

# Ekstrudiranje plastičnih filmova

---

**Horčićka, Karlo**

**Undergraduate thesis / Završni rad**

**2025**

*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://um.nsk.hr/um:nbn:hr:235:645755>

*Rights / Prava:* [Attribution-NonCommercial-NoDerivatives 4.0 International/Imenovanje-Nekomercijalno-Bez prerada 4.0 međunarodna](#)

*Download date / Datum preuzimanja:* **2025-02-25**

*Repository / Repozitorij:*

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



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

# ZAVRŠNI RAD

**Karlo Horčička**

Zagreb, 2025.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

# ZAVRŠNI RAD

Mentor:

Izv. prof. dr. sc. Ana Pilipović, dipl. ing.

Student:

Karlo Horčička

Zagreb, 2025.

Izjavljujem da sam ovaj rad izradio samostalno koristeći znanja stečena tijekom studija i navedenu literaturu.

Zahvaljujem se najviše svojim roditeljima i obitelji što su imali strpljenja i omogućili mi da polazim fakultet koji sam želio kroz sve ove godine. Zahvaljujem se na njihovoj moralnoj, materijalnoj, financijskoj i emocionalnoj podršci i razumijevanju. Zahvaljujem se i svojoj curi koja me poticala na učenje i bila mi podrška kroz velik dio studija. Koja me bodrila i pomagala koliko god je mogla čak i kad nije imala pojma o čemu se uopće radi. Velike zahvale cijeloj ekipi s Katedre za preradu polimera na pomoći u praktičnom djelu rada i na savjetima i smjernicama vezanim uz pisanje rada. Izv. prof. Ani Pilipović također veliko hvala što je odlučila biti mi mentorica i što je imala strpljenja i volje pratiti me kroz ovaj projekt i što mi je pomogla usmjeriti me prema konačnom cilju rada. Također bih zahvalio i ostalim profesorima, profesoricama i asistentima na njihovoj nesebičnosti i volji da pomognu čak i u svoje slobodno vrijeme. Zahvale i tetama iz referade koje su uvijek bile dostupne i spremne pomoći kako god znaju i mogu.

Karlo Horčička



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE



Središnje povjerenstvo za završne i diplomske ispite  
Povjerenstvo za završne i diplomske ispite studija strojarstva za smjerove:  
proizvodno inženjerstvo, računalno inženjerstvo, industrijsko inženjerstvo i menadžment, inženjerstvo  
materijala i mehatronika i robotika

Sveučilište u Zagrebu Fakultet strojarstva i brodogradnje	
Datum: 0 - 02 - 2025	Prilog
Klasa: 602 - 04 / 25 - 06 / 1	
Ur.broj: 15 - 25 - 61	

## ZAVRŠNI ZADATAK

Student: **Karlo Horčićka** JMBAG: **0035227803**

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **Ekstrudiranje plastičnih filmova**

Naslov rada na engleskom jeziku: **Extrusion of plastic films**

Opis zadatka:

Ekstrudiranje je najrašireniji postupak prerade polimernih tvorevina. Tim postupkom moguće je prerađivati tvorevine od svih materijala (metal, polimer, hrana, kompoziti, itd.) koji su istog poprečnog presjeka po cijeloj dužini. Plastični filmovi se najčešće izrađuju klasičnim ekstrudiranjem sa širokousnom mlaznicom ili ekstrudiranjem crijevnog filma. U Laboratoriju za preradu polimera kupljen je novi alat za izradu plastičnih filmova sa širokousnom mlaznicom, te je sukladno tome u sklopu rada potrebno:

- napraviti pregled literature općenito za postupak ekstrudiranja i detaljnije za ekstrudiranje plastičnih filmova, folija i ploča,
- napraviti pregled literature vezan uz alate koji se primjenjuju kod izrade filmova, folija i ploča,
- staviti u pogon novi alat ekstrudera za izradu filmova,
- izraditi različite debljine plastičnih filmova,
- obratiti pozornost na parametre prerade gotovih filmova.

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

Zadatak zadan:

30. 11. 2024.

Zadatak zadao: *Ana Pilipović*  
Izv. prof. dr. sc. Ana Pilipović

Datum predaje rada:

1. rok: 20. i 21. 2. 2025.
2. rok: 10. i 11. 7. 2025.
3. rok: 18. i 19. 9. 2025.

Predviđeni datumi obrane:

1. rok: 24. 2. - 28. 2. 2025.
2. rok: 15. 7. - 18. 7. 2025.
3. rok: 22. 9. - 26. 9. 2025.

Predsjednik Povjerenstva:  
*Godić*  
Prof. dr. sc. Damir Godić

## SADRŽAJ

SADRŽAJ .....	I
POPIS SLIKA .....	II
POPIS TABLICA.....	III
POPIS OZNAKA I KRATICA .....	IV
SAŽETAK.....	V
SUMMARY .....	VI
1. UVOD.....	1
2. Ekstruderi.....	3
2.1. Mlaznice.....	9
3. IZRADA POLIMERNIH FILMOVA I FOLIJA POSTUPKOM EKSTRUDIRANJA....	12
3.1. Ekstrudiranje crijevnog filma.....	12
3.2. Ekstrudiranje sa širokousnom mlaznicom .....	15
4. PRAKTIČNI DIO.....	18
5. REZULTATI .....	21
6. ZAKLJUČAK.....	31
LITERATURA.....	32

**POPIS SLIKA**

Slika 1.1 Presjek spiralne glave za koekstrudiranje crijevnog filma [3].....	2
Slika 2.1 Izgled ekstrudera i prikaz zona [3].....	3
Slika 2.2 Linija za ekstrudiranje [3].....	3
Slika 2.3 Izgled presjeka nekih konstrukcija komora za relaksaciju taljevine [3].....	4
Slika 2.4 Shematski prikaz podjele dvopužnih ekstrudera [3].....	5
Slika 2.5 Prikaz pužnog vijka sa svim potrebnim dimenzijama [3].....	6
Slika 2.6 Primjeri izgleda djela pužnog vijka namjenjenom za mješanje materijala [3].....	6
Slika 2.7 Shematski prikaz zona i prijelaza taljevine u zoni prijenosa energije [3].....	7
Slika 2.8 Izgled Kenicksovog statičnog mješala gdje dolazi do mješanja dvaju polimera [8] ..	8
Slika 2.9 Stepenasti prijelaz s okruglog ulaza u alat ekstrudera k izgledu konačnog profila na izlazu iz ekstrudera [9] .....	10
Slika 2.10 Blaži prijelaz s okruglog profila k konačnome [9] .....	10
Slika 2.11 Bubrenje taljevine (proširenje mlaza) na izlazu iz širokousne mlaznice .....	11
Slika 3.1 Skica ekstrudiranja crijevnog filma [3].....	12
Slika 3.2 Presjek mlaznice za ekstrudiranje crijevnog filma [12].....	13
Slika 3.3 Shematski prikaz alata za ekstrudiranje crijevnog filma u polovičnom presjeku [13] .....	14
Slika 3.4 Funkcionalni prikaz prstena za hlađenje [3] .....	14
Slika 3.5 Presjek širokousne mlaznice [14] .....	16
Slika 3.6 Gornja (lijevo) i donja (desno) polovica širokousne mlaznice .....	17
Slika 5.1 Prikaz lošeg proizvoda nastalog ekstrudiranjem.....	21
Slika 5.2 Utjecaj valjka bez promjene parametara u odnosu na sliku 5.1.....	22
Slika 5.3 Utjecaj povišenja brzine iznad brzine izlaza ekstrudata .....	23
Slika 5.4 Proizvodi dobiveni ekstrudiranjem .....	24

## POPIS TABLICA

Tablica 5.1 Rezultati prvog mjerenja .....	25
Tablica 5.2 Rezultati drugog mjerenja .....	26
Tablica 5.3 Rezultati trećeg mjerenja.....	26
Tablica 5.4 Rezultati trećeg mjerenja - nastavak .....	27
Tablica 5.5 Rezultati četvrtog mjerenja .....	27
Tablica 5.6 Rezultati petog mjerenja.....	28
Tablica 5.7 Rezultati šestog mjerenja .....	28
Tablica 5.8 Rezultati šestog mjerenja - nastavak .....	29
Tablica 5.9 Rezultati sedmog mjerenja .....	29
Tablica 5.10 Rezultati osmog mjerenja.....	30



## POPIS OZNAKA I KRATICA

CV	Koeficijent varijacije
EPDM	Etilen/propilen/dienski kaučuk
PA	Poliamid
PC	Polikarbonat
PE	Polietilen
PE-HD	Polietilen visoke gustoće
PE-LD	Polietilen niske gustoće
PE-LLD	Linearni polietilen niske gustoće
PMMA	Poli(metil-metakrilat)
PP	Polipropilen
PVC	Poli(vinil-klorid)

Oznaka	Jedinica	Opis
$n$	-	Broj elemenata u statičnom mješalištu

## **SAŽETAK**

Ekstrudiranje je najrašireniji postupak prerade polimera no nije striktno vezan uz njih jer se ekstrudiranjem mogu prerađivati i drugi materijali poput metala i stakla. Ovim radom će se opisati oprema i alati za ekstrudiranje, objasniti ekstrudiranje kroz širokousnu mlaznicu i alat za ekstrudiranje crijevnog filma te će se proučiti ovisnost kvalitete i dimenzije proizvoda o parametrima prerade.

Ključne riječi: ekstruder, ekstrudiranje, film, folija, polietilen, širokousna mlaznica

## **SUMMARY**

Extrusion is the most widespread polymer processing process, but it is not strictly limited to them as other materials such as metals and glass can also be processed by extrusion. This paper will go through the equipment and tools for extrusion, explain the extrusion through a wide-lip die and blow extrusion, as well as study the dependence of the quality and dimensions of the product on the processing parameters.

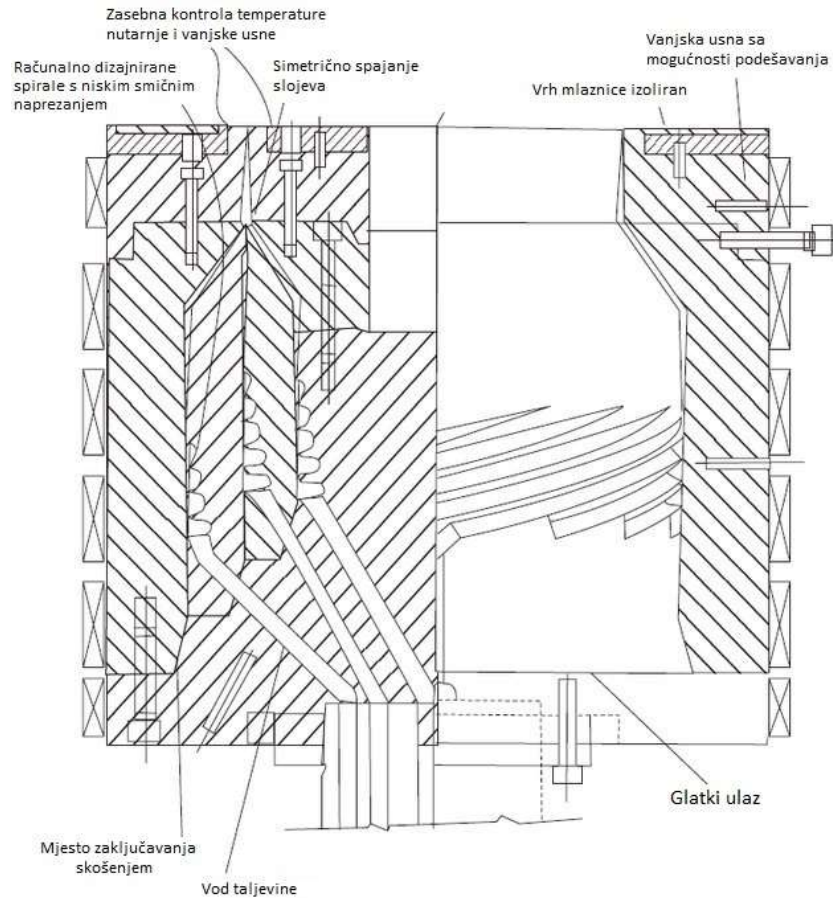
Keywords: extruder, extrusion, film, foil, polyethylene, wide-lip die

## 1. UVOD

Ekstrudiranje je kontinuirani postupak praoblikovanja materijala istiskivanjem kapljevito materijala kroz mlaznicu. [1] Ekstrudiranjem se mogu dobiti razni proizvodi i poluproizvodi od različitih materijala, a u ostatku rada se pod proizvod računaju i poluproizvodi osim ako nije eksplicitno naglašeno da se radi baš o poluproizvodu. Sam postupak ekstrudiranja daje beskonačne proizvode, odnosno barem jedna od dimenzija proizvoda nije definirana, a najčešće je to duljina. Ekstrudiranjem metala dobivaju se razne folije poput aluminijske folije koja se upotrebljava u kućanstvu, razne čelične opruge različitih oblika presjeka, šipke i žice, građevinski profili, bakreni vodiči i mnogi drugi. Polimerni proizvodi iz ekstrudera pak izlaze u mnogo većem broju oblika i namjena: raznoliki profili, kanalice, ploče, folije, filmovi, ali i kompleksni oblici poput PVC profila za izradu prozora. Uz malo kreativnosti ekstrudiranje se uspijelo pretvoriti u svojevrsni postupak prevlačenja poput izolacije žica i kabela, izrada plastične ambalaže. [2]

Ekstruder može biti reakcijski ili nereakcijski ovisno o materijalu koji se ekstrudira. [1] Osim plastomernih materijala, mogu se, uz puno opširniji proces ekstrudirati i duromerni materijali poput smola, ali i elastomeri poput gume. Kod njih je specifično to da, kad se jednom umreže, ne mogu se nikakvim procesima vratiti u prvotno stanje da ih se ponovo preradi. Stoga ekstruderi namjenjeni izradi takvih proizvoda u sebi sadrže geometrije koje pomažu u mješanju reaktanata i proizvodi izlaze sporije iz ekstrudera. [3]

Koekstrudiranje je inačica ekstrudiranja koja omogućuje višeslojno ekstrudiranje različitih polimera. Bilo da su to drugačiji materijal ili samo drugačija boja, koekstrudiranje omogućuje da se materijal lijepo poveže, a najčešće je to u obliku crijevnog filma koji se kasnije prerađuje u vrećice, vreće itd [1]. Slika 1.1 prikazuje primjer alata za koekstrudiranje crijevnog filma u presjeku.

