. Shematski prikaz hibridne ubrizgavalice	32
Slika 3.9. Kalup za injekcijsko prešanje plastomera	34
Slika 3.10. Dijelovi uljevnog sustava	35
Slika 3.11. Indikator protoka sustava za temperiranje na ubrizgavalici <i>Haitian</i>	37
Slika 3.12. Ciklus injekcijskog prešanja	38
Slika 3.13. Ubrižgavanje taljevine	39

Slika 3.14. Naknadni tlak	39
Slika 3.15. Priprema taljevine	40
Slika 3.16. Izbacivanje otpreska i zatvaranje kalupa	40
Slika 4.1. Opcije gospodarenja otpadom	42
Slika 4.2. Sustav označivanja plastičnih pakovanja	43
Slika 5.1. PA podna tipla obujmica	47
Slika 5.2. Ispitni materijal pomiješan s bojilom.....	49
Slika 5.3. Kalup za injekcijsko prešanje primijenjen za izradu tvorevina.....	50
Slika 5.4. Peć za kondicioniranje	51
Slika 5.5. Charpyev bat proizvođača <i>Frank</i>	52
Slika 5.6. Tvorevine nakon označavanja i mjerenja mase spremne za kondicioniranje	54
Slika 5.7. Tvorevina pozicionirana na Charpyevom batu	55
Slika 5.8. Tvorevina pozicionirana za ispitivanje prilikom udara bata	56
Slika 5.9. Tvorevina nakon ispitivanja.....	56
Slika 5.10. Razdioba analize za 21 stanje pokusa.....	58
Slika 5.11. Grafički prikaz ovisnosti apsorpcije vode o vremenu kondicioniranja i postotku reciklata.....	59
Slika 5.12. Funkcija poželjnosti za apsorpciju vode.....	62
Slika 5.13. Grafički prikaz ovisnosti žilavosti o vremenu kondicioniranja i postotku reciklata	66
Slika 5.14. Funkcija poželjnosti za žilavost.....	68
Slika 6.1. Usporedba žilavosti za uzorke s 10% reciklata.....	70

POPIS TABLICA

Tablica 2.1. Vrste veza kod polimernih materijala	2
Tablica 2.2. Kemijske strukture poliamida	10
Tablica 4.1. Vijek trajanja pojedinih plastičnih proizvoda	41
Tablica 5.1. Podaci materijala za injekcijsko prešanje	49
Tablica 5.2. Tehničke karakteristike ubrizgavalice	50
Tablica 5.3. Parametri injekcijskog prešanja	51
Tablica 5.4. Plan pokusa	53
Tablica 5.5. Izračunate srednje vrijednosti apsorpcije vode	57
Tablica 5.6. Rezultati analize apsorpcije vode modulom ANOVA	58
Tablica 5.7. Statistički podaci o modelu	60
Tablica 5.8. Ciljevi optimizacije apsorpcije vode	61
Tablica 5.9. Rješenja za optimizaciju apsorpcije vode	61
Tablica 5.10. Izračunate srednje vrijednosti žilavosti	63
Tablica 5.11. Rezultati žilavosti modulom ANOVA za sva stanja pokusa	64
Tablica 5.12. Rezultati žilavosti modulom ANOVA za odabrana stanja pokusa	65
Tablica 5.13. Statistički podaci o modelu	66
Tablica 5.14. Ciljevi optimizacije žilavosti	67
Tablica 5.15. Rješenja za optimizaciju žilavosti	67
Tablica 6.1. Podaci žilavosti za uzorak od 10% reciklata bez kondicioniranja	69
Tablica 9.1. Podaci stanja pokusa 1	74
Tablica 9.2. Podaci stanja pokusa 2	74
Tablica 9.3. Podaci stanja pokusa 3	75
Tablica 9.4. Podaci stanja pokusa 4	75
Tablica 9.5. Podaci stanja pokusa 5	76
Tablica 9.6. Podaci stanja pokusa 6	76
Tablica 9.7. Podaci stanja pokusa 7	77
Tablica 9.8. Podaci stanja pokusa 8	77
Tablica 9.9. Podaci stanja pokusa 9	78
Tablica 9.10. Podaci stanja pokusa 10	78

Tablica 9.11. Podaci stanja pokusa 11	79
Tablica 9.12. Podaci stanja pokusa 12	79
Tablica 9.13. Podaci stanja pokusa 13	80
Tablica 9.14. Podaci stanja pokusa 14	80
Tablica 9.15. Podaci stanja pokusa 15	81
Tablica 9.16. Podaci stanja pokusa 16	81
Tablica 9.17. Podaci stanja pokusa 17	82
Tablica 9.18. Podaci stanja pokusa 18	82
Tablica 9.19. Podaci stanja pokusa 19	83
Tablica 9.20. Podaci stanja pokusa 20	83
Tablica 9.21. Podaci stanja pokusa 21	84

POPIS KRATICA

Kratika	Opis
EP	epoksid
F	formaldehid
M	melamin
MF	melamin-formaldehid
NCO	izocijanat
OH	amin
P	fenol
PA	poliamid
PA 11	poliamid 11
PA 12	poliamid 12
PA 6	poliamid 6
PA 6.10	poliamid 6.10
PA 6.6	poliamid 6.6
PC	polikarbonat
PE	polietilen
PE-HD	polietilen visoke gustoće
PE-LD	polietilen niske gustoće
PE-LLD	linearni polietilen niske gustoće
PE-MD	polietilen srednje gustoće
PET	poli(etilen-tereflat)
PE-UHMW	polietilen vrlo visoke molekularne mase
PF	fenol-formaldehid
PP	polipropilen
PS	polistiren
PUR	poliuretan
PVC	poli(vinil-klorid)
TPE	elastoplastomer
TPEA	etramidni elastoplastomer
TPEE	eter-esterski elastoplastomer

TPO	olefinski elastoplastomer
TPS	stirenski elastoplastomer
TPU	poliuretanski elastoplastomer
U	urea
UF	urea-formaldehid
UP	nezasićeni poliester

POPIS OZNAKA I MJERNIH JEDINICA FIZIKALNIH VELIČINA

Oznaka	Mjerna jedinica	Opis
A	mm^2	površina lome površine
a_{cN}	kJ/m^2	žilavost
c	%	apsorpcija vode
E_c	J	apsorbirana energija udarnog rada loma
m_1	g	masa uzorka prije apsorpcije vode
m_2	g	masa uzorka nakon apsorpcije vode
s		standardna devijacija
t	h	vrijeme kondicioniranja
\bar{x}		srednja vrijednost
ϑ	$^{\circ}\text{C}$	temperatura kondicioniranja
ρ	kg/m^3	gustoća

1. UVOD

Polimerni materijali su oduvijek u našoj okolini, od samih začetaka života. Životinje, biljke i mnogi drugi živi organizmi sastoje se od polimera. Unatoč tome, tek početkom 20. stoljeća počinjemo shvaćati pravu bit polimera. Tome je ponajviše doprinio razvoj plastomera.

Injekcijsko prešanje, uz ekstrudiranje, je najvažniji postupak praoblikovanja polimernih materijala. Ovisno o materijalu koji se upotrebljava, svojstva poluproizvoda ili proizvoda bitno se razlikuju. Nakon prešanja također je moguće utjecati na svojstva, to jest postoji mogućnost ispravljanja nepravilnosti u strukturi. Takav pristup je potreban kod injekcijskog prešanja poliamida (PA) zbog njegove strukture, gdje se provodi kondicioniranje (proizvod se određeno vrijeme ostavlja u vodi pri određenoj temperaturi).

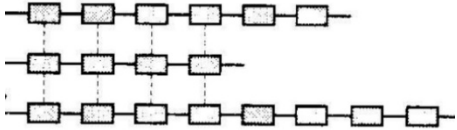
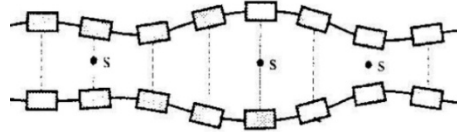
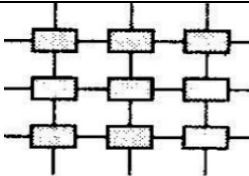
Uz poluproizvod ili proizvod u postupku injekcijskog prešanja dobivamo i otpad kojeg možemo reciklirati i ponovno upotrijebiti, zbog čega imamo vrlo veliku iskoristivost materijala. Da bi se zadržala tražena mehanička svojstva potrebno je ispitati koliko se recikliranog materijala smije dodati.

2. POLIMERNI MATERIJALI

Materijal čiji je osnovni sastojak sustav makromolekula, bio on prirodnog ili sintetskog podrijetla, naziva se polimerni materijal. Sam naziv dolazi od grčkih riječi *poli* - mnogo i *meros* – čestica. [1]

Postoji više kriterija po kojima možemo podijeliti polimere, neki od njih su spomenuto prirodno ili sintetsko podrijetlo, anorganski ili organski po kemijskom sastavu, te po ponašanju pri povišenim temperaturama. Tu dolazimo do najvažnije podjele, ponašanje pri povišenim temperaturama dijeli polimere na plastomere, elastomere duromere te elastoplastomere kao posebnu skupinu (tablica 2.1). U odnosu na zahtijevana svojstva proizvoda ili poluproizvoda, bismo određenu vrstu polimera. [1]

Tablica 2.1. Vrste veza kod polimernih materijala [1]

Vrsta veza među makromolekulama	Struktura	Ponašanje pri zagrijavanju	Grupa polimera
Fizikalne (Van der Waalsove, vodikove, Londonove privlačne sile)	 <p>Amorfna Linearna Kristalna Kristalasta</p>	Mekša, tali se	Plastomeri
Fizikalne i kemijske	 <p>Djelomično umrežena</p>	Mekša, ne tali se	Elastomeri
Kemijske (kovalentne)	 <p>Potpuno umrežena</p>	Ne mekša, ne tali se	Duromeri

Polimeri se nalaze oduvijek oko nas, ali tek početkom 20. stoljeća istraživanjima se dolazi do shvaćanja kako funkcioniraju polimerni spojevi. To shvaćanje dolazi s razvojem plastomera koji su potpuno umjetno stvoreni materijali. [2]

Polimerna industrija bilježi svoj početak 1868. godine sinteriranjem celuloznog nitrata. Razlog tome je bio nedostatak slonovače, od čega su se u ono vrijeme radile kugle za biljar. Proizvođač kugli, kako bi osmislio drugačiji model proizvodnje organizirao je natjecanje. John W. Hyatt je u SAD-u sinterirao celulozni nitrat i taj materijal nazvao celuloid. Pošto se za proizvodnju celuloida upotrebljava celuloza, koja je prirodni polimer, tek 41 godinu kasnije napravljen je prvi potpuno umjetni polimerni materijal. Leo Baekeland stvorio je fenol-formadehidnu smolu, poslije nazvanu „bakelit“ (slika 2.1). Zbog dobrih izolacijskih svojstava još se i danas upotrebljava u izradi utičnica, prekidača i sličnih električnih proizvoda. [1]



Slika 2.1. Kućište telefona izrađeno od bakelita [3]

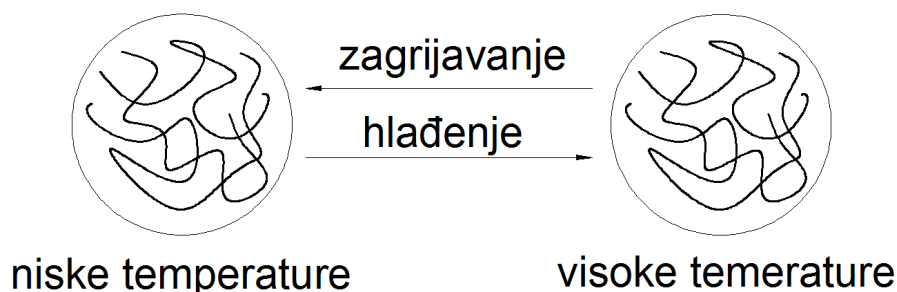
Danas poznajemo toliko različitih polimernih materijala da ih možemo po svojstvima podijeliti u tri različite skupine. Prvi su polimeri koji imaju jednaka svojstva kao neki drugi materijali koji su se primjenjivali prije njih, ali su zbog svoje cijene puno ekonomičniji za primjenu te su potisnuli klasične materijale. Druga skupina su materijali sa značajno poboljšanim svojstvima u odnosu na konvencionalne materijale, dok su u trećoj vrsti oni polimerni materijali koje bi mogli nazvati

unikatnima, jer do njihovog pronalaska nije postojao drugi materijal s iole sličnim svojstvima. Budući razvoj polimera sigurno će biti povezan s otkrićima novih materijala, ali definitivno i dorade već postojećih materijala tako da im se poboljšaju svojstva ili dobiju neka koja do sad nisu imali. Također veliki dio industrije povezan je uz recikliranje polimera. Pošto se jako velik dio proizvodnje veže uz fosilna goriva, vrlo je bitno omogućiti što veće mogućnosti recikliranja, jer će s ponestajanjem sirovina rasti i cijena, a uz širenje mogućnosti recikliranja to ne mora nužno biti uzročno-posljedična veza.

2.1 Plastomeri [1]

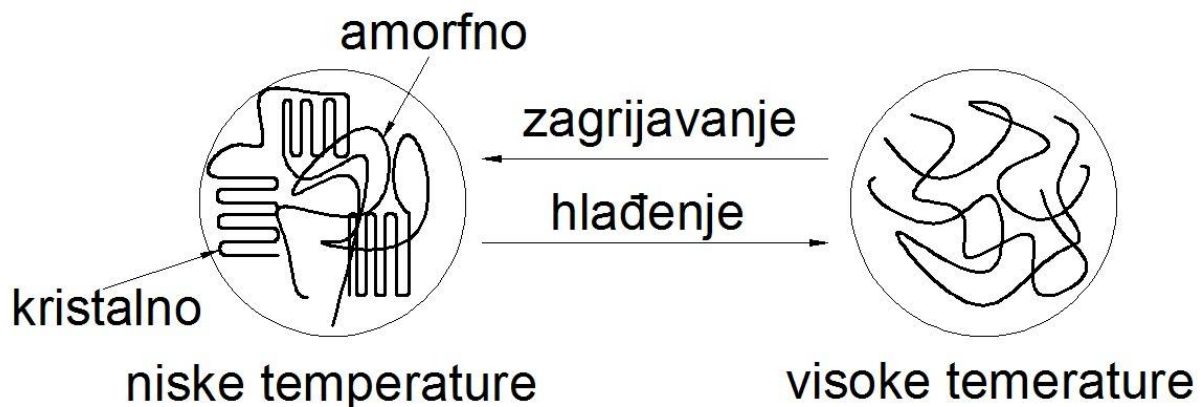
Prema potrošnji polimernih materijala, skupina plastomera je najviše rasprostranjena. Po stupnju uređenja plastomeri mogu biti amorfni, kristalasti i kristalni. Imaju linearne i granate makromolekule koje su međusobno povezane isključivo sekundarnim vezama.

Gotovo polovica komercijalno upotrebljivih plastomera po svojim obilježjima makromolekularne strukture spada u amorfne plastomere. Njihovi polimerni lanci uvijek imaju slučajan raspored (slika 2.2). Amorfni plastomeri su pri niskim temperaturama u čvrstom stanju i nema zapaženijeg gibanja molekula. Pri povišenim temperaturama prelaze u kapljevito stanje uz stalna molekularna kretanja. Bez dodataka boje i ojačavala amorfni plastomeri su uglavnom prozirni, krhki i slabe kemijske postojanosti.



Slika 2.2. Makromolekularna struktura amorfnih plastomera [1]

Kristalasti plastomeri svoj naziv duguju spoznaji da osim kristalne faze sadrže i amorfnu (slika 2.3). Nalik su kristalnim, a udio kristalne faze označava se stupnjem kristalnosti, koji uvelike utječe na preradbena i mehanička svojstva. Viši stupanj kristalnosti povisuje gustoću, čvrstoću, tvrdoću, krutost i postojanost prema otapalima. Manji stupanj kristalnosti poboljšava fleksibilnost, podatljivost i preradljivost. Kristalasti polimeri su najčešće neprozirni. Mogu se pojaviti kao djelomično prozirni i svjetlopropusni (translucentni). Odlikuju se izvrsnom žilavošću i razvlačivosti, te boljom kemijskom postojanošću od amorfni plastomera.



Slika 2.3. Makromolekularna struktura kristalastih plastomera [1]

2.1.1 Polipropilen (PP) [4]

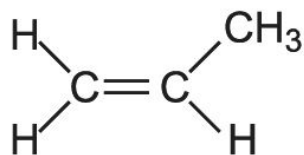
Polipropilen je nastao 1951. godine od strane Paula Hogan i Roberta Banks, kemičara u tvrtki *Phillips petroleum*. Sastoji se od linearnih makromolekula i ima pravilan raspored metilnih skupina u lancu (slika 2.4). Zbog tog rasporeda tvore spiralnu strukturu oblikom sličnu zavojnici. Kristalasti je polimer te nastaje polimerizacijom propilena u polipropilen pri niskim temperaturama, a uz pomoć katalizatora.

Polipropilen se proizvodi postupkom koordinativne polimerizacije, gdje se više manjih molekula propilenovog monomera povezuje pravilnim rasporedom u duge lance molekula koje nazivamo makromolekule.

Gustoća polipropilena je vrlo niska ($\rho \approx 0,9 \text{ g/cm}^3$). Zbog toga je vrlo rasprostranjen jer daje dobra mehanička svojstva, a relativno malu masu u odnosu na proizvode od

metala, drva i slično. Tali se pri temperaturama oko 160-180 °C, pa ima vrlo dobra svojstva na širokom rasponu temperatura. UV otpornost nastaje uz dodatak stabilizatora. Najčešće se prerađuje postupkom injekcijskog prešanja i ekstrudiranja.

U odnosu na druge polimere ima jako konkurentnu cijenu te relativno dobra svojstva pa se upotrebljava u vrlo širokom spektru. Primjenjuje se u građevinarstvu, gdje je primjerice zamijenio konvencionalne željezne cijevi za vodovodne i odvodne vodove. U kućanstvu se upotrebljava za izradu posuda za hranu, raznih poklopaca, nosača u ormarima i slično. Također se upotrebljava i u medicini gdje se od njega proizvode razne posude i medicinska pomagala.



Slika 2.4. Struktura polipropilena [5]

2.1.2 Polietilen (PE)

Polietilen je kristalasti plastomer, nastaje polimerizacijom etilena $\text{CH}_2\text{-CH}_2$. Kod niskog stupnja kristalosti gustoća je također niska dok je kod visokog stupnja kristalosti i gustoća visoka. Osim te dvije podjele po gustoći se razlikuju još i polietilen srednje gustoće (PE-MD), polietilen vrlo visoke molekularne mase (PE-UHMW) te linearni polietilen niske gustoće (PE-LLD). [1]

Polietilen niske gustoće (PE-LD) koji se proizvodi pomoću tubularne tehnologije ili autoklave te se može dobiti u standardnim ($0,918\text{-}0,925 \text{ g/cm}^3$) i srednjim gustoćama ($0,930\text{-}0,940 \text{ g/cm}^3$). Vrlo je žilav materijal visokog modula elastičnosti, voskaste konzistencije i zamućeno bijele boje. PE-LD se najčešće proizvodi ekstrudiranjem i injekcijskim prešanjem, a primjenjuje se u farmaciji i prehrambenoj industriji. [6]

Polietilen visoke gustoće (PE-HD) je postojan u kipućoj vodi i relativno postojan prema UV zračenju, goriv je i potreban mu je dodatak antistatika. Prerađuje se postupkom puhanja, injekcijskog prešanja i ekstrudiranjem. Primjenjuje se za izradu

vrećica, igračka, posuda, boca, cisterni i spremnika te cijevi za vodovodne instalacije (slika 2.5). [6]



Slika 2.5. Boce izrađene od PE-HD [7]

Linearni polietilen niske gustoće (PE-LLD) se može dobiti i veće gustoće (do $0,941 \text{ g/cm}^3$) pa do jako niske gustoće ($0,905 \text{ g/cm}^3$). Od PE-LLD izrađuje se ambalaža za zamrznutu hranu, cijevi za podno grijanje, rastezljivi film, kozmetika, farmaceutske cijevi postupkom ekstrudiranja, puhanja, rotacijskog kalupljenja i injekcijskog prešanja. [6]

Polietilen vrlo visoke molekularne mase (PE-UHMW) je materijal sa samopodmazivajućim svojstvom i niskim faktorom trenja pa je time dosta otporan na trošenje (slika 2.6). Dodatkom staklenih vlakana može mu se povećati krutost i toplinska postojanost uz jako male promjene drugih svojstava. Dinamička izdržljivost mu je jako dobra, a čistoća mu je dovoljna za primjenu u prehrambenoj industriji. Primjenjuje se za izradu: ploča za potrebe kemijske industrije i industrije papira, dijelova za potrebe prehrambene industrije (dijelovi pumpi, dijelovi filtara, zupčanici), dijelova vozila i poljoprivrednih strojeva. [8]

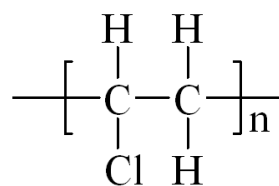


Slika 2.6. Vodilice za lanac izrađene od PE-UHMW [9]

2.1.3 Poli(vinil-klorid) (PVC) [1]

Poli(vinil-klorid) je naziv za skupinu plastomera koji sadržavaju makromolekule s ponavljajućim $-\text{CH}_2-\text{CHCl}-$ jedinicama (slika 2.7). U svom čistom obliku PVC je krut i krhak, ali se njegova svojstva mogu lagano modificirati. Poznato je više od stotinu vrsta plastomera na osnovi vinil-klorida. Razlikuju se po postupcima dobivanja, vrsti i količini omekšavala, sadržaju komponenata ili drugih polimera. Njihova se fizička svojstva tako mijenjaju od savitljivog, elastomernog do žilavog ili krutog materijala.

Poznata su dva osnovna tipa PVC-a: kruti i savitljivi. Kruti PVC je tvrd, žilav, proziran i teško obradiv materijal, ali zato vrlo postojan na utjecaj atmosferilija, vlage i kemikalija, a ima i odlična električna svojstva i slabi gori. Drugi, savitljivi PVC, sadrži 20 – 30 % omekšavala, lagano se prerađuje, ali je slabijih mehaničkih svojstava i manje je postojan prema utjecaju topline i atmosferilija.



Slika 2.7. Struktura poli(vinil-klorida) [1]

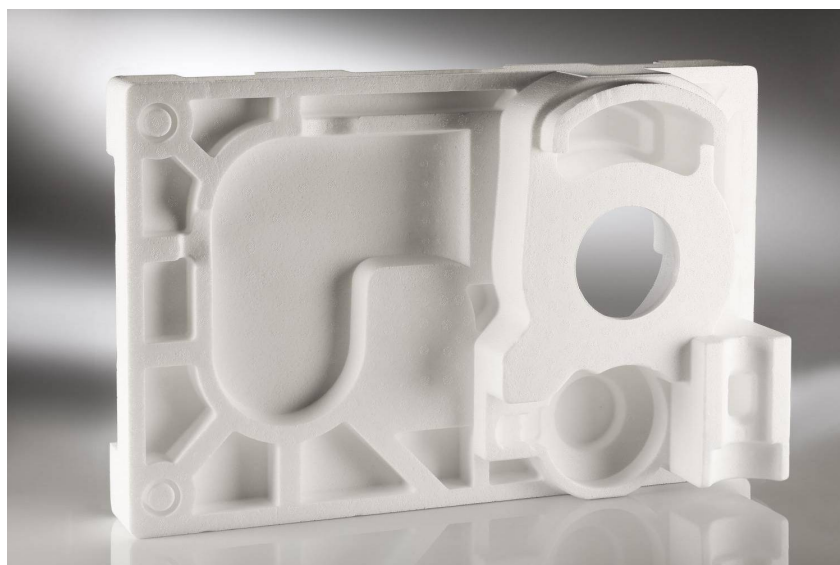
PVC ne kristalizira u uobičajenom smislu. Za njegovu preradu potrebna je temperatura koja je dosta iznad relativno niskog staklišta (140-190 °C). PVC se najčešće upotrebljava u proizvodnji: okvira prozora, boca, zaštitnih panela u kućanstvu, različitih cijevi, obloga za žice i kabele.

