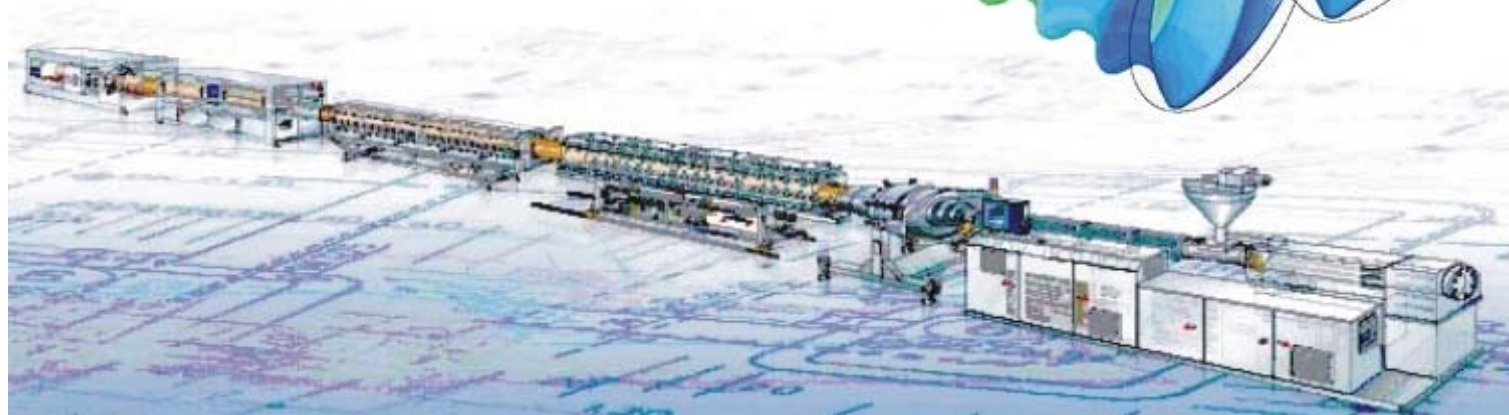




Mašine za **EKSTRUZIJU**



2. MAŠINE ZA EKSTRUZIJU - EKSTRUDERI

2.1 Tipovi ekstrudera

Tehnologija ekstrudiranja polimera (plastike i gume) zauzima značajno mesto u preradi plastike. Proces ekstrudiranja može biti kontinualan i diskontinualan. Osnovni tipovi ekstrudera dati su u tabeli 2.1.

Screw extruders (continuous)	Single screw extruders	Melt fed Plasticating Single stage Multi stage Compounding
	Multi screw extruders	Twin screw extruders Gear pumps Planetary gear extruders Multi (>2) screw extruders
Disk or drum extruders (continuous)	Viscous drag extruders	Spiral disk extruder Drum extruder Diskpack extruder Stepped disk extruder
	Elastic melt extruders	Screwless extruder Screw or disk type melt extruder
Reciprocating extruders (discontinuous)	Ram extruders	Melt fed extruder Plasticating extruder Capillary rheometer
	Reciprocating single screw extruders	Plasticating unit in injection molding machines Compounding extruders such as the Kneader

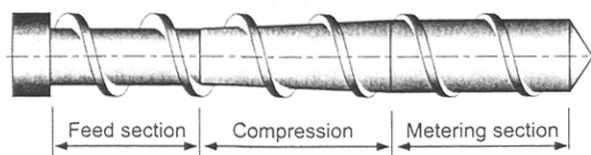
Tabela 2.1

2.2 Ekstruder sa jednim pužem – singl ekstruder

Ekstruderi sa jednim pužem imaju veliku primenu u preradi polimera, a prednost ovih mašina u odnosu na druge su:

- niža cena,
- jendostavna, robusna i pouzdana konstrukcija,
- dobre tehničke performanse.

Osnovni element ove mašine je puž i ima sekciju punjenja, kompresije i istiskivanja (*slika 2.1*).



Sl.2.1

Ovakva konstrukcija puža naziva se jednostepenom (single stage) jer ima samo jednu kompresionu zonu. Prva sekcija sa dubokim navojem služi za uvlačenje sirovog materijala. U poslednjoj zoni zavojnica ima najmanju dubinu, a zahvaćeni materijal je potpuno rastopljen i doveden u stanje višeg pritiska šta znači da ova sekcija ima ulogu pumpe. Srednja sekcija je tzv. tranziciona –

kompresiona, a u njoj se dubina navoja linearno smanjuje, što doprinosi zagrevanju polimera i povećanju pritiska. Stepjen kompresije ekstrudera je bitna tehnička karakteristika ovih mašina.

Ekstruderi se standardizuju u pogledu prečnika cilindra, a prema USA standardu prečnici su: $\frac{3}{4}$, 1, 1½, 2, 2½, 3½, 4½, 6, 8, 10, 12, 14, 16, 18, 24 inch-a.

Evropski standard za prečnike ekstrudera je: 20, 25, 30, 35, 40, 50, 60, 90, 120, 150, 200, 250, 300, 350, 400, 450, 500 i 600 mm.

Većina ekstrudera ima cilindar u rasponu 25 - 150 mm.

Druga važna karakteristika ekstrudera je odnos dužine i prečnika puža (osnosno cilindra), a kreće se u rasponu $L/D=20-30$, najčešće je to 24. Kod ventiliranih ekstrudera taj odnos je od 35-40 pa i više.

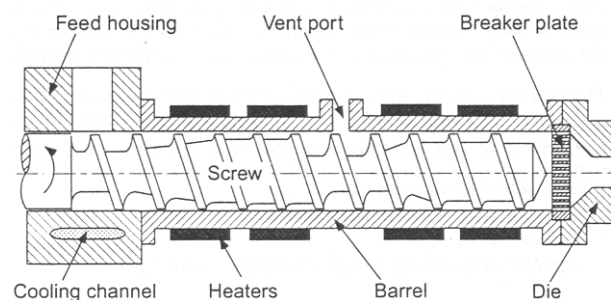
2.2.1. Osnovne funkcije

Polazni materijal, iz levka, obično gravitaciono, ulazi u prostor koji je određen prvom sekcijom puža i radnog cilindra. Usled obrtanja puža, a zahvaljujući trenju materijal se transportuje unapred, zagreva i povećava se pritisak. Zagrevanje materijala vrši se pomoću električnih grejača i delimično usled trenja. Kada temperatura pređe tačku topljenja rastopljeni film pojavljuje se na površini cilindra. To se dešava na kraju zone čvrstog materijala i početku zone rastopa. Treba napomenuti da se ova tačka ne mora podudarati sa početkom kompresione zone. Položaj granice između zona zavisi od vrste materijala, geometrije mašine (puža) i uslova obrade. Položaj ove granice menja se sa promenom uslova obrade, pošto se geometrija puža ne menja, ako se ne menja ceo puž. Sa pomeranjem materijala unapred smanjuje se količina čvrstog materijala, a povećava količina rastopa. Sa nestankom poslednje količine čvrstog materijala definisana je dužina zone plastifikacije i nastaje zona transporta rastopa.

Rastopljeni polimer iz radnog cilindra ulazi u alat koji formira obradak određenog profila. Profili alata i obradaka nisu identični, što se mora predvideti konstrukcijom alata. Pri prolasku polimera kroz alat postoje otpori tečenju pa na izlasku iz cilindra mora, odnosno u glavi alata mora postojati odgovarajući pritisak, koji zavisi od vrste materijala i geometrije obratka. Važno je napomenuti da je pritisak u glavi alata prouzrokovan alatom, a ne ekstruderom. Ekstruder mora da stvori dovoljan pritisak, odnosno silu, koja omogućuje istiskivanje materijala kroz alat. Pritisak u glavi alata prouzrokovan je konstrukcijom alata kroz koji rastop teče.