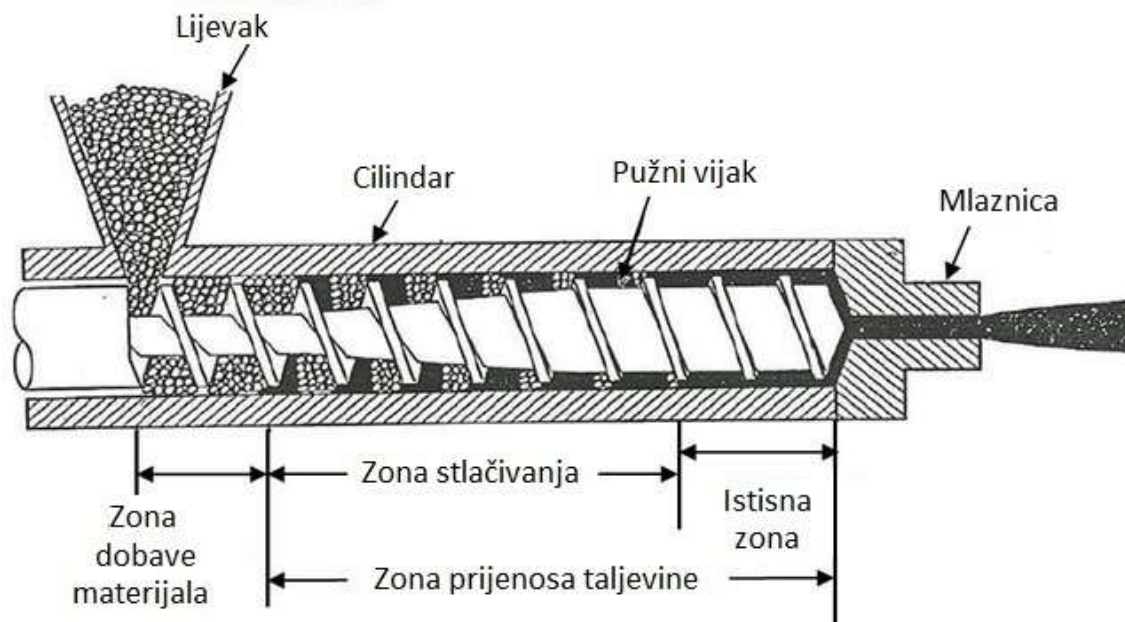


**Slika 1.1 Presjek spiralne glave za koeksudiranje crijevnog filma [3]**

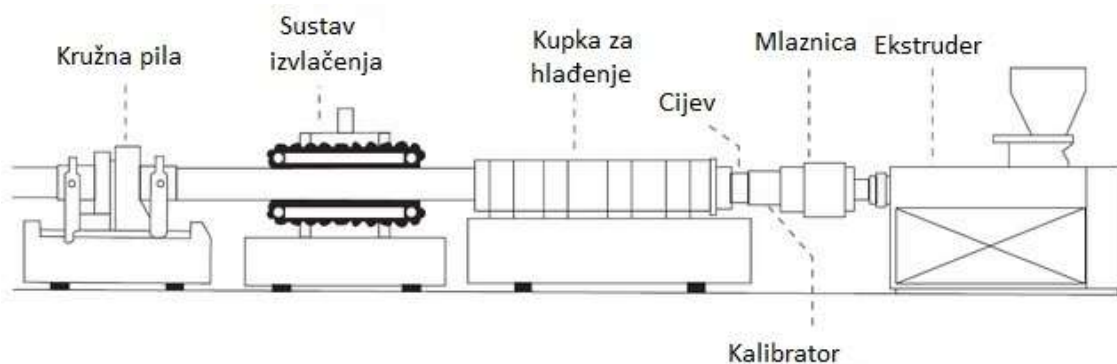
Prema debljini, ekstrudirani proizvodi dijele se u 3 kategorije: ploče, folije i filmove. Filmovi su oni ekstrudirani (ili drugim postupcima poput kalandriranja dobiveni) proizvodi čija je debljina manja od 0,2 mm, folije od 0,2 mm do 2 mm, a sve debljine veće od 2 mm nazivamo pločama. [1]

## 2. EKSTRUDERI

Uređaj koji provodi ekstrudiranje zove se ekstruder, a postoji širok raspon različitih konfiguracija. Da se izradi kvalitetan proizvod uz ekstruder potrebna je cijela linija koja se sastoji od kalibratora, kade za hlađenje ili transportne trake, sustava za povlačenje, namotavalice ili rezalice ako je riječ o krutim proizvodima (Slika 2.2).



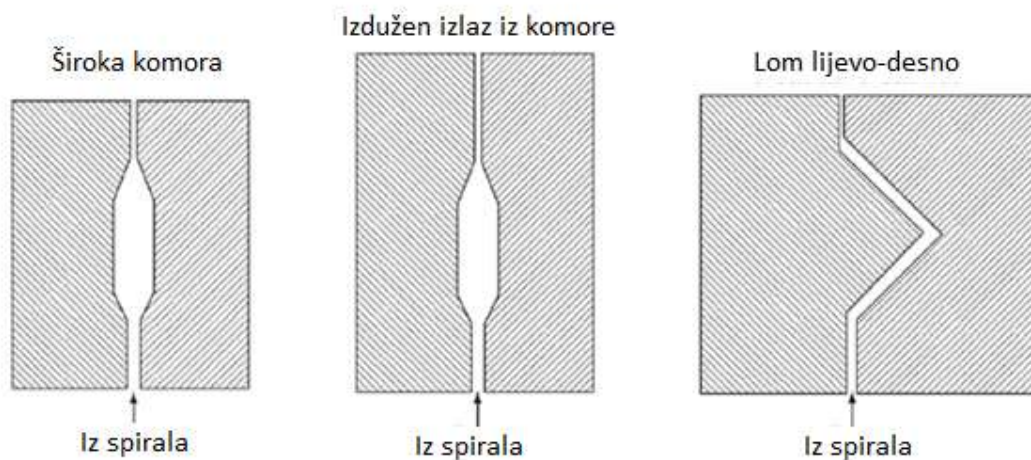
Slika 2.1 Izgled ekstrudera i prikaz zona [3]



Slika 2.2 Linija za ekstrudiranje [3]

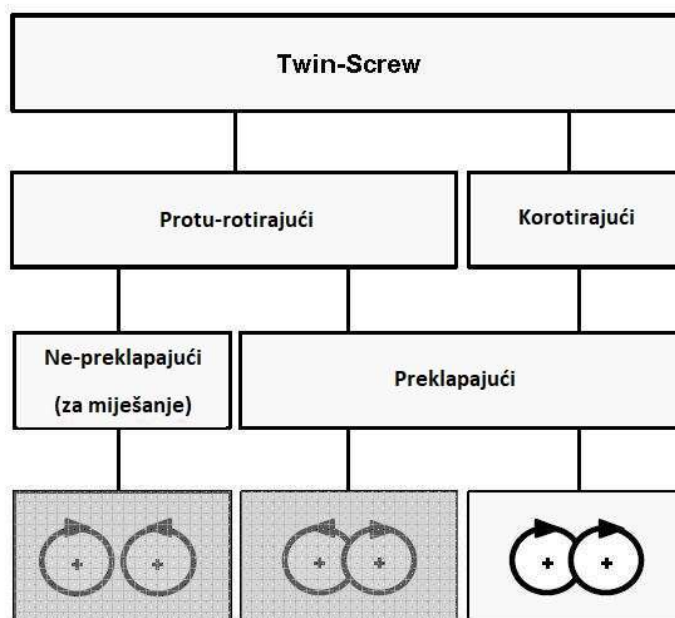
Postupak ekstrudiranja počinje dobavom materijala u lijevak. Lijevak najčešće ima na sebi motor sa ekscentričnim utegom ili piezo aktuator da vibrira i sprječava da se materijal zaglavi na izlazu iz lijevka, odnosno ulazu u ekstruder. Ulaskom u ekstruder, materijal pada između zubi pužnog vijka kojeg goni motor regulirane konstantne brzine. Slika 2.1 lijepo prikazuje kako se materijal dobavlja u ekstruder i vodi kroz njega pužnim vijkom. Pužni vijak (ili pužno kolo)

nalazi se unutar cilindra koji je ujedno i tijelo ekstrudera. Oko cilindra nalaze se grijači elementi koji griju ekstruder po zonama koje su određene geometrijom pužnog vijka. Okretanjem vijka se materijal pomiče kroz cilindar, a trenjem se zagrijava i tali. Grijači izvana služe ili kao pomoć (zona dobave materijala) ili kao sredstvo dobave topline potrebne za taljenje ili održavanje taljevine (istisna zona i mlaznica). Materijal iz zone dobave prelazi u zonu stlačivanja što povećava trenje među česticama i povećava tlak taljevini. Tlačenjem taljevine stvaraju se velika posmična naprezanja koja se po izlasku iz ekstrudera otpuštaju i time oslobađaju narinute elastične deformacije stvarajući proširenje taljevine na izlazu (Slika 2.11) što se smanjuje na način da se materijal nakon zone stlačivanja uvede u istisnu zonu gdje je promjer pužnog vijka veći, ali konstantan. Takva geometrija pomaže materijalu da se „navikne“ na smičnu deformaciju i prilagodi uvjetima visokog tlaka prije samog izlaska iz mlaznice. Presjek kanala za vođenje taljevine na putu do izlaza iz mlaznice pokušava se održavati konstantnim, ali može se pojaviti i manjih proširenja koje omogućuju materijalu popuštanje unutarnjih naprezanja kako primjerice pokazuje Slika 2.3. [3, 4, 5] Nakon istisne zone, materijal pod visokim pritiskom ulazi u mlaznicu koja taljevinu formira u konačan oblik gotovog proizvoda. Odmah po izlasku iz mlaznice se proizvod intenzivno hladi kako bi se taljevina ohladila i proizvod zadržao svoj oblik. Za neke proizvode dobivene ekstrudiranjem vrlo je bitno regulirati dimenziju na način da se ispred hladila stavi kalibrator koji mjeri debljinu ili širinu i šalje taj podatak nazad u kontrolnu jedinicu koja je povezana na izvlačilo. Izvlačilo se najčešće nalazi nakon sustava za hlađenje, a služi za povlačenje proizvoda kroz sustav hlađenja i održavanje napetosti. Kad se sustavom za izvlačenje nebi održavala napetost, došlo bi do deformacija koje mogu znatno pokvariti izgled i svojstva proizvoda. Kako bi se proizvodima lakše baratalo i transportiralo ih se, potrebno je beskonačan proizvod prekinuti rezanjem. Najčešće se u tu svrhu koristi kružna pila ako su u pitanju cijevi, ploče i profili ili oštar nož ako su u pitanju filmovi i folije. Za proizvode poput ploča i cijevi nakon rezanja dolazi paleta kojom se odvoze, a za proizvode poput filmova i folija nakon pile dolazi namotavalica. Ona služi da se proizvod namota u špule i održava napetost nakon izvlačila.