2.1.4 Polistiren (PS) [10]

Polistiren je amorfni plastomer. Njegovo nisko staklište čini ga materijalom niske toplinske postojanosti. Čisti polistiren je vrlo proziran i krhak. Slitina polistirena se često miješa s česticama kaučuka pa je žilavija i manje prozirna.

Polistiren je plastomer relativno niskog tališta (≈ 170 °C) pa time ima i malu toplinsku postojanost. To je aromatski polimer koji nastaje od monomera stirena, koji se proizvodi iz sirove nafte. U krutom stanju je tvrd, bezbojan i relativno krhak. Često se za pjenasti polistiren upotrebljava i industrijski naziv - stiropor. Relativno je niske cijene pa se upotrebljava za proizvode jednostavnih zahtjeva.

Polistirenske pjene upotrebljavaju se kod raznih izolacija u građevinarstvu, hladnjačama, domaćinstvu i slično. Polistiren se upotrebljava za izradu jednokratnog pribora za jelo (EU direktiva zabranila je takav pribor za jelo), jednostavna kućišta, laboratorijska oprema, zaštitna ambalaža i slično (slika 2.8).

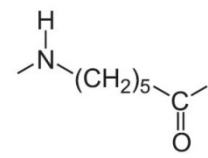
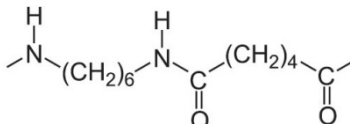
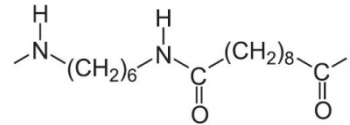
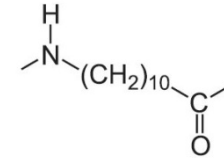
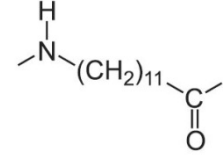


Slika 2.8. Zaštitna ambalaža proizvedena od pjenastog polistirena [11]

2.1.5 Poliamid (PA)

Kemijski je moguće proizvesti preko 2500 različitih podvrsta poliamida. Danas se najčešće rabi pet glavnih vrsta: PA 6, PA 6.6, PA 6.10, PA 11 i PA 12 čije su kemijske strukture prikazane u tablici 2.2. Brojevi uz oznaku pokazuju broj ugljikovih atoma u osnovnoj molekuli. Poliamid je poznat po visokoj žilavosti i otpornosti na trošenje. U određenoj mjeri PA apsorbira vlagu i zbog toga se ne koristi kao izolacijski elektromaterijal. Kako bi se smanjio utjecaj topline i UV svjetlosti dodaju mu se stabilizatori. Čvrstoća mu se znatno pojačava dodavanjem kratkih staklenih vlakana (PA 6.6 s dodacima). [12]

Tablica 2.2. Kemijske strukture poliamida [13]

Vrsta poliamida	Kemijska struktura
PA 6	
PA 6.6	
PA 6.10	
PA 11	
PA 12	

Većina svjetske proizvodnje poliamida odnosi se na PA 6 i PA 6.6. Oboje pripadaju skupini linearnih poliamida. Mehanička svojstva najveća su prednost ovih materijala. Visoka tvrdoća, otpornost na habanje, te povećana postojanost na toplinu u odnosu na druge plastomere. Talište PA 6 je 240 °C, dok je talište PA 6.6 između 260 do 300 °C. PA 6.6 ima sposobnost održavanja stalnog oblika do 180 °C, a privremeno i

do 200 °C. PA 6.6 ima dobru dinamičku čvrstoću te otpornost na pucanje. Otporan je na ciklička opterećenja te pokazuje svojstva zvučne i vibracijske izolacije. Također u odnosu na PA 6 ima i kemijsku postojanost. PA 6.6 postojan je na maziva, naftne derivate i organska otapala. [13]

Kod injekcijskog prešanja s PA 6.6 moguća je izrada tankih stijenki. Nakon ubrizgavanja otpresak počinje upijati vodu (vlagu) iz atmosfere, što mijenja mehanička svojstva. S upijanjem vode materijal postaje žilaviji, što je kod nekih otpresaka zahtijevano pa je potrebno provesti kondicioniranje prije nego je otpresak spreman za upotrebu. Za materijal koji će se primijeniti u eksperimentalnom dijelu ovog rada po tehničkoj specifikaciji poznato je da je žilavost veća od 60 % pa do 100 % nakon kondicioniranja. [13]

PA 11 karakteriziran je malim upijanjem vode, pa ima dobru postojanost oblika, manju gustoću nego PA 6 i 6.6 i ima niže talište od PA 6 i PA 6.6, oko 200 °C. Izvrsna mu je postojanost prema organskim otapalima i slabim kiselinama. Međutim, cijena je relativno viša nego ona za PA 6 i PA 6.6. [14]

Poliamid ima široku primjenu u automobilskoj industriji kao dijelovi pogonskih sklopova, konektori elektroničkih komponenti, kućišta zračnih jastuka, zupčanicu usisne grane motora (slika 2.9) te u općoj primjeni, kod motornih alata, vezova skija, kotača za kolica, podložne pločice. [12]



Slika 2.9. Usisna grana motora proizvedena od poliamida [15]

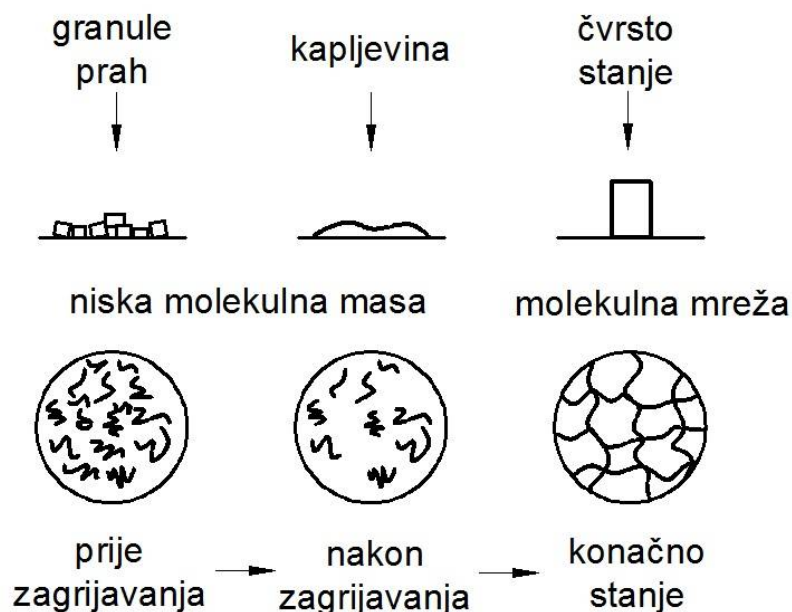
2.2 Duromeri [1]

Duromerni materijali su gusto prostorno umrežene strukture, netaljivi su, netopljivi i ne bubre. Zbog karaktera primarnih veza kojima su im makromolekule međusobno povezane, duromerne se tvorevine zagrijavanjem ne može niti omekšati niti rastaliti. Svojstvo mekšanja i taljenja duromeri imaju u fazi dobivanja (duromerni pretpolimeri ili duromerne taljevine). U toj fazi mora ih se preoblikovati u potrebni oblik tvorevine kako bi se zatim omogućila potrebna reakcija polimeriziranja i umreživanja.

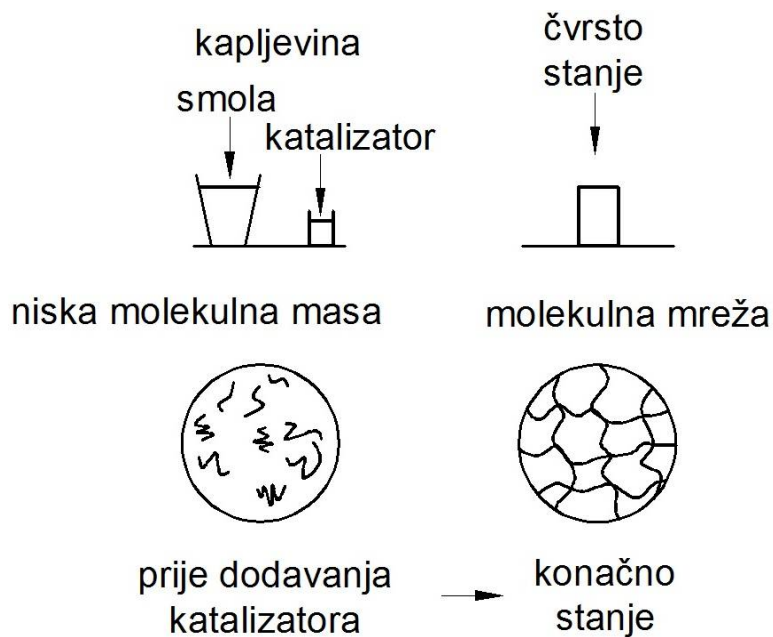
Najprošireniji duromeri načinjeni su na temelju fenol-formaldehidnih (PF), urea-formaldehidnih (UF) i melamin-formaldehidnih (MF) smola, kojima se dodaju potrebni sastojci. Kao osnovni sastojci za proizvodnju ojačanih duromernih tvorevina upotrebljavaju se nezasićeni poliesteri (UP) i epoksidi (EP). Važna je i skupina tvorevina na osnovi silikonskog kaučuka. U duromerne tvorevine ubrajaju se i one načinjene od poliuretana.

Obzirom na način preradbe, duromere je moguće podijeliti u tri skupine:

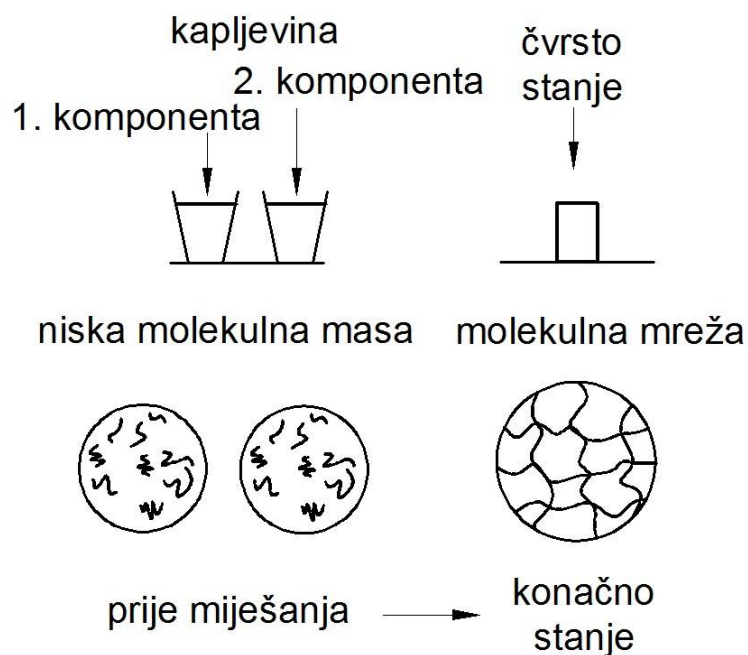
- temperaturno aktivirani sustavi (slika 2.10),
- katalizatorom aktivirani sustavi (slika 2.11),
- duromerni sustavi aktivirani smješavanjem (slika 2.12).



Slika 2.10. Toplinom aktivirani duromerni sustavi [16]



Slika 2.12. Katalizatorom aktivirani duromerni sustavi [16]



Slika 2.11. Duromerni sustavi aktivirani smješavanjem [16]

2.2.1 Fenol formaldehidi (PF) [1]

Formaldehidni polimerni sustavi nastaju reakcijom formaldehida (F) sa fenolom (P), ureom (U) ili melaminom (M). Spadaju u skupinu topline aktiviranih duromera. Formaldehidni duromerni prepolimeri se često smješavaju s različitim punilima (drveno brašno, celulozna vlakna i mineralna punila). Za potrebe preradbe (najčešće

izravnim prešanjem) većinom se dostavljaju u obliku praha, granulata ili nepravilnih ljuskica.

Fenol-formaldehid je prvi sintetski polimer s početka 20. stoljeća, a poznat je po trgovačkom imenu „*bakelit*“. Pošto se „*bakelit*“ upotrebljavao za ugradnju u razne sklopove, istodobno se radi o konstrukcijskom duromeru. Ta se skupina duromera u očvrnutom stanju odlikuje dobrom toplinskom postojanošću i niskom gorivosti te izvrsnom kemijskom postojanošću, ali su sklони pucanju. Najčešće se javljaju kao tamno obojeni, a najproširenija im je primjena za proizvodnju električnih izolatora.

Aminoplasti (UF ili MF smole) zajedničko je ime za duromere na osnovi uree (U) ili melamina (M) s formaldehidom (F). UF sustavi imaju sličnu namjenu kao i PF duromeri, osobito tamo gdje se postavljaju zahtjevi na boju. Za razliku od fenol-formaldehida mogu biti prozirni ili različito svijetlo obojeni. Proizvodi od MF-a visoko su postojani na vodu te se rabe kao unutarnji i vanjski pokrovni laminati.

2.2.2. Nezasićeni poliesteri (UP) [1]

Nezasićena poliesterska smola, skraćeno ime nezasićeni poliestar (UP), sastoji se od relativno kratkih polimernih lanaca, koji su nastali reakcijom između difunkcionalnih kiselina ili anhidrida i disfunkcionalnog alkohola (glikol).

Molekule su pogodne za umreživanje zbog svoje umjerene molekularne mase i dvostrukih veza. To je osnovni sastojak tog duromernog sustava. Drugi je sastavni element monomer sa sposobnošću polimeriziranja i reagiranja s nezasićenom poliesterskom molekulom, pri čemu nastaje molekularna mreža u kojoj je udio monomera u rasponu od 30 - 50 %. Za očvršćivanje, odnosno za reakciju ovih dvaju sastavnih elemenata potrebna je toplina ili katalizator. Zahvaljujući niskoj viskoznosti obiju sastavnih komponenti, poliesteri su pogodni za impregniranje ojačavala (roving, mat, vlakna) i stvaranje kompozita.

2.2.3. Epoksidne smole (EP) [1]

Epoksidne smole (EP) nastaju reakcijom između epiklorhidrina i multifunkcionalnih kiselina, amina ili alkohola. Tvorevine na osnovi epoksidnih smola odlikuju se dobrom prionjivošću, mehaničkim i električkim svojstvima, ali su skupi. Često se upotrebljavaju kao adhezivna sredstva pri proizvodnji električnih komponenata. U kombinaciji s vlaknastim ojačavalima nastaju kompozitne tvorevine boljih svojstava od onih na osnovi nezasićenih poliesterskih smola.

2.2.4. Uretani i uree [1]

Poliuretani (PUR) čine veliku skupinu duromera. Duromerni poliuretan se sastoji od kombinacije dviju kapljevitihih komponenti, izocijanata i poliola. Svojstva poliuretana ovise o tome temelji li se polioli na poliesteru ili polieteru. Tvorevine temeljene na polieteru bitno su postojanije na hidrolizu od onih temeljenih na poliesteru. Poliuretan ima vrlo široku primjenu. Na tržištu su dostupni i plastomerni poliuretani koji uključuju linearne lance u obliku različitih blokova.

Uree nastaju sintezom izocijanata (NCO) i amina (OH), pa se tako dobiveni sustavi označavaju kao poliurea sustavi. Urea-formaldehid je proziran duromerni materijal, sastavljen od uree i formaldehida. Odlikuje se visokom rasteznom čvrstoćom i prekidnim istezanjem, visokim modulom savojnosti i postojanošću pri visokim temperaturama. Zahvaljujući tim svojstvima, upotrebljava se za izradu ljepila, lakova i završnih premaza, a prešanjem iz urea-formaldehida proizvode se i tvorevine, najčešće za primjenu u elektro i elektronskoj industriji.

2.3 Elastomeri [1]

Elastomerni materijali, elastomeri (gume), imaju djelomično umreženu strukturu, što znači da su im makromolekule međusobno povezane i sekundarnim (fizikalnim, međumolekularnim) i primarnim vezama. Netaljivi su, netopljivi, ali bubre. S obzirom na prisutnost sekundarnih veza, elastomere se zagrijavanjem može omekšati. Gdje god postoje sekundarne veze, one će uslijed dovođenja topline popuštati, a to će

dovesti do povećane pokretljivosti segmenata makromolekula, što je uzrok mekšanja. Kako između makromolekula postoje i primarne veze, elastomer se više ne može rastaliti. Koliko će se neki elastomer moći omekšati ovisi o odnosu primarnih i sekundarnih veza.

Elastomeri se mogu najbolje definirati kao materijali sa sposobnošću vrlo velikih elastičnih deformacija. Praksa je potvrdila da se takvo posebno mehaničko ponašanje temelji na gumastom stanju polimernih molekula (iznad staklišta, $-60\text{ }^{\circ}\text{C}$). Pri tom se molekule svojim slučajnim rasporedom opiru deformaciji. Nijedan drugi materijal ne pokazuje takvu elastičnost. Zbog toga se gumeni materijali nazivaju elastomeri.

Osim elastičnosti, gume posjeduju niz drugih svojstava. Tako su npr. neki gumeni materijali nepropusni za vodu i zrak, ili su postojani pri temperaturama koje su više od $200\text{ }^{\circ}\text{C}$. Također mogu biti postojani na agresivne medije, ili pak savitljivi na temperaturama od $-100\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Kaučuk, bio prirodni bilo sintetski, osnovni je sastojak kaučukovih smjesa. Pod pojmom kaučuk podrazumijeva se i neumreženi polimer, prirodni ili sintetski, koji nakon umreživanja postaje entropijski elastičan.

Gumasta elastičnost pojavljuje se u kratkim vremenskim razdobljima kod nekristalizirajućih plastomernih polimera iznad staklišta. Prevladava teza da su zapleti molekularnih lanaca odgovorni za prijenos opterećenja na pojedine dijelove molekule. Takvi zahvati lanaca nisu, međutim, kontinuirani i efekti rasterećenja onemogućuju da bude posve elastičan.

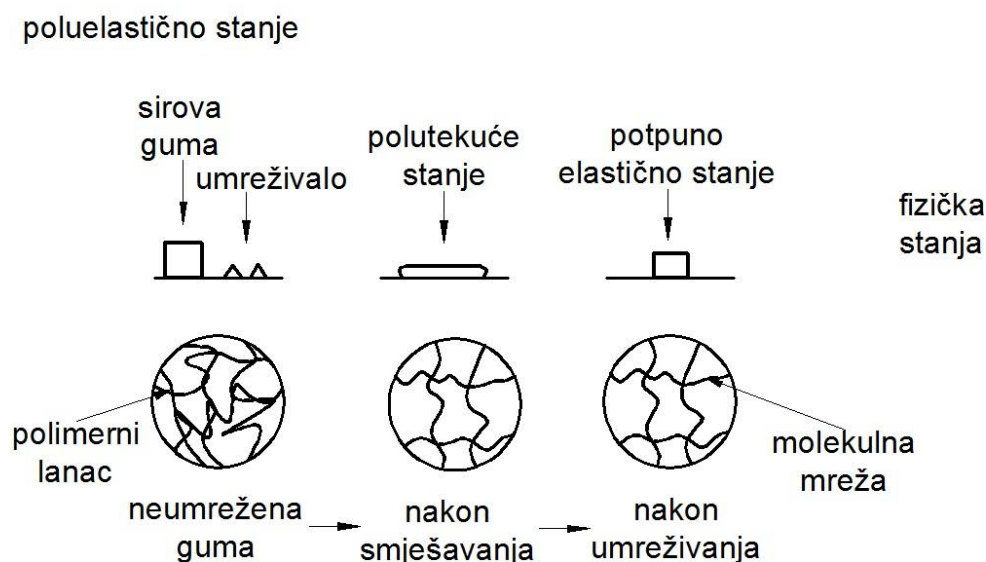
Dodatne veze između molekula ili njihovih dijelova omogućuju postizanje zadovoljavajućeg stupnja „kontinuirane“ elastičnosti. Postoji više načina ostvarivanja tog cilja. U nastavku su razmotrene tri vrste elastomera: umreživi elastomeri, reaktivni elastomeri te elastoplastomeri. Svaka se skupina temelji na drugačijim načelima.

Također je bitno napomenuti da se umreživi i reaktivni elastomeri pretvaraju u proizvode reakcijskim postupcima praoblikovanja. To znači da se reakcija stvaranja praoblika i materijala potrebnih uporabnih svojstava kod cikličkih postupaka zbiva u kalupu, pa je u tom slučaju kalup šaržni reaktor. Kod kontinuiranih postupaka faza praoblikovanja odvojena je od one učvršćivanja, ali joj prethodi.

2.3.1 Umreživi elastomeri [1]

Jedan od postupaka proizvodnje materijala dobrih elastičnih svojstava temelji se na stvaranju kemijskih veza između linearnih molekula visoke molekularne mase. Početni polimer, kaučuk mora biti amorfne strukture, a njegovo staklište bitno niže od sobne temperature, kako bi osiguralo gumasto ponašanje. Kemijske veze, odnosno umreženja moraju biti mnogostruka. Stvaranje umrežene strukture rezultat je reakcije umreživanja. Time se postiže čvrsto stanje. Promjene fizičkih stanja i promjene molekularne strukture tijekom umreživanja prikazane su na slici 2.13.

Umreživanje najproširenijih kaučukovih smjesa najčešće se temelji na kemijskim spojevima sa sumporom (vulkanizacija) i postojanju dvostrukih veza ugljik – ugljik (C=C), ili na nezasićenju u lancu.



Slika 2.13. Promjene fizičkih stanja i molekularne strukture pri umreživanju elastomera [16]

Mogu se primjeniti i drugi kemijski spojevi, poput organskih peroksida, ali su bitno skuplji. Sastojci potrebni za umreživanje kaučukovim smjesama dodaju se pri temperaturama od 140 do 150 °C. Postupak stvaranja smjese kaučuka i ostalih potrebnih sastojaka naziva se smješavanje. Smjesa se nakon smješavanja ekstrudiranjem i raznim postupcima prešanja praoblikuje u tvorevinu.

Potrebna uporabna svojstva gumenih proizvoda postižu se umreživanjem, koje se zbiva u kalupu (ciklički postupci) ili posebnim umreživajućim jedinicama (kontinuirani postupci). Za poticanje umreživanja potrebna je relativno visoka temperatura taljevine (>150 °C). Osim umreživala, kaučuku se dodaju: punila, pigmenti, omekšavala, dodaci za poboljšanje preradljivosti, dodaci za sprečavanje starenja, ubrzavala, aktivatori, usporavala i ostalo. Postupak smješavanja kaučuka i dodavala u kaučukovu smjesu je vrlo kompliciran i kompleksan proces i mora se prilagoditi namjeni kaučukove smjese. Iskusni prerađivači kaučukovih smjesa često razvijaju vlastite recepte.