2.2.2. Ventilirani ekstruderi

Kod ovih ekstrudera postoje posebno dizajnirani otvori kroz koje se vrši odstranjivanje isparenja iz radnog cilindra koja su nastala oslobađanjem iz zagrejanog polimera. Ponekad se ovi otvori mogu koristiti za drugu svrhu, npr. za dodavanje aditiva, boja, ispunja i dr. U tom slučaju ventilirani ekstruder radi kao i običan, neventilirani ekstruder. Ventilirani ekstruder, šematski, prikazan je na slici 2.2.



Sl. 2.2

Jedan od osnovnih problema kod ovog ekstrudera je ometanje toka materijala na mestima ventilacionih otvora. Kroz te otvore ne ističu samo isparenja već i rastopljeni materijal. Radi toga puž mora biti konstruisan tako da se u zoni ventilacionih otvora ne stvara pozitivni pritisak u materijalu. To je dovelo do konstrukcije dvostepenog puža za odzračivanje.

Dvostepeni puž ima dve kompresione zone i jednu dekompresionu zonu.

Ventilirani ekstruderi koriste se za izbacivanje reaktivnih materija iz monomera ili oligomera.

Nivo odzračivanja kod jednopužnog ventiliranog ekstrudera može biti ispod 1%.

Dvopužni konvencionalni ekstruder može odzračiti do 50% para, a sistemom za odzračivanje to može ići do 15% uz korišćenje jednog stepena za ekstrakciju.

Za poboljšanje odzračivanja kod jednostepenog puža koriste se dva ili više ventilacionih otvora.

Kod ventiliranih ekstrudera problem može biti ograničenje dužine puža $L/D=40 - 50$ mm, pa se zbog toga koriste dvopužni ekstruderi.

2.2.3. Ekstruderi za gumu

Ekstruderi za gumu su kraći u odnosu na ekstrudere za ostale polimere. Proizvode se od druge polovine XIX veka: John Royle – USA, Francis Shaw – GB. Glavni proizvođač ovih ekstrudera u Nemačkoj je Troster. Ova firma proizvodi i druge ekstrudere.

U početku ekstruderi su građeni tako da je punjenje vršeno sa zagrejanim materijalom iz miksera. Od 1950. punjenje ekstrudera vrši se hladnim materijalom.

Prednosti hladnog ekstrudiranja:

- niži investicioni troškovi,
- bolja kontrola temperature magacina,
- redukcija labaratorijskih troškova,
- lakše rukovanje sa potrebnim materijalom.

Ekstruderi sa hladnim punjenjem gume ne razlikuju se bitno u odnosu na ekstrudere za termoplaste.

Razlika je u sledećem:

1. redukovana dužina,
2. grejanje i hlađenje,
3. sekcija za dodavanje,
4. konstrukcija puža.

Smanjena dužina puža proizilazi iz činjenice da je kod gume prisutno visoko trenje, a potrebna temperatura istiskivanja je relativno niska ($20 - 120^{\circ}\text{C}$) pa je zbog toga dužina puža manja. Kod toplu punjenog ekstrudera dužina puža je $L=5D$, a kod hladnog ekstrudera $L=(15 - 20)D$.

Grejanje ekstrudera za gumu kod nižih temperatura, obično se vrši parom, a kod viših električnim grejačima, slično ekstruderima za termoplaste. Takođe se kod ovih ekstrudera primenjuje grejanje sa uljnom cirkulacijom.

Hlađenje ekstrudera izvodi se cirkulacijom vode. Sekcija za punjenje polaznog materijala (trake, komadići, kuglice...). ako se ekstruder puni iz miksera, tada se koristi hidrocilindar za punjenje. Ulaz u cilindar ekstrudera mora imati mogućnost zatvaranja i prekida punjenja radi intervencije u slučaju ubacivanja suviše krupnih komada sirovine. Ako je sirovina trakasta tada dodavanje može da se vrši pomoću rolni. Polazni materijal za gumu može biti i praškast.

Smatra se da je tehnologija ekstrudiranja gume u određenom zaostatku u odnosu na termoplastiku, pa se problemi koji nastaju pokušavaju rešiti jednostavnom promenom sastava sirovine. Osim toga, postoji velika razlika između gume i plastike, pa se ne mogu uvek koristiti iskustva ekstrudiranja plastike za rešavanje problema kod gume.

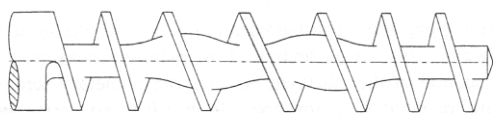
U nekim slučajevima (klizava sirovina) poboljšanje punjenja ekstrudera obezbeđeno je konstrukcijom sa radijalno postavljenim pinovima.

Puž ekstrudera za gumu često se gradi sa konstantnom dubinom uz linearno smanjenje koraka (slika 2.3).

Mnogi ekstruderi za gumu koriste tzv. „doubleflight“ varijantu puža (slika 2.4).



Sl. 2.3



Sl. 2.4

Sledeća specifičnost ekstrudera za gumu je veća dubina puža u odnosu na termoplaste, što je potrebno kako bi se izbeglo prekomerno zagrevavanje zbog trenja, jer guma ima veću viskoznost u odnosu na termoplaste.

Na slici 2.4 prikazan je tip puža firme NRM.

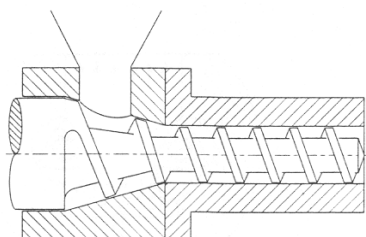
Na slici 2.5 prikazana je konstrukcija ekstrudera firme Pireli, koja je specifična po ulaznoj sekciji, gde se puž konusno sužava, što obezbeđuje široku zazor u zavojnici puža i dobro mešanje sirovine.

Na slici 2.6 prikazana je konstrukcija puža firme Werner and Pfleiderer, tip EVK, koja je karakteristična po tome što ima poprečne kanale koji omogućuju dodatno mešanje i prelivanje materijala iz jednog navoja u drugi.

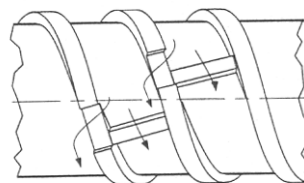
Na slici 2.7 prikazan je ekstruder Transfermix koji predstavlja varijantu mašine ekstruder/mikser koji omogućuje dobro mešanje komponenti.

Na slici 2.8 prikazan je ekstruder QSM koji ima radijalno postavljene šipke za bolje mešanje materijala. Ovakav ekstruder može se koristiti i za viskozne termoplaste kao na primer PVC.

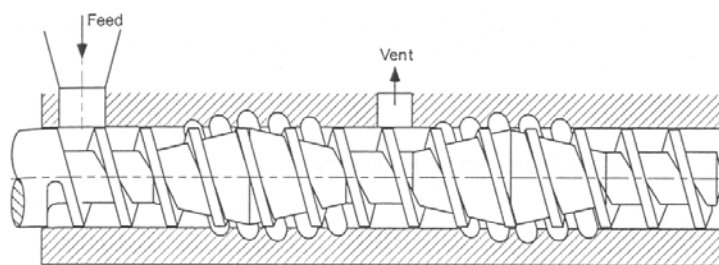
Na slici 2.9 prikazan je ekstruder za gumu kojeg karakteriše alat sa rolnama (valjcima) koji se koristi u tandemu sa kalandrom za izradu gumenih traka.