Slika 2.3 Izgled presjeka nekih konstrukcija komora za relaksaciju taljevine [3]

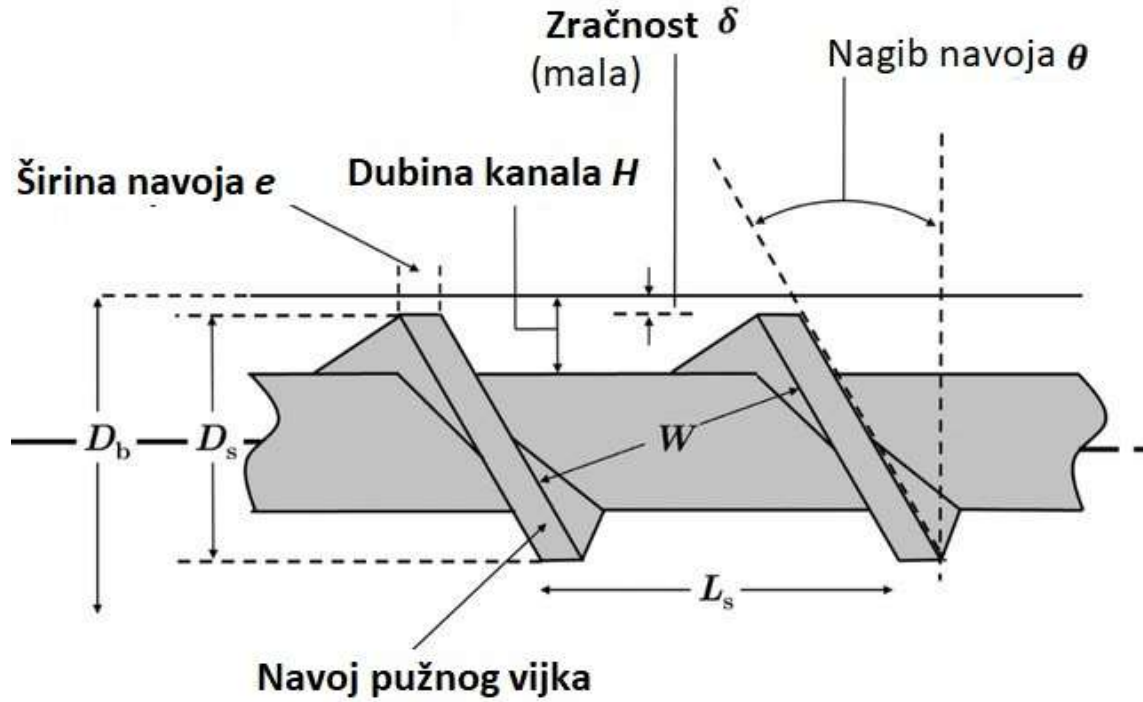
Najjednostavniji je jednopužni ekstruder s tri zone na svom pužnom vijku. Jednopužni ekstruder znači da se unutar cilindra ekstrudera nalazi samo jedan pužni vijak koji tlači materijal, a tri zone govore da je cilindar u kojem se nalazi pužni vijak podijeljen u 3 zone i da se temperatura prerade može mijenjati zasebno u svakoj zoni. Prva zona je uvijek zona dobave materijala jer se nalazi točno ispod lijevka kroz koji se materijal dobavlja. Ona ima najveći volumen i služi da se čim više materijala uvuče u ekstruder. Zatim slijedi zona stlačivanja gdje dolazi do taljenja materijala. Posljednja zona je zona istisna zona gdje dolazi do izjednačavanja tlakova te ona uvelike doprinosi dimenzijskoj stabilnosti taljevine pri izlazu iz ekstrudera. Moguće je da ekstruder ima i dva pužna vijeka, gdje je dodatna podijela prema geometrijama pužnih vijaka te smjeru vrtnje (Slika 2.4). Kad se govori o dvopužnim ekstruderima najčešće korištena konfiguracija ekstrudera u industriji je dvopužni ekstruder s istosmjerno rotirajućim pužnim vijcima koji imaju djelomično preklapanje. Dvopužni ekstruderi imaju najveću primjenu u industriji prerade poli(vinil-klorid)-a (PVC) i za smješavanje. [6, 7]



Slika 2.4 Shematski prikaz podjele dvopužnih ekstrudera [3]

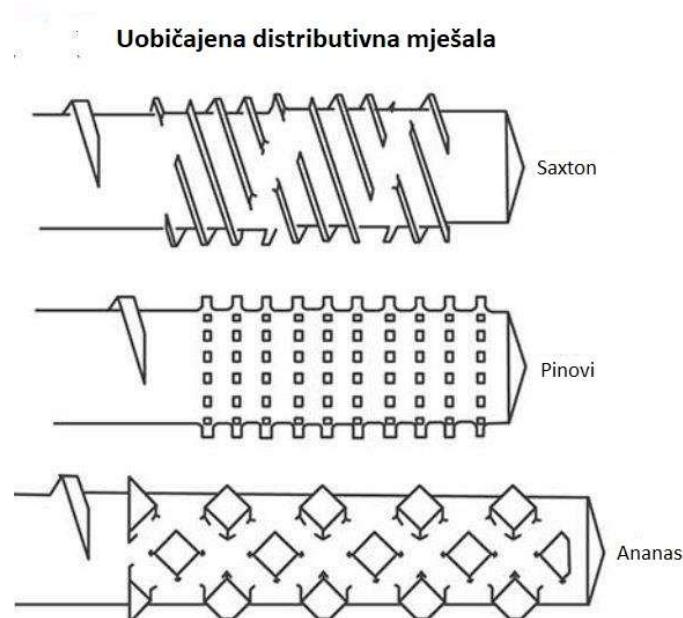
Pužni vijak je pomični dio ekstrudera koji služi tome da materijal (plastomere, duromere, elastomere ili elastoplastomere ili, ponekad u slučaju metala, taljevinu stlači i pogura prema kraju cilindra u kojem se vrti. Pužni vijci izgledom podsjećaju na navojno vreteno, no razmak i veličina navoja su dosta veći s drugačijom geometrijom (Slika 2.5). [3]





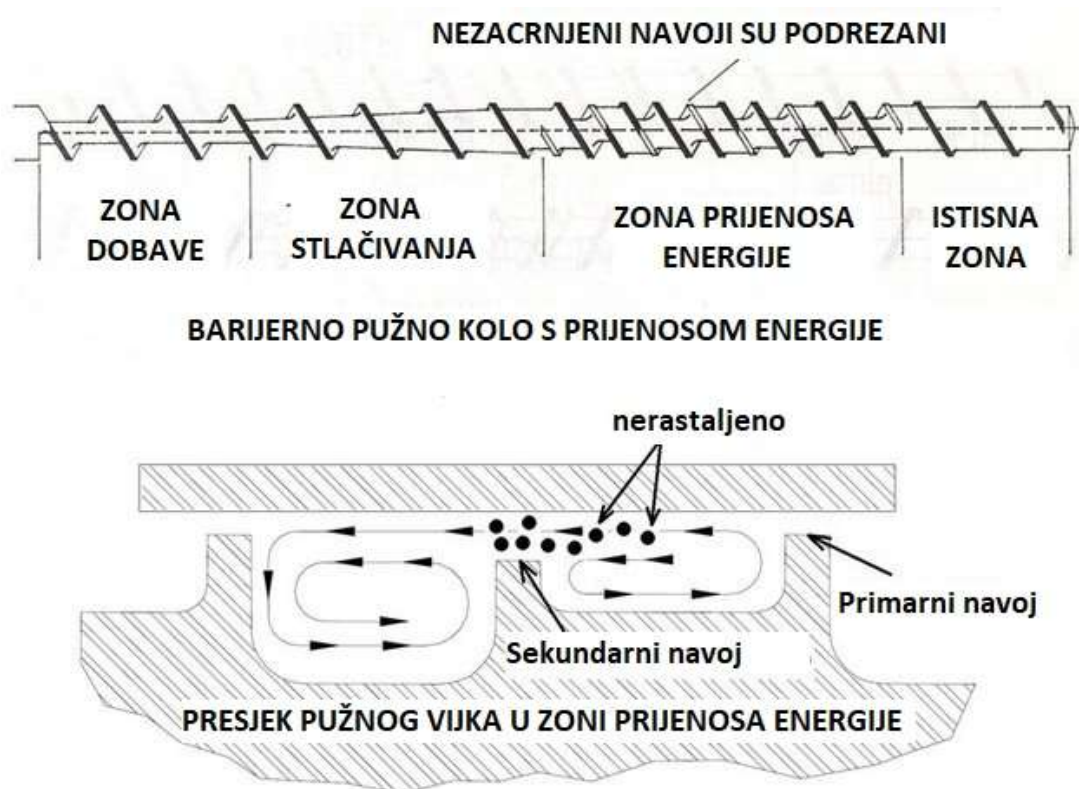
Slika 2.5 Prikaz pužnog vijka sa svim potrebnim dimenzijama [3]

Pužni vijak se nalazi unutar cilindra ekstrudera, a pokreće ga vanjski motor. Slika 2.6 prikazuje primjere navoja za mješanje.



Slika 2.6 Primjeri izgleda djela pužnog vijka namjenjenom za mješanje materijala [3]

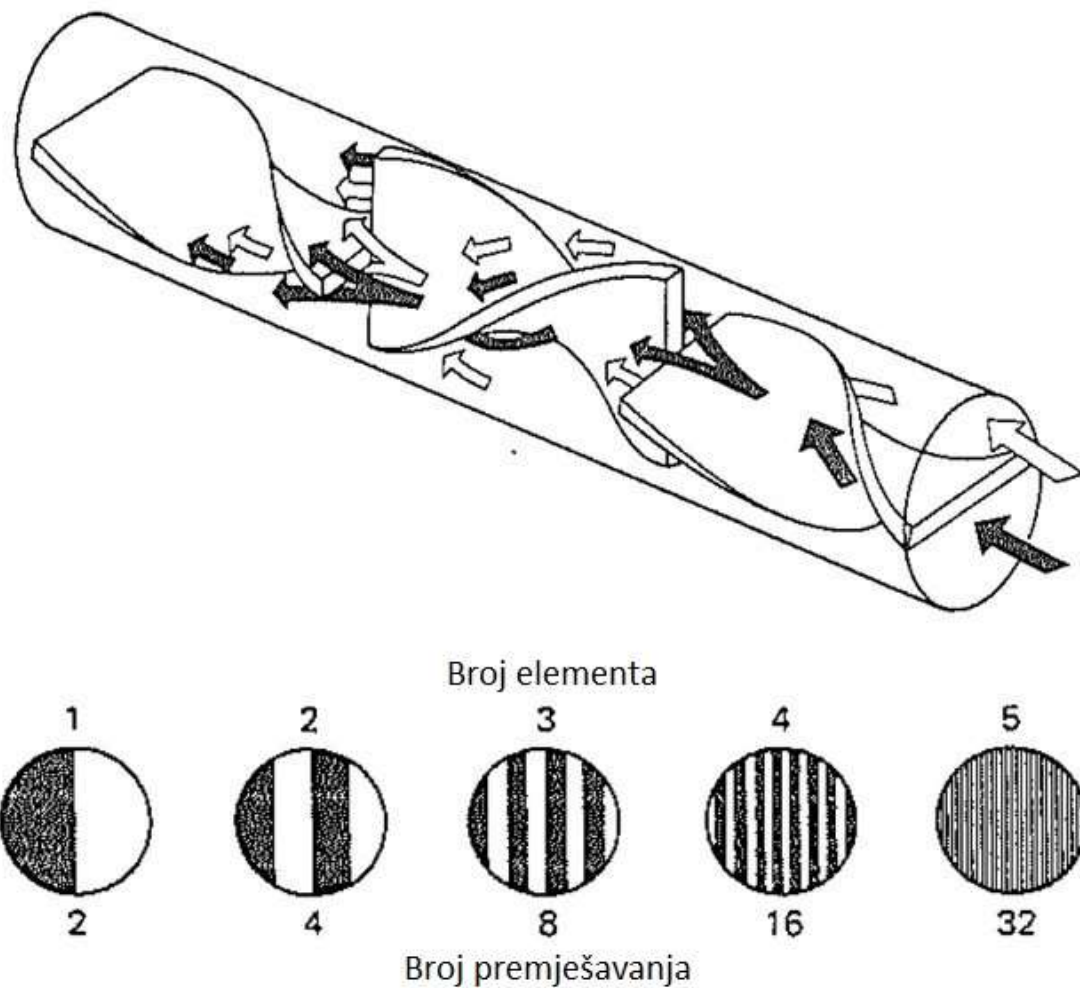
Ponekad se na pužnim vijcima mogu naći i prolazi na vrhovima navoja. Ovi prolazi omogućuju povrat taljevine i nerastaljenog granulata nazad da se zadrži malo duže u zoni stlačivanja i osigura se potpuno taljenje materijala što doprinosi protoku na izlazu. Ta zona zove se zona prijenosa energije, a time što je prolaz na vrhu vijka osigurava se da će granulat ili djelomično rastaljen materijal doći bliže cilindru ekstrudera i primiti više topline koja će osigurati potpuno taljenje (Slika 2.7). [3]



Slika 2.7 Shematski prikaz zona i prijelaza taljevine u zoni prijenosa energije [3]

Ti prolazi omogućavaju recirkulaciju materijala nazad ako je visok tlak ili ako nije materijal dobro rastaljen. Okretanje pužnog vijka uzrokuje pomicanje materijala prema mlaznici ekstrudera, naravno, ako se vrti u pravilnu stranu. Bitna geometrija pužnog vijka je također i samo tijelo pužnog vijka oko kojeg ide spirala. Ono gotovo nikad nije jednoliko po svojoj dužini zato što različitim debljinama stvara različite efekte poput stlačivanja taljevine, njenog odzračivanja, izjednačavanja tlakova i viskoznosti, mješanja smjese itd. [3]

Jedan od načina mješanja polimerne smjese je taj da se na pužnom vijku prekine spirala i na mjestu prekida se nastavi, ali zakrenuta za  $90^\circ$ . [3] Primjer izgleda zone miješanja duž pužnog vijka prikazan je na Slika 2.8.