2.3.2 Reaktivni elastomeri [1]

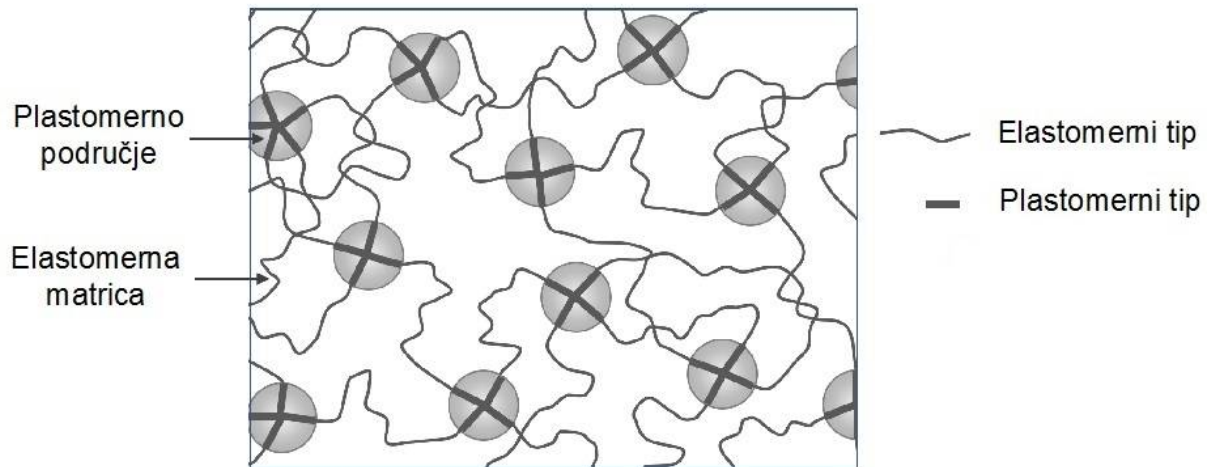
Materijali dobrih elastomernih svojstava mogu se proizvesti jednostupnjevitim postupkom od niskomolekulnih reaktivnih tvari. Postupak je sličan dobivanju duromernih polimera, ali budući da se kod elastomera zahtjeva relativno isprekidano umreživanje, lančana polimerizacija umreživanjem traje tijekom cijele kemijske reakcije.

Neki tipovi poliuretana i silikona pripadaju toj skupini elastomera. Početne tvari su u kapljevitom stanju i jednostavne za praoblikovanje u kalupu, a umreživanje se može potaknuti pomoću topline, katalizatora ili smješavanjem kao u slučaju duromera.

2.4 Elastoplastomeri (TPE) [1]

Elastoplastomer (eng. *thermoplastic elastomers* ili *thermoplastic rubber*, njem. *thermoplastische Elastomere* ili *thermoplastische Gummi*) posebna su skupina blok-kopolimera ili cijepljenih kopolimera, kod kojih su jedne skupine mera plastomernog tipa, a druge skupine elastomernog tipa (slika 2.14).

Osnovno je obilježje te skupine polimernih materijala da se pri sobnim temperaturama ponašaju kao elastomeri, a pri povišenim temperaturama postaju kapljasti kao plastomeri. To znači da su im uporabna svojstva slična svojstvima elastomera, a prerađuju se postupcima tipičnim za plastomere. Svojstva i cijena elastoplastomera, ovisno o tipu i sastavu, mogu varirati u širokom području.



Slika 2.14. Struktura elastoplastomera (TPE) [17]

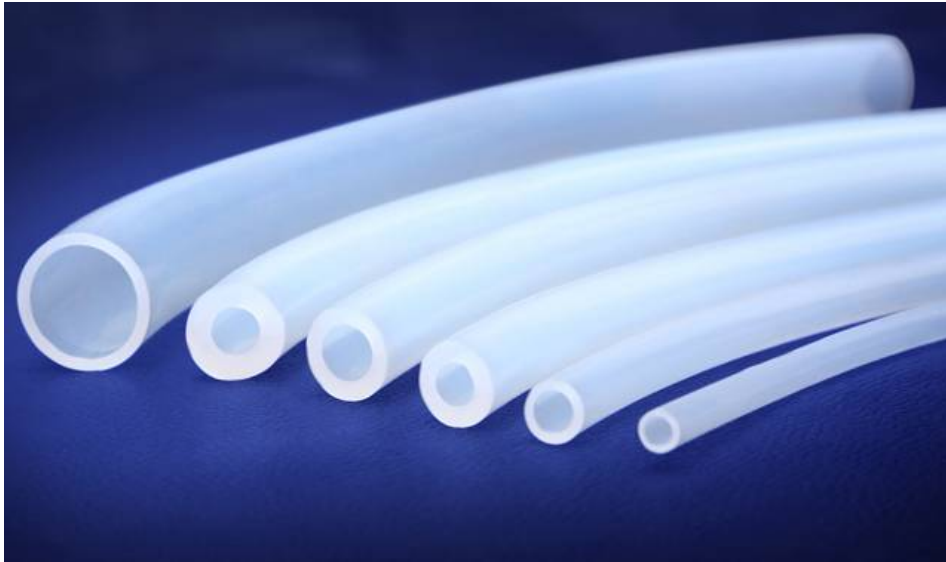
Prema strukturi plastomernih blokova, mogu biti amorfni (staklište više od sobne temperature) i kristalasti (staklište niže od sobne temperature).

Različiti tipovi elastoplastomera mogu općenito biti načinjeni u širokom području tvrdoće, čime se popunjava područje između „meke“ plastike i elastomera. Zbog svojih plastomernih svojstava, elastoplastomeri se mogu prerađivati različitim postupcima, uključujući injekcijsko prešanje, ekstrudiranje, puhanje, rotacijsko kalupljenje, itd.

Elastoplastomeri posjeduju mnoge prednosti u usporedbi s umreženim kaučucima, ali još uvijek i niz nedostataka u pogledu važnih svojstava kao što je puzanje i povratak u prvobitno stanje, temperaturno područje upotrebe, postojanost na utjecaj otapala i ulja. Zbog toga se meki tipovi elastoplastomera ne primjenjuju u izradi pneumatika ili crijeva za rashladne kapljevine. Oni se primjenjuju za izratke kod kojih su ta svojstva manje važna (obuća, izolacija žica, itd.), a imaju i primjenu u području prijanjala, modificiranje polimera, asfaltnih smjesa.

Tvrđi tipovi, posebno oni nastali na osnovi poliuretana i poliamida, postojaniji su na utjecaj ulja i otapala, više su im vrijednosti zaostale pritisne deformacije, pa se rabe pri izradi raznih crijeva (slika 2.15).

Veći dio elastoplastomera može se svrstati u pet osnovnih skupina: olefinski (TPO), stirenski (TPS), poliuretanski (TPU), eter-esterski (TPEE) i etramidni (TPEA).



Slika 2.15. Cijevi od elastoplastomera namijenjene za medicinu [18]

3. INJEKCIJSKO PREŠANJE POLIMERA

Injekcijsko prešanje polimera najvažniji je ciklički postupak preradbe polimera, također i najusavršeniji prema dostignutoj razini. Ima mogućnost preradbe svih vrsta polimera: duromera, elastomera, elastoplastomera, a posebno je proširena preradba plastomernih taljevina. Prema prerađenim količinama injekcijsko prešanje nalazi se odmah iza ekstrudiranja. [19]

Strojevi koji omogućuju injekcijsko prešanje prirodnih modificiranih plastomera (nitrocelululoze) susreću se već u 19. stoljeću. Suvremena proizvodnja, najprije klipnih strojeva za injekcijsko prešanje (ustaljeni naziv za takve strojeve je *ubrizgavalica*), počinje patentom Nijemca *Eichengrüna* (1919). Uočivši prednosti celuloznog acetata, on je razvio prvu ubrizgavalicu za preradbu plastomernih taljevina, primjenivši načelo tlačnog lijevanja lakih i obojenih materijala. Do najbitnije promjene u konceptu izgradnje ubrizgavalice dolazi 1956. kada njemačka tvrtka *Ankerwerk* (danas *Demag*) proizvodi prvu komercijalnu ubrizgavalicu s jednim pužnim vijkom (slika 3.1). Taj koncept i danas prevladava, ostala rješenja se tehnički zanimljiva ali u praksi se nisu pokazala učinkovitima. [19]



Slika 3.1. Proizvodnja ubrizgavalica *Ankerwerk* [20]

Osnovno obilježje suvremene opreme za injekcijsko prešanje je visok stupanj automatiziranosti, posebno ubrizgavalica, te moderno vođenje procesa koje se najčešće temelji na mikroprocesorima i računalima. U Hrvatskoj je tijekom druge polovine 20. stoljeća postojao industrijski proizvođač ubrizgavalica (*Belišće*), a danas se ubrizgavalice isključivo uvoze. Još uvijek više iz Europe, ali proizvođači iz Azije se uz dobar omjer cijene i kvalitete također probijaju na tržište. [19]

3.1 Definicija injekcijskog prešanja [1]

Injekcijsko prešanje polimera ciklički je postupak praobliskovanja ubrizgavanjem polimerne tvari potrebne smične viskoznosti iz jedinice za pripremu i ubrizgavanje u temperiranu kalupnu šupljinu. Nakon polireakcije i/ili umreživanja, geliranja i/ili hlađenja otpresak postaje podoban za vađenje iz kalupne šupljine.

Različite veličine otpresaka, koje mogu varirati od mase manje od miligrama, pa čak do 180 kg, kolika je masa najvećeg poznatog otpreska napravljenog injekcijskim prešanjem, omogućuju zbilja široku primjenu proizvoda. Osim različitih dimenzija, bitna je prednost što se mogu izrađivati i komplicirani oblici i to u relativno visoke dimenzijske postojanosti. Također zbog visokog stupnja automatiziranosti procesa moguća je proizvodnja dvadeset četiri sata na dan, sedam dana u tjednu, što u konačnosti znači manju cijenu proizvodnje po otpresku odnosu na druge metode izrade.

Za injekcijsko prešanje potrebna je preradbena linija koju čine sustav za injekcijsko prešanje i dopunska oprema. Dopunska oprema ovisi o zahtjevima procesa, a osnovni cilj je da povisuje djelotvornost procesa.

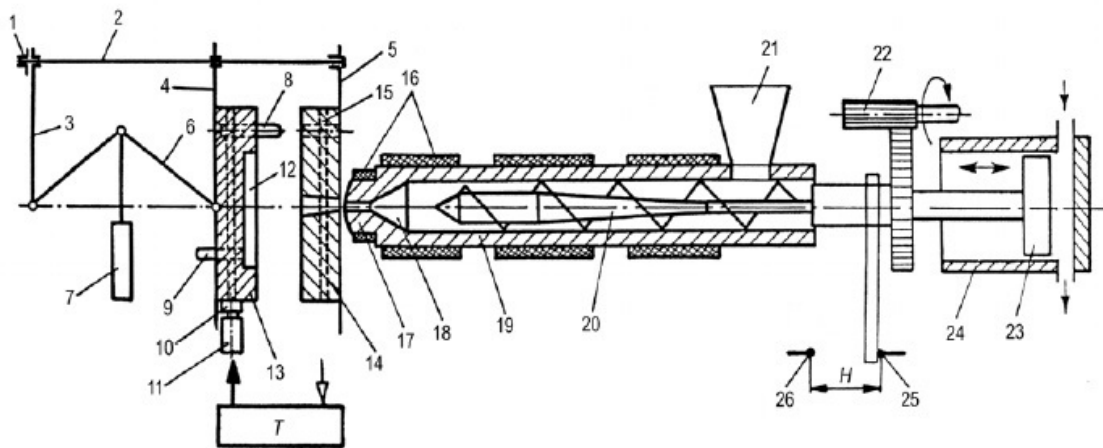
3.2 Sustav za injekcijsko prešanja [19]

Svaki sustav za injekcijsko prešanje mora ispunjavati sljedeće funkcije: priprema tvari potrebne smične viskoznosti, ubrizgavanje i stvaranje praoblika tvorevine pri propisanoj temperaturi kalupne šupljine. Pri preradbi polimernih materijala (plastomerne taljevine i elastoplastomeri) dolazi samo do promjene stanja materijala, čvrsto – kapljevito – čvrsto, što se ostvaruje geliranjem i/ili hlađenjem. Pri preradbi plastomernih monomera, duromernih tvari i kaučukovih smjesa, očvršćivanje tvari u potreban geometrijski oblik otpreska povezano je s kemijskim reakcijama polimeriziranja i/ili umreživanja.

Sustav za injekcijsko prešanje (SIP), je umjetan, realan i relativno izdvojen, što znači da je sustav ulazima i izlazima povezan s okolinom, ali su te veze slabije od onih

među elementima sustava. Sustav za injekcijsko prešanje sastoji se od tri osnovna dijela (slika 3.2):

- ubrizgavalica
- kalup
- temperiralo.



Slika 3.2. Sustav za injekcijsko prešanje [19]

1 - matica za namještanje visine kalupa, 2 - priječnica, 3 - uporišna ploča, 4 - pomični nosač kalupa, 5 - nepomični nosač kalupa, 6 – kutne poluge, 7 - hidraulički cilindar, 8 - vodeći zatik, 9 - izbacivalo, 10 - priključak, 11 - gipka cijev, 12 - kalupna šupljina, 13 - pomični dio kalupa, 14 - nepomični dio kalupa, 15 - kanal za temperiranje, 16 - pojasno grijalo, 17 - mlaznica, 18 - sabirnica, 19 - cilindar za taljenje, 20 - pužni vijak, 21 - lijevak, 22 - pogonski mehanizam pužnog vijka, 23 - hidraulički stap, 24 - cilindar za ubrizgavanje, 25 - stražnja krajnja sklopka, 26 - prednja krajnja sklopka, H – hod pužnog vijka, T – temperiralo

3.2.1 Ubrizgavalica [19]

Ubrizgavalica je element sustava za injekcijsko prešanje koji mora ostvariti više funkcija, a to su:

- priprema taljevine za ubrizgavanje
- ubrizgavanje taljevine u kalup
- otvaranje i zatvaranje kalupa
- vađenje otpreska.

Ubrizgavalica je univerzalni element sustava, unutar njezinih mogućnosti i dimenzija (snaga zatvaranja kalupa, dimenzije ploča za montažu kalupa, volumen taljevine po ciklusu) moguće je izraditi beskonačno mnogo različitih otpresaka.

Ubrizgavalica se sastoji od četiri osnovne jedinice:

- jedinica za pripremu taljevine
- jedinica za zatvaranje kalupa
- jedinica za vođenje procesa
- pogonska jedinica.

Osim navedenih osnovnih jedinica, jako je važan i sustav za zaštitu radnika. Na ubrizgavalicama postoji više sustava za zaštitu, mehanički, hidraulično-elektronski, softverski.

3.2.1.1 Jedinica za pripremu taljevine

Jedinica za pripremu taljevine ima dvije funkcije: potrebno je stalno i precizno dovoditi, pripremati i dozirati taljevinu, a zatim ubrizgati zadani volumen taljevine pod visokim pritiskom u kalupnu šupljinu. [21]

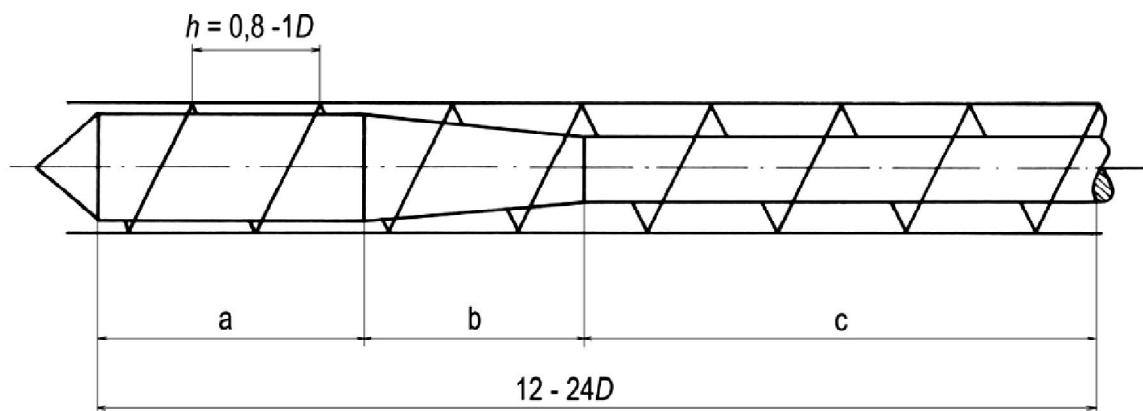
Po kronološkom razvoju razlikujemo tri vrste jedinica za pripremu taljevine: [19]

- klipna ubrizgavalica – plastificiranje i ubrizgavanje pomoću klipa
- klipna ubrizgavalica s predplastificiranjem – predplastificiranje pužnim vijkom, ubrizgavanje klipom
- pužna ubrizgavalica – plastificiranje i ubrizgavanje pomoću pužnog vijka.

Ubrizgavalice s pužnim vijkom danas prevladavaju u industriji zbog svojih prednosti u usporedbi na ubrizgavalice s klipom. Neke od prednosti su: [19]

- potrebne su niže temperature taljevine (kraće vrijeme ciklusa)
- otpresak ima višu savojnu žilavost
- lakša izmjena vrste plastomera i boje plastomera
- suho obojenje plastomera je bolje
- omogućena preradba plastomera nižeg masenog protoka taljevine i praškastog plastomera.

Za preradbu plastomernih materijala najčešće se primjenjuje takozvani univerzalni pužni vijak (slika 3.3). To je univerzalni trozonski pužni vijak duljine $12 - 24D$ u nekim slučajevima i dulji. [19]



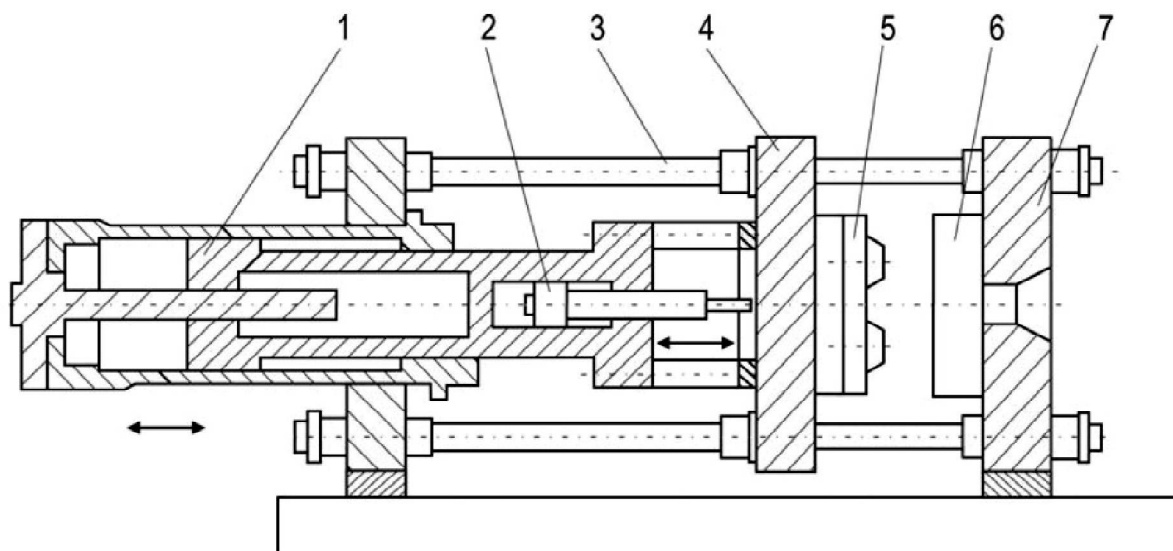
Slika 3.3. Univerzalni trozonski pužni vijak [19]

a – istisna zona, b – kompresijska zona, c – uvlačna zona

Postoji niz parametara za oblikovanje ubrizgavanjem koji se odnose na djelovanje jedinice za pripremu taljevine. To uključuje podešavanje temperature grijača koji se nalaze na vanjskoj ovojnici cilindra u kojem se nalazi pužni vijak, podešavanje točnog volumena taljevine po ciklusu, podešavanje brzine ubrizgavanja i brzinu miješanja vijka kojim se kontrolira brzina povratka vijka, te naknadni tlak koji djeluje nakon ubrizgavanja. Nosač jedinice za ubrizgavanje također se može pomaknuti da sjedne izravno na lijevku nepomičnog dijela kalupa tijekom ubrizgavanja ili da se povuče tijekom doziranja i pročišćavanja, ako je potrebno. [21]

3.2.1.2 Jedinica za zatvaranje kalupa [19]

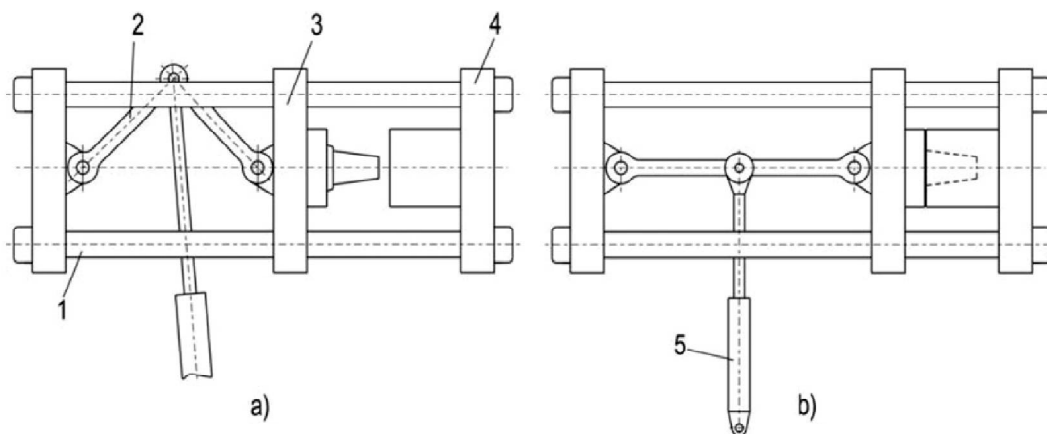
Zadaća jedinice za zatvaranje kalupa je dovođenje u dodir pomičnog i nepomičnog dijela kalupa (zatvaranje kalupa), održavanje u dodiru dijelova kalupa tijekom ubrizgavanja i djelovanja naknadnog tlaka. Zatvaranje kalupa može se ostvariti izravno jednim ili više hidrauličkih cilindara (slika 3.4) ili mehaničkim sustavima (slika 3.5).



Slika 3.4. Hidraulički sustav za zatvaranje kalupa [19]

1- hidraulički cilindar, 2 - hidrauličko potiskivalo, 3 - priječnica, 4 - pomični nosač kalupa, 5 - pokretni dio kalupa, 6 - nepokretni dio kalupa, 7 - nepomični nosač kalupa

Mehanički sustavi sastavljeni su od elemenata za zatvaranje. To je slog poluga, a njihovo potrebno gibanje ostvaruje se djelovanjem elektromehaničkih ili hidrauličkih pogona.