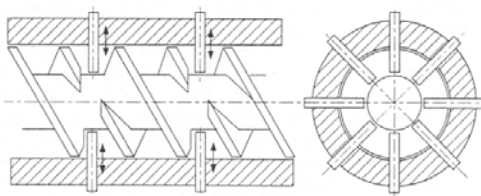
Sl. 2.5



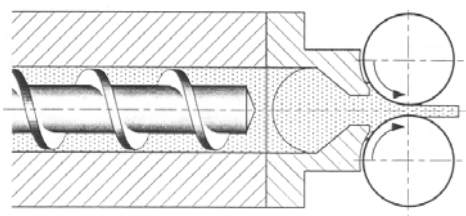
Sl. 2.6



Sl. 2.7



Sl. 2.8



Sl. 2.9

2.3 Višepužni ekstruderi

2.3.1. Dvopužni ekstruder

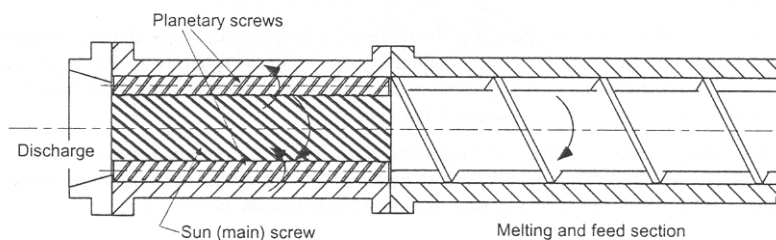
Dvopužni ekstruder ima puž sa dve arhimedove zavojnice. Postoji više varijanti dvopužnih ekstrudera čija konstrukcija može značajno da odstupa od prethodne, načelne, definicije, a zavisi od nemene ekstrudera, odnosno polaznog materijala. Klasifikacija ovih mašina data je u tabeli 2.2, a prvenstveno je bazirana na geometrijskoj konfiguraciji. Mnogi dvopužni ekstruderi funkcionišu slično jednopužnim mašinama. Drugi opet funkcionišu sasvim drugačije od jednopužnih mašina.

Intermeshing extruders	Co-rotating extruders	Low speed extruders for profile extrusion High speed extruders for compounding
	Counter-rotating extruders	Conical extruders for profile extrusion Parallel extruders for profile extrusion High speed extruders for compounding
Non-intermeshing extruders	Counter-rotating extruders	Equal screw length Unequal screw length
	Co-rotating extruders	Not used in practice
	Co-axial extruders	Inner melt transport forward Inner melt transport rearward Inner solids transport rearward Inner plasticating with rearward transport

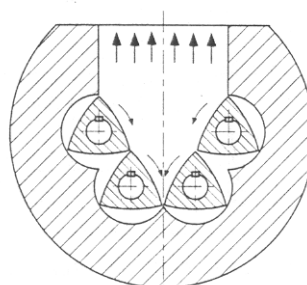
Tabela 2.2

2.3.2. Ekstruderi sa brojem puževa većim od dva

Postoji nekoliko tipova ekstrudera, kod kojih je broj puževa veći od dva. Jedna od varijanti je planetarni roler ekstruder (slika 2.10).



Sl. 2.10



Sl.2.11

Kod planetarnog ekstrudera sekcija za punjenje je identična sekciji za punjenje kod jednopužnog ekstrudera, a fundamentalna razlika postoji kod sekcije za istiskivanje u kojoj postoji centralni (glavni) puž sa spregnutim planetarnim puževima, kojih ima šest ili više. Planetarni puževi su uzupčeni sa glavnim pužem.

Planetarna sekcija obično predstavlja zasebnu sekciju koja je priрубnicom povezana sa prethodnom.

U prvom delu mašine planetarnog puža materijal se kreće na isti način kao i kod jednopužnog ekstrudera. Ulaskom materijala u planetarnu sekciju dolazi do intenzivnijeg mešanja i plastifikacije polimera. Trenje je ovde jače pa je veća i oslobođena toplota. Planetarni pužni komplet karakteriše velika kontaktna površina u odnosu na dužinu cilindra. Mali zazor između planetarnih puževa i površine cilindra (oko 0,25mm) omogućuje stvaranje tankih slojeva materijala i efikasnu degazaciju materijala, zatim efektivno zagrevanje i dobru kontrolu temperature. Zbog toga se ovaj ekstruder koristi za preradu (i mešanje) komponenti PVC. Planetarna jedinica često se koristi kao mikser i dodatak uz klasičan ekstruder.

Na slici 2.11 prikazan je četveropužni ekstruder koji se koristi za efikasnu degazaciju npr. sa 40% na 0,3%. Na radnom cilindru nalaze se tzv. fleš kupole u kojima se ugrađene mlaznice za brzo odzračivanje.

2.3.3. Zupčasti ekstruder (zupčasti pumpni ekstruder)

Ekstruder koji ima karakteristike zupčaste pumpe koristi se često kao jedinica koja se dodaje uz običan ekstruder na plastifikacionu sekciju. Zupčasto pumpni ekstruder ustvari predstavlja dvopužni ekstruder kod kojeg se puževi okreću u kontrasmernu. Koriste se za povećanje pritiska, a kao samostalne jedinice nemaju primenu.

Pritisak kod ovog ekstrudera zavisi od zazora puževa sa kućištem, zatim od viskoznosti i temperature sirovine. Regulacijom parametara procesa, reguliše se trenje i toplota zagrevanja.

Koeficijent iskorišćenja energije zupčasto pumpnog ekstrudera je 15 – 35%, ostalo su mehanički gubici i gubici zagrevanja zbog trenja. Od toga su mehanički gubici 20 – 40%, a na zagrevanje se utroši 40 – 50%. Iskustvo sa polimerima pokazuje da ovaj ekstruder podiže temperature materijala više od 20 – 30°C.

Kapacitet mešanja ovog ekstrudera je ograničen što je potvrđeno proverom ujednačenosti temperature rastopa nekon prolaska kroz zupčasti ekstruder.

Zupčasti ekstruderi imaju sledeće prednosti:

- stabilnost izlaznih dimenzija npr. kod medicinskih cevi, oplatanja žice, fibera, itd.,
- prednost u odnosu na višepužne i dvopužne ekstrudere u pogledu obezbeđivanja stabilnosti pritiska.

Problemi kod zupčastih ekstrudera:

- abrazivno delovanje sirovine utiče na promenu početnog zazora zbog habanja,
- kod polimera sklonih degradaciji nije moguće samočišćenje ekstrudera.

Nedostaje skica

2.4 Disk ekstruderi

Postoji značajan broj ekstrudera kod kojih nema puža sa Arhimedovom spiralom, a za obezbeđivanje kontinuiteta ekstrudiranja koriste se ploče i bubnjevi, pa su tako nastale nove vrste ekstrudera (*tabela 2.1*).

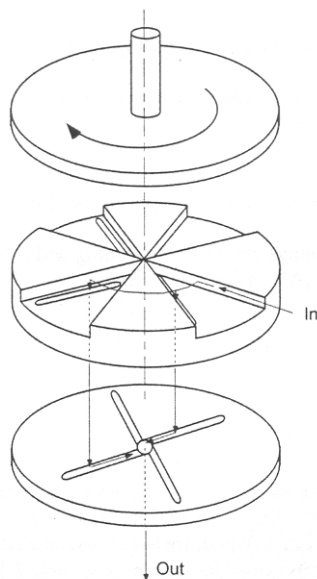
2.4.1. Visoko povlačni disk ekstruder (*Viscous Drag Disc Extruders*)

2.4.1.1. Stepenasti disk ekstruder

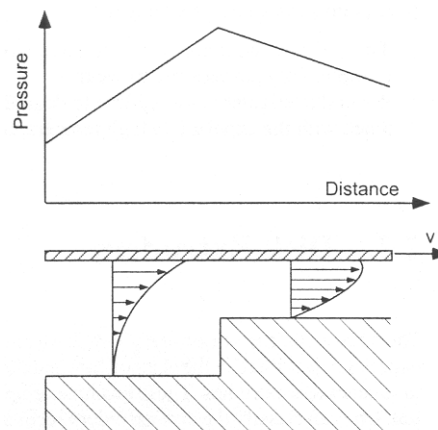
Jedan od prvih disk ekstrudera razvijen je od strane Bell Telephon Lab, kao stepenasti disk ekstruder koji je prikazan na *slici 2.12*.