Slika 2.8 Izgled Kenicksovog statičnog mješala gdje dolazi do mješanja dvaju polimera [8]

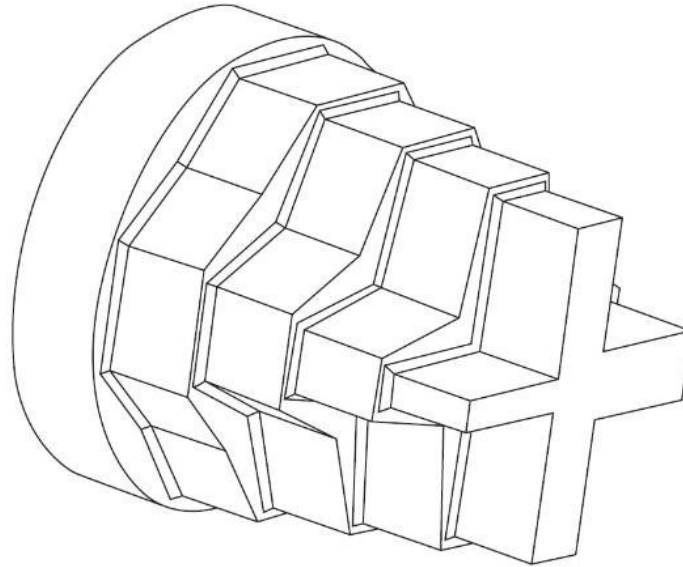
Time se dobiva da ako su se polimeri ili reaktanti držali odvojeno dođe do njihovog cijepanja na pola. Osim što udaraju u vrh navoja i malo se izmješaju, dobije se sličan efekat kao kod izrade kroasana: presavijanje. Dovoljnim brojem presavijanja lisnatog tijesta može se dobiti kroasan sa stotinama tisuća slojeva tankog tijesta. Isto tako ako se cijepanje taljevine ponovi 3-4 puta, dobije se taljevina s  $2^n$  slojeva gdje je  $n$  broj elementa baš kako je prikazano na Slika 2.8. [3, 8]

## 2.1. Mlaznice

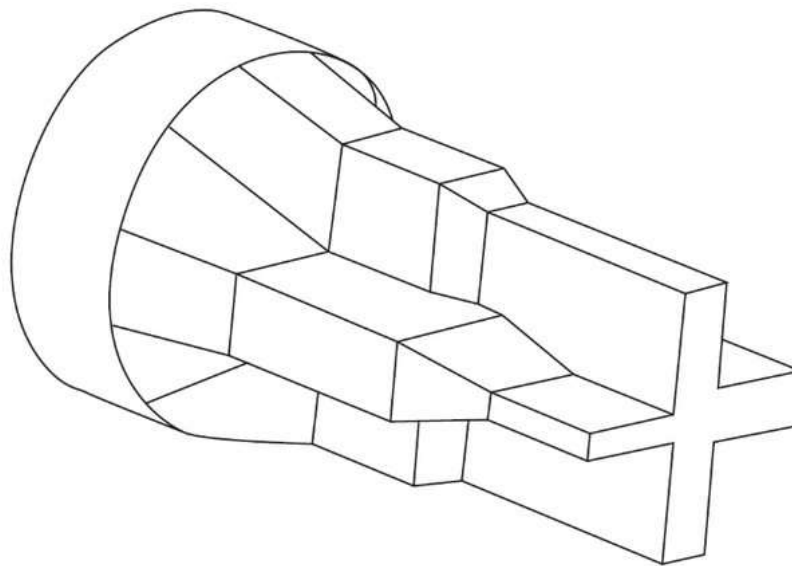
Pri kraju cilindra vrlo često se nalazi sito koje služi da se neželjene uključine poput komadića metala s taljevinom dovuku u (polu)proizvod ili zablokiraju put masi kroz mlaznicu. Mlaznica označava dio ekstrudera koji određuje konačan izgled proizvoda odnosno poluproizvoda. Kao što je ranije spomenuto, proizvodi mogu biti razni profili poput L, I, U, C, T i drugih profila, profila različitih oblika poput pravokutnog trokuta, kvadrata, pravokutnika, kruga, toroida, ali i kompleksnijih profila poput onih za prozore i lajsne. Također, proizvodi i poluproizvodi dobiveni ekstrudiranjem uključuju razne filmove, folije, ploče i trake, razna crijeva pa čak i korugirane cijevi, opruge i žice. Okruglim mlaznicama s dovodom zraka dobiva se jedan izniman proizvod, vrlo redovno korišten u svakodnevnom životu i neophodan za funkcioniranje današnjeg društva: plastična vrećica. Iako ne izlazi iz ekstrudera kao takva, naknadnim zavarivanjem i rezanjem dobije se konačan, prepoznatljiv oblik proizvoda. [3, 6]

Još jedan vrlo popularan proizvod dobiven ekstrudiranjem je i tjestenina. Razni fusili, spaghetti, makaroni i pužići dobivaju se ekstrudiranjem tijesta, no taj ekstruder je malo drugačije geometrije. Cilindar takvog ekstrudera poliran je na svim mogućim plohama da se smanji trenje i da ne dođe do nepotrebnog zagrijavanja smjese. Pužni vijak također ne izgleda kao tipični pužni vijci za ekstrudiranje polimera već su mu navoji dosta veći kao i razmak među njima. Pomalo podsjeća na stroj za mljevenje mesa no drugačija je mlaznica. Kako meso praktički izlazi direktno kroz sito, može se reći da sito u tom slučaju i jest mlaznica. Kad su u pitanju kobasice, tu ekstruder ipak ima mlaznicu, ali ona više služi za usmjeravanje proizvoda nego oblikovanje. Također, izrada kobasica je cilkički postupak jer se ne može odvijati bez ljudske intervencije i kratkog pauziranja procesa: zamjene crijeva, odnosno kolagena u koji se kobasice pune.

Najveću ulogu u obliku konačnog proizvoda igra upravo alat za ekstrudiranje, odnosno mlaznica. Pravilnim dimenzioniranjem i izradom mlaznice mogu se dobiti poprilično kompleksni oblici, a ono uključuje pred-deformaciju oblika da materijal prilikom izlaska svojim svojstvom proširenja mlaza ne promjeni izgled konačnog proizvoda (Slika 2.9 i 2.10). Efekt proširenja mlaza (Slika 2.11) može se suzbiti na više načina, a to je najčešće riješeno tako da se postupno mijenja geometrija od okrugle koja je izgled otvora pred sitom prema izgledu konačnog proizvoda. [9]

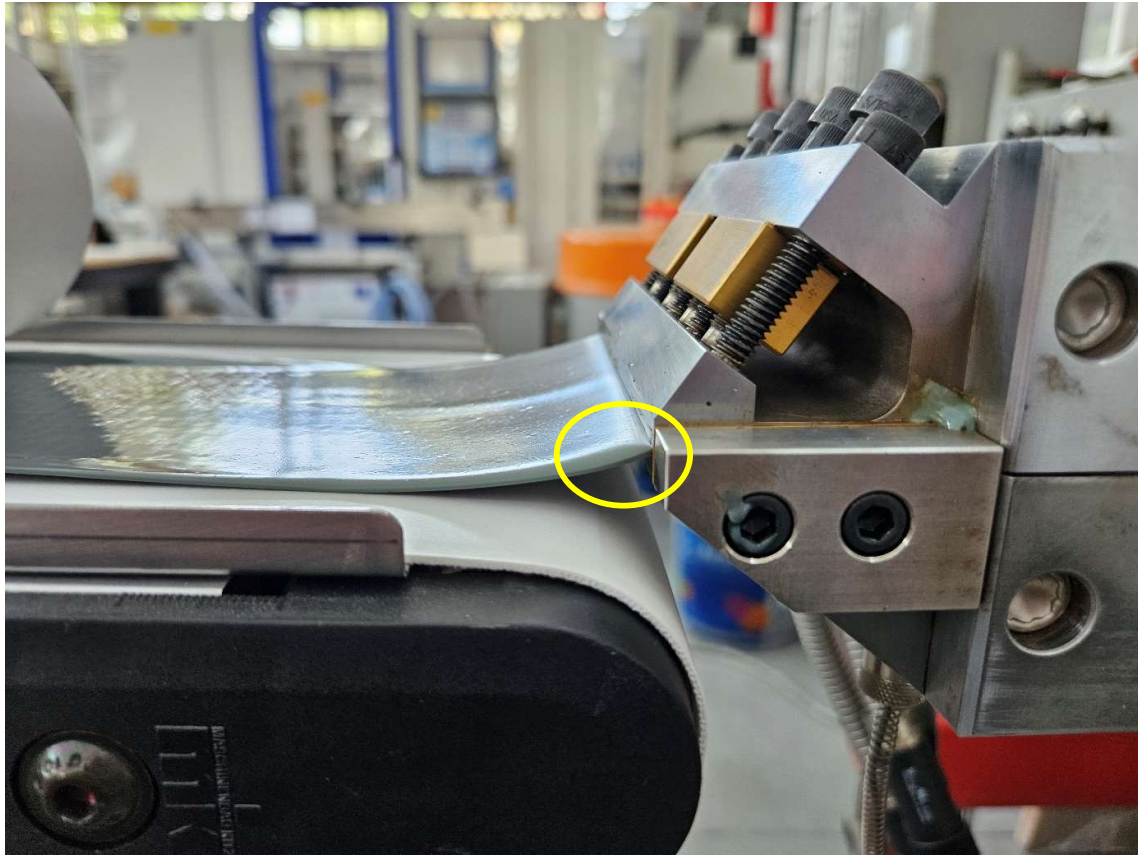


**Slika 2.9** Stepenasti prijelaz s okruglog ulaza u alat ekstrudera k izgledu konačnog profila na izlazu iz ekstrudera [9]



**Slika 2.10** Blaži prijelaz s okruglog profila k konačnome [9]

Vrlo često rješenje je i produljivanje zone istiskivanja gdje se materijal drži pri temperaturi i tlaku nebi li mu se relaksirala struktura i unutarnje deformacije i time postiglo da deformacija na izlazu bude čim niža. [3]

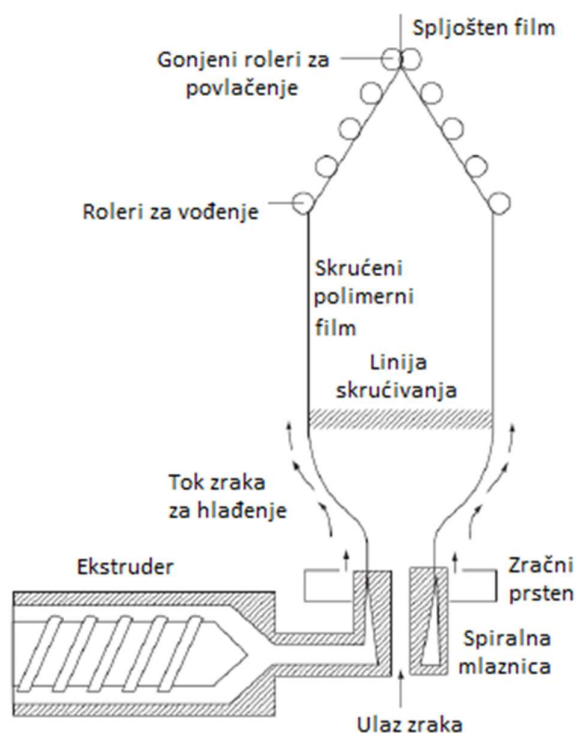


**Slika 2.11** Bubrenje taljevine (proširenje mlaza) na izlazu iz širokousne mlaznice

### 3. IZRADA POLIMERNIH FILMOVA I FOLIJA POSTUPKOM EKSTRUDIRANJA

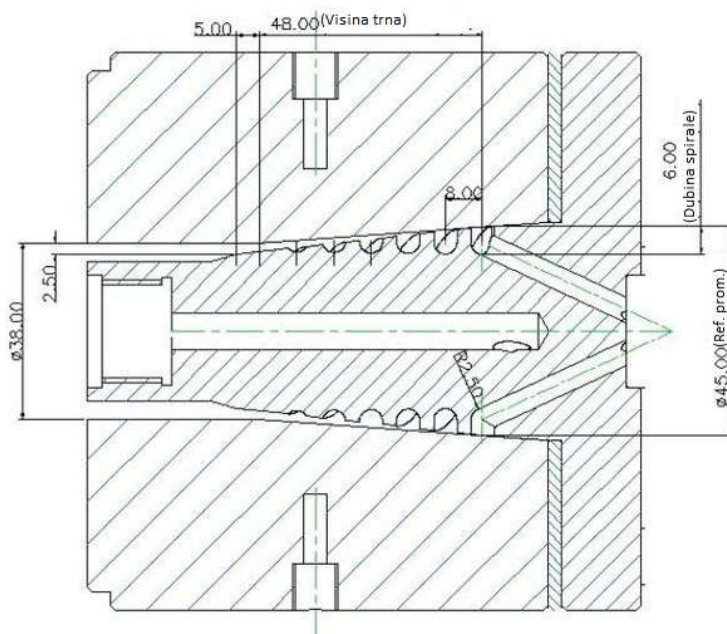
#### 3.1. Ekstrudiranje crijevnog filma

Uvođenjem zraka u postupak ekstrudiranja, otvorila se jedna skroz nova dimenzija proizvodnje. Ekstrudiranje crijevnog filma (Slika 3.1) kontinuiran je postupak ekstrudiranja kojim se dobiva širok raspon šupljih, tankostjenih proizvoda. Debljine stijenke variraju od 0,01 mm do 0,5 mm dok se širine procijepa na mlaznici kreću od 0,76 mm do 3 mm. [10]



Slika 3.1 Skica ekstrudiranja crijevnog filma [3]