Slika 3.5. Mehanički sustav jedinice za zatvaranje: [19]

a) - otvoreni kalup, b) - zatvoreni kalup

1 - priječnica, 2 - poluga, 3 - pomični nosač kalupa, 4 - nepomični nosač kalupa, 5 – hidraulički cilindar

Potrebno je razlikovati silu zatvaranja od sile držanja, sila držanja je ona koja se mora suprotstaviti sili uzgona u smjeru otvaranja kalupa. Sila uzgona nastaje zbog tlaka koji djeluje u kalupnoj šupljini kod ubrizgavanja. Sila držanja definira se kao sveukupnost sila koje tijekom ubrizgavanja djeluju na prečnice. Sila držanja mora biti veća od sile uzgona, jer u suprotnom može doći do odmicanja pomičnog i nepomičnog dijela kalupa. To odmicanje stvara srh na otpresku i prelijevanje taljevine, a u najgoroj situaciji može doći i do loma prečnice.

Sila držanja kod mehaničkih jedinica za zatvaranje je 10 do 15 % viša od sile zatvaranja, dok je kod potpuno hidrauličkog sustava zatvaranja kalupa sila držanja jednaka sili zatvaranja. Sila zatvaranja propisan je podatak svake ubrizgavalice.

Prednosti hidrauličkih jedinica za zatvaranje jesu:

- brža i jednostavnija ugradnja kalupa
- hod otvaranja kalupa može se lakše namjestiti na potrebnu veličinu
- mogu se ugrađivati kalupi raznih visina
- veća sigurnost od prekoračenja dopuštenih naprezanja priječnica
- sila držanja je poznata jer je moguće očitati tlak u hidrauličkom mehanizmu
- održavanje i popravci su jednostavniji.

Prednosti mehaničkih jedinica su:

- lakše se ostvaruje polagano približavanje pomičnog dijela nepomičnim, što je potrebno
- ostvaruje se brže zatvaranje i otvaranje kalupa
- zatvaranje i zakračunavanje (zasunjivanje) je ovdje jedinstveno, kod hidrauličkih jedinica potrebno je posebno rješenje
- nabavni troškovi ubrizgavalica s mehaničkim jedinicama niži su i do 15 %, a prostor potreban za ubrizgavalicu manji je i do 30 %
- energijski su povoljnije.

Danas kod manjih ubrizgavalica prevladava mehaničko, a kod većih hidrauličko zatvaranje.

3.2.1.3 Jedinica za vođenje procesa

Danas je nezamislivo vidjeti visokoproduktivan industrijski stroj koji nema barem jedno računalo. Mnogi strojevi imaju i više njih te su povezani u jedinici za vođenje procesa (upravljačka jedinica).

Prva komercijalna ubrizgavalica (*Ankerwerk*) bila je upravljana pomoću elektroničkih sklopova, te mehaničkih ventila koji su se ručno podešavali da bi se dobili željeni parametri ciklusa. Za razliku od tehnologije koja se primjenjuje danas, bilo je puno manje mogućnosti te su ventili imali puno manju preciznost podešavanja od današnjih elektronički upravljanih servo ventila za hidrauliku. Također sam proces promjene kalupa je puno brži jer su svi podaci danas spremljeni na računalu te se uz par dodira na zaslonu vraćaju postavke za određeni kalup i određeni materijal. Na starijim strojevima to nije bilo moguće, jer se svaki ventil namještao ručno te je svaki put bilo potrebno pronaći točnu vrijednost da se dobije kvalitetan otpresak. [22, 23]

Svaki ozbiljniji proizvođač strojeva za injekcijsko prešanje upotrebljava vlastiti softver prilagođen njihovim strojevima, tako da se on razlikuje od proizvođača do proizvođača. Samo upravljanje je relativno jednostavno, pošto su sve opcije vrlo jednostavno dohvatljive, ali je naravno potrebno znanje da ih se što kvalitetnije i produktivnije upotrijebi. [23]

3.2.1.4. Pogonska jedinica [24]

Danas se koristi nekoliko različitih pogonskih jedinica:

- hidrauličke ubrizgavalice (slika 3.6)
- električke ubrizgavalice (slika 3.7)
- hibridne ubrizgavalice (slika 3.8).

Moderno konstruirane hidrauličke ubrizgavalice u mnogim područjima primjene usporedive su s hibridnim i električnim ubrizgavalicama. Na kvalitetu proizvedenoga otpreska utječu tri važna čimbenika:

- kvaliteta taljevine
- brzina tečenja čela taljevine
- gustoća taljevine.

Kvaliteta je taljevine ovisna o konstrukciji jedinice za pripremu i ubrizgavanje taljevine, koja je neovisna o pogonu ubrizgavalice. Pogrešan je zaključak kako se električnim ubrizgavalicama postiže stalna kvaliteta taljevine. Brzina tečenja čela taljevine ovisi o kvaliteti taljevine, temperaturi stijenke kalupne šupljine i brzini pužnoga vijka.

Električne ubrizgavalice ne nude odlučujuću prednost u tom pogledu u odnosu na hidrauličke ubrizgavalice sa servo-pumpama s promjenjivim volumenom. Ujednačena gustoća otpreska postiže se nadzorom visine i trajanja tlaka tijekom razdoblja djelovanja naknadnoga tlaka. Nove hidrauličke ubrizgavalice sa servo pumpama s promjenjivim volumenom, nude velike mogućnosti uštede energije. Sustav s promjenjivim volumenom troši samo 18 % više energije u odnosu na potpuni električni pogon.

Treba uočiti da hidraulični pogon omogućuje ponajbolju kontrolu tlaka u kalupnoj šupljini tijekom razdoblja djelovanja naknadnoga tlaka. Jednako se tako postižu najbolja dinamika i najviši tlakovi ubrizgavanja. Na ujednačenost procesa injekcijskoga prešanja utjecajnije je kvaliteta taljevine od vrste pogona pužnoga vijka.

Neispravan je zaključak da su preciznost i točnost krajnjega položaja pužnoga vijka u linearnom smjeru tijekom ubrizgavanja i doziranja dokaz ujednačenosti procesa. Sustavi sa servo pumpama s promjenjivim volumenom, s dobro konstruiranom jedinicom za pripremu taljevine i ubrizgavanje, također omogućuju izradbu otpresaka unutar vrlo uskih granica tolerancija mase otpreska. Ujedno ne postoji niti jedan otpresak koji se ne može proizvesti na ubrizgavalici s hidrauličkim pogonom. Hidrauličke su ubrizgavalice pogodnije za rad s velikim kalupima, otprescima kompleksne geometrije, posebice za višekomponentno ili višebojno injekcijsko prešanje, kao i pri radu s višekratnim kalupima.



Slika 3.6. Hidraulička ubrizgavalica *Demag* [24]

a - jedinica za pripremu taljevine, b - jedinica za zatvaranje kalupa, c - pogonska jedinica, d - jedinica za vođenje procesa

Potpuno električne ubrizgavalice primjenjuju se za otpreske s visokom točnošću mjera i preciznosti izradbe, koji zahtijevaju posebne profile ubrizgavanja, kalupe s posebnim načinima zatvaranja te za otpreske koji troše puno energije uslijed dugih putova doziranja i potrebnih visokih brzina ubrizgavanja.

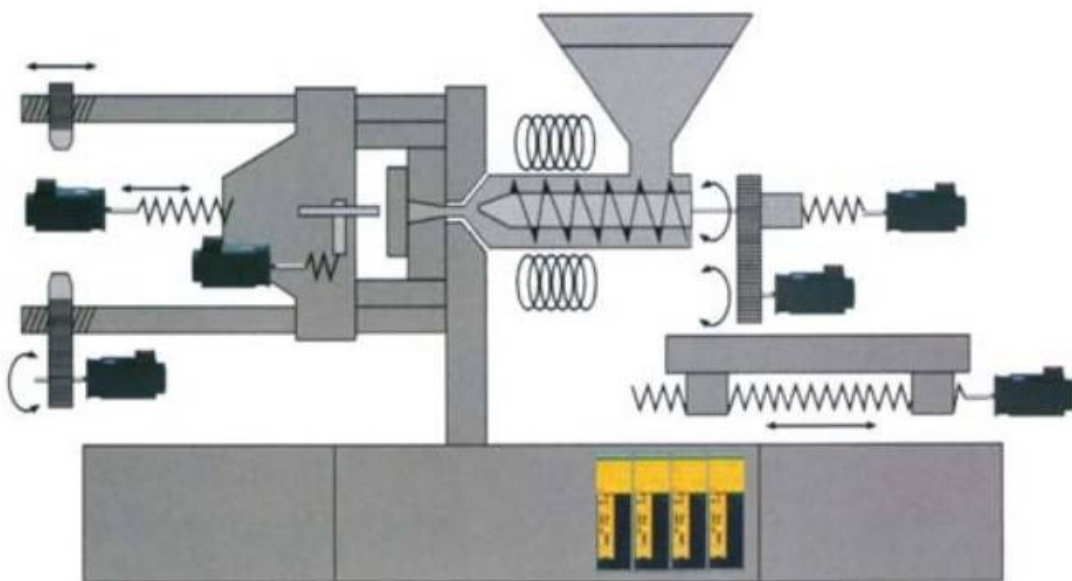
Ključne prednosti električkih u odnosu na hidrauličke ubrizgavalice:

- mogućnost dugotrajnoga održavanja stabilnosti procesa injekcijskoga prešanja
- visoka točnost i preciznost gibanja (ubrzanje, usporenje i namještanje)
- niski utrošak energije i medija za temperiranje
- kraće vrijeme ciklusa
- niža razina buke i prikladnost proizvodnje čistih otpresaka.

Uporabom sinkronih motora s velikim momentom vrtnje za pripremu i ubrizgavanje taljevine postiže se preciznost i ekonomičnost rada. U prednosti potpuno električkih ubrizgavalica valja nabrojati i znatno kraće vrijeme puštanja sustava za injekcijsko prešanje u rad.

Električne ubrizgavalice nepovoljne su za primjenu pri izradbi debelostijernih otpresaka, pri dugim vremenima hlađenja i kada postoji potreba za dvostrukim ili trostrukim izvlačenjem jezgri iz kalupa.

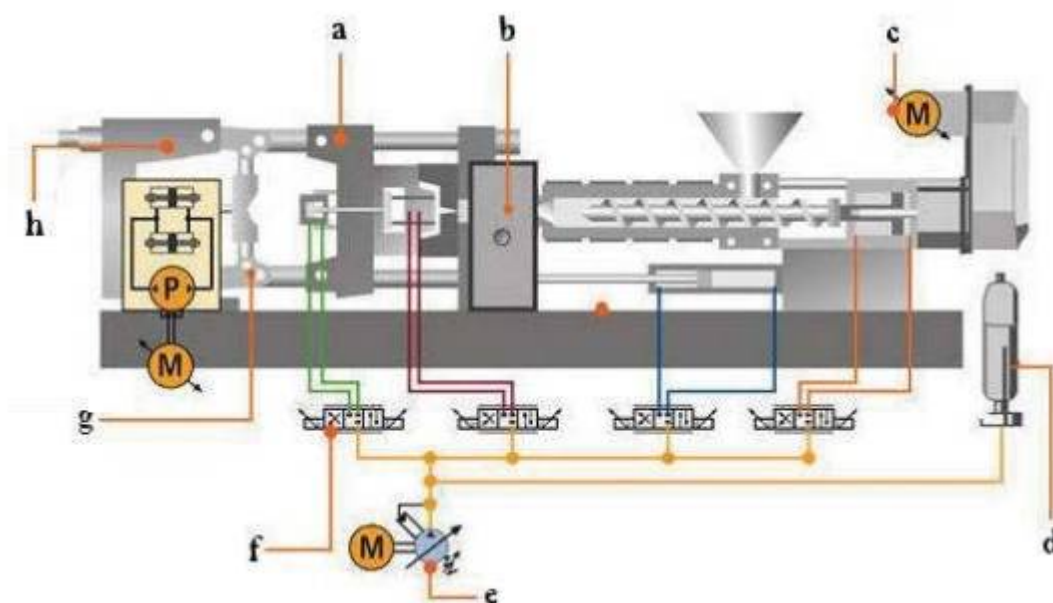
Viša cijena, najmanje 20 % te viši troškovi pri preradbi polimera električnim ubrizgavalicama u odnosu na hidrauličke i hibridne izvedbe, njihov su najveći nedostatak. Sve veći prodor električnih ubrizgavalica na tržište vjerojatno će za posljedicu imati sniženje troškova, uslijed sniženja ili uravnoteženja cijena servo pogona, ali će one u pravilu biti više u odnosu na hidrauličke ubrizgavalice.



Slika 3.7. Izvedba potpuno električne ubrizgavalice [24]

Hibridne ubrizgavalice uobičajeno sjedinjuju raznovrsnost i snagu hidrauličkih s preciznošću i ponovljivošću rada potpuno električno upravljanih i pogonjenih ubrizgavalica. Hibridni pogon ubrizgavalica najčešće se postiže dodavanjem električnoga pogona za pužni vijak na klasičnu hidrauličku ubrizgavalicu. Električni pogon pužnoga vijka omogućuje preklapanje slijednih operacija rada ubrizgavalice tijekom rada čime se postiže skraćenje ciklusa injekcijskoga prešanja ili primjena novih postupaka poput izradbe pjenastih otpreska MuCell postupkom. Takav pogon radi dobro i za opće namjene kada se traže dulji ciklusi izradbe te se postižu veće uštede energije.

Kombinacija električnoga pogona pužnog vijka s elektromehaničkim polugama za zatvaranje kalupa troši oko 50 % manje energije u odnosu na usporedive veličine hidrauličke izvedbe. Kod te izvedbe ubrizgavalica moguće je ubrizgavanje i tri dodatne funkcije: izvlačenje jezgri, izbacivanje otpreska te otvaranje i zatvaranje kalupa koji se obavljaju hidrauličkim sustavom s akumulatorom. Posebno valja naglasiti ulogu akumulatora kojim se postižu visoke brzine gibanja pužnoga vijka u aksijalnom smjeru, što se ne može postići kod električne izvedbe. Hidrauličko ubrizgavanje taljevine u kalupnu šupljinu može se bolje prilagoditi zahtjevima pojedine vrste otpreska i općenito omogućuje bolju ponovljivost ubrizgavanja pri promjenama viskoznosti taljevine. No ipak valja napomenuti da se razlike u viskoznosti taljevine teško mogu nadoknaditi, ili to gotovo uopće nije moguće korekcijom parametara procesa ili vrstom pogona ubrizgavalice.



Slika 3.8. Shematski prikaz hibridne ubrizgavalice [24]

a - nosači kalupa, b - upravljačka jedinica, c - električni pogon pužnoga vijka, d - hidraulički akumulator, e - hidraulička pumpa, f - sustav za uštedu energije, g - osjetilo za zaštitu kalupa, h - jedinica za zatvaranje kalupa

Hidromehanički sustav zatvaranja kalupa ima niz prednosti u odnosu na polužni sustav zatvaranja kalupa jer omogućuje zaštitu kalupa tijekom zatvaranja, automatsko podešavanje visine kalupa, ravnomjernu raspodjelu sile zatvaranja, planparalelnost ploča, veće pomake klipa i izradbu čistih otpresaka. U svrhu

održavanja područja kalupa čistim, hidraulički cilindri su izvedeni s dvostrukim brtvljenjem i podtlačnim povratnim vodom za ulje. Dobro konstruirane hibridne ubrizgavalice već sada nadmašuju mogućnosti i hidrauličkih i električnih ubrizgavalica.

Hibridne ubrizgavalice skuplje su 5 do 10 % od hidrauličkih, ali istodobno 10 do 15 % jeftinije od većine potpuno električnih ubrizgavalica. Danas se njihov udio na tržištu ubrizgavalica procjenjuje na 2 do 3 %, a u narednom se razdoblju očekuje rast udjela hibridnih ubrizgavalica na 5 do 7 %, najvećim dijelom zbog potrebe uštede energije i porasta broja otpresaka koji će zahtijevati brze izradbene cikluse. Za prerađivače će ta skupina ubrizgavalica biti posebno zanimljiva jer im omogućuje izradbu otpresaka široke namjene, ali i onih povišene kvalitete.

3.2.2 Kalup za injekcijsko prešanje [19]

Za razliku od ubrizgavalice i temeljirala, koje je moguće smatrati univerzalno primjenjivim elementima sustava za injekcijsko prešanje, kalup ima točno određenu namjenu i može u pravilu služiti samo za pravljenje jedne vrste otpreska.

Osnovni zadaci kalupa su:

- prihvaćanje taljevine pripremljene u ubrizgavalici
- očvršćivanje taljevine u željeni oblik otpreska
- ciklički rad sustava za injekcijsko prešanje.

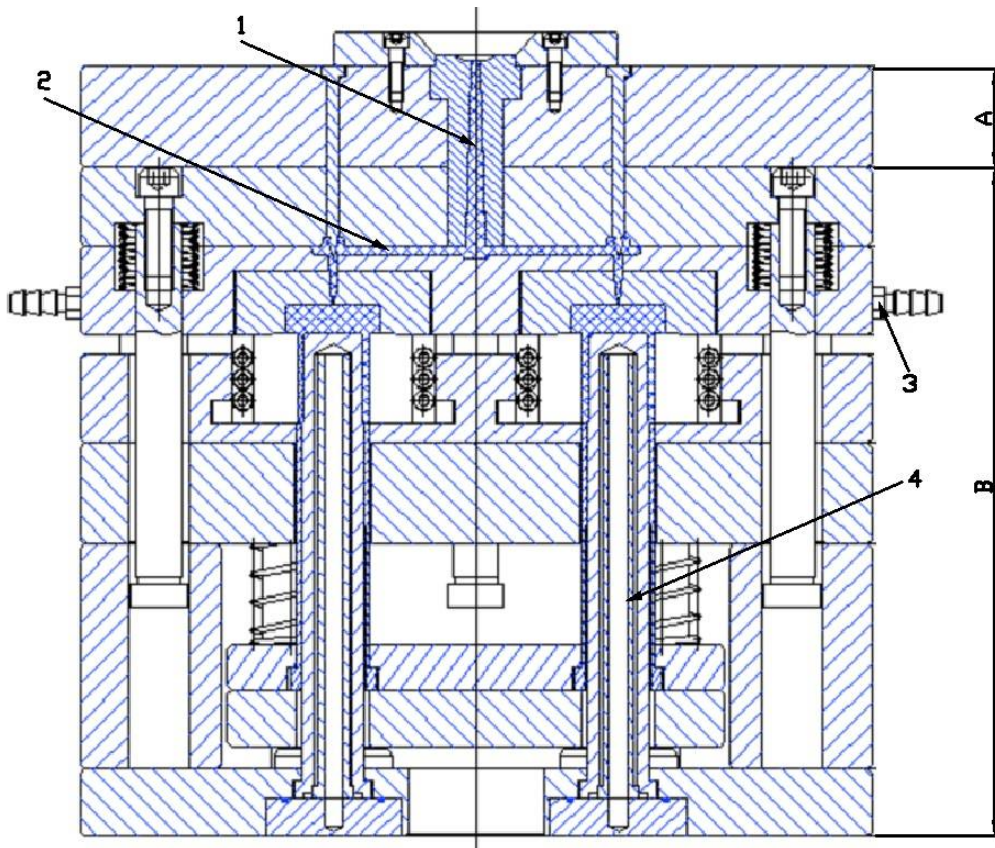
Kalup mora sniženjem temperature taljevine dati oblik ubrizganom plastomeru i omogućiti da se dovoljno ohlađeni otpresak izvadi iz kalupne šupljine. Da bi kalup mogao odgovoriti postavljenim zahtjevima, mora imati sljedeće elemente:

- kućište kalupa
- uljevni sustav
- kalupna šupljina
- sustav za izbacivanje otpreska
- sustav za ostvarivanje međusobnog dodira nepomičnog i pomičnog dijela kalupa (sustav za vođenje)
- kanali za temperiranje.

Kalup može imati i druge elemente, ali se oni pojavljuju u posebnim konstrukcijama.

3.2.2.1 Kućište kalupa [19]

Kućište je slog ploča koje zajedno čine noseću konstrukciju kalupa. U njemu su ugrađeni svi ostali elementi kalupa, a u pločama kućišta nalaze se i kanali za temperiranje (slika 3.9). Na kalup djeluju sve sile koje zavise od postupka, dakle sila zatvaranja, sila uzgona te sile izazvane naprežanjem čvrstih dosjeda pojedinih elemenata i toplinskim promjenama kalupa. Kućište kalupa može biti kružno ili pravokutno. Pri odabiru izmjera kućišta valja voditi računa ne samo o silama koje djeluju tijekom procesa već i o mogućem grubom rukovanju kalupom.



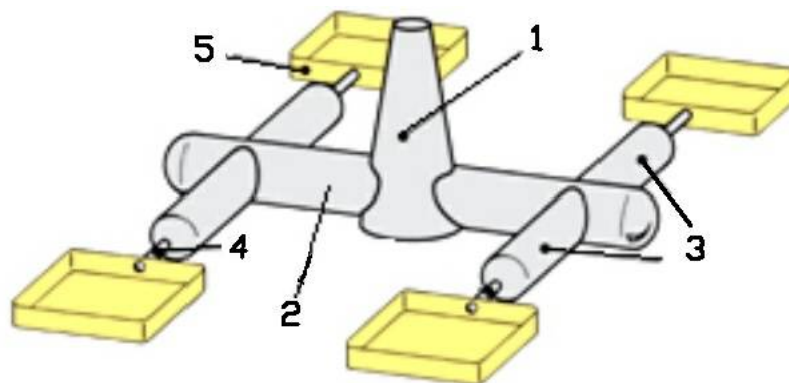
Slika 3.9. Kalup za injekcijsko prešanje plastomera [25]

A – nepomični dio kalupa, B – pomični dio kalupa, 1 – šupljina u kojoj nakon ubrizgavanja nastaje uljevni sustav, 2 – kalupna šupljina, 3 – kanal za temperiranje, 4 - izbacivalo

Kalup se steznim pločama pričvršćuje na nosače kalupa ubrizgavalice. Obruč za centriranje omogućuje jednostavno ostvarivanje podudarnosti središnjice mlaznice i uljavnog tuljca. Kalupne ploče služe da se u njih umetnu gnijezda (ploča gnijezda) i žigovi (ploča žiga), odnosno da se u njih izravno izrade obrisi kalupne šupljine (kalupne ploče).

3.2.2.2. Uljevni sustav [19]

Mlaznica ubrizgavalice i kalupne šupljine s obličjem otpreska povezane su kanalima različitih dimenzija i oblika. Svi otvori između mlaznice ubrizgavalice i kalupne šupljine čine uljevnu šupljinu. Razlikuju se čvrsti (hladni) i kapljeviti (topli ili vrući) uljevni sustavi. Općenito, očvrsnuti materijal u uljevnoj šupljini naziva se grozd, a čine ga uljevak, uljevni kanal, razdjelnik, ušće i zdenac (slika 3.10).



Slika 3.10. Dijelovi uljavnog sustava [19]

1 – uljevak, 2 – uljevni kanal, 3 – razdjelnik, 4 – ušće, 5 - otpresak

3.2.2.3 Kalupna šupljina [25]

Kalupna šupljina je prostor kojeg zatvaraju pomični i nepomični dijelovi kalupa i u nju se ubrizgava polimer potrebne smične viskoznosti.

S obzirom na broj otpresaka koji se istodobno prešaju i broj mjesta ubrizgavanja razlikuju se sljedeći načini ubrizgavanja:

- izravno ubrizgavanje – primjenjuje se kod kalupa s jednom kalupnom šupljinom te se uljevni sustav sastoji samo od uljevka
- posredno ubrizgavanje – najčešće se primjenjuje kod kalupa s više kalupnih šupljina ili kalupa s jednom kalupnom šupljinom ako se ubrizgava na više mjesta.