Srce ove mašine je stepenasti disk koji je postavljen na malom rastojanju do ravnog diska. Obrtanjem jednog od diskova materijal iz šireg prostora se potiskuje u manji (uži) prostor što dovodi do povećanja pritiska (*slika 2.13*). Ako iza ovog stepena stoji izlazni profilisani otvor, polimer je istiskuje kroz njega. Konstrukcija stepenastog diska se prilagođava potrebama zavisno od materijala i pritiska.

Nedostatak ovih ekstrudera je nemogućnost čišćenja stepenastih ploča.



Sl. 2.12

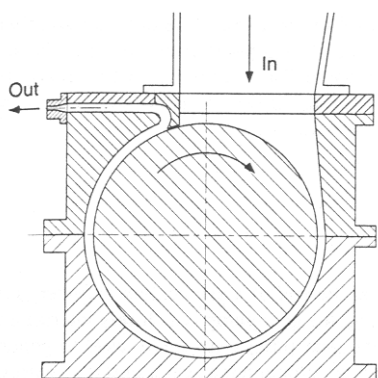


Sl. 2.13

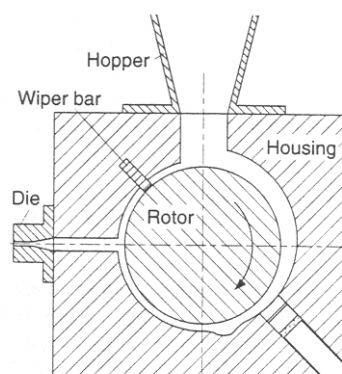
2.4.1.2. Ekstruder sa bubnjom

Starija konstrukcija ovog ekstrudera data je na slici 2.14. Materijal iz dozatora ulazi u prostor između valjka i kućišta i usled trenja se transportuje ka izlaznom otvoru mašine.

Konstrukcija slična prethodnoj data je na slici 2.15, kod koje postoji mogućnost regulacije prolaznog procepa pomoću šibera koji se aktivira hidrauličnim cilindrom. Prelaz materijala u levak sprečava se pomoću klizača.



Sl. 2.14



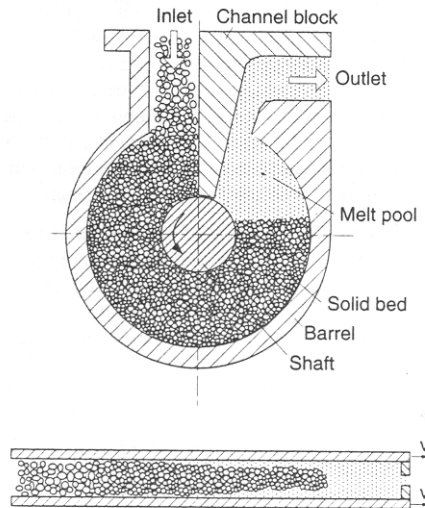
Sl. 2.15

2.4.1.3. Ekstruder sa spiralnim diskom

Postoji nekoliko patenata za ekstruder ovog tipa. Kod njih umesto stepenastog diska postoje spiralni diskovi sa žljebovima koji su povezani sa odgovarajućim spiralnim žljebovima.

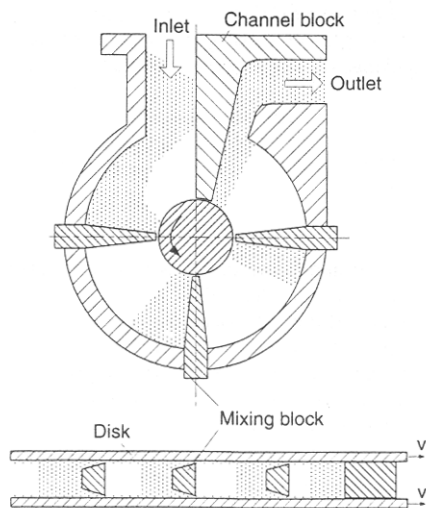
2.4.1.4. Pločasti ekstruder (ekstruder sa paketom ploča)

Konstrukcija ovog ekstrudera ima nekoliko patentnih rešenja, a jedna od varijanti data je na slici 2.16. Materijal iz levka upada u prostor između diskova male debljine koji su montirani na obrtnom vratilu. Materijal se transportuje zajedno sa diskovima od ulaza prema izlazu. Geometrija diskova se optimira zavisno od funkcije; transport čvrste materije, topljenje, odvođenje gasova i para, transport rastopa, mešanje itd.

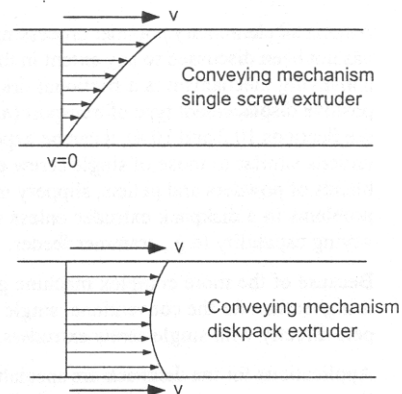


Sl. 2.16

Jedna unapređena mašina sa paketom diskova data je na slici 2.17a. Razlika između ovog ekstrudera i jednopužnog ekstrudera je u tome što kod njega postoje dve vučne površine, a kod jednopužnog ekstrudera samo jedna (slika 2.17b)



Sl. 2.17a

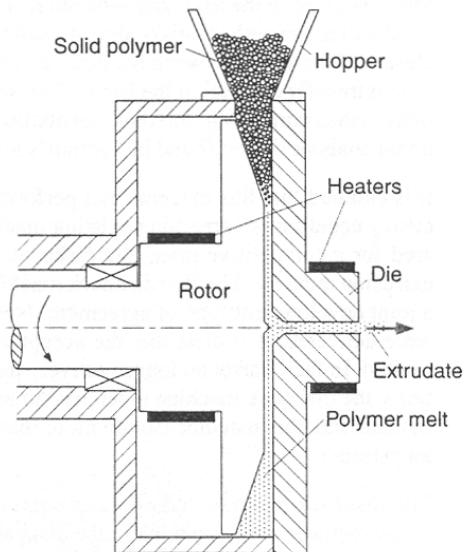


Sl. 2.17b

Radialno postavljene blokove svojim oblikom utiču na zazor između bloka i diskova i utičuna kapacitet mešanja materijala.

2.4.2. Ekstruder sa elastičnim topljenjem (The elastic melt extruder)

Ovaj ekstruder razvijen je 1950. godine, a baziran je na visko-elastičnom ponašanju polimera. Kada je polimer izložen smicanju u njemu se pojavljuju i normalni naponi koji nisu isti u svim pravcima, upravo suprotno čisto viskoznom fluidu. Kod ovog ekstrudera polimer se smiče pomoću dve ploče, jedne nepokretne i druge pokretne (slika 2.18). Usled smicanja generiše se normalni napon radialnog pravca sa smerom prema centru što se koristi za istiskivanje. Zbog toga se ovaj ekstruder naziva normalno-naponski ekstruder.



Sl. 2.18

Ovaj ekstruder je interesantan sa reološkog stanovišta jer koristi visko-elastična i temperaturna svojstva polimera.

2.5 Klipni ekstruderi

Klipni i plunđer ekstruderi su mašine robusne konstrukcije, diskontinualnog dejstva. Mogu da generišu visoke pritiske. Zbog cikličnog dejstva primenjuju se kod injekcionog presovanja i duvanja polimera. Ranije mašine za oblikovanje plastike bile su snabdevene klipnim ekstruderom. Limitirajući faktori ovih mašina su:

1. ograničen kapacitet plastifikacije (topljenja),
2. skromna (niska) uniformnost temperature u materijalu.

Danas se ovi ekstruderi primenjuju kod presovanja sitnih otpresaka i u nekim specijalnim zahtevima u pogledu pritiska.

2.5.1. Singl klipni ekstruderi

Ovi ekstruderi koriste se za oblikovanje malih delova i u specijalnim slučajevima kod polimera ultra visoke molekularne težine, kao na primer polietilen UHMWPE i PTFE. Ovi ekstruderi mogu da izvedu i do 250 hodova u nizu, a rade sa pritiscima i do 300 bara, kada mogu da vrše sabijanje i u hladnom stanju.