Sam postupak ekstrudiranja nastao je zbog rasta potrebe za savitljivom plastičnom ambalažom. Postupak ekstrudiranja crijevnog filma (slika 3.2) vrlo je sličan postupku ekstrudiranja kroz širokousnu mlaznicu, ali se najčešće ekstrudira u vertikalnom smjeru gdje zrak širi polimerni materijal prema rolerima koji osiguravaju da se crijevo ne prenapuše, a i pomažu voditi crijevo prema daljnjim koracima prerade. Tlakovi zraka u crijevu variraju od 1,7 bar čak do 10 bar ovisno o materijalu i debljini stijenke. Zbog tanjih stijenki i prisutnosti zraka pod tlakom, ovaj postupak dosta je teže podesiti od klasičnog ekstrudiranja širokousnom mlaznicom. To je vrlo zahtjevan postupak podešavanja parametara jer prevelik tlak zraka rezultira tanjom stijenkom i moglo bi doći do prepuhavanja i stvaranja lokaliziranih slabih točaka, dok premali tlak bi značio deblju stijenku, ali na teret njene dimenzijske stabilnosti. [11]

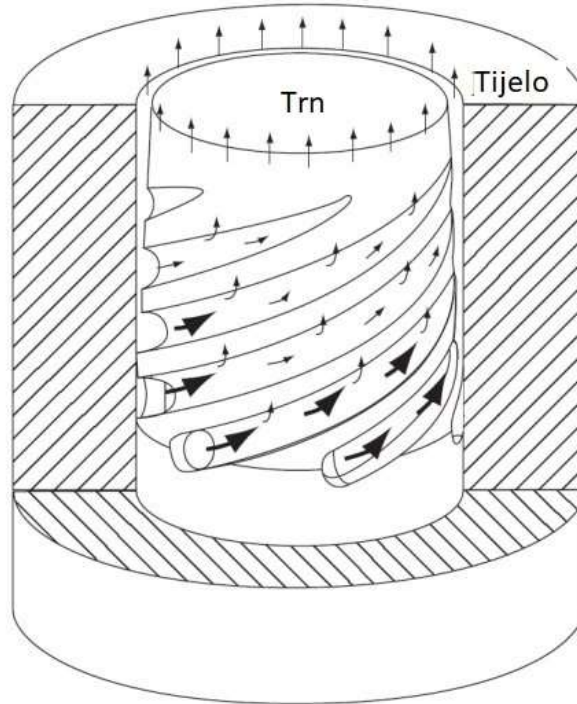


Slika 3.2 Presjek mlaznice za ekstrudiranje crijevnog filma [12]

Najčešće upotrebljavani materijali u ekstrudiranju crijevnog filma su polietilen niske gustoće (PE-LD), linerani polietilen niske gustoće (PE-LLD), polietilen visoke gustoće (PE-HD), kopolimeri etilena i kopolimeri polipropilena te poliamid (PA) i poli(vinil-klorid) (PVC). Razvoj PE-LLD (linearnog polietilena niske gustoće) omogućio je da se ekstrudiranje crijevnog filma digno na višu razinu odnosno niže debljine stijenke zbog svoje odlične izvlačivosti. Izvlačivost je svojstvo materijala koje govori koliko ga se može razvući prije nego se podere. Iako PE-LLD ima odličnu izvlačivost, njegova niska čvrstoća pri temperaturama blizu temperature taljenja znatno otežava njegovu primjenu, no u mješanju s PE-LD u omjeru 70:30 (PE-LD:PE-LLD) znatno poboljšava mogućnost prerade. [6]

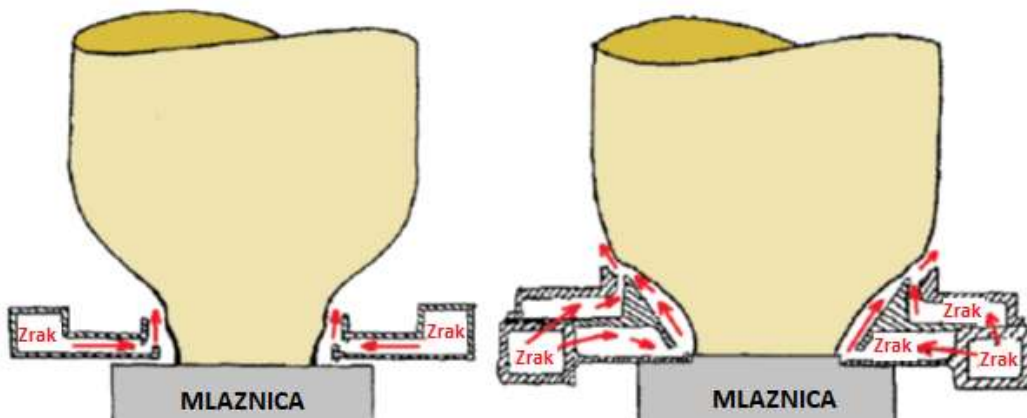
Jedan od problema koji se javljaju pri ovom procesu je neujednačenost promjera prilikom hlađenja. Kako je crijevni film toliko tanak i savitljiv, vrlo ga je teško voditi kroz neke alate stoga ga se vodi zrakom i povlači rolerima. Na središnjem djelu podupire ga nekoliko seta rolera ili puhalica zraka koji osiguravaju da se proizvod ne širi previše, no oni ne mogu zagarantirati 100 % dimenzijsku stabilnost. Iz tog razloga preporuča se da se crijevni film rotira kako nebi kod namatanja na role došlo do gomilanja jedne dimenzijske greške na jednom mjestu nego da se ona, ako postoji, konstantno miče. Najupotrebljavanije rješenje zasad je mlaznica sa spiralnom glavom shematski prikazana na Slika 3.3 koja svojom geometrijom tjera da se polimerna taljevina konstantno zakreće što ima utjecaj cijelom dužinom. Nakon izlaska iz spiralnog djela, taljevina ulazi u male komore koje kao i kod širokousne mlaznice pomažu pri relaksaciji smičnih naprezanja i deformacija unutar materijala. [13]





Slika 3.3 Shematski prikaz alata za ekstrudiranje crijevnog filma u polovičnom presjeku [13]

Nakon izlaska iz mlaznice, crijevni film se odmah kreće hladiti strujom zraka izvana, a najčešće i iznutra. Alat za hlađenje izvana zove se zračni prsten (Slika 3.4) i njegova zadaća je osigurati da taljevina dobiva pravilno hlađenje, ali i potporu da gravitacija ne povuče nazad taljevinu i ne presavije ju preko sebe. [3]



Slika 3.4 Funkcionalni prikaz prstena za hlađenje [3]

Upravo ti prsteni za hlađenje su najčešći limitirajući čimbenik prilikom ekstrudiranja crijevnog filma radi svog kapaciteta hlađenja. Prevelika brzina zraka izvana značila bi deformiranje crijeva prema unutra što se može suzbiti povišenjem tlaka iznutra, no na većim visinama gdje zrak s prstena za hlađenje ne doseže, unutarnji tlak može raširiti i stanjiti crijevo dovoljno da se ono raspasa. [11]

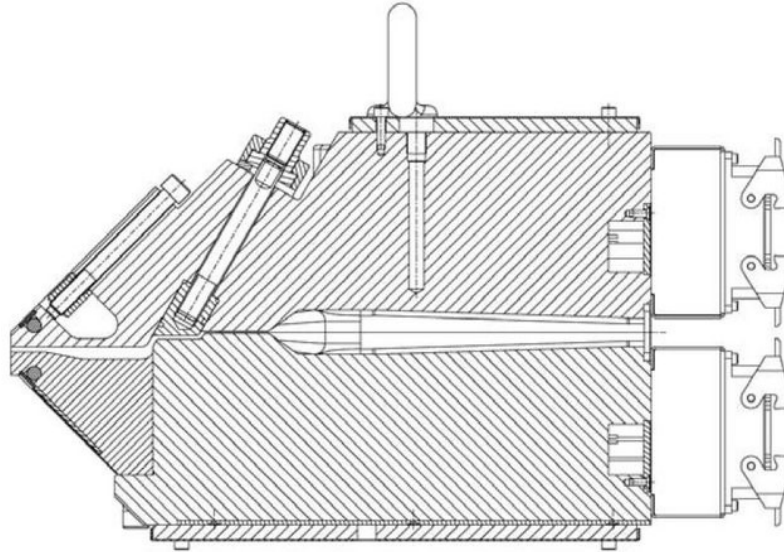
### 3.2. Ekstrudiranje sa širokousnom mlaznicom

Širokousna mlaznica pojam je koji označava alat za ekstrudiranje filmova, folija i ploča. Najčešće se primjenjuje za prevlačenje raznih platna od različitih materijala (tkanina, plastične mase, papir, itd.) ili za proizvodnju traka koje se kasnije primjenjuju za izradu proizvoda poput samoljepljivih traka ili jačih ručki za nošenje vrećica za kupovinu. Vrlo dobar primjer primjene širokousne mlaznice je izrada polikarbonatnih ploča koje se primjenjuju za zaštitu kao prozori, ali umjesto stakla. Također, bitan proizvod napravljen širokousnom mlaznicom su i geomembrane koje se primjenjuju za izolaciju građevinskih objekata od utjecaja vlage iz zemlje. Malo bliži proizvod normalnom korisniku bio bi plastični film koji se primjenjuje za zamatanje sendviča i plata s narecima. Iako širokousna mlaznica proizvodi ploče, filmove i folije, razlika u odnosu na iste proizvode dobivene kalandriranjem je značajna. Ekstrudiranje daje vrlo anizotropna svojstva u smjeru ekstrudiranja dok kod kalandriranja smjer ne igra toliku ulogu. Druga velika razlika je ta da kalandriranje zahtjeva čvrstoću materijala pri temperaturama blizu temperature tališta, a to ima PVC. [6, 7] PE i PP mogu biti kalandrirani, ali vrlo rijetko zbog niske čvrstoće pri temperaturi blizu temperature taljenja, no ako se i upotrebljava, najčešće je to u raznim laminatima. Kalandriraju se i razni drugi materijali poput prirodne gume (kaučukovca), silikonske gume, etilen/propilen/dienski kaučuk (EPDM) i još nekih drugih. Sve ostale materijale se ekstrudira kroz širokousne mlaznice ako se želi dobiti film, folija, ploča, ili neki drugi proizvod ili poluproizvod. Za razliku od kalandriranja, ekstrudiranje daje puno bolja optička svojstva za proizvode poput akrilnih ploča ili pakiranja proizvoda poput omota u prehrambenoj industriji. Ekstrudiranje kroz širokousnu mlaznicu se također intenzivno primjenjuje i za izradu tetrapaka. [6]

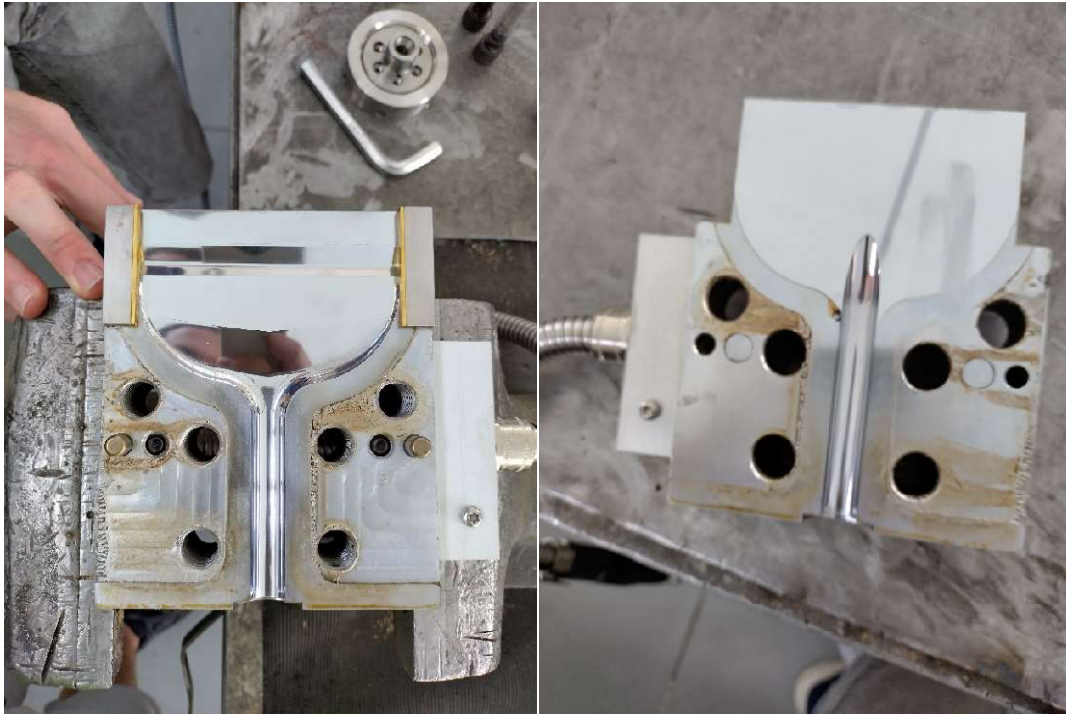
Na slici 3.5 prikazan je presjek širokousne mlaznice, a na slici 3.6 stvarni izgled otvorene širokousne mlaznice.

Sama konstrukcija širokousne mlaznice sastoji se od Gornje i donje polovice obje prikazane na slici 3.6. Donja polovica je jednostavna: Ima provrte za vijke za pritezanje gornje polovice, grijač sa termistorom ugrađen i poliranu gornju plohu koja je ploha dosjeda sa gornjom polovicom te polovicu kanala za dovod plastične mase. Gornja pak je polovica malo kompliciranije izvedbe jer na sebi, osim druge polovice dovodnog kanala i grijača sadrži i šupljinu u obliku lopatice odnosno vješalice kad je šira prema čemu je i dobla englesko ime *coathanger die*. Na gornjoj polovici se nalaze navoji na koje se love vijci za stezanje polovica mlaznice kao i usna za podešavanje. Sa svake strane šupljine mlaznice nalaze se dva manja bloka koji pritežu mjedene pločice uz obje polovice i time blokiraju izlaz taljevine sa strane.