Pri raspodjeli kalupnih šupljina u kalupu treba težiti tome da uljevni put do kalupnih šupljina bude što kraći i jednak za sve kalupne šupljine. Osnovni uvjeti kojih se treba pridržavati za optimalan raspored kalupnih šupljina su:

- ostvariti najbolji mogući raspored radi postizanja minimalne veličine kalupa
- uljevni sustav treba što kraćim putem povezati mlaznicu ubrizgavalice s kalupnom šupljinom
- ostvariti simetričan raspored kalupnih šupljina zbog zatvaranja kalupa.

3.2.2.4 Sustav za izbacivanje otpresaka [25]

Sustav za izbacivanje otpresaka može biti vrlo raznolikih izvedbi tj. može biti sastavni dio kalupa ili djelovati izvana kao dio dodatne opreme. Prema načinu djelovanja mogu se podijeliti na:

- mehaničke
- hidrauličke
- pneumatske
- mješovite.

Pri injekcijskom prešanju plastomera najčešća su izbacivala s mehaničkim sustavom za vađenje otpreska (slika 3.9). Za njegov rad primjenjuje se gibanje pomičnog nosača kalupa. Sustav čine potisna ploča i ploča za izbacivala, potiskivala, povratna opruga, povratnici, izvlačilo i izbacivala. Tijekom otvaranja kalupa (gibanje pomičnog dijela kalupa) potisna motka ubrizgavalice djeluje na potiskivalo koje potiskuje izbacivalo, izvlačilo i povratnike. Opruga tada vraća ploču za izbacivala natrag, kad se potisna motka vrati u početni položaj. Ta radnja može se izvršiti jednom ili više puta po ciklusu, ovisno o obliku otpreska.

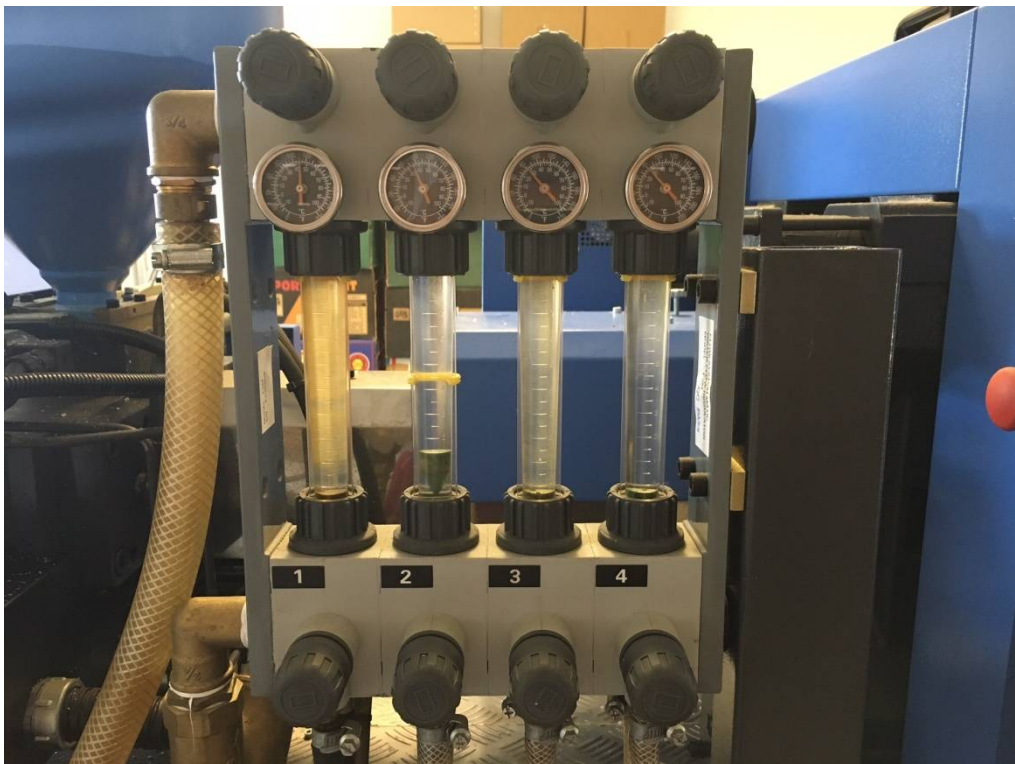
3.2.2.5 Sustav za ostvarivanje međusobnog dodira nepomičnog i pomičnog dijela kalupa (sustav za vođenje) [25]

Centriranje nepomičnog i pomičnog dijela kalupa ostvaruje se sustavom za vođenje. Kod kalupa za rotacijske otpreske s jednom, a kod vrlo tankostijenih otpresaka i u kalupima s više kalupnih šupljina, centriranje se ostvaruje konusnim dosjedom nepomičnog i pomičnog dijela.

Kod ostalih kalupa centriranje se ostvaruje s pomoću cilindričnoga vodećeg zatika i vodeće puškice (slika 3.9).

3.2.2.6 Kanali za temperiranje [25]

Da bi se postigla potrebna temperatura stijenke kalupne šupljine, potrebno je kalup temperirati. Temperiranje se provodi kroz kanale koji se nalaze oko kalupne šupljine.



Slika 3.11. Indikator protoka sustava za temperiranje na ubrizgavalici *Haitian*

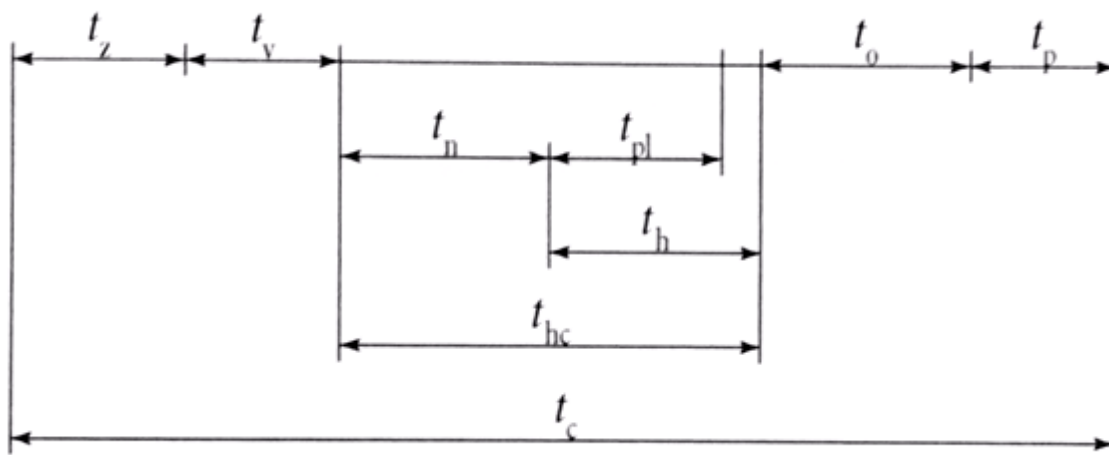
1 - temperiranje cilindra i pužnog vijka na ulazu granulata, 2 - temperiranje hidrauličkog ulja, 3 - temperiranje nepomičnog dijela kalupa, 4 - temperiranje pomičnog dijela kalupa

Pod temperiranjem se podrazumijeva postizanje propisane temperature stijenke kalupne šupljine, bez obzira treba li se pri tome toplina kalupu dovoditi ili odvoditi. Cilj je propisana temperatura stijenke kalupne šupljine, a način njena postizanja ovisi o stvarnim uvjetima, što dovodi do potrebe zagrijavanja ili hlađenja kalupa. Toplina se kalupu može dovoditi i odvoditi kapljevinama, a grijalima samo dovodit.

Osim temperiranja kalupa, kod hidrauličkih i hibridnih ubrizgavalica potrebno je i temperirati hidrauličko ulje ubrizgavalice (slika 3.11). Optimalna temperatura hidrauličkog ulja je od 45 do 50 °C. Prije početka rada potrebno je ulje ugrijati, a kad krene proces injekcijskog prešanja ulje je potrebno hladiti da temperatura ulja bude postojana.

3.3 Ciklus injekcijskog prešanja [26]

Ciklus injekcijskog prešanja uključuje grijanje i ubrizgavanje taljevine pod tlakom u kalupnu šupljinu, omogućujući tako da se tisuće ili čak milioni istovjetnih dijelova proizvedu brzo i relativno jeftino. Ciklus je vremenski prikazan na slici 3.12.

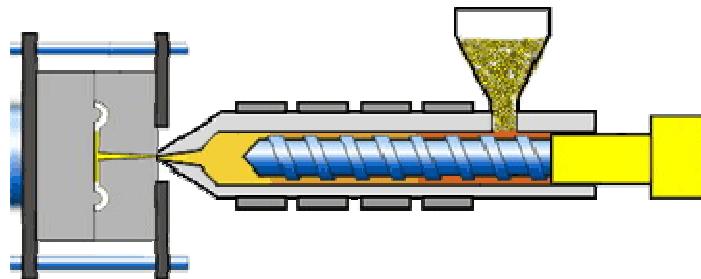


Slika 3.12. Ciklus injekcijskog prešanja [14]

t_z – vrijeme zatvaranja kalupa, t_v – vrijeme ubrizgavanja, t_n – vrijeme djelovanja naknadnog tlaka, t_{pl} – vrijeme plastificiranja, t_h – vrijeme hlađenja, t_{hc} – ukupno vrijeme hlađenja, t_o – vrijeme otvaranja kalupa, t_p – vrijeme izbacivanja otpreska, t_c – vrijeme ciklusa

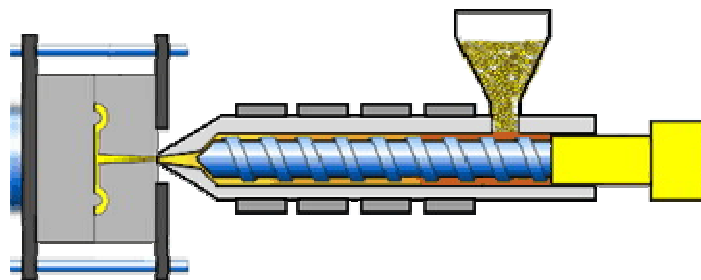
Ciklus se sastoji od četiri osnovna koraka, koje ima svaki ciklus injekcijskog prešanja. U nekim situacijama moguće je imati još poneki dodatni korak, ali četiri koja se uvijek ponavljaju su:

- Ubrizgavanje taljevine (slika 3.12)
- Naknadni tlak (slika 3.13)
- Priprema taljevine (slika 3.14)
- Izbacivanje otpreska i zatvaranje kalupa (slika 3.15)



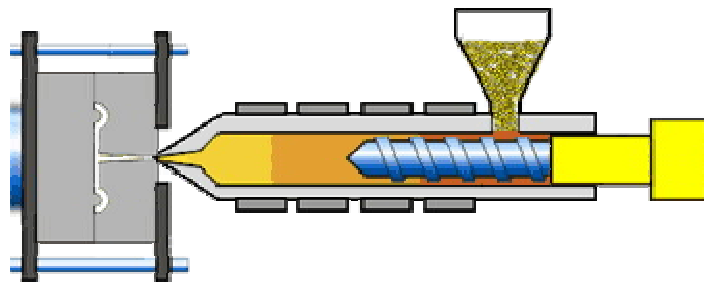
Slika 3.13. Ubrizgavanje taljevine [26]

Ubrizgavanje taljevine u kalupnu šupljinu obavlja se pod velikim tlakom (najčešće do 150 MPa, kod specifičnih zahtjeva otpreska tlak može biti i veći). Pužni vijak u ovom koraku ne rotira nego se giba samo aksijalno, te služi kao klip u cilindru. Nakon ubrizgavanja, taljevina popunjava sve kalupne šupljine.



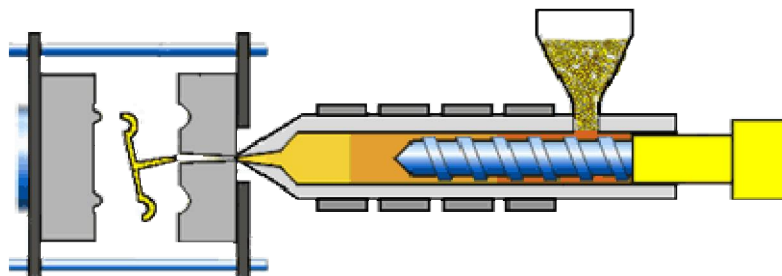
Slika 3.14. Naknadni tlak [26]

Nakon što je taljevina pod velikim tlakom ubrizgana u kalupnu šupljinu, u kalupnoj šupljini stvara se sila reakcije koja pokušava pomaknuti pužni vijak unatrag. Da bi se to spriječilo i da ne dođe do greške u otpresku, postavlja se naknadni tlak. Taj tlak omogućuje pužnom vijku da ostane na svojoj poziciji, to jest da se ne pomakne unatrag. Naknadni tlak aktivan je sve dok se ne stvrdne materijal na ušću kalupa, tako da je onemogućen protok materijala van kalupne šupljine.



Slika 3.15. Priprema taljevine [26]

Sljedeći korak je priprema taljevine za naredni ciklus. Pužni vijak rotira te se također pomiče unatrag tako da stvara prostor za taljevinu ispred vrha pužnog vijka. Temperatura u cilindru mora biti iznad temperature taljenja materijala, tako da se taljevina bez poteškoća može pripremiti za sljedeći ciklus. Također ovisno o brzini vrtnje i brzini pomaka unatrag, dolazi do homogenizacije taljevine, tako da su materijal i dodaci (bojila, UV zaštita i slično) homogenizirani prije ubrizgavanja u kalupnu šupljinu. Također dok traje proces pripreme taljevine, u kalupu se odvija hlađenje otpreska. Najčešće je vrijeme hlađenja dulje od vremena potrebnog za pripremu taljevine, ali to nije uvijek pravilo.



Slika 3.16. Izbacivanje otpreska i zatvaranje kalupa [26]

Nakon što je otpresak proveo odgovarajuće vrijeme u kalupu, te se dovoljno ohladio, otvara se kalup, to jest pomični dio kalupa se pomakne unatrag te se aktivira sustav za izbacivanje otpreska. Ubrizgavalica može imati senzor, kameru ili neki drugi element koja provjerava da li je kalup spreman za sljedeći ciklus. Zatim se pomični dio kalupa približava nepomičnom dijelu (najčešće minimalnom potrebnom silom da se kalup može pomicati određenom brzinom, a pred samo sljublivanje dijelova kalupa se primjenjuje velika sila zatvaranja).

4. RECIKLIRANJE PLASTOMERA

Zbog široke upotrebe plastike i gume u suvremenom životu, bitno je razmotriti i zbrinjavanje polimernih proizvoda i polimernog otpada nastalih tijekom proizvodnje polimernih tvorevina, posebno sa stajališta zaštite okoliša. [19]

Plastični i gumeni proizvodi mogu biti različite trajnosti. Trajnost nekih plastičnih proizvoda, poput kablskih izolacija ili cijevi, iznosi pedeset pa i više godina. U tablici 4.1 prikazana su očekivana vremena upotrebe nekih tipičnih plastičnih proizvoda. Nakon isteka njihove uporabne vrijednosti, potrebno je zbrinuti te proizvode. [19]

Tablica 4.1. Vijek trajanja pojedinih plastičnih proizvoda [19]

Tvorevina	Vijek trajanja
<ul style="list-style-type: none">• Pakovanja za hranu• boce• spremnici	kraće od dvije godine
<ul style="list-style-type: none">• bijela tehnika• proizvodi za domaćinstvo• dijelovi automobila	od dvije do deset godina
<ul style="list-style-type: none">• cijevi• konstrukcijski proizvodi (PVC profili, kablске izolacije)	dulje od deset godina

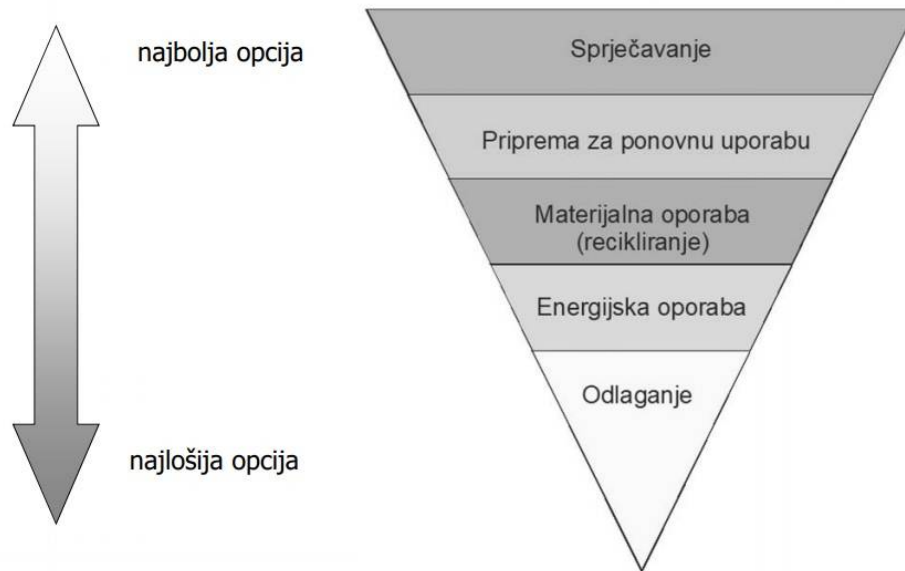
Pri zbrinjavanju polimernih proizvoda i polimernog otpada razlikujemo nekoliko opcija gospodarenja otpadom, koje su prikazane na slici 4.1. Sprečavanje nastanka otpada je najbolja opcija, ali naravno ona uvijek nije moguća. [19]

Sljedeća opcija je priprema za ponovnu upotrebu, zadržavajući pri tome oblik i funkciju proizvoda. Neki od primjera ponovne upotrebe je: [19]

- obnavljanje pneumatika
- tehnički komplicirani i kompleksni uređaji koji još imaju funkcionalne dijelove (vozila)
- uređaji iz „druge“ ruke (npr. računala)

- bijela tehnika (hladnjaci mikrovalne pećnice)
- radio i TV prijammnici.

Takav način uporabe je već pri malim količinama gospodarski opravdan.



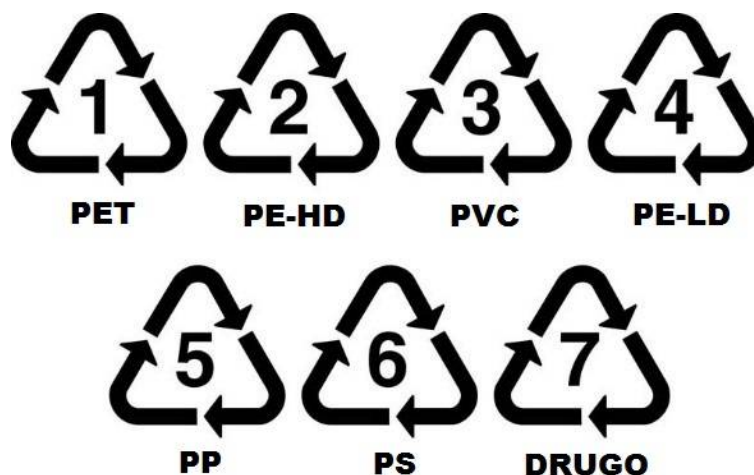
Slika 4.1. Opcije gospodarenja otpadom [27]

4.1 Materijalna uporaba

Materijalna uporaba dijeli se prema smjernici *APME-a* (Europskog udruženja proizvođača plastike, sada *PlasticsEurope*) na mehaničku i kemijsku uporabu. [19]

Obilježje mehaničke uporabe, recikliranja, jest usitnjavanje polimernih proizvoda i njihovo pretvaranje u polimerni materijal (npr. proizvodnja plastomernog granulata) ili primjena kao dodataka (npr. usitnjeni duromerni ili elastomerni prahovi služe kao punilo). [19]

Kemijska uporaba označuje postupke razlaganja usitnjenog polimernog materijala i/ili proizvoda na početne sastojke, sintetski plin ili ulje. Da bi se olakšalo potrebno skupljanje i razvrstavanje plastičnog otpada, uveden je brojčani sustav za označavanje plastičnih pakovanja prikazan na slici 4.2. [19]



Slika 4.2. Sustav označivanja plastičnih pakovanja [28]

4.1.1 Mehanička uporaba (recikliranje)

Mehanička uporaba je najpoznatiji oblik zbrinjavanja plastičnih i gumenih proizvoda te nastalog otpada. Primjerice 80 % plastomera moguće je na taj način taljevinski uporabiti, pri čemu se od početnog materijala oblikuju novi proizvodi. [19]

Postoje tri oblika mehaničke uporabe: [19]

- taljenje čistih plastomera odvojenih po vrstama
- taljenje posebnih skupina onečišćenih plastomera
- taljenje raznovrsnih plastomera.

Kod reciklata razlikujemo primarni reciklat koji nastaje iz primarne proizvodnje (nije bio u upotrebi kao proizvod) te sekundarni reciklat koji nastaje od upotrijebljenih proizvoda. Za mehaničku uporabu posebno su pogodni svi po skupinama odvojeni plastomeri koji se mogu dalje prerađivati bilo kojim postupkom, npr. ekstrudiranjem, injekcijskim prešanjem ili puhanjem. Skupina koja se mehanički teže oporabljuje jesu onečišćeni plastomeri koje je potrebno od nečistoća odvojiti u hidrociklonu ili nekom drugom postrojenju za tu svrhu. [19]

Elastomeri se mehanički oporabljuju mehaničko-toplinskim kidanjem veza, postupkom poznatim pod nazivom masticiranje. Tržište takvih reciklata bilježi stalan pad, sve popularniji postaju podovi od granulirane gume, kojom se oblažu dječja

igrališta, sportska borilišta i slično. Najviše se nade ipak polaže u primjenu tih reciklata pri proizvodnji asfaltnih smjesa. Nasuprot tome, takav postupak nije moguće primijeniti tijekom uporabe duromera, gdje postoji samo mogućnost dodavanja reciklata u osnovni materijal, u pravilu do 20 % na količinu novog materijala. [19]

U eksperimentalnom dijelu rada upotrebljava se primarni čisti reciklat materijala PA 6.6. Mljeveni materijal dobiva se mljevenjem plastičnih poluproizvoda, koje se u proizvodnom procesu izdvaja kao otpad. Sa svim mogućim zahvatima potrebno je osigurati normalnu preradu materijala, pri kojoj će se otpad pojavljivati u što manjoj mogućoj mjeri ili ga uopće neće biti. Osim što se mljeveni materijal može miješati sa osnovnim, kakav je slučaj u eksperimentalnom dijelu rada, moguće je mljeveni materijal opet pretaliti u granulat tako da se dobije oblik osnovnog materijala i makne prašina koja nastaje od mljevenja. Ako mljeveni materijal ima puno prašine, može loše utjecati na sam ciklus ubrizgavanja i otpresak. [14]

Mljeveni materijal je u većini slučajeva primjenjiv materijal te ga se, u slučaju ne problematičnih materijala i na ne zahtjevne proizvode može koristiti i 100 %. Općenito vrijedi da se osnovnom materijalu dodaje 10 do 20 % mljevenog materijala bez rizika od snižavanja kvalitete proizvoda. Primjena mljevenog materijala vrlo je ograničena i to radi utemeljene opasnosti od onečišćenja mljevenog materijala drugim primjesama tijekom pripreme, čime on postaje neupotrebljiv. U svim koracima pripreme potrebno je voditi brigu o tome. [14]

Bitno je odvojiti upotrebljivi otpad od neupotrebljivog: [14]

- među neupotrebljivi otpad ubrajaju se proizvodi, koji nastaju na početku rada ili nakon duljeg zastoja, te su najčešće masni, zagoreni ili na neki drugi način onečišćeni drugim materijalima.
- među upotrebljiv otpad spadaju proizvodi koji nisu potpuno popunjeni, imaju usahline, odlomljeni, napuknuti ali čisti. Tu pripadaju i čisti ostaci uljevnog sustava. Takav otpad se primjenjuje za dobivanje prvorazrednog recikliranog mljevenog materijala.