Takođe se koriste za izradu delova od PTE čije čestice mogu biti manje od 1,2mm.

2.5.1.1. Istiskivanje u čvrstom stanju

Polimeri mogu da se istiskuju i na temperaturama koje su ispod tačke topljenja. Na ovaj način nastaje vrlo intenzivno orijentisanje makromolekularne strukture koje je znatno veće u odnosu na konvencionalnu obradu. Zahvaljujući tome postižu se izvanredna mehanička svojstva obradaka.

Ova vrsta istiskivanja koristi se od 1940. godine zahvaljujući Bridgmanovim ispitivanjima uticaja hidrostatičkog pritiska na mehanička svojstva materijala. On je takođe ispitao i polimere i ustanovio da temperatura staklaste transformacije raste sa pritiskom.

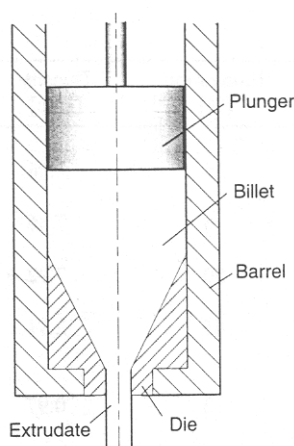
Postoje dve varijante čvrstog istiskivanja:

- a) klasično – istosmerno
- b) hidrostatičko

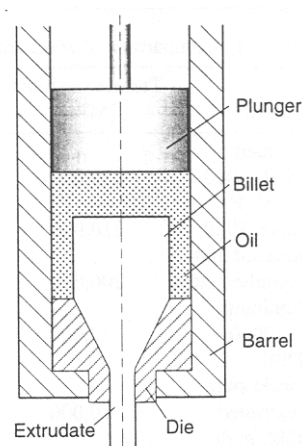
U prvom slučaju (*slika 2.19*) materijal je u direktnom kontaktu sa klipom i matricom. Kod hidrostatičkog istiskivanja polimera potreban pritisak prenosi se sa klipa na pripremak pomoću odgovarajućeg medija, npr. mineralnog ulja (*slika 2.20*). Ovakvi uređaji mogu imati i poseban izvor pritiska van radnog cilindra (pumpa).

Ovakva istiskivanja uglavnom se izvode na univerzitetima širom sveta, a jedan od ciljeva je da se ustanovi maksimalna orijentacija makromolekula.

U tabeli 2.3 data su uporedno mehanička svojstva za Al, HDPE istiskivan u čvrstom stanju i HDPE istiskivan konvencionalno.



Sl. 2.19



Sl. 2.20

Material	Tensile modulus [MPa]	Tensile strength [MPa]	Elongation [%]	Density [g/cc]
Annealed SAE 1020 W-200 °F	210,000	410	35	7.86
Annealed 304 stainless steel	210,000	720	6	7.86
Aluminum 1100-0	200,000	590	50	7.92
HDPE solid state extruded	70,000	90	45	2.71
HDPE melt extruded	70,000	480	3	0.97
HDPE melt extruded	10,000	30	20-1000	0.96

Tab. 2.3

Iz gornje tabele sledi da HDPE istiskivan u čvrstom stanju ima daleko viša mehanička svojstva od istog, istiskivanog u rastopljenom stanju.

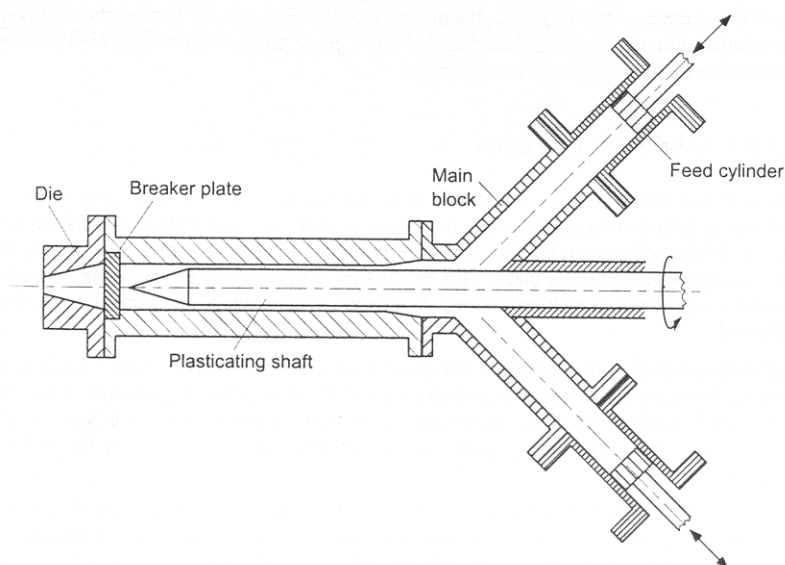
Kod čvrsto istiskivanog HDPE čvrstoća je na nivou čvrstoće ugljeničnog čelika. Takođe kod hladnog istiskivanja nema uvećanja (naduvavanja) dimenzija obratka po izlasku iz alata pri visokom stepenu deformisanja kao kod toplog istiskivanja polimera. Dimenzije hladno istiskivanog obratka potpuno odgovaraju dimenzijama alata. Kod hidrostatičkog istiskivanja manje je trenje na kontaktnim površinama pa je manja i orijentisanost strukture polimera u odnosu na konvencionalnu varijantu. Čak i kod odnosa ekstruzije ($R=A_0/A$) većim od 10 polietilen i polipropilen ostaju prozirni. Hladno istiskivani polimeri zadržavaju svoja svojstva i na povišenim temperaturama – polietilen do 120°C.

Istiskivanje u čvrstom (hladnom) stanju koristi se pri koekstruziji različitih polimera.

Istiskivanje u čvrstom stanju moguće je koristiti za izradu pojedinačnih komada, dok kontinualna izrada profila npr. nije moguća. Da bi se poboljšala mehanička svojstva klasično istiskivanih proizvoda od polimera, oni se naknadno, kontrolisano deformišu u čvrstom (hladnom) stanju. Ovo se primenjuje kod fibera, folija, filmova itd.

2.5.2. Višeklipni ekstruderi

Glavni nedostatak klipnih ekstrudera je periodično izvođenje ciklusa ekstruzije, tj. nemogućnost odvijanja kontinualnog istiskivanja. Da bi se ovaj problem prevazišao vršeni su razni pokušaji. Weston je dizajnirao ekstruder sa četiri cilindra – dva za plastifikaciju, a dva za pumpanje rastopljenog polimera. Drugu konstrukciju napravili su Yi i Feuner koja se sastoji od dva cilindra u V-rasporedu (slika 2.21). Čvrsti polimer iz cilindra se ubacuje u zajednički radni cilindar u kome se nalazi vratilo za plastifikaciju. Kod ove mašine moguće je ostvariti kontinuitet rada. Vratilo može imati helikoidni kanal, ili može biti zamenjeno sa pužem, te u tom slučaju klipovi i njihovi cilindri služe samo za punjenje glavnog cilindra.



Sl. 2.21

3. OPREMA EKSTRUDERA

U ovom poglavlju prikazani su osnovni delovi i sklopovi jednopužnog cilindra. Objasnjene su funkcije i prikazana alternativna rešenja pojedinih delova.

3.1 Pogon ekstrudera

Pogonski sistem ekstrudera ima zadatak da obezbedi obrtanje puža određenom brzinom. Brzina obrtanja mora biti konstantna radi kontinuiteta odvijanja procesa istiskivanja. Konstantnost brzine obrtanja puža je vrlo važan zahtev pogonskog sistema ekstrudera. Pogonski sistem mora da obezbedi dovoljan obrtni moment na pužu. Treći zahtev jeste mogućnost variranja brzine obrtanja puža u relativno širokom dijapazonu broja obrtaja. Najbolje je da se variranje brzine vrši kontinualno.