Usna za podešavanje je jedan od najbitnijih dijelova širokousne mlaznice jer je odgovorna za podešavanje debljine proizvoda kao i protoka materijala. Usna na sebi ima dva seta vijaka: jedan koji postavlja položaj usne, a drugi koji zaključava položaj usne protustezanjem. Drugi dio koji spada među najbitnije djelove je ulegnuće u šupljini mlaznice jer to ulegnuće služi kao način za popuštanje zaostalih smičnih napreznja što uvelike doprinosi dimenzijskoj stabilnosti. Mlaznica nema sustav hlađenja već je vrlo termički troma i u njoj se neće dogoditi toplinske nestabilnosti poput *thermal runaway*-a (temperatura krene nekontrolirano rasti) ili naglog pada temperature zbog same mase čelika u pitanju.



Slika 3.5 Presjek širokousne mlaznice [14]



**Slika 3.6 Gornja (lijevo) i donja (desno) polovica širokousne mlaznice**

## 4. PRAKTIČNI DIO

Ekstrudiranje filmova i folija je postupak u kojem i najmanje varijacije u parametrima prerade mogu prouzročiti vrlo velike razlike. Parametri ekstrudiranja su brojni i utjecaj svakog od njih je nezamariv. Najbitniji parametri su temperatura i brzina vrtnje pužnog vijka. Bez pravilnog postavljanja temperature, sustav ne može uopće ni krenuti s radom. Ekstruder ima četiri zone grijanja: tri raspodjeljene po dužini cilindra i četvrta temperatura mlaznice. Pravilnim postavljanjem temperatura svake zone dobiva se ravnomjerno taljenje. Prva zona nalazi se neposredno nakon lijevka za dobavu, a njena temperatura je najčešće postavljena na temperaturu taman ispod temperature taljenja polimera. Time se osigurava da se polimer neće lijepiti za pužni vijak ili stijenke cilindra te da će se dovoljno omekšati za sljedeću zonu. Sljedeća zona je zona stlačivanja i ovdje je jako bitno pažljivo odabrati temperaturu da se osigura balans između taljenja trenjem i toplinom grijača. Ako je temperatura zone postavljena previsoko, neki materijali mogu degradirati, dok preniska temperatura neće dovesti do potpunog taljenja. Treća zona je zona istiskivanja i u njoj dolazi do homogenizacije tlaka, temperature i viskoznosti materijala što je vrlo bitno za konačno oblikovanje. Utjecaj grijača ovdje osigurava idealne uvjete za protok materijala. Pri previsokoj temperaturi materijal bi mogao biti previše rastaljen, dok pri preniskoj temperaturi viša mu je viskoznost i time se otežava protok materijala kroz cilindra/mlaznicu. Poslijednja zona je sama mlaznica koja je također grijana. Ona može biti duga i po nekoliko desetaka centimetara ovisno o prilagodbi materijala na oblik. Grijanje mlaznice najbitnija je zona jer ona direktno utječe na izgled gotovog proizvoda. Držanjem temperature u preciznome rasponu sprječava se iskrivljenje, površinske neravnine i defekti i tragovi smjera ekstrudiranja. Ako temperatura mlaznice nije dobro podešena, može doći do sniženja optičkih svojstava i izgleda površine pojavom loma taljevine ili tzv *sharkskin-a*. [15, 16, 17]

Sljedeći parametar koji igra vrlo veliku ulogu je broj okretaja pužnog vijka u minuti (sekundi, satu). Pravilnim odabirom broja okretaja osigurava se maseni protok materijala kroz ekstruder. Prevelik broj okretaja može dovesti do povišenja tlakova i oštećivanja ekstrudera, dok premali broj okretaja može dovesti do premalog trenja među česticama koje za posljedicu ima loše taljenje i nepravilan protok. Prevelik broj okretaja također može dovesti i do oštećivanja opreme tako što će uzrokovati povišene tlakove u ekstruderu i u jednom trenutku neki dio neće moći izdržati pritisak i oštećenje će nastupiti naglo. Bubrenje protoka pri izlazu iz mlaznice i orijentacija polimernih lanaca su također posljedica prevelikog broja okretaja. [18]

Širina otvora širokousne mlaznice igra ogromnu ulogu što se tiče dimenzija proizvoda i protoka taljevine. Premali otvor i u ekstruderu će se nabijati tlak dok će prevelik otvor uzrokovati nestabilan protok. Uski otvor može rezultirati i defektima ekstrudiranja poput *sharksin-a* ili loma taljevine što je vrlo nepovoljno zbog lošeg izgleda površine. Bubrenje taljevine pri izlazu može biti problem kod većih otvora mlaznice pošto omogućuje veću relaksaciju materijala. Stoga je vrlo bitno pronaći neki optimum razmaka među usnama širokousne mlaznice. Vrlo bitno je osigurati to da cijelom dužinom mlaznice širina otvora bude što ravnomjernija jer

nejednakosti dovode do nejednakih tokova i tlakova i to može utjecati na izgled konačnog proizvoda (slika 4.1 i 4.2), ali i na mehanička svojstva, primarno izotropnost svojstava. [3]



**Slika 4.1.** Posljedica neujednačeno postavljenog razmaka među usnama širokousne mlaznice



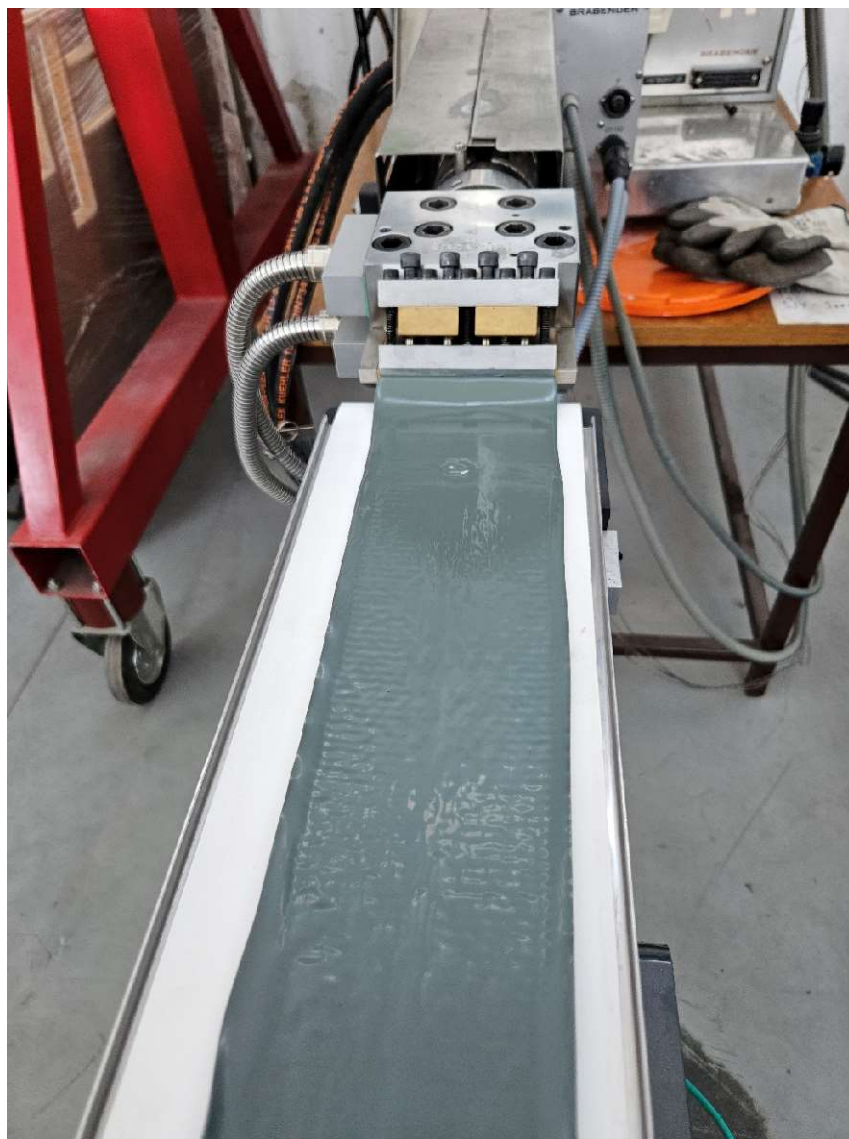
**Slika 4.2. Prikaz dobro postavljenog (lijevi dio mlaznice) i loše postavljenog (desni dio mlaznice) razmaka među usnicama širokousne mlaznice**

Uz ekstruder kako je spomenuto i prikazano na Slika 2.2, da se dobije kvalitetni proizvod potrebno je imati i ostale elemente linije za ekstrudiranje. Glavni element u liniji je i traka za hlađenje, te je time i zadnji bitni parametar pri preradi brzina trake za hlađenje. Prilikom ekstrudiranja širokousnom mlaznicom primjenjuje se traka za hlađenje sa okolnim zrakom (ili sustavom ventilatora), a ne kade za hlađenjem u kojoj cirkulira voda. Traka je bolja zato što se na njoj vrlo često nalaze i polirani valjci koji doprinose kvaliteti površine, a kako su hlađeni, tako i sami pomažu hlađenju, ali i kontroli debljine proizvoda. Prolazak filma ili folije kroz površinu vode mogao bi imati dovoljno otpora da deformira površinu i samim time upropasti proizvod, a za neke materijale poput polikarbonata (PC) ili poli(metil-metakrilata) (PMMA) prisutstvo vode nije poželjno zbog absorpcije vode. Još jedan plus u odnosu na kadu je taj da se brzina traka može podesiti brzinom višom od brzine ekstrudiranja i time dodatno razvlačiti materijal što će ga suziti, ali i stanjiti.

Kroz praktični rad, bilo je potrebno varirati sve parametre i proučavati njihov utjecaj na konačan proizvod.

## 5. REZULTATI

Prema slikama prikazanim u ovom poglavlju može se primjetiti utjecaj parametara prerade na debljinu i širinu filmova nastalih ekstrudiranjem kroz širokousnu mlaznicu. Postupak ekstrudiranja prikazan je s polietilenom. Na slici 5.1 prikazan je film vrlo nepravilan, nejednakih dimenzija s vidljivim varijacijama u širini i debljini trake i loše površinske kvalitete. Kroz podešavanje parametara ekstrudiranja (temperature po zonama, brzine ekstrudiranja i brzine trake za hlađenje) postignuti su puno bolji rezultati.

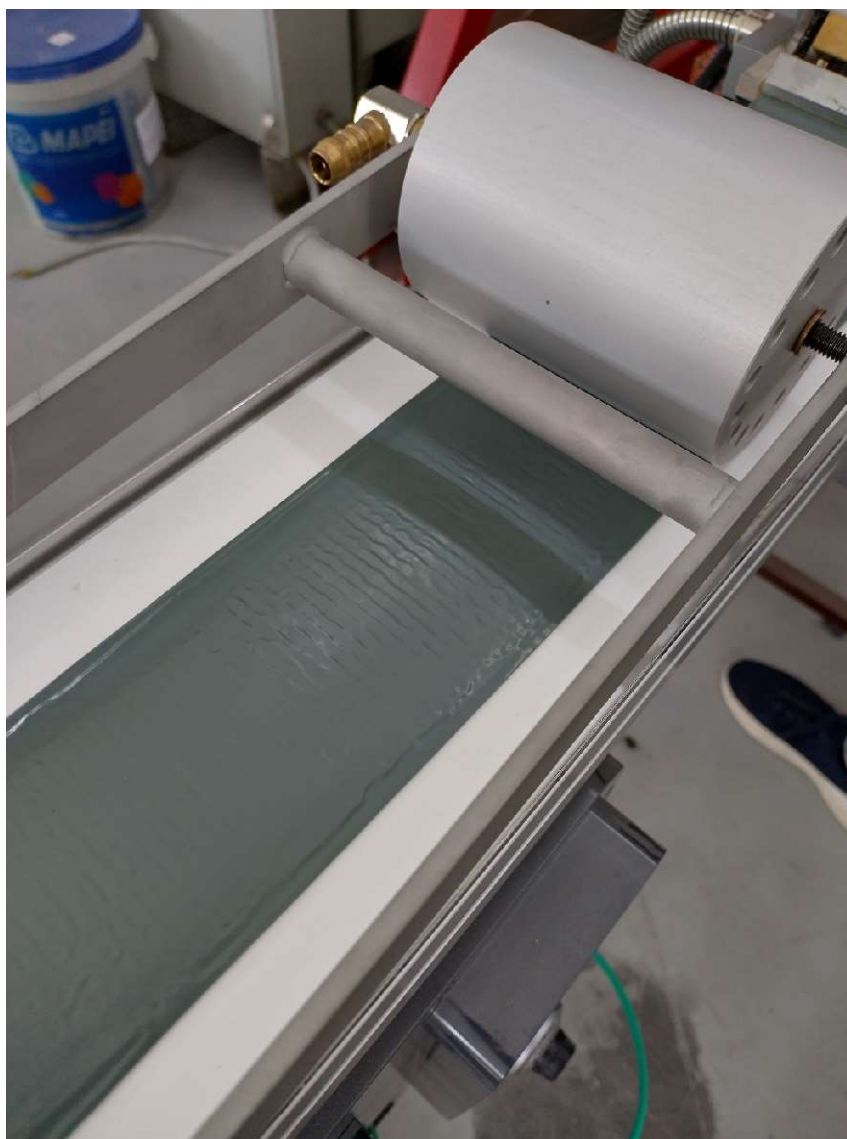


**Slika 5.1 Prikaz lošeg proizvoda nastalog ekstrudiranjem**



Na slici iznad, jasno su vidljive površinske neravnine, savijanje i bubrenje rubova kao i pad taljevine bliže traci. Velik dio tih problema riješen je povišenjem brzine trake. Kako je brzina traka brža od ekstrudata, ona ga lagano razvlači i samim time stanjuje i sužuje osiguravajući bolju dimenzijsku stabilnost. Razvlačenje ekstrudata također zateže površinu pa ne dolazi do neravnina i smanjuje se bubrenje krajeva, odnosno rubova.