4.1.2 Kemijska oporaba

Kemijska oporaba obuhvaća sve postupke koji tijekom recikliranja iskorištavaju kemijska svojstva plastike i gume. Pritom se ne mijenja samo oblik i funkcija primarnog proizvoda već i molekularna struktura materijala. Za kemijsku oporabu pogodni su svi polimeri: duromeri, elastomeri, elastoplastomeri i plastomeri. Do sada je razvijen tek malen broj gospodarski opravdanih postupaka kemijske oporabe. Moguće je razlikovati četiri osnovne skupine postupaka kemijske oporabe: [19]

- piroliza
- hidroliza
- hidriranje
- oporaba otapanjem.

4.2 Energijska oporaba [19]

Postupci energijske oporabe temelje se na iskorištenju topline koju sadržavaju polimeri, koji su u pravilu gorivi materijali. Poticaj tom načinu zbrinjavanja otpada jest sve manji raspoloživi prostor za odlagališta. Otpad koji se na neki drugi način više ne može iskoristiti, spaljuje se, radi smanjenja njegovog obujma na odlagalištima. Toplinska vrijednost plastike i gume u otpadu procjenjuje se na 35 MJ/kg, pa se uz njihov udio od 7 % u čvrstom kućnom otpadu postiže vrijednost od 8,5 MJ/kg otpada.

Energijska oporaba, kao konačni oblik zbrinjavanja odbačenih polimernih tvorevina i ostalog otpada povezana je s određenim teškoćama. Iz dimnih plinova potrebno je ukloniti eventualne otrove, najčešće teške metale: titan, krom, kadmij i druge. Pri trenutnom stanju tehnike, odstranjivost je 98 %. Energijska se oporaba primjenjuje za dobivanje električne energije, što pridonosi izravnom sniženju utroška ekvivalentne količine loživog ulja.

Energijska se oporaba otpada provodi s pomoću čistog kisika, a osnovna joj je prednost da zahtjeva dvije trećine manje uređaja za pročišćavanje dimnih plinova koji se (zbog visoke temperature od 1600 °C) sastoje od 48 % vode, 48 % ugljikovog dioksida i 1,5 % ugljikovog monoksida. To omogućuje da se održe propisane

granične vrijednosti emisije, pa je prema današnjim spoznajama, takva uporaba neškodljiva za ljude i okoliš.

Postoji više vrsta postupaka energijske uporabe:

- spaljivanje plastičnog otpada
- uporaba plastičnog i gumenog otpada u cementnim pećima
- energijska obrada plastičnog otpada zajedno s muljem.

5. EKSPERIMENTALNI DIO

U eksperimentalnom dijelu zadatka bilo je potrebno izabrati stvarnu tvorevinu (proizvod), te je izraditi postupkom injekcijskog prešanja s različitim postocima reciklata. Nakon izrade ispitan je utjecaj kondicioniranja (temperature i vremena izlaganja tvorevine vodi) na mehanička svojstva, te je uz pomoć mase izmjerena apsorpcija vode.

Odabrana tvorevina je *PA podna tipla obujmica* (slika 5.1) koja se primjenjuje za pričvršćivanje cijevi za centralno grijanje, najčešće u betonske ploče (temeljna ploča, betonska greda i slično). Obujmica je konstruirana tako da se za postavljanje iste izbuši rupa promjera 8 mm i zatim se čekićem nazubljeni dio zabije u beton, dok gornji dio obujmice osigurava cijev od pomicanja.



Slika 5.1. PA podna tipla obujmica

Tvorevina se sastoji od dva dijela. Donji dio tvorevine načinjen je u obliku zubaca koji se kod fiksiranja u beton saviju te onemogućuju povlačenje tvorevine van iz rupe. Duljina nazubljenog dijela je 40 mm, a promjer 8,5 mm. Duljina gornjeg dijela tvorevine je 40 mm, polukružnog oblika, tako da se mogu pričvrstiti cijevi do promjera 80 mm. Ukupna duljina tvorevine je 80 mm.

Tvorevina se u nekim slučajevima kod montaže, uslijed udarca, slomi. Shodno tome potrebno je ispitati dva izlazna podatka, žilavost i apsorpcija vode. Pretpostavka je da se tvorevina slomi jer kondicioniranje nije provedeno kvalitetno, to jest materijal nije uspio apsorbirati dovoljno vode prije nego je stigao u upotrebnu, pa mu je žilavost smanjena. Nakon analize cilj je uz pomoć matematičkih modela dobiti funkciju utjecaja ulaznih parametara (postotak reciklata, temperatura kondicioniranja, vrijeme kondicioniranja), na apsorpciju vode i žilavost.

Odabrana tvorevina komercijalni je proizvod obrta *MPR Mališ Željko*, te su uzorci izrađeni u pogonu za obradu polimernih masa obrta, a ispitivanje je izvršeno u *Laboratoriju za preradbu polimera i drva na Fakultetu strojarstva i brodogradnje*.

5.1 Ispitni materijal

Za izradu odabranog proizvoda upotrebljava se poliamid 6.6, proizvođača *Solvay Engineering Plastics* komercijalnog naziva *Technyl A205F natural*.

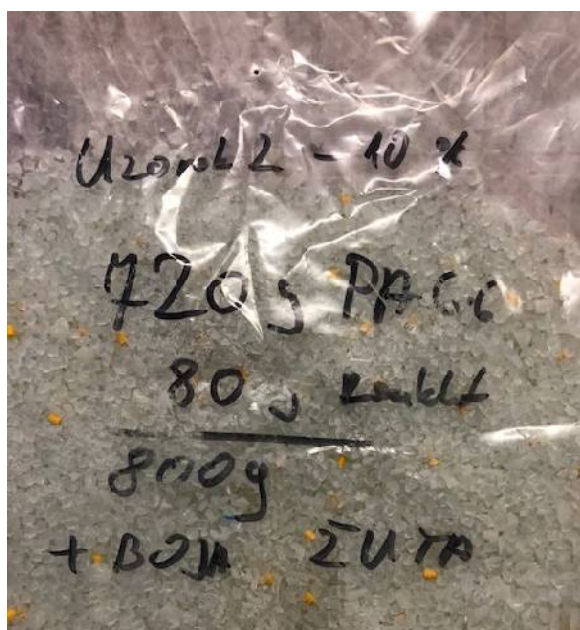
Technyl A205F natural je PA 6.6 bez ojačavala namijenjen za injekcijsko prešanje. Za razliku od većine drugih poliamida, nije ga potrebno sušiti prije upotrebe, jer je pakiran u posebne vreće gdje ne može doći u kontakt sa zrakom, pa tako ne može ni akumulirati vlagu prije upotrebe. [29]

Za popunjavanje kalupne šupljine potrebno je ubrizgati 16 g materijala iz kojeg dobijemo dva komada tvorevine, a sukladno izborom postotka reciklata (5 %, 10 %, 15 %) određena je masa prema tablici 5.1. 800 g materijala dovoljno je za izradu 100 tvorevina, što je dovoljna količina za provedbu ispitivanja.

Upotrijebljen je čisti reciklat koji je mljeven neposredno prije miješanja s osnovnim materijalom. Da bi se u fazi ispitivanja lakše raspoznale tvorevine s različitim udjelom reciklata, dodano je bojilo (slika 5.2).

Tablica 5.1. Podaci materijala za injekcijsko prešanje

	Uzorak 1	Uzorak 2	Uzorak 3
Postotak reciklata	5 %	10 %	20 %
Masa čistog materijala	760 g	720 g	680 g
Masa reciklata	40 g	80 g	120 g
Boja	bijela	žuta	plava



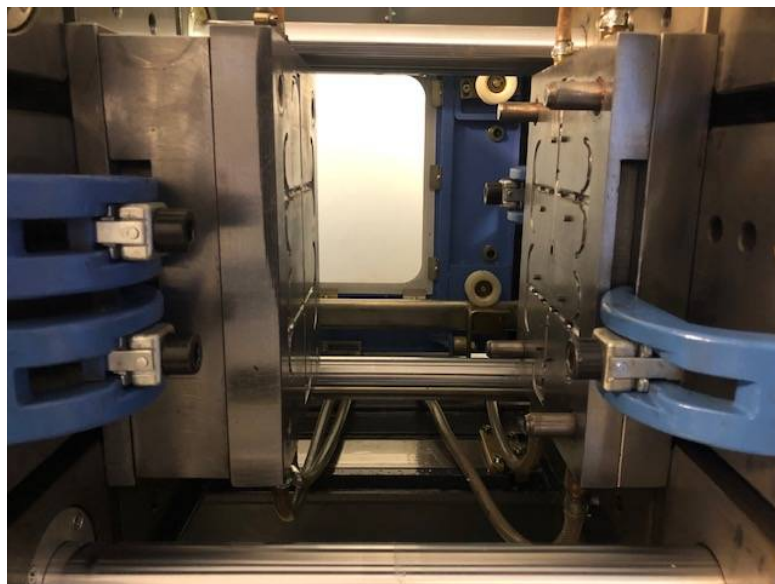
Slika 5.2. Ispitni materijal pomiješan s bojom

5.2 Ispitna oprema

Tvorevine su napravljene na ubrizgavalici proizvođača *Haitian*, model *SA900/300-B* tehničkih karakteristika prikazanih u tablici 5.2. Postupak injekcijskog prešanja napravljen je uz preporučene parametre prerade po podacima proizvođača materijala prikazane u tablici 5.3. Kalup za injekcijsko prešanje ima uljevni sustav za šest otpresaka, a ispitane su tvorevine iz dva uljevna mjesta

Tablica 5.2. Tehničke karakteristike ubrizgavalice [30]

HAITIAN SA 900 / 300 - B	
Jedinica za pripremu taljevine	
Promjer pužnog vijka	36 mm
Omjer L/D duljine i promjera	20 D
Maksimalni volumen taljevine	153 cm ³
Količina ubrizgavanja (PS)	108 g/s
Tlak ubrizgavanja	196 MPa
Količina plastificiranja (PS)	16,8 g/s
Broj okretaja pužnog vijka	0 – 295 min ⁻¹
Jedinica za zatvaranje kalupa	
Sila zatvaranja	900 kN
Minimalna visina kalupa	150 mm
Maksimalna visina kalupa	380 mm
Razmak između vodilica	360 x 360 mm
Sila izbacivala	33 kN
Ostale karakteristike	
Maksimalni tlak pumpe	16 MPa
Snaga motora pumpe	15 kW
Snaga grijačih elemenata	6,3 kW
Dimenzije stroja (D x Š x V)	4,5 x 1,13 x 1,91 m
Masa stroja	3500 kg



Slika 5.3. Kalup za injekcijsko prešanje primijenjen za izradu tvorevina

Tablica 5.3. Parametri injekcijskog prešanja

Tlak ubrizgavanja	65 MPa
Sila zatvaranja kalupa	750 kN
Temperatura pužnog vijka straga	265 °C
Temperatura pužnog vijka u sredini	275 °C
Temperatura pužnog vijka naprijed	280 °C
Temperatura kalupa	60 °C
Vrijeme ciklusa	38,2 s

Za provedbu ispitivanja apsorpcije vode potrebno je prema normi HRN EN ISO 62: 2008 izmjeriti masu prije i nakon kondicioniranja. [31]

Za mjerenje mase upotrijebljena je digitalna vaga proizvođača *RADWAG*, tipa PS 2100.R2, razreda točnosti II, mjerno područje 0,5 – 2000 g, vrijednost pododjeljka $d = 0,01$ g. Vrijednost ispitnog pododjeljka $d = 0,1$ g.

Kondicioniranje je provedeno u *Laboratoriju katedre za preradbu polimera i drva*, u peći za kondicioniranje prikazanoj na slici 5.4. U peći su postavljene posude napunjene destiliranom vodom gdje su za vrijeme kondicioniranja stavljene ispitne tvorevine.



Slika 5.4. Peć za kondicioniranje

Ispitivanje žilavosti izvođeno je na Charpyevom batu proizvođača *Frank* koji ima raspon očitavanja udarne energije 0 - 4 J (slika 5.5). Naknadno je upotrebljen Charpyev bat s rasponom očitavanja udarne energije 4 – 200 J, jer se kondicioniranjem i nekim ulaznim parametrima žilavost povećala preko 4 J.



Slika 5.5. Charpyev bat proizvođača *Frank*

5.3 Centralno kompozitni plan pokusa

Za pokus je odabran centralno kompozitni plan koji pripada u skupinu planova pokusa višeg reda, tj metode odzivne površine. Ta metoda obuhvaća skup statističkih i matematičkih metoda koje se upotrebljavaju za analizu, poboljšavanje i optimiranje procesa. Cilj plana pokusa je generiranje matematičkog modela, jednadžbe koja opisuje proces u odnosu na ulazne veličine. Plan pokusa napravljen je sa softverom *DesignExpert* modulom ANOVA (analiza varijance). Za pokus su određeni sljedeći

ulazni parametri njihove granice koje u praksi možemo mijenjate te su nam ekonomski opravdane:

- postotak reciklata 5 - 15 %
- temperatura kondicioniranja 60 °C – 90 °C
- vrijeme kondicioniranja 1 h – 4 h.

Izlazne veličine koje će se ispitati su:

- apsorpcija vode c , %
- žilavost a_{cN} , kJ/m²

Za kombinaciju ulaznih parametara potrebno je izraditi 21 stanja pokusa s pripadajućim parametrima (tablica 5.4). Za svako stanje pokusa napravljeno je 10 komada tvorevina te je na njima provedeno ispitivanje apsorpcije vode i žilavosti. Ispitivanje žilavosti provedeno je prema normi HRN EN ISO 179 – 1:2010. [32]

Tablica 5.4. Plan pokusa

	Postotak reciklata, %	Temperatura kondicioniranja, °C	Vrijeme kondicioniranja, h
1	15	60	2,5
2	5	75	1
3	5	90	2,5
4	15	90	4
5	15	90	1
6	5	75	1
7	15	60	1
8	10	75	4
9	5	90	4
10	5	60	4
11	15	60	4
12	5	90	1
13	5	60	1
14	15	90	1
15	10	75	2,5
16	10	75	2,5
17	5	60	2,5
18	10	75	2,5
19	10	75	1,75
20	15	90	4
21	15	60	1

5.4 Provedba ispitivanja

Prema tablici 5.2 proizvedene su injekcijskim prešanjem tvorevine određenih postotaka reciklata. Odmah po izlasku iz kalupa tvorevine su pakirane u vrećice tako da se izvukao zrak kako ne bi bile kontaminirane prije kondicioniranja. Neposredno prije kondicioniranja, uzorci su označeni te im je izmjerena masa (slika 5.6).



Slika 5.6. Tvorevine nakon označavanja i mjerenja mase spremne za kondicioniranje

Kondicioniranje je izvedeno u tri dijela, za svaki dio kondicioniranja peć je podešena na različitu temperaturu prema planu pokusa (60, 75 i 90 °C). U peć su stavljene sve tvorevine koje se trebaju kondicionirati na istoj temperaturi, te su vađene van iz peći ovisno o vremenu kondicioniranja za pojedino stanje pokusa.

Nakon što su tvorevine izvađene iz peći, ispuhane su komprimiranim zrakom, da na njima ne ostane sloj vode nakon kondicioniranja koji bi utjecao na mjerenje mase.

Prema normi HRN EN ISO 179-1 ispitivanje bi trebalo izvršiti na ispitnom tijelu zadanih dimenzija, ali u ovom radu mjerena je žilavost na stvarnom proizvodu, čija je duljina 80 mm, kako i nalaže norma, kao i razmak oslonaca od 62 mm. U cijelom eksperimentalnom dijelu pokušalo se sve uskladiti prema zahtjevima norme.

Kod mjerenja udarne energije u pojedinim uzorcima Charpyev bat od maksimalne nazivne energije 4 J nije bio dovoljno snažan da pokida tvorevinu. U takvim situacijama udarna energija mjerena je na većem Charpyevom batu koji ima očitavanje apsorbirane energije od 4 do 200 J u *Laboratoriju za ispitivanja mehaničkih svojstava na Fakultetu strojarstva i brodogradnje*. Podaci dobiveni iz ispitivanja s dva različita bata ne mogu se uspoređivati tako da su u naknadnoj analizi izostavljeni podaci dobiveni na većem batu. Manji bat ima precizniju mjernu skalu, pa su ti podaci analizirani, te je pretpostavljeno da je tvorevina koju ne pokida manji bat dovoljno žilava da se može koristiti za svoju funkciju te neće pucati kod montaže. Tvorevine prilikom ispitivanja žilavosti prikazana je na slikama 5.8 i 5.9 dok je na slici 5.10 prikazana tvorevina nakon ispitivanja.

Tvorevina pukne na početku nazubljenog dijela, a to je u stvarnoj primjeni i najslabije mjesto gdje dolazi do pucanja.



Slika 5.7. Tvorevina pozicionirana na Charpyevom batu



Slika 5.8. Tvorevina pozicionirana za ispitivanje prilikom udara bata



Slika 5.9. Tvorevina nakon ispitivanja

U priložima (tablice 8.1 – 8.21) nalaze se rezultati ispitivanja.

5.5 Analiza apsorpcije vode

Za svaku tvorevinu od 21 stanja pokusa (210 uzoraka) izmjerena je masa prije i nakon kondicioniranja. Uz pomoć tih podataka izračunata je apsorpcija vode prema jednadžbi: [31]

$$c = [(m_2 - m_1) \div m_1] \times 100, \% \quad (5.1)$$

gdje je:

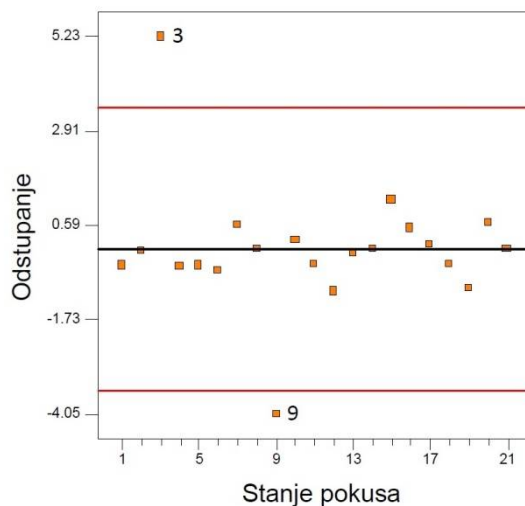
- c [%], apsorpcija vode
- m_1 [g], masa prije kondicioniranja
- m_2 [g], masa nakon kondicioniranja

Rezultati apsorpcije vode prikazani su u tablici 5.5. Prikazane su srednje vrijednosti za pojedino stanje pokusa, te standardna devijacija vrijednosti.

Tablica 5.5. Izračunate srednje vrijednosti apsorpcije vode

Stanje pokusa	Aritmetička sredina	Standardna devijacija
1	1,27	0,11
2	0,93	0,17
3	1,90	0,11
4	2,08	0,18
5	0,58	0,12
6	0,86	0,13
7	1,00	0,15
8	1,98	0,35
9	1,95	0,28
10	1,87	0,14
11	1,69	0,20
12	0,65	0,19
13	1,09	0,08
14	0,63	0,13
15	1,60	0,15
16	1,50	0,16
17	1,49	0,13
18	1,36	0,15
19	0,99	0,15
20	2,21	0,12
21	0,93	0,12

Izračunate srednje vrijednosti unesene su u softver *DesignExpert*. Podaci su zatim analizirani pomoću modula ANOVA (analiza varijance). Stanja pokusa 3 i 9 nisu uzeta u daljnju analizu zbog nesljedivosti modela (slika 5.10). Rezultat analize prikazani su u tablici 5.6, a grafički prikaz je na slici 5.11.



Slika 5.10. Razdioba analize za 21 stanje pokusa

Tablica 5.6. Rezultati analize apsorpcije vode modulom ANOVA

	Suma kvadrata odstupanja	Stupnjevi slobode	Srednji kvadrat odstupanja	Varijabla F	Rizik odbacivanja hipoteze H_0	
Model	4,553634	6	0,758938954	113,470624	< 0,0001	značajno
A	0,037659	1	0,037658733	5,630439577	0,0352	
B	0,001807	1	0,001807119	0,270186367	0,6127	
C	3,054298	1	3,054297852	456,6547565	< 0,0001	
AB	0,001631	1	0,001630943	0,243845879	0,6304	
AC	0,003126	1	0,003126362	0,467429259	0,5072	
BC	0,322948	1	0,322947905	48,28464802	< 0,0001	
Ostatak	0,080261	12	0,006688418			
Odstupanje od modela	0,036594	6	0,006099058	0,83803851	0,5822	neznačajno
Greška	0,043667	6	0,007277778			
Ukupno	4,633895	18				

Gdje je:

parametar A – postotak reciklata

parametar B – temperatura kondicioniranja

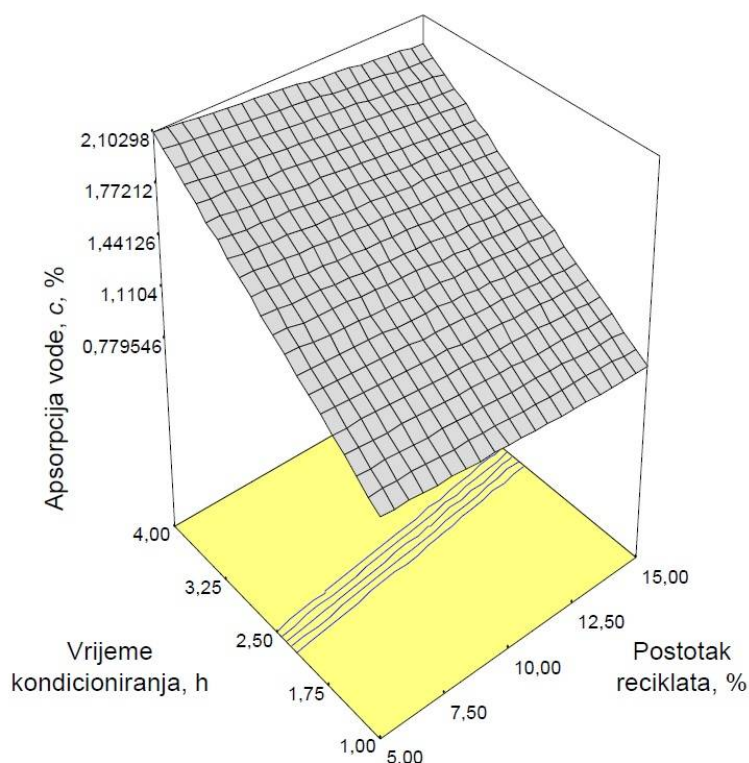
parametar C – vrijeme kondicioniranja

Vrijednost rizika odbacivanja hipoteze H_0 manja od 0,0500 pokazuje da je model, to jest parametar značajan u modelu. Vrijednost H_0 za ovaj model je manji od 0,0001 što je izrazito dobar rezultat. U ovom modelu parametri A, C i BC su značajni.