Osnovni pogonski sistemi ekstrudera su:

1. AC motorni pogon (naizmjenični asinhroni motori),
2. DC motorni pogon (motori jednosmerne struje),
3. Hidraulični pogon.

3.1.1. AC motorni pogon (naizmjenični asinhroni motori)

Pogonski sistem sa AC motorom gradi se u dve verzije:

1. sa mehaničkom transmisijom
2. sa frekventnim regulatorom

3.1.1.1. Pogon sa mehaničkom promenom broja obrtaja

Postoje četiri varijante ovog sistema:

- sa kaišnim prenosnikom,
- sa lančanikom,
- sa drvenim blokom,
- frikcionni tip.

Poslednja dva imaju određena ograničenja i manje se primenjuju.

Kaišni prenosnik koristi se za mašine sa snagom do 100KS. Najveći odnos brzine je 1:10, a primenjuje se za brojeve obrtaja do 4000min¹. Ovaj prenosnik ima dobar koeficijent iskorišćenja i u stanju je da amortizuje udare. Nedostatak je grejanje kaiša, mogućnosti proklizavanja, slaba kontrola brzine obrtanja i ograničen vek trajanja (do 2000 časova).

Lančani prenosnik je snažniji i pouzdaniji od kaišnog, bolja je kontrola brzine obrtanja. Ovaj pogon je kompaktniji i može da radi na povišenim temperaturama. Nedostaci su mu: dva puta je skuplji od kaišnog, nema zaštitu od udarnog opterećenja, primenjuje se kod malih brzina.

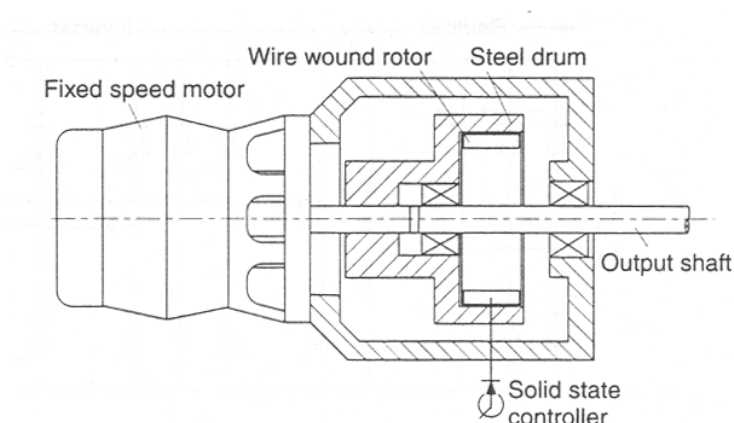
Mehanički prenosnici kod ekstrudera danas se sve manje koriste zbog nemogućnosti potpune kontrole brzine i ograničenih mogućnosti u pogledu snage.

3.1.1.2. Pogon sa elektro-frikcionom spojnicom

Kod ovog pogonskog sistema nema mehaničkog kontakta između ulaznog i izlaznog vratila i nema mehaničkog trenja. Postoji više tipova ovog pogona, ali najveću primenu ima sistema sa indukcionom spojnicom (slika 3.1). Pogon se sastoji od asinhronog motora čije vratilo okreće čelični bubanj. Na izlaznom vratilu je rotor sa namotajem koji se usled indukcije struje obrće. Variranjem napona u rotoru menja se klizanje između rotora i statora, pa se na taj način menja broj obrtaja izlaznog vratila.

Karakteristike ovog pogona su:

- prenosni odnos 30:1
- maksimalno preopterećenje (obrotni moment) 200%
- tačnost regulacije brzine obrtanja 0,5%



Sl. 3.1

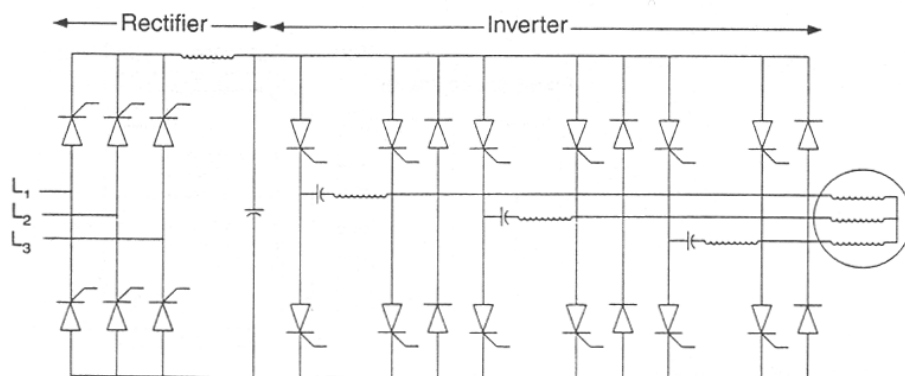
3.1.1.3. Pogon sa frekventnim regulatorom

Pogonski sistem sa frekventnim regulatorom koristi asinhroni elektromotor čiji broj obrtaja se menja promenom frekvencije struje kojom se motor napaja. Ovakav pogon je jeftin, pouzdan i snažan, nema komutator, jeftin je za održavanje i kompaktne je konstrukcije.

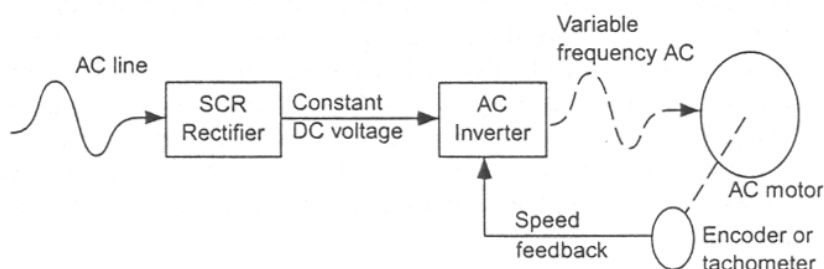
Kod ovog pogonskog sistema konvertor pretvara naizmeničnu struju u jednosmernu, a potom u naizmeničnu određene frekvencije. Konvertor ima prilično visoku cenu.

Na slici 3.2 prikazan je konvertor sa šest stupnjeva napona. Konvertor na ulazu ima tri faze naizmeničnog napona, koje se pomoću ispravljača pretvaraju u jednosmernu struju. Pomoću invertora se dobija naizmenična struja određenog napona i frekvencije.

Za održavanje konstantnog obrtnog momenta potrebna je regulacija napon-frekvencija. Zbog određenih ograničenja ovakav pogon se koristi za snage do 300KS. Kontrola brzine obrtanja ima tačnost 0.01%, a prenosni odnos može iznositi do 1000. Noviji pogon se kontrolom vektora fluksa prikazan je na slici 3.3.



Sl. 3.2

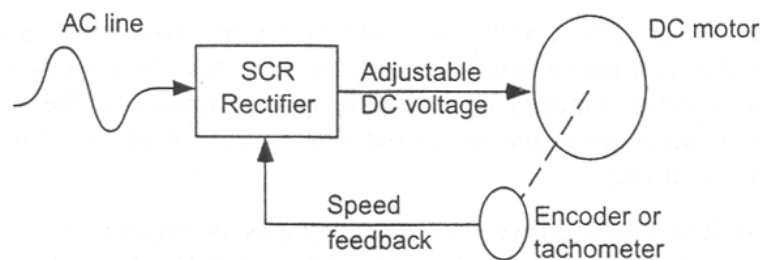


Sl. 3.3

3.1.2. DC motorni pogon (motori jednosmerne struje)

Raniji pogon ove vrste imao je jedan AC (asinhroni) motor koji je pokretao DC generator (jednosmerni), iz koga se napajao (pokretao) jednosmerni motor ekstrudera. Varijacija broja obrtaja puža vršena je promenom ulaznog napona na jednosmernom motoru. Današnji jednosmerni motori koriste stabilne (solid-state) pretvarače koji imaju dovoljnu snagu, a znatno su jeftiniji od seta sa motorom i generatorom. Šema pogona sa jednosmernim motorom data je na slici 3.4.