Dodavanjem valjka (slika 5.2) pri izlasku ekstrudata iz mlaznice, situacija se mijenja drastično. Dobiva se puno bolja površinska kvaliteta i veća dimenzijska stabilnost širom, ali i duž filma. Brže se i hladi što doprinosi da se filmu praktički zamrzne dimenzija i ne dođe do deformiranja krajeva ili sredine kao pri sporijim izvlačenjima bez valjka.

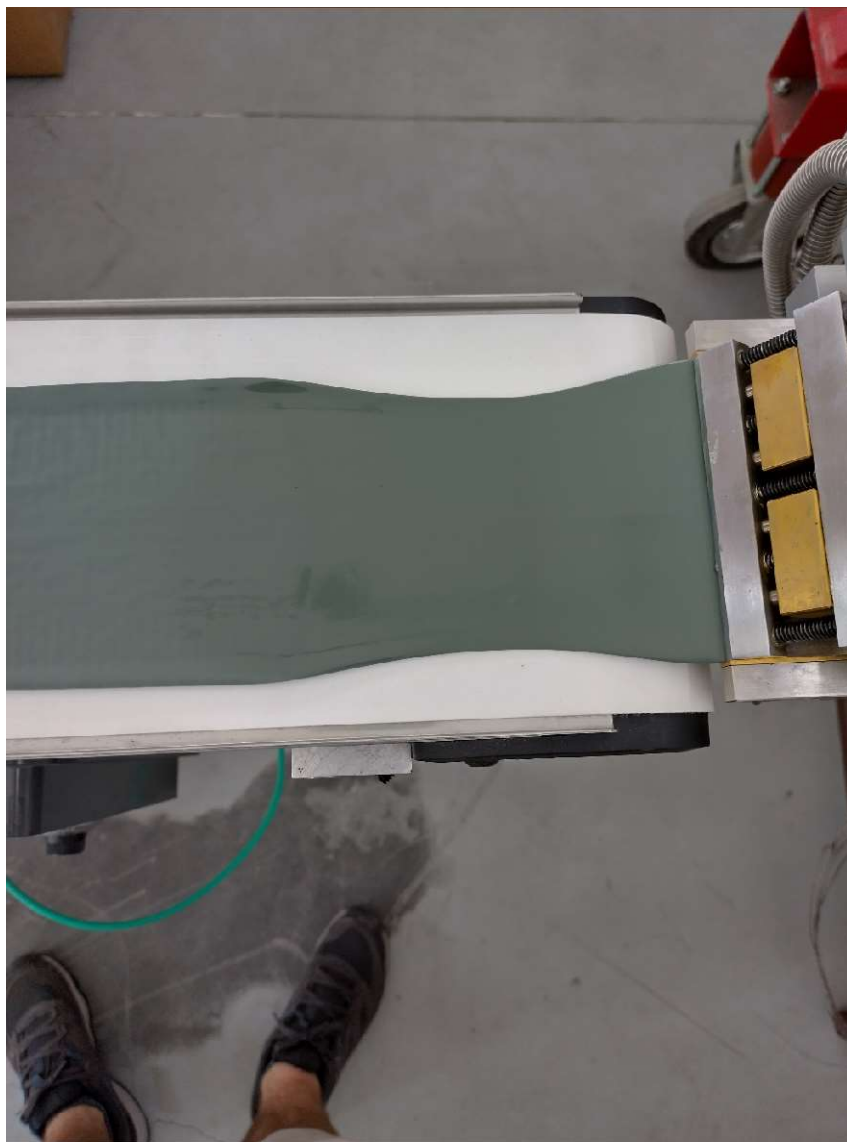


**Slika 5.2 Utjecaj valjka bez promjene parametara u odnosu na sliku 5.1**

Slika 5.2 vrlo lijepo prikazuje i površinske neravnine koje se događaju nepravilnim hlađenjem i izvlačenjem trake.

Slika 5.3 jasno prikazuje utjecaj brzine trake za hlađenje na izgled površine jer se jasno vidi kako se površina zategne i polimerni film suzi. Upravo taj efekt je ono što omogućuje ekstrudiranom materijalu da postigne svoju površinsku kvalitetu.

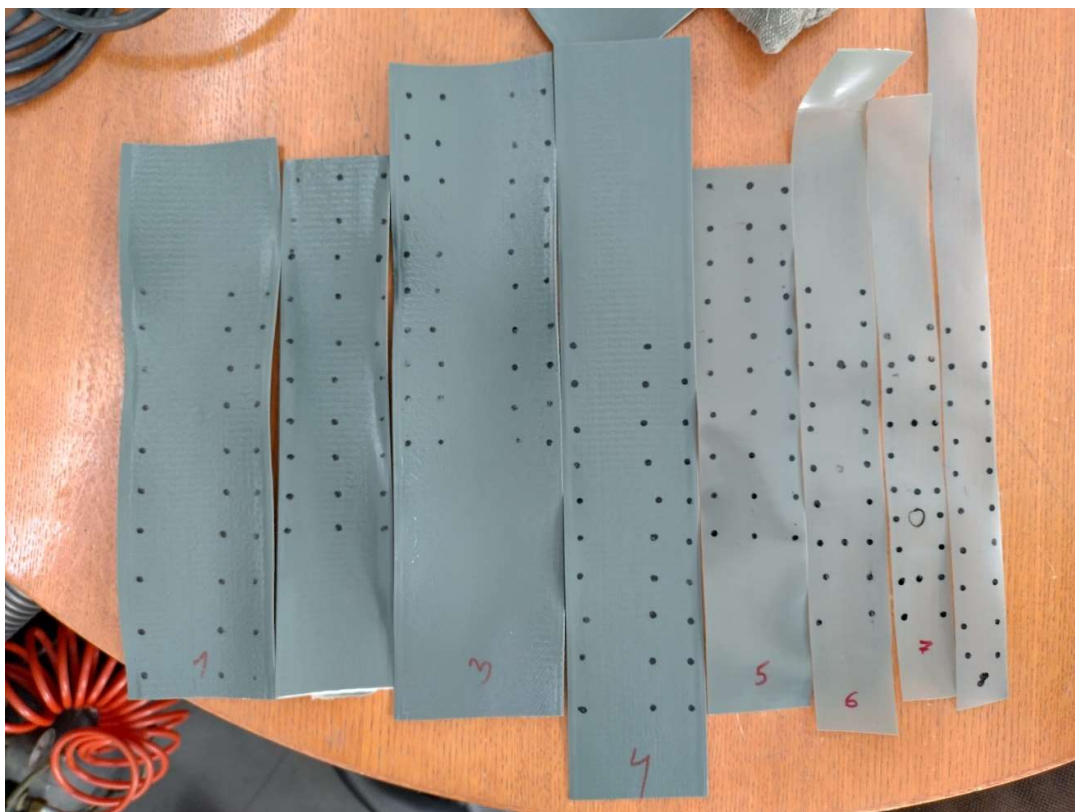
Rezultati pokusa pokazuju upravo ono što je bilo i očekivano. Niže brzine trake za hlađenje daju neravnomjernije rezultate i deblje proizvode, dok više brzine daju tanje proizvode sa stabilnijim dimenzijama.



**Slika 5.3 Utjecaj povišenja brzine iznad brzine izlaza ekstrudata**

Mjerenja traka napravljena su digitalnim debljinomjerom duž ekstrudirane trake u deset točaka na tri mjesta po širini. Dva mjesta ako je traka uža i četiri mjesta za najširu traku kako bi se pokazala distribucija materijala po dužini i širini. Standardna devijacija ne prikazuje baš najjasnije kako podatci odstupaju tako da uvođenjem koeficijenta varijacije CV se može bolje vidjeti odstupanje podataka od srednje vrijednosti debljine trake. Koeficijent varijacije je postavljen tako da pokazuje koliki postotak visine čini ukupan raspon podataka za mjerenja uzduž trake. Čim je koeficijent varijacije veći, to je raspon vrijednosti između minimuma i maksimuma mjerenja veći. Iako nije ista mjera za sve trake, odstupanje od 0,1 mm nije isto za debljine 1 mm i 0,4 mm.

Između mjerenja mijenjani su brzina ekstrudiranja, odnosno broj okretaja pužnog vijka, brzina trake i temperatura mlaznice. Temperatura zone dobave postavljena je na 165 °C, zona stalčivanja i istisna zona na 170 °C i konačno mlaznica na 180 °C uz broj okretaja pužnog vijka od 110 okr/min i brzine rake postavljene na 51. Kako uz broj na zaslonu ne piše mjerna jedinica, prema brzini trake moguće je da se radi o m/min jer također nema smisla kretanje trake mjeriti u okretajima u minuti. Sve mjere u tablicama su izražene u milimetrima.



**Slika 5.4** Proizvodi dobiveni ekstrudiranjem

Slika 5.4 prikazuje sve proizvode dobivene ekstrudiranjem kroz praktični dio rada. Brojevi na svakom proizvodu označavaju postavke i redoslijed izrade, dok točkice duž proizvoda predstavljaju mjesta mjerenja debljine.

### Prvo ekstrudiranje

Prvo mjerenje prikazano u Tablica 5.1 Rezultati prvog mjerenja (na idućoj stranici) pokazalo je da se doista rubovi zadebljaju prilikom ekstrudiranja širokousnom mlaznicom. Također, iz podataka je jasno vidljivo da se vrijednosti kreću između 1,572 mm i 1,657 mm što daje raspon od 0,085 mm. Prema prethodno postavljenom koeficijentu varijacije, to znači kako raspon između najniže i najviše vrijednosti iznosi 5,284 % prosječne debljine trake. Po dužini CV iznosi 4,428 % za lijevi stupac, 2,565 % za srednji i 3,757 % za desni stupac za prosječne debljine svakog stupca odnosno svake strane folije.

**Tablica 5.1 Rezultati prvog mjerenja**

	Lijevo	Sredina	Desno
Mjerenje 1	1,572	1,590	1,608
Mjerenje 2	1,574	1,594	1,657
Mjerenje 3	1,620	1,606	1,638
Mjerenje 4	1,604	1,584	1,609
Mjerenje 5	1,643	1,597	1,602
Mjerenje 6	1,586	1,592	1,596
Mjerenje 7	1,635	1,586	1,612
Mjerenje 8	1,601	1,595	1,635
Mjerenje 9	1,601	1,616	1,646
Mjerenje 10	1,599	1,625	1,633
CV	4,428%	2,565%	3,757%
Srednja vrijednost	1,609 mm		
Standardna devijacija	0,022		
Širina trake	86 mm		

### Drugo ekstrudiranje

Nakon povećanja brzine trake i broja okretaja ekstrudera, podatci su se malo pogoršali. Standardna devijacija porasla je na 0,0025, koeficijenti varijacije po dužini proizvoda su porasli, a ukupna širina trake je pala na 60,5 mm. Jasno se vidi kako širina mlaznice nije bila dobro namještena pa je jedna strana ispala deblja od druge te se vidi pad prema desnoj strani koja je bila više zategnuta. Podaci se kreću od 0,957 mm do 1,053 mm što je raspon od 0,096 mm, a CV pokazuje da je to 9,66 % prosječne debljine trake što je gotovo duplo više od prethodnog.

**Tablica 5.2 Rezultati drugog mjerenja**

	Lijevo	Sredina	Desno
Mjerenje 1	1,010	1,053	0,960
Mjerenje 2	1,022	1,039	0,997
Mjerenje 3	1,014	0,986	0,963
Mjerenje 4	0,980	0,988	0,957
Mjerenje 5	0,990	0,986	0,994
Mjerenje 6	1,006	0,983	0,966
Mjerenje 7	1,013	0,964	1,019
Mjerenje 8	1,005	0,979	1,023
Mjerenje 9	0,980	0,997	0,995
Mjerenje 10	1,013	0,960	0,963
CV	4,186%	9,361%	6,709%
Srednja vrijednost	0,994 mm		
Standardna devijacija	0,025		
Širina trake	60,5 mm		

**Treće ekstrudiranje**

Nakon usporavanja trake, treće ekstrudiranje je dalo najdeblji film od svih s prosjekom debljina 1,723 mm. Također je i najšire s 90,5 mm širine, a s rasponom od čak 0,112 mm ima i najveće odstupanje u mm. Postotno to iznosi samo 6,5 % prosječne debljine folije. Po dužini odstupanje iznosi 4,081 % za lijevi stupac, 1,628 % za srednji lijevi, 1,795 % za srednji desni i 5,278 % za desni stupac što je vrlo dobar pokazatelj kako na rubovima dolazi do zadebljanja i pada dimenzijske stabilnosti.