Odstupanje od modela u vrijednost 0,5822 upućuje da to odstupanje je neznačajno za model. Odstupanje od modela koje je neznačajno je podatak kojeg želimo dobiti nakon analize jer u protivnom bi značilo da ulazni podaci nisu dobro izabrani i apsorpcija vode se ne može prikazati po ovom modelu.

Na slici 5.11 prikazan je utjecaj vremena kondicioniranja i postotka reciklata na apsorpciju vode. Parametar temperature kondicioniranja je konstantan $\vartheta = 75\text{ }^\circ\text{C}$.

Iz slike 5.11 vidljivo je da apsorpcija vode puno više raste s vremenom kondicioniranja, a pada povećanjem postotka reciklata ali u puno manjim vrijednostima.



Slika 5.11. Grafički prikaz ovisnosti apsorpcije vode o vremenu kondicioniranja i postotku reciklata

Statistički podaci vezani uz model prikazani su u tablici 5.7. Koeficijent determiniranosti R^2 je mjera odstupanja od aritmetičke sredine koja je opisana modelom. Vrijednost bliža 1 pokazuje da model bolje slijedi podatke. Rezultat od 0,9826 pokazuje da izabrani model dobiven analizom odlično slijedi apsorpciju vode.

Tablica 5.7. Statistički podaci o modelu

Standardno odstupanje	0,081783
Aritmetička sredina	1,300526
Koeficijent determiniranosti R^2	0,982679577

Jednadžba za izračunavanje apsorpcije:

$$c = 2,341166 - 0,02241 \cdot A - 0,02439 \cdot B - 0,28341 \cdot C + 0,000201 \cdot AB - 0,00295 \cdot AC + 0,0094 \cdot BC \quad (5.2)$$

Gdje je:

parametar A – postotak reciklata

parametar B – temperatura kondicioniranja

parametar C – vrijeme kondicioniranja

5.6 Optimizacija apsorpcije vode

Softver *DesignExpert* ima i mogućnost optimizacije modela nakon izvršene analize. Potrebno je definirati ciljeve optimizacije, pa je prema tim ciljevima modelirano nekoliko prijedloga. Za optimizaciju apsorpcije vode odabrani su sljedeći ciljevi prikazani u tablici 5.8.

Tablica 5.8. Ciljevi optimizacije apsorpcije vode

	Cilj	Donja granica	Gornja granica
Postotak reciklata, %	maksimalan	5	15
Temperatura kondicioniranja, ϑ , °C	u granicama	60	90
Vrijeme kondicioniranja, t , h	u granicama	1	4
Apsorpcija vode, c , %	minimalan	0,58	2,21

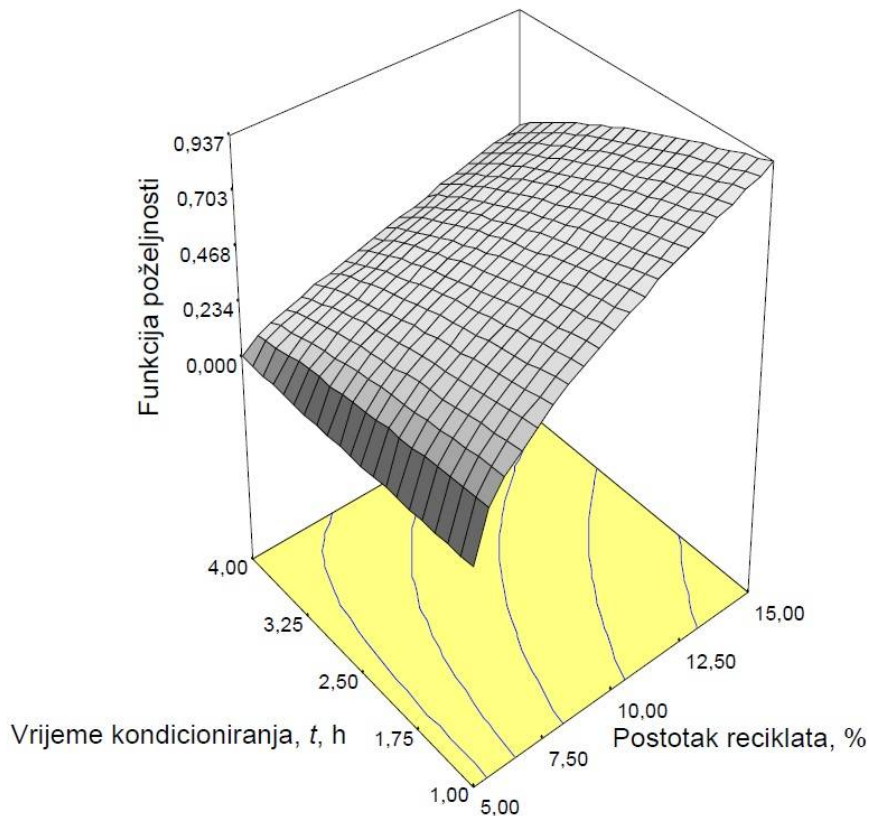
Ciljevi su odabrani ekonomski opravdano, da se iskoristi što više recikliranog materijala, a opet da proizvod ima potrebna svojstva i dimenzijsku postojanost. Odabran je cilj najvišeg postotka reciklata, jer je se u proizvodnji stvara čisti reciklat te je najbolja mogućnost ponovne upotrebe u što većoj količini. Temperatura kondicioniranja može biti u granicama modela, to jest mogućnosti peći jer nam je potrošnja energije zbog više temperature u peći zanemariva. Vrijeme kondicioniranja je također prihvatljivo u granicama modela, jer 4 sata kondicioniranja koliko je maksimalna vrijednost u ovoj optimizaciji omogućuje dovoljno vremena da se proizvod nakon toga pakira i pripremi za distribuciju. Minimalna apsorpcije vode bitna je da se održi dimenzijska postojanost. Također je bitno napomenuti da proizvod nakon duljeg vremena pri povišenoj temperaturi ne apsorbira previše vlage, to jest da mu se ne promijene svojstva i dimenzijska postojanost.

U tablici 5.9 prikazana su rješenja optimizacije procesa za apsorpciju vode.

Tablica 5.9. Rješenja za optimizaciju apsorpcije vode

Rješenje	Postotak reciklata, %	Temperatura kondicioniranja, °C	Vrijeme kondicioniranja, h	Apsorpcija vode, %	Poželjnost
1	15,00	90,00	1,00	0,600	0,994
2	15,00	89,13	1,00	0,610	0,991
3	15,00	90,00	1,03	0,616	0,989
4	15,00	88,47	1,00	0,618	0,988
5	15,00	90,00	1,20	0,702	0,962
6	15,00	79,50	1,00	0,726	0,954
7	14,25	90,00	1,05	0,629	0,947
8	15,00	69,36	1,00	0,847	0,914

Na slici 5.13 prikazano je prvo rješenje, odnosno funkcija poželjnosti pri konstantnoj temperaturi kondicioniranja $\vartheta = 75 \text{ }^\circ\text{C}$ za apsorpciju vode.



Slika 5.12. Funkcija poželjnosti za apsorpciju vode

Na slici 5.12 prikazana je funkcija poželjnosti za pojedine uvjete optimizacije, odnosno za što manju apsorpciju vode. Vidljivo je da bi se postigli ciljevi optimizacije važnu ulogu igra postotak reciklata, što je više reciklata u osnovnom materijalu to je poželjnost funkcije veća, dok vrijeme kondicioniranja mora biti najniže.

5.7 Analiza žilavosti

Za svaku tvorevinu od 21 stanja pokusa pristupilo se mjerenju apsorbirane energije odnosno ispitivanju žilavosti na Charpyevom batu. Uz podatak o apsorbiranoj energiji i površini presjeka tvorevine na području loma (početak nazubljenog dijela) izračunata je žilavost prema jednadžbi: [32]

$$a_{cN} = \frac{E_c}{A} \times 10^3, \text{ kJ/m}^2 \quad (5.3)$$

Gdje je:

a_{cN} , kJ/m² - žilavost

E_c , J - apsorbirana energija kod udarnog rada loma

A , mm² – lomna površina ($A=21,2371 \text{ mm}^2$ prema slici 5.1)

Rezultati žilavosti prikazani su u tablici 5.10. Prikazane su srednje vrijednosti za pojedino stanje pokusa, te standardna devijacija vrijednosti. Stanja pokusa ispitivana na velikom Charpyevom batuu od 200 J označena su zvjezdicom.

Tablica 5.10. Izračunate srednje vrijednosti žilavosti

Stanje pokusa	Aritmetička sredina	Standardna devijacija
1	60,60	7,44
2	62,30	11,81
3*	-	-
4*	444,71	57,0
5	28,51	2,2
6	57,96	13,44
7	38,99	5,13
8*	364,93	48,69
9*	209,54	42,19
10*	419,08	51,82
11*	332,23	59,38
12	48,64	8,41
13	60,18	12,15
14	28,49	3,2
15*	395,53	55,27
16*	390,82	48,63
17*	366,23	77,29
18*	348,45	46,82
19	63,71	10,59
20*	419,08	83,65
21	44,64	6,61

Izračunate srednje vrijednosti unesene su u softver *DesignExpert*. Podaci su zatim analizirani pomoću modula ANOVA (analiza varijance).

Tablica 5.11. Rezultati žilavosti modulom ANOVA za sva stanja pokusa

		Suma kvadrata odstupanja	Stupnjevi slobode	Srednji kvadrat odstupanja	Varijabla F	Rizik odbacivanja hipoteze H_0	
Model		444130,3	3	148043,4	20,63397	< 0,0001	značajno
	A	19032,55	1	19032,55	2,652715	0,1242	
	B	4009,522	1	4009,522	0,558838	0,4663	
	C	443590,1	1	443590,1	61,82661	< 0,0001	
Ostatak		107621,1	15	7174,743			
	Odstupanje od modela	105922,7	9	11769,19	41,57572	0,0001	značajno
	Greška	1698,47	6	283,0784			
Ukupno		551751,4	18				

Gdje je:

parametar A – postotak reciklata

parametar B – temperatura kondicioniranja

parametar C – vrijeme kondicioniranja

Nakon unosa podataka za sva stanja pokusa u modul ANOVA, nije moguće pronaći odgovarajući model jer svaki od modela (linearni, kvadratni, kubni) ima značajna odstupanja. U tablici 5.11 prikazana je analiza linearnog modela, te je vidljivo da je odstupanje od modela značajno. Za sva stanja uzorka testirana na velikim batu također nije moguće pronaći odgovarajući model. Nakon toga odabrani su podaci za analizu stanja pokusa ispitani na manjem batu, gdje je moguće pronaći odgovarajući model. Analiza tih podataka prikazana je u tablici 5.12.

Tablica 5.12. Rezultati žilavosti modulom ANOVA za odabrana stanja pokusa

		Suma kvadrata odstupanja	Stupnjevi slobode	Srednji kvadrat odstupanja	Varijabla F	Rizik odbacivanja hipoteze H_0	
Model		1585,443	3	528,4809	29,94537	0,0005	značajno
	A	1068,621	1	1068,621	60,55138	0,0002	
	B	213,4556	1	213,4556	12,09506	0,0132	
	C	434,7134	1	434,7134	24,63222	0,0025	
Ostatak		105,889	6	17,64817			
	Odstupanje od modela	80,50974	3	26,83658	3,172266	0,1842	neznačajno
	Greška	25,37925	3	8,45975			
Ukupno		1691,332	9				

Gdje je:

parametar A – postotak reciklata

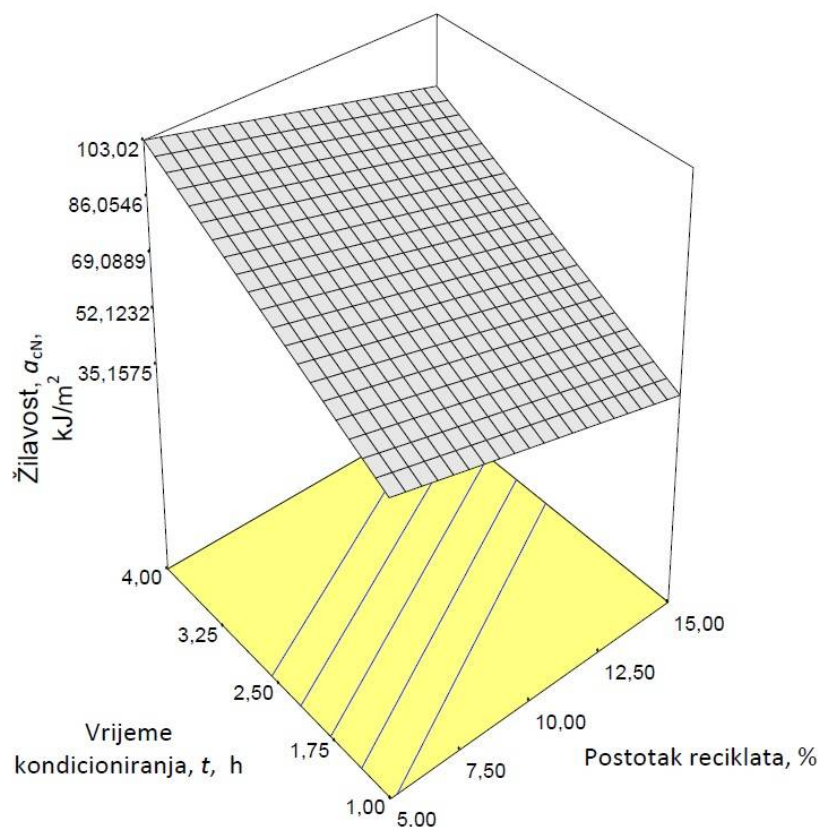
parametar B – temperatura kondicioniranja

parametar C – vrijeme kondicioniranja

Vrijednost rizika odbacivanja hipoteze H_0 manja od 0,0500 pokazuje da je model, to jest varijabla značajna u modelu. Vrijednost H_0 za ovaj model je manji od 0,0005 što je izrazito dobar rezultat. U ovom modelu sve tri varijable A, B, C su značajne.

Odstupanje od modela u vrijednost 0,1842 upućuje da to odstupanje nije značajno za model. Odstupanje od modela koje je neznačajno je podatak kojeg želimo dobiti nakon analize.

Na slici 5.13 prikazana je ovisnost vremena kondicioniranja i postotka reciklata uz konstantnu temperaturu kondicioniranja $\vartheta = 75\text{ }^\circ\text{C}$, na žilavost.



Slika 5.13. Grafički prikaz ovisnosti žilavosti o vremenu kondicioniranja i postotku reciklata

Iz slike 5.13 vidljivo je da žilavost raste s povećanjem vremena kondicioniranja, dok s povećanjem postotka reciklata u osnovnom materijalu žilavost se snižava.

Statistički podaci vezani uz model prikazani su u tablici 5.13. Koeficijent determinantnosti R^2 je mjera odstupanja od aritmetičke sredina koja je opisana modelom. Vrijednost bliža 1 pokazuje da model bolje slijedi podatke. Rezultat od 0,9373 pokazuje da dobiveni model odlično objašnjava žilavost.

Tablica 5.13. Statistički podaci o modelu

Standardno odstupanje	4,200972
Aritmetička sredina	49,402
Koeficijent determiniranosti R^2	0,937393

Jednadžba za izračunavanje žilavosti:

$$a_{cN} = 83,7829 - 2,28469 \cdot A - 0,39417 \cdot B + 15,00531 \cdot C \quad (5.4)$$

Gdje je:

parametar A – postotak reciklata

parametar B – temperatura kondicioniranja

parametar C – vrijeme kondicioniranja

5.8 Optimizacija žilavosti

Za optimizaciju žilavosti odabrani su sljedeći ciljevi prikazani u tablici 5.14.

Tablica 5.14. Ciljevi optimizacije žilavosti

	Cilj	Donja granica	Gornja granica
Postotak reciklata, %	maksimalno	5	15
Temperatura kondicioniranja, ϑ , °C	u granicama	60	90
Vrijeme kondicioniranja, t , h	minimalno	1	4
Žilavost, a_{cN} kJ/m ²	maksimalno	28,49	63,71

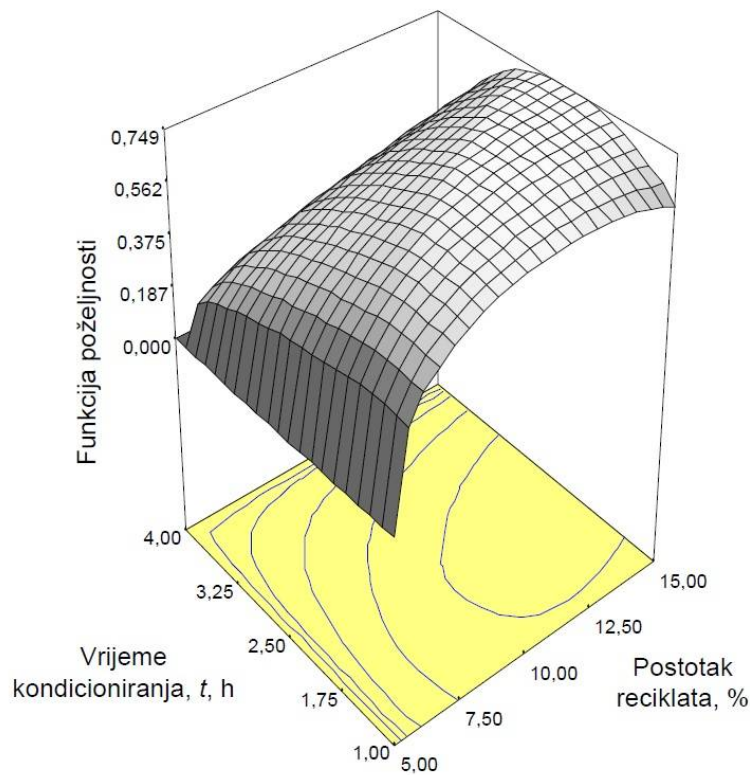
Ciljevi optimizacije odabrani su tako da se iskoristi što više recikliranog materijala, kako bi cijena proizvodnje bila što manja i iskoristi se što više čistog reciklata koji nastaje u proizvodnji. Također cilj je da žilavost bude najviša.

U tablici 5.15 prikazana je optimizacija procesa za žilavost. Program je izbacio tri rješenja, a odabrano je rješenje 1, jer je poželjnost najveća.

Tablica 5.15. Rješenja za optimizaciju žilavosti

Rješenje	Postotak reciklata, %	Temperatura kondicioniranja, °C	Vrijeme kondicioniranja, h	Žilavost, kJ/m ²	Poželjnost
1	15,00	60,00	2,08	57,266	0,805
2	14,80	60,00	2,13	58,509	0,803
3	15,00	60,29	1,96	55,318	0,803

Na slici 5.15 prikazana je funkcija poželjnosti za žilavost u ovisnosti o vremenu kondicioniranja i postotka reciklata uz konstantnu temperaturu kondicioniranja $\vartheta = 75\text{ }^{\circ}\text{C}$.



Slika 5.14. Funkcija poželjnosti za žilavost

Na slici 5.14 prikazana je funkcija poželjnosti za dobivanje najviše žilavosti uz ostale postavljene vrijednosti parametara. Vidljivo je da bi se postigli ciljevi optimizacije važnu ulogu imaju obje vrijednosti prikazane na slici, vrijeme kondicioniranja i postotak reciklata. Za najbolje rezultate optimizacije, potrebno je upotrijebiti postotak reciklata od 15 %, te vrijeme kondicioniranja u vrijednostima oko 2 sata, što se može i grafički vidjeti na slici gdje je vrijednost poželjnosti najveća.

6. RASPRAVA REZULTATA

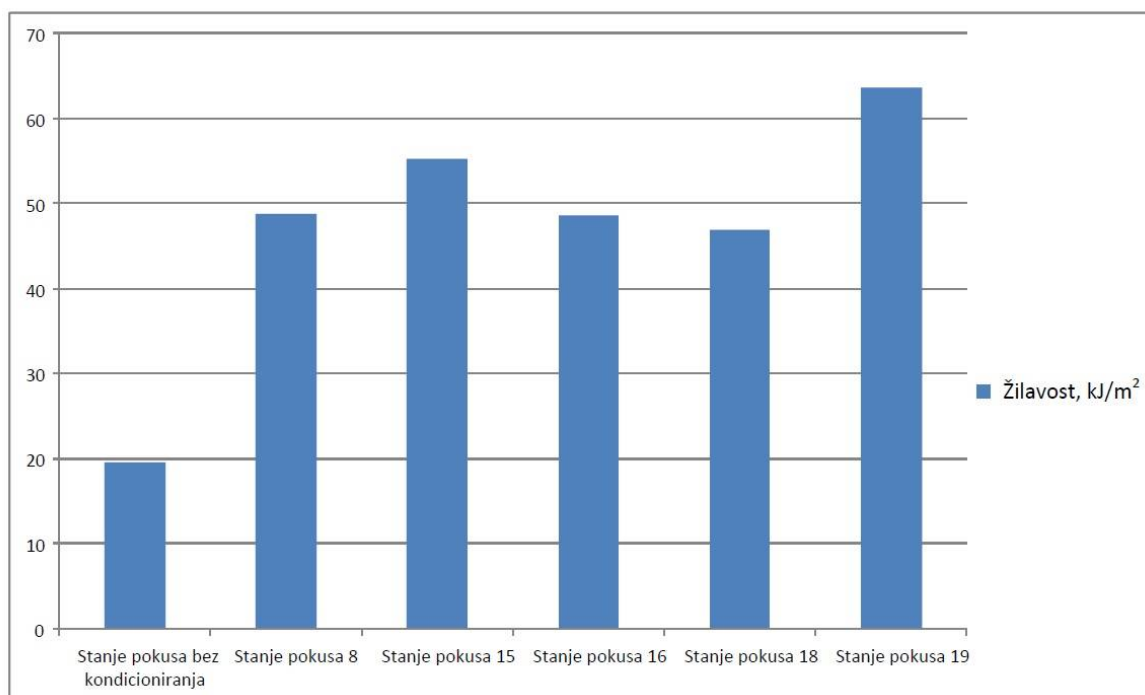
U tablici 6.1 prikazani su rezultati za mjerenje žilavosti na uzorku od 10% reciklata bez kondicioniranja. Srednja vrijednost i standardna devijacija također su prikazani u tablici.

Tablica 6.1. Podaci žilavosti za uzorak od 10% reciklata bez kondicioniranja

Uzorak	E_c , J	a_{cN} , kJ/m ²
1	0,47	22,13
2	0,50	23,54
3	0,38	17,89
4	0,34	16,01
5	0,35	16,48
6	0,52	24,49
7	0,36	16,95
8	0,39	18,36
9	0,42	19,78
10	0,42	19,78
\bar{x}	0,42	19,54
s	0,06	2,98

Podaci iz tablice 6.1 pokazuju nam za koliko možemo očekivati povišenje žilavosti u odnosu na tvorevinu bez kondicioniranja. Najniža srednja vrijednost žilavosti nakon kondicioniranja za stanje pokusa od 10% reciklata bila je 48,63 kJ/m², a najviša 63,71 kJ/m². Optimizacijom tražimo model s kojim se dobiva što veća vrijednost žilavosti.

Na slici 6.1 prikazana je grafički žilavost za sve uzorke s 10% reciklata nakon kondicioniranja te uzorak bez kondicioniranja. Vidljivo je da je žilavost kod svakog kondicioniranog uzorka viša u odnosu na uzorak koji nije kondicioniran. Prema tome može se zaključiti da kondicioniranje u znatnoj mjeri povisuje žilavost tvorevine.