Prenosni odnos pogona sa jednosmernim motorom je do 100:1. Ovaj pogon može da održava konstantan moment ili konstantnu silu ili oba faktora. Moguće preopterećenje je 150% u toku jednog minuta. Jednosmerni motor vrlo brzo reaguje na promenu kontrolnog signala. Postoje i druge varijante pogona sa jednosmernim motorima, kao što je pogon sa trofaznim ispravljačem i punom kontrolom talasa napona.



Sl. 3.4

3.1.3. Hidraulični pogonski sistem

Hidraulični pogonski sistem, generalno, sastoji se od asinhronog elektromotora, pumpe i hidromotora i sistema za regulaciju. Osnovna karakteristika ovog pogonskog sistema je dobra kontrola broja obrtaja, obrtnog momenta, snage, glatko ubrzavanje i mogućnost »gušenja« (zaustavljanja) bez oštećenja i laka kontrola.

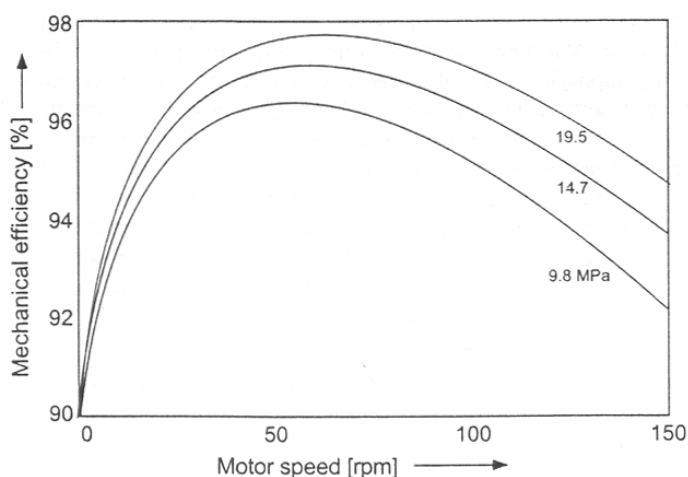
Hidraulično-motorni pogon ima primenu u različitim oblastima tehnike. Zahvaljujući stalnim unapređenjem ovog sistema dobijen je agregat sa visokim preformansama i smanjenim nivoom buke.

Postoje tri tipa hidro-pogona u pogledu izlaznih performansi. Promenljiva snaga i promenljiv obrtni moment bazirani su na promenljivom pomeranju pumpe (tj. na promenljivom protoku) koja napaja motor takođe sa promenljivim pomeranjem. Prenos snage preko hidraulične transmisije obavlja se kombinacijom konstantnog obrtnog momenta i konstantne snage. Ovaj pogon je vrlo fleksibilan i vrlo skup.

Konstantni obrtni moment i promenljiva snaga dobijaju se kombinacijom promenljivog pomeranja pumpe koja napaja motor sa fiksnim pomeranjem pod fiksnim opterećenjem. Brzina se reguliše regulacijom protoka pumpe. Dobar hidropogon mora da ima mogućnost opsega brzine u odnosu 40:1. Konstantna snaga, promenljiv obrtni moment dobija se sa promenljivim pomeranjem pumpe i sa limitatorom snage, koji pokreće motor sa fiksnim pomeranjem.

Hidrostatička transmisija je vrlo pogodna ako se pumpa i motor nalaze u zajedničkom bloku, što predstavlja vrlo kompaktnu konstrukciju, olakšava zaptivanje i druge praktične probleme. Hidraulični pogon se dobro i lako kontroliše i brzo reaguje. Bajpas sistem obezbeđuje brzo zaustavljanje pogona i eliminiše potrebu za menahičkom kočnicom.

Stepen korisnog dejstva hidro-pogona je vrlo dobar i kod dobro konstruisanog i izgrađenog sistema može biti veći od 70%. Ovaj pogonski sistem može biti snabdeven i akumulatorom. Stepen korisnog dejstva hidrauličnog pogona dat je na dijagramu (*slika 3.7*) u zavisnosti od broja obrtaja i pritiska. Sledi sa slike 3.7 da se dobar koeficijent iskorišćenja nalazi u području broja obrtaja od 0-150min⁻¹. Povećanjem pritiska povećava se stepen iskorišćenja.



Slika. 3.7

Posebna pogodnost hidropogona je ta što se hidromotor najčešće priključuje direktno na puž bez posrednog mehaničkog prenosnika – reduktora.

Takođe, prednosti ovog pogona je u tome, što se za pogon drugih delova mašine može koristiti ista pumpa koja pokreće hidromotor.

Pogonski sistem kontinualnog ekstrudera je potpuno drugačiji od jedinice za brizganje koja je cikličnog dejstva.

Uprkos dobrim karakteristikama hidrauličnog pogonskog sistema, postoje određene rezerve ljudi prema njegovoj primeni, koje su prouzrokovane starijim varijantama ovog pogona, koje nisu bile dovoljno pouzdane i precizne.

3.1.5. Reduktor

Kod pogona ekstrudera sa asinhronim i jednosmernim motorom obavezna je upotreba reduktora kojim se smanjuje broj obrtaja od 15:1 do 20:1. U tu svrhu koriste se zupčasti i pužni jednostepeni ili dvostepeni reduktori. Stepen korisnog dejstva je od 96-98%.

Neki prenosnici imaju mogućnost spoljne promene broja obrtaja i predstavljaju menjače, ali ime je stepen korisnog dejstva manji.

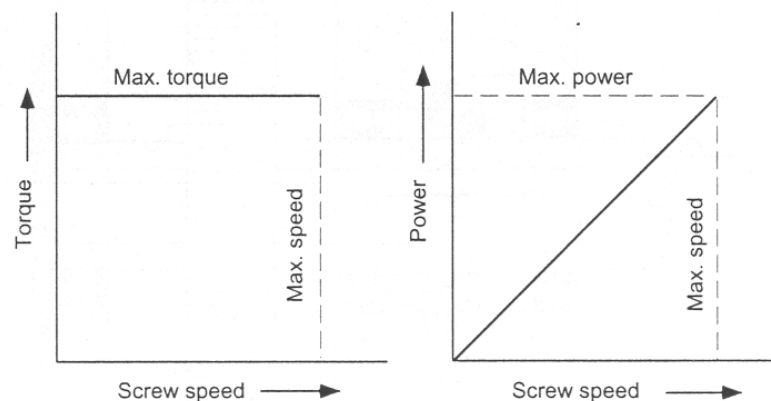
Pužni reduktor često se koristi kod ekstrudera. Prednost mu je niska cena i kompaktna konstrukcija. Međutim stepen korisnog dejstva je od 75-90%. Kod nekih ekstrudera između motora i reduktora postoji još kaišni ili lančani prenosnik. Kaišni prenosnik je dobar jer štiti ceo pogon od preopterećenja, ali smanjuje stepen korisnog dejstva za 5-10%.

3.1.6. Pogon sa karakteristikom $T=const.$

Većina ekstrudera zahteva da je obrtni moment konstantan ($T=const.$) na pužu u svim režimima broja obrtaja. U tom slučaju snaga iznosi:

$$P = T \cdot \omega = T \frac{\pi N}{30}$$

U tom slučaju ukupna snaga je proporcionalna sa brojem obrtaja (N) – slika 3.8



Slika. 3.8

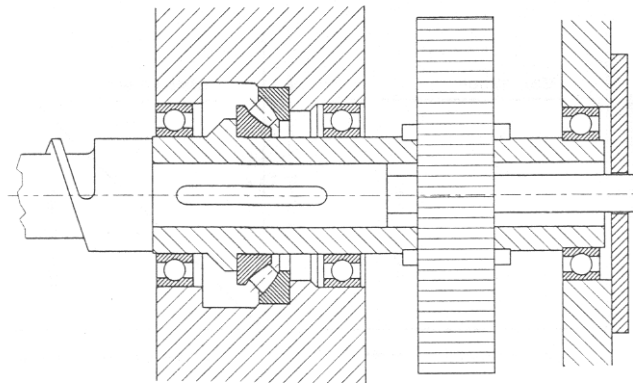
Maksimalna snaga u tom slučaju prisutna je samo pri maksimalnom broju obrtaja pogona. Ako postoji ograničavač snage u pogonu, tada se mašina može koristiti i sa graničnim performansama, a da pri tome ne dođe do oštećenja kaiša ili lanca.