**Tablica 5.3 Rezultati trećeg mjerenja**

	Lijevo	Sredina L	Sredina D	Desno
Mjerenje 1	1,723	1,724	1,736	1,761
Mjerenje 2	1,723	1,731	1,736	1,748
Mjerenje 3	1,712	1,728	1,708	1,722
Mjerenje 4	1,759	1,727	1,737	1,694
Mjerenje 5	1,761	1,714	1,739	1,705
Mjerenje 6	1,755	1,703	1,723	1,671
Mjerenje 7	1,783	1,727	1,721	1,674
Mjerenje 8	1,729	1,706	1,729	1,700
Mjerenje 9	1,725	1,711	1,716	1,677
Mjerenje 10	1,729	1,729	1,730	1,700
CV	4,081%	1,628%	1,795%	5,278%
Srednja vrijednost	1,723 mm			

**Tablica 5.4 Rezultati trećeg mjerenja - nastavak**

Standardna devijacija	0,023
Širina trake	90,5 mm

### Četvrto ekstrudiranje

Četvrto ekstrudiranje je najtočnije ispalo sa samo 4,38 % odstupanja raspona od prosjeka debljine folije. Raspon vrijednosti se kreće između 1,304 mm i 1,362 mm što je 0,058 mm razlike. Ono također pokazuje povratak na pravilnije zatezanje vijaka za podešavanje jer se opet može uočiti zadebljanje rubova u odnosu na sredinu no ovog puta sa malo stabilijim tokom. Razlog tome je povećanje brzine trake uz podizanje temperature istinse tone na 180 °C. Po dužini odstupanje iznosi 2,827 % za lijevi stupac, 1,296 % za srednji i 2,350 % za desni stupac što su zapravo zanemarivo male brojke jer sve ispod 3% se računa kao dovoljno dobro za puštanje na tržište (nije škart).

**Tablica 5.5 Rezultati četvrtog mjerenja**

	Lijevo	Sredina	Desno
Mjerenje 1	1,352	1,316	1,325
Mjerenje 2	1,346	1,321	1,312
Mjerenje 3	1,362	1,318	1,317
Mjerenje 4	1,344	1,305	1,307
Mjerenje 5	1,349	1,313	1,311
Mjerenje 6	1,341	1,312	1,315
Mjerenje 7	1,343	1,307	1,309
Mjerenje 8	1,338	1,304	1,338
Mjerenje 9	1,345	1,316	1,334
Mjerenje 10	1,324	1,304	1,323
CV	2,827%	1,296%	2,350%
Srednja vrijednost	1,325 mm		
Standardna devijacija	0,017		
Širina trake	72,9 mm		

### Peto ekstrudiranje

Peto ekstrudiranje nakon povećanja brzine trake i temperature mlaznice na 195 °C daje vrlo zanimljive rezultate jer se u Tablica 5.6 na sljedećoj stranici jasno vide odvojene linije debljina uzduž ekstrudirane folije što je posljedica pretjeranog zatezanja vijaka na sredini usne širokousne mlaznice. S rasponom vrijednosti od 0,281 mm do 0,329 mm ima drugo najveće

odstupanje raspona dimenzija od prosjeka sa čak 15,8 %. Po dužini odstupanje od prosjeka stupaca iznosi 4,653 % za lijevi stupac, 3,495 % za srednji i 4,002 % za desni stupac

**Tablica 5.6 Rezultati petog mjerenja**

	Lijevo	Sredina	Desno
Mjerenje 1	0,300	0,289	0,329
Mjerenje 2	0,297	0,287	0,325
Mjerenje 3	0,298	0,287	0,325
Mjerenje 4	0,300	0,290	0,328
Mjerenje 5	0,303	0,291	0,329
Mjerenje 6	0,311	0,287	0,326
Mjerenje 7	0,299	0,283	0,326
Mjerenje 8	0,298	0,281	0,323
Mjerenje 9	0,303	0,284	0,316
Mjerenje 10	0,300	0,282	0,321
CV	4,653%	3,495%	4,002%
Srednja vrijednost	0,304 mm		
Standardna devijacija	0,017		
Širina trake	54,9 mm		

### Šesto ekstrudiranje

Šesto ekstrudiranje je uslijedilo nakon dodatnog ubrzanja trake do te razine da je širina trake pala na 41,4 mm. Izvrsne površinske kvalitete kako je vidljivo na Slika 5.4 ovi rezultati začuđujuće daju odstupanje raspona od prosjeka filma za čak 15,173 %. Tablica 5.7 pokazuje da su dimenzije od 0,196 mm do 0,288 mm što je taman na granici između filma i folije te se razlikuju za samo 0,032 mm razlike između najniže i najviše vrijednosti debljine. Po dužini odstupanje iznosi čak 10,832 % za lijevi stupac i 7,316 % za desni što su najveća odstupanja od svih mjerenja.

**Tablica 5.7 Rezultati šestog mjerenja**

	Lijevo	Desno
Mjerenje 1	0,218	0,220
Mjerenje 2	0,206	0,220
Mjerenje 3	0,216	0,227
Mjerenje 4	0,197	0,228
Mjerenje 5	0,198	0,213
Mjerenje 6	0,200	0,219
Mjerenje 7	0,201	0,218
Mjerenje 8	0,198	0,212
Mjerenje 9	0,201	0,212
Mjerenje 10	0,196	0,218

**Tablica 5.8 Rezultati šestog mjerenja - nastavak**

CV	10,832%	7,316%
Srednja vrijednost	0,211	
Standardna devijacija	0,010	
Širina trake		

**Sedmo ekstrudiranje**

Sedmo ekstrudiranje je završilo s vrlo stabilnim dimenzijama s niskom standardnom devijacijom. Povećanje brzine trake isplatilo se jer je rezultiralo prosjekom od 0,150 mm i rasponom od 0,144 mm do 0,159 mm (0,015mm) što je ukupno 9,98 % odstupanja raspona od prosjeka filma. Po dužini odstupanje iznosi 2,738 % za lijevi stupac i 5,821 % za desni što nije baš najbolja vrijednost.

**Tablica 5.9 Rezultati sedmog mjerenja**

	Lijevo	Desno
Mjerenje 1	0,147	0,151
Mjerenje 2	0,144	0,157
Mjerenje 3	0,148	0,159
Mjerenje 4	0,147	0,154
Mjerenje 5	0,146	0,154
Mjerenje 6	0,146	0,155
Mjerenje 7	0,145	0,156
Mjerenje 8	0,146	0,154
Mjerenje 9	0,146	0,150
Mjerenje 10	0,146	0,156
CV	2,738%	5,821%
Srednja vrijednost	0,150 mm	
Standardna devijacija	0,005	
Širina trake	31,3 mm	

**Osmo ekstrudiranje**

Osmo ekstrudiranje prikazano Tablica 5.10 dalo je najgore rezultate ali bilo je čisto teoretsko da se vidi koje su granice ekstrudiranja kroz širokousnu mlaznicu uz dodatno povećanje brzine trake i brzine ekstrudiranja. Brzina ekstrudera rezultirala je time da se u foliji vide zadebljanja i promjene boje uzrokovane nepotpuno rastaljenim granulatom. Sa svojih 0,131 mm prosjeka ispalo je najtanje, a odstupanje raspona od prosječne debljine iznosi mu čak 15,9 %. Naravno, ta brojka zvuči jako loše, ali uz 0,21 mm raspona između 0,119 mm i 0,140 mm rezultati su prilično dobri. Po dužini odstupanje iznosi visokih 12,569 % za lijevi stupac i 6,637 % za desni stupac. Sve ove brojke daju uvid u to da je protok taljevine postao nestabilan i da, iako je ekstrudat bio samo 0,131 mm debeo u prosjeku, dimenzijska stabilnost nije dovoljno visoka da



omogućiti daljnje ekstrudiranje. Upravo ovo mjerenje pokazuje da standardna devijacija nije dobro mjerilo kvalitete jer u usporedbi sa Tablica 5.6 pretpostavka bi bila da je kvaliteta bolja, no koeficijenti varijacije i mjerenja pokazuju upravo suprotno.

**Tablica 5.10 Rezultati osmog mjerenja**

	Lijevo	Desno
Mjerenje 1	0,135	0,140
Mjerenje 2	0,133	0,140
Mjerenje 3	0,132	0,140
Mjerenje 4	0,131	0,133
Mjerenje 5	0,125	0,132
Mjerenje 6	0,124	0,134
Mjerenje 7	0,121	0,138
Mjerenje 8	0,132	0,131
Mjerenje 9	0,119	0,137
Mjerenje 10	0,121	0,131
CV	12,569%	6,637%
Srednja vrijednost	0,131 mm	
Standardna devijacija	0,006	
Širina trake	27,05 mm	

Koeficijent varijacije CV može dati dobar uvid u kvalitetu proizvoda, no mjerenje nije napravljeno dovoljno precizno i dovoljno gusto da bi taj podatak dao potpunu sliku o kvaliteti proizvoda. CV ispod 1 % znači da su površine toliko konzistentne da se polimerni film može primjeniti u optičkim namjenama dok 3-5 % znači da je dovoljno dobro da se primjenjuje u građevini za panele. Primjerice, prvo ekstrudiranje daje rezultate od 0,829 % što je izvrsno za odstupanja od dimenzija po dužini, ali vidljivo je golim okom da je ta površina iznimno valovita što ukazuje da mjerenje takve površine nije izvršeno pravilnim uređajem. S druge strane, filmovi koji su ispali vidno bolje poput filmova 5, 6 i 7 imaju koeficijente varijacije od 0,7 % do čak 3,9 %. Za bolju sliku o kvaliteti površine potrebno je više podataka ili preciznija mjerenja.

## **6. ZAKLJUČAK**

Iako je rad sa širokousnom mlaznicom vrlo zanimljiv i vizualan, potrebno je vrlo mnogo vremena i truda da se jedan takav sustav dovede u radno stanje. To znači da dimenzije moraju biti konzistentne s 2-3 % varijacije, bez ikakvih površinskih defekata poput valova, guljenja, *sharkskin*-a ili loma taljevine. Eksperimentalni dio pokazuje upravo to da matematički modeli mogu pogurati operatera ili projektanta u dobrom smjeru, ali nikad neće isprve dobiti upravo ono za što računa. Potrebno je uložiti nekoliko od desetaka sati do čak nekoliko tjedana za dobro podešavanje parametara ekstrudiranja.

**LITERATURA**

- [1] Čatić I. Godec D., Rogić A.: Polimeri i polimerne tvorevine, Društvo za plastiku i gumu, Zagreb, 2008.
- [2] Lubrizol, <https://www.lubrizol.com/-/media/Lubrizol/Engineered-Polymers/Documents/EP-Literature/Lubrizol-Engineered-Polymers-Extrusion-Processing-Guide.pdf> , 2024. (Pristupljeno 7.2.2025.)
- [3] Vlachopoulos J., Polichronopoulos N. D.: Understanding Rheology and Technology of Polymer Extrusion (First Edition), Polydynamics INC., 2019.
- [4] Extrusion Die Industries, Tappi, <https://www.tappi.org/content/events/07europlace/presentation/01europl15.pdf> (Pristupljeno 12.2.2025.)
- [5] Oliver G., Tappi, Extrusion Die Industries <https://www.tappi.org/content/events/10EXTRU/papers/3.2.pdf> (Pristupljeno 12.2.2025.)
- [6] Rubin I. I.: Handbook of Plastic Materials and Technology, Wiley, 1990.
- [7] LA Plastic, <https://www.la-plastic.com/post/at-what-temperature-is-plastic-extruded> 18.11.2023. (Pristupljeno 7.2.2025.)
- [8] Middleman S.: Fundamentals of Polymer Processing, McGraw-Hill, 1977.
- [9] Nóbrega J.M., Carneiro O.S.: Profile Forming Tools iz Design of Extrusion Forming Tools, Smithers Rapra, 2012.
- [10] Direct Industry, [https://pdf.directindustry.com/pdf/davis-standard-extrusion-systems/pe-dies/50067-711708-\\_2.html](https://pdf.directindustry.com/pdf/davis-standard-extrusion-systems/pe-dies/50067-711708-_2.html) , 2012. (Pristupljeno 7.2.2025.)
- [11] Maksoud M. A.: Blown Film Cooling Numerical and Experimental investigations, 2024. DOI: 10.5772/intechopen.1002412
- [12] Kenith S.: Die Design for Extrusion of Plastic Tubes and Pipes, Hanser, 2018.
- [13] Perdikoulis J.: Analysis and Design of Annular Dies for Mono- and Multilayer Polymer Flows, University of Waterloo, Waterloo, ON, Canada, 1997.
- [14] Vlachopoulos J. et al.: Flat Film Sheet Dies iz Design of Extrusion Foeming Tools, Smithers Rapra, London, 2012.

- [15] SantaFe Machine, <https://santafemachine.com/barrels/the-importance-of-barrel-temperature-optimization-for-plastic-extrusion-and-injection-molding/> , 2.2023. (Pristupljeno 12.2.2025.)
- [16] Buck R., Shuntool, <https://shuntool.com/article/twin-screw-extruder-barrel-temperatures>, 12.12.2024. (Pristupljeno 7.2.2025.)
- [17] Extrusion-training, SHS Plus Germany, <https://www.extrusion-training.de/en/wie-erkenne-ich-das-perfekte-extruder-temperaturprofil/> , 6.8.2018. (Pristupljeno 7.2.2025.)
- [18] Caicedo C. et al.: Effect of Extrusion Screw Speed and Plasticizer Proportions on the Rheological, Thermal, Mechanical, Morphological and Superficial Properties of PLA, Polymers, 2020., <https://doi.org/10.3390/polym12092111>