Slika 6.1. Usporedba žilavosti za uzorke s 10% reciklata

7. ZAKLJUČAK

Polimerni materijali su danas svuda oko nas. Teško je zamisliti suvremeni svijet bez njih, jer je i sam tehnološki napredak vezan uz napredak u industriji polimernih materijala. Mogućnosti upotrebe proizvoda napravljenih od polimera jako su široke. Od najmanjih dijelova kućišta pa do dijelova u automobilskoj i zrakoplovnoj industriji, polimeri su se u puno slučajeva pokazali kao najbolji odabir materijala.

U ovom radu opisana je većina polimernih materijala, posebno poliamid. Od poliamida 6.6 napravljen je otpresak na kojem je u eksperimentalnom dijelu mjerena apsorpcija vode i žilavost. Recikliranje polimera je jako bitna stavka u konkurentnosti i budućnosti polimernih materijala. Polimerni otpad jako se dugo razgrađuje, pa je cilj da se što više polimera reciklira. Otpresak je napravljan s dodatkom recikliranog materijala u osnovom materijalu, a nakon ubrizgavanja pristupilo se kondicioniranju.

Pomoću centralno kompozitnog plana pokusa razrađena je dinamika ispitivanja, proizvedene su tvorevine s različitim postotkom reciklata, te su kondicionirani različitim temperaturama i različitim vremenima. Pomoću softvera *DesignExpert* analizirali su se rezultati apsorpcije vode i žilavosti, te su dobiveni modeli za izračunavanje vrijednosti tih parametara.

Kod apsorpcije vode pokazalo se da postotak reciklata i vrijeme kondicioniranja imaju utjecaj na rezultat dok temperatura kondicioniranja ne utječe. Na žilavost sva tri ulazna parametra imaju utjecaj, ali se kao važniji ulazni parametar pokazao postotak reciklata. S povećanjem reciklata u osnovnom materijalu snižava se žilavost. Osim analize, modeli su i optimizirani, odabrani su ulazni parametri koji odgovaraju zahtjevima u stvarnim uvjetima proizvodnje.

Dobiveni modeli omogućuju da se u proizvodnom pogonu izračunaju vrijednosti apsorpcije vode i žilavosti, bez potrebe da se obavljaju ispitivanja. Ta mogućnost osim što štedi vrijeme, također omogućuje i ekonomičniju proizvodnju. Svakako se ova analiza pokazala korisnom, te će se koristiti u daljnjoj proizvodnji.

8. LITERATURA

- [1] Rogić, A., Čatić, I., Godec, D.: *Polimeri i polimerne tvorevine*, Društvo za plastiku i gumu, Zagreb, 2008.
- [2] Ebewe, R. O.: *Polymer science and technology*, CRC Press, Benin City, 2000.
- [3] <https://blog.sciencemuseum.org.uk/bakelite-the-first-synthetic-plastic/>, 11/2020.
- [4] <https://en.wikipedia.org/wiki/Polypropylene>, 11/2020.
- [5] <http://www.essentialchemicalindustry.org/polymers/polypropene.html>, 11/2020.
- [6] <https://www.resinex.hr/polimer-vrste/pe.html>, 11/2020.
- [7] <https://adelphi-hp.com/product-range/hdpe-syrup-bottle>, 11/2020.
- [8] https://en.wikipedia.org/wiki/Ultra-high-molecular-weight_polyethylene, 11/2020.
- [9] <https://www.norelem.com/us/en/Products/Product-overview.html>, 11/2020.
- [10] <https://en.wikipedia.org/wiki/Polystyrene>, 11/2020.
- [11] <https://www.jub.hr/eps/ambalazni-i-tehnicki-stiropor>, 11/2020.
- [12] <https://www.resinex.hr/polimer-vrste/pa.html>, 11/2020.
- [13] <https://www.essentialchemicalindustry.org/polymers/polyamides.html>, 11/2020.
- [14] Privšek, H.: *Umjetnost injekcijskog prešanja*, Profidtp, Zagreb, 2016.
- [15] <https://www.greencarcongress.com/2019/09/20190918-ascend.html>, 11/2020.
- [16] Charrier, J. M.: *Polymeric Materials and Processing : Plastics, Elastomers and Composites*, Hanser Gardner Publications, Munich, 1990.
- [17] <http://polymerdatabase.com/Elastomers/TPEs.html>, 12/2020.
- [18] <https://www.amipolymer.com/pharma-tubing.html>, 12/2020.
- [19] Čatić, I.: *Proizvodnja polimernih tvorevina*, Društvo za plastiku i gumu, Zagreb, 2006.
- [20] <https://www.sumitomo-shi-demag.eu/company/brand-and-tradition.html#4>, 12/2020.
- [21] Goodship, V., Middleton, B., Cherrington, R.: *Design and Manufacture of Plastic Components for Multifunctionality*, Elsevier, Oxford, 2016.
- [22] *Ankerwerk 65-120*, tehnička dokumentacija, MPR Mališ, 2020.
- [23] *Haitian SA 900 / 300 – B*, Tehnička dokumentacija, MPR Mališ, 2020.
- [24] Šercer, M.: *Smjerovi razvoja ubrizgavalica za injekcijsko prešanje plastomera*, Polimeri, br. 24 2-4, str. 74 - 78, 2003.
- [25] Rogić, A., Čatić, I.: *Injekcijsko prešanje polimera*, Društvo plastičara i gumaraca, Zagreb, 1996.

- [26] <https://www.toolcraft.co.uk/plastic-injection-moulding/advice/help-injection-moulding-process.htm>, 12/2020.
- [27] Šercer, M., Rujnić Havstad, M: *Gospodarenje plastičnim i gumenim otpadom*, podloge za predavanja, FSB, 2020.
- [28] <https://zeleni-val.com/oznake-na-ambalazi/>, 12/2020.
- [29] [https://ravagosp.com/DATASHEET/PA/SOLVAY/TECHNYL/TECHNYL%20NYLON%20A%20205F%20\(NATURAL\).pdf](https://ravagosp.com/DATASHEET/PA/SOLVAY/TECHNYL/TECHNYL%20NYLON%20A%20205F%20(NATURAL).pdf), 20/2020.
- [30] <https://www.tecnovasa.com/pdfs/HAITIANSATURNIIEspecificaciones20130605.pdf>, 12/2020.
- [31] HRN EN ISO 62: 2008 Plastika – Određivanje apsorpcije vode (Plastics – determination of water absorption)
- [32] HRN EN ISO 179-1: 2010 Plastika - Određivanje svojstava žilavosti po Charpyju – 1. dio. Ispitivanje žilavosti bez instrumenata (Plastics – Determination of Charpy impact properties – Part 1: Non-instrumented impact test)

9. PRILOZI

Tablica 9.1. Podaci stanja pokusa 1

Tvorevina	m_0 , g	m_1 , g	c , %	E_c , J	a_{cN} , kJ/m ²
1	5,66	5,72	1,06	1,03	48,50
2	5,73	5,80	1,22	1,04	48,97
3	5,72	5,79	1,22	1,46	68,75
4	5,65	5,72	1,24	1,32	62,16
5	5,72	5,80	1,40	1,38	64,98
6	5,65	5,72	1,24	1,39	65,45
7	5,73	5,81	1,40	1,20	56,50
8	5,66	5,73	1,24	1,48	69,69
9	5,72	5,80	1,40	1,25	58,86
10	5,66	5,73	1,24	1,32	62,16
\bar{x}	5,69	5,76	1,27	1,29	60,60
s	0,04	0,04	0,11	1,58	7,44

Tablica 9.2. Podaci stanja pokusa 2

Tvorevina	m_0 , g	m_1 , g	c , %	E_c , J	a_{cN} , kJ/m ²
1	5,66	5,73	1,24	1,22	57,45
2	5,68	5,72	0,70	1,20	56,50
3	5,74	5,79	0,87	1,23	57,92
4	5,66	5,72	1,06	1,04	48,97
5	5,74	5,80	1,05	1,40	65,92
6	5,74	5,79	0,87	1,72	80,99
7	5,73	5,78	0,87	1,70	80,05
8	5,67	5,72	0,88	1,26	59,33
9	5,73	5,79	1,05	0,98	46,15
10	5,74	5,78	0,70	1,48	69,69
\bar{x}	5,71	5,76	0,93	1,32	62,30
s	0,04	0,03	2,51	0,25	11,81

Tablica 9.3. Podaci stanja pokusa 3

Tvorevina	m_0 , g	m_1 , g	c , %	E_c , J	a_{cN} , kJ/m ²
1	5,65	5,77	2,12	-	-
2	5,66	5,77	1,94	-	-
3	5,66	5,77	1,94	-	-
4	5,66	5,76	1,77	-	-
5	5,73	5,84	1,92	-	-
6	5,66	5,76	1,77	-	-
7	5,65	5,76	1,95	-	-
8	5,73	5,84	1,92	-	-
9	5,73	5,83	1,75	-	-
10	5,66	5,77	1,94	-	-
\bar{x}	5,68	5,79	1,90	-	-
s	0,04	0,03	0,11	-	-

Tablica 9.4. Podaci stanja pokusa 4

Tvorevina	m_0 , g	m_1 , g	c , %	E_c , J	a_{cN} , kJ/m ²
1	5,66	5,76	1,77	11,00	517,96
2	5,66	5,77	1,94	10,00	470,87
3	5,73	5,85	2,09	8,50	400,24
4	5,64	5,77	2,30	10,00	470,87
5	5,72	5,85	2,27	8,00	376,70
6	5,65	5,76	1,95	11,00	517,96
7	5,72	5,84	2,10	-	-
8	5,71	5,84	2,28	8,50	400,24
9	5,72	5,83	1,92	8,00	376,70
10	5,65	5,77	2,12	10,00	470,87
\bar{x}	5,69	5,80	2,08	9,44	444,71
s	0,04	0,04	0,18	1,21	57,00

Tablica 9.5. Podaci stanja pokusa 5

Tvorevina	m_0 , g	m_1 , g	c , %	E_c , J	a_{cN} , kJ/m ²
1	5,65	5,69	0,71	0,70	32,96
2	5,72	5,75	0,52	0,62	29,19
3	5,65	5,69	0,71	0,62	29,19
4	5,71	5,75	0,70	0,55	25,90
5	5,72	5,75	0,52	0,57	26,60
6	5,65	5,69	0,71	0,65	30,61
7	5,67	5,69	0,35	0,62	29,19
8	5,72	5,75	0,52	0,56	26,37
9	5,72	5,75	0,52	0,57	26,84
10	5,72	5,75	0,52	0,60	28,25
\bar{x}	5,69	5,73	0,58	0,61	28,51
s	0,03	0,03	0,12	0,05	2,20

Tablica 9.6. Podaci stanja pokusa 6

Tvorevina	m_0 , g	m_1 , g	c , %	E_c , J	a_{cN} , kJ/m ²
1	5,66	5,71	0,88	0,84	39,55
2	5,66	5,72	1,06	0,88	41,44
3	5,67	5,71	0,71	1,32	62,16
4	5,67	5,71	0,71	0,97	45,67
5	5,66	5,72	1,06	1,20	56,50
6	5,66	5,71	0,88	1,24	58,39
7	5,74	5,79	0,87	1,16	54,62
8	5,73	5,78	0,87	1,52	71,57
9	5,74	5,79	0,87	1,72	80,99
10	5,68	5,72	0,70	1,46	68,75
\bar{x}	5,69	5,74	0,86	1,23	57,96
s	0,03	0,04	0,13	0,29	13,44

Tablica 9.7. Podaci stanja pokusa 7

Tvorevina	m_0 , g	m_1 , g	c , %	E_c , J	a_{cN} , kJ/m ²
1	5,65	5,72	1,24	0,70	32,96
2	5,65	5,71	1,06	0,76	35,79
3	5,66	5,72	1,06	0,66	31,08
4	5,65	5,71	1,06	0,89	41,91
5	5,65	5,70	0,88	0,79	37,20
6	5,72	5,78	1,05	0,84	39,55
7	5,65	5,71	1,06	0,89	41,91
8	5,72	5,77	0,87	0,96	45,20
9	5,66	5,70	0,71	0,79	37,20
10	5,72	5,78	1,05	1,00	47,09
\bar{x}	5,67	5,73	1,00	0,83	38,99
s	0,03	0,03	0,15	0,11	5,13

Tablica 9.8. Podaci stanja pokusa 8

Tvorevina	m_0 , g	m_1 , g	c , %	E_c , J	a_{cN} , kJ/m ²
1	5,71	5,82	1,93	8,00	376,70
2	5,72	5,81	1,57	8,00	376,70
3	5,63	5,73	1,78	8,00	376,70
4	5,63	5,74	1,95	6,00	282,52
5	5,70	5,81	1,93	7,50	353,15
6	5,63	5,75	2,13	6,00	282,52
7	5,63	5,75	2,13	8,00	376,70
8	5,64	5,80	2,84	9,00	423,79
9	5,64	5,74	1,77	9,00	423,79
10	5,71	5,81	1,75	8,00	376,70
\bar{x}	5,66	5,78	1,98	7,75	364,93
s	0,04	0,04	0,35	1,03	48,69

Tablica 9.9. Podaci stanja pokusa 9

Tvorevina	m_0 , g	m_1 , g	c , %	E_c , J	a_{cN} , kJ/m ²
1	5,73	5,84	1,92	6,00	282,52
2	5,65	5,77	2,12	4,00	188,35
3	5,67	5,78	1,94	5,00	235,44
4	5,74	5,85	1,92	6,00	282,52
5	5,74	5,86	2,09	4,00	188,35
6	5,74	5,85	1,92	4,00	188,35
7	5,66	5,78	2,12	4,00	188,35
8	5,66	5,78	2,12	4,00	188,35
9	5,79	5,86	1,21	3,50	164,81
10	5,66	5,78	2,12	4,00	188,35
\bar{x}	5,70	5,82	1,95	4,45	209,54
s	0,05	0,04	0,28	0,90	42,19

Tablica 9.10. Podaci stanja pokusa 10

Tvorevina	m_0 , g	m_1 , g	c , %	E_c , J	a_{cN} , kJ/m ²
1	5,67	5,78	1,94	10,50	494,42
2	5,68	5,77	1,58	10,00	470,87
3	5,73	5,85	2,09	8,00	376,70
4	5,73	5,84	1,92	8,00	376,70
5	5,74	5,84	1,74	7,50	353,15
6	5,67	5,78	1,94	10,00	470,87
7	5,74	5,84	1,74	8,00	376,70
8	5,72	5,83	1,92	8,50	400,24
9	5,74	5,85	1,92	8,50	400,24
10	5,67	5,78	1,94	10,00	470,87
\bar{x}	5,71	5,82	1,87	8,90	419,08
s	0,03	0,03	0,14	1,10	51,82

Tablica 9.11. Podaci stanja pokusa 11

Tvorevina	m_0 , g	m_1 , g	c , %	E_c , J	a_{cN} , kJ/m ²
1	5,66	5,75	1,59	8,50	400,24
2	5,72	5,83	1,92	7,00	329,61
3	5,65	5,75	1,77	8,00	376,70
4	5,72	5,81	1,57	6,00	282,52
5	5,72	5,81	1,57	6,00	282,52
6	5,66	5,75	1,59	8,00	376,70
7	5,66	5,74	1,41	8,50	400,24
8	5,71	5,83	2,10	5,00	235,44
9	5,72	5,82	1,75	6,50	306,07
10	5,66	5,75	1,59	-	-
\bar{x}	5,69	5,78	1,69	7,06	332,23
s	0,03	0,04	0,20	1,26	59,38

Tablica 9.12. Podaci stanja pokusa 12

Tvorevina	m_0 , g	m_1 , g	c , %	E_c , J	a_{cN} , kJ/m ²
1	5,73	5,79	1,05	1,25	58,86
2	5,67	5,70	0,53	0,96	45,20
3	5,67	5,70	0,53	1,04	48,97
4	5,74	5,77	0,52	1,40	65,92
5	5,73	5,76	0,52	1,04	48,97
6	5,74	5,77	0,52	1,01	47,56
7	5,66	5,70	0,71	0,84	39,55
8	5,66	5,71	0,88	0,84	39,55
9	5,74	5,77	0,52	1,07	50,38
10	5,66	5,70	0,71	0,88	41,44
\bar{x}	5,70	5,74	0,65	1,03	48,68
s	0,04	0,04	0,19	0,18	8,41

Tablica 9.13. Podaci stanja pokusa 13

Tvorevina	m_0 , g	m_1 , g	c , %	E_c , J	acN , kJ/m ²
1	5,67	5,73	1,06	1,52	71,57
2	5,67	5,73	1,06	1,34	63,10
3	5,68	5,74	1,06	0,98	46,15
4	5,73	5,79	1,05	1,15	54,15
5	5,74	5,80	1,05	1,15	54,15
6	5,74	5,80	1,05	1,50	70,63
7	5,74	5,80	1,05	1,13	53,21
8	5,66	5,73	1,24	1,03	48,50
9	5,74	5,80	1,05	1,80	84,76
10	5,66	5,73	1,24	1,18	55,56
\bar{x}	5,70	5,77	1,09	1,28	60,18
s	0,04	0,04	0,08	0,26	12,15

Tablica 9.14. Podaci stanja pokusa 14

Tvorevina	m_0 , g	m_1 , g	c , %	E_c , J	acN , kJ/m ²
1	5,72	5,75	0,52	0,62	29,19
2	5,64	5,68	0,71	0,64	30,14
3	5,73	5,76	0,52	0,62	29,19
4	5,64	5,69	0,89	0,54	25,43
5	5,66	5,70	0,71	0,65	30,61
6	5,72	5,75	0,52	0,50	23,54
7	5,72	5,76	0,70	0,70	32,96
8	5,72	5,75	0,52	0,52	24,49
9	5,66	5,69	0,53	0,68	32,02
10	5,71	5,75	0,70	0,58	27,31
\bar{x}	5,69	5,73	0,63	0,61	28,49
s	0,04	0,03	0,13	0,07	3,20

Tablica 9.15. Podaci stanja pokusa 15

Tvorevina	m_0 , g	m_1 , g	c , %	E_c , J	a_{cN} , kJ/m ²
1	5,70	5,79	1,58	7,00	329,61
2	5,64	5,73	1,60	8,50	400,24
3	5,71	5,81	1,75	7,50	353,15
4	5,64	5,73	1,60	8,00	376,70
5	5,64	5,72	1,42	10,00	470,87
6	5,64	5,73	1,60	10,00	470,87
7	5,70	5,81	1,93	9,50	447,33
8	5,72	5,80	1,40	7,50	353,15
9	5,64	5,73	1,60	9,00	423,79
10	5,71	5,80	1,58	7,00	329,61
\bar{x}	5,67	5,77	1,60	8,40	395,53
s	0,04	0,04	0,15	1,17	55,27

Tablica 9.16. Podaci stanja pokusa 16

Tvorevina	m_0 , g	m_1 , g	c , %	E_c , J	a_{cN} , kJ/m ²
1	5,72	5,79	1,22	7,50	353,15
2	5,64	5,73	1,60	8,50	400,24
3	5,64	5,73	1,60	8,00	376,70
4	5,73	5,80	1,22	8,50	400,24
5	5,63	5,72	1,60	10,00	470,87
6	5,64	5,73	1,60	7,00	329,61
7	5,64	5,73	1,60	10,00	470,87
8	5,71	5,80	1,58	7,50	353,15
9	5,71	5,79	1,40	7,50	353,15
10	5,64	5,73	1,60	8,50	400,24
\bar{x}	5,67	5,76	1,50	8,30	390,82
s	0,04	0,03	0,16	1,03	48,63

Tablica 9.17. Podaci stanja pokusa 17

Tvorevina	m_0 , g	m_1 , g	c , %	E_c , J	a_{cN} , kJ/m ²
1	5,74	5,82	1,39	-	-
2	5,74	5,82	1,39	7,00	329,61
3	5,66	5,75	1,59	10,00	470,87
4	5,74	5,82	1,39	8,00	376,70
5	5,74	5,82	1,39	5,00	235,44
6	5,73	5,82	1,57	7,50	353,15
7	5,74	5,82	1,39	7,50	353,15
8	5,67	5,77	1,76	10,50	494,42
9	5,74	5,83	1,57	7,00	329,61
10	5,74	5,82	1,39	7,50	353,15
\bar{x}	5,72	5,81	1,49	7,78	366,23
s	0,03	0,03	0,13	1,64	77,29

Tablica 9.18. Podaci stanja pokusa 18

Tvorevina	m_0 , g	m_1 , g	c , %	E_c , J	a_{cN} , kJ/m ²
1	5,64	5,72	1,42	5,50	258,98
2	5,71	5,78	1,23	7,00	329,61
3	5,71	5,79	1,40	7,00	329,61
4	5,72	5,78	1,05	7,50	353,15
5	5,64	5,72	1,42	7,50	353,15
6	5,70	5,79	1,58	9,50	447,33
7	5,70	5,78	1,40	7,50	353,15
8	5,70	5,78	1,40	7,00	329,61
9	5,64	5,72	1,42	7,50	353,15
10	5,64	5,71	1,24	8,00	376,70
\bar{x}	5,68	5,76	1,36	7,40	348,45
s	0,03	0,03	0,15	0,99	46,82

Tablica 9.19. Podaci stanja pokusa 19

Tvorevina	m_0 , g	m_1 , g	c , %	E_c , J	a_{cN} , kJ/m ²
1	5,70	5,76	1,05	1,15	54,15
2	5,65	5,69	0,71	1,40	65,92
3	5,70	5,77	1,23	1,48	69,69
4	5,65	5,70	0,88	1,02	48,03
5	5,64	5,69	0,89	1,40	65,92
6	5,71	5,77	1,05	1,26	59,33
7	5,70	5,76	1,05	1,48	69,69
8	5,71	5,77	1,05	1,06	49,91
9	5,64	5,70	1,06	1,58	74,40
10	5,65	5,70	0,88	1,70	80,05
\bar{x}	5,68	5,73	0,99	1,35	63,71
s	0,03	0,04	0,15	0,22	10,59

Tablica 9.20. Podaci stanja pokusa 20

Tvorevina	m_0 , g	m_1 , g	c , %	E_c , J	a_{cN} , kJ/m ²
1	5,71	5,85	2,45	9,00	423,79
2	5,73	5,85	2,09	8,50	400,24
3	5,72	5,84	2,10	8,50	400,24
4	5,64	5,77	2,30	10,00	470,87
5	5,65	5,78	2,30	11,00	517,96
6	5,65	5,77	2,12	10,00	470,87
7	5,71	5,84	2,28	8,00	376,70
8	5,72	5,84	2,10	5,00	235,44
9	5,72	5,85	2,27	8,00	376,70
10	5,64	5,76	2,13	11,00	517,96
\bar{x}	5,69	5,82	2,21	8,90	419,08
s	0,04	0,04	0,12	1,78	83,65

Tablica 9.21. Podaci stanja pokusa 21

Tvorevina	m_0 , g	m_1 , g	c , %	E_c , J	a_{cN} , kJ/m ²
1	5,72	5,78	1,05	1,25	58,86
2	5,72	5,77	0,87	0,98	46,15
3	5,73	5,77	0,70	1,10	51,80
4	5,73	5,78	0,87	0,87	40,97
5	5,66	5,71	0,88	0,80	37,67
6	5,65	5,71	1,06	0,84	39,55
7	5,65	5,71	1,06	1,02	48,03
8	5,66	5,71	0,88	0,88	41,44
9	5,65	5,70	0,88	0,88	41,44
10	5,65	5,71	1,06	0,86	40,50
\bar{x}	5,68	5,74	0,93	0,95	44,64
s	0,04	0,03	0,12	0,14	6,61