Promenjiva snaga u pogonskom sistemu može se postići ugradnjom više pogonskih motora što je skupo rešenje.

3.2 Uležištenje pogonskog vratila

Ležište pogonskog vratila, odnosno puža, nalazi se na kraju izlaznog vratila pogonskog sistema, a to je obično izlazno vratilo zupčastog prenosnika ili reduktora. Ovo uležištenje je nužno zbog toga što postoji pritisak od rastopljenog polimera koji aksijalno opterećuje puž. Uležištenje glavnog pogonskog vratila mora biti tako dimenzionisano da primi aksijalno opterećenje puža. Aksijalna sila puža dobija se kao proizvod pritiska polimera i površine puža, pa kod velikih ekstrudera i visokih pritisaka, to opterećenje ima izuzetno velike iznose.

Na slici 3.9 prikazano je uležištenje jednopužnog ekstrudera. Proračun uležištenja vrši se po principu kotrljajnih ležajeva.



Slika. 3.9

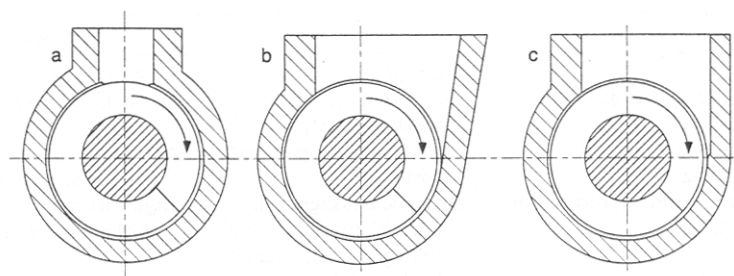
Umesto kotrljajnog uležištenja moguća je primena drugih tipova – hidrodinamičko, hidrostatično...

3.3 Radni cilindar i grlo za punjenje

Radni cilindar je kućište – komora, koja okružuje puž (ili puževe) ekstrudera. Punjenje ekstrudera vrši se kroz ulazni otvor – grlo na radnom cilindru, koje pokriva nekoliko početnih navoja puža. Neki ekstruderi nemaju posebnu jedinicu sa ulaznim grlom, koje je u tom slučaju izrađeno zajedno sa cilindrom. Jedinica sa ulaznim grlom, koja je obično odlivak, hladi se vodom kako ne bi došlo do preranog zagrevanja polimera što bi moglo dovesti do lepljenja materijala i zagušivanja ulaza, tj. neredovnog punjenja.

Na mestu povezivanja ulazne jedinice sa radnim cilindrom mora postojati termalna barijera kako bi se sprečio prenos toplote iz radnog cilindra u ulaznu jedinicu. Kod jednodelnog radnog cilindra to nije moguće.

Ulazno grlo mora biti dimenzionisano prema protoku sirovine, a geometrijski oblici datu su na slici 3.11.

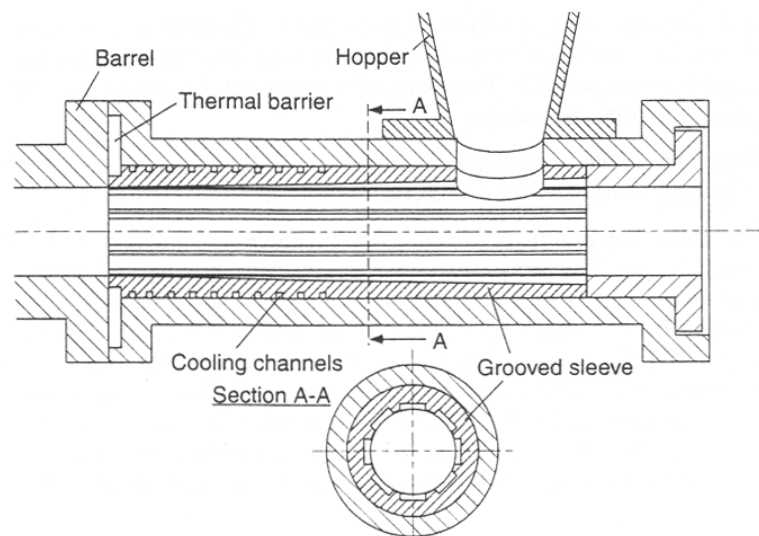


Slika. 3.11

Slika 3.11a prikazuje uobičajeni ulazni port, *slika 3.11b* potkopanu varijantu koja se koristi za rastopljeni materijal. Problem kod ovog rešenja je uvlačenje materijala u klinasti prostor između puža i kontejnera. Ako je materijal jako tvrd onda se javlja veliko radijalno opterećenje puža i izaziva njegovo savijanje. To dovodi do habanja puža i površine cilindra. Ovakav ulaz treba koristiti za rastopljen polimer. Bolja konstrukcija prikazana je na *slici 3.11c*, takođe potkopan ulaz koji obezbeđuje dobro punjenje. Klinasti prostor je manje izražen pa je manje opterećenje i krivljenje puža.

Otvor na cilindru ulaznog porta obično je kružnog ili pravougaonog oblika. Glatko (lako) ulaženje materijala postoji ako je otvor istog oblika kao i poprečni presek levka (bunkera). Kružni levak zahteva kružni ulazni otvor na cilindru.

Kod nekih ekstrudera primenjuje se izžljebljena sekcija za punjenje, tj. ulazni cilindar sa žljebovima, šta je prikazano na *slici 3.12*. dubina žljebova menja se od ulaza (max) do kraja ulazne sekcije gde ima vrednost nula.



Slika. 3.12

Konstrukcija ovakve (ožljebljene) ulazne sekcije mora da obezbedi:

- dobro hlađenje
- dobru termalnu izolaciju prema radnom cilindru
- da podnosi visoki pritisak

Dobro hlađenje potrebno je zbog velikog trenja i oslobađanja značajne količine toplote što bi moglo da prouzrokuje prerano topljenje polimera i otežano uvlačenje sirovog materijala. Termička izolacija između ulazne sekcije i radnog cilindra treba da spreči prenos toplote iz radnog cilindra ka ulaznoj sekciji. Kod ožljebljene ulazne sekcije pojavljuju se visoki pritisci (100-300MPa), pa kontejner ulazne sekcije mora biti dimenzionisan s obzirom na ove podatke. Između žlebova i polimera postoje visoki kontaktni naponi, pa ako sirovina sadrži abrazivne materije dolazi do habanja, što zahteva izradu ulaznog cilindra od kvalitetnog materijala.

Radni cilindar – je cilindar sa prirubnicom koji je izložen visokim pritiscima i do 70Mpa. Treba da je robusne konstukcije kako bi se izbegle neželjene deformacije (uleganje i krivljenje). Mnogi cilindri grade se sa unutrašnom površinom otpornom na habanje što produžuje radni vek cilindra. U tom smislu primenjuju se dve tehnike:

1. nitriranje
2. bimetalno legiranje

Nitriranje se može izvesti kao jonsko (pomoću plazme) ili kao gasno ili tečno nitriranje. Jonsko nitriranje daje bolje rezultate. U tom smislu cilindar se nalazi u vakuumu (u vakuumskoj komori) povezan sa jednosmernom strujom visokog napona predstavljajući anodu. Posle vakuumiranja vodi se nitrogeni gas. Između cilindra i vakuumske komore postoji visoki potencijal (400-1000V), što dovodi do jonizacije gasa i joni azota se talože na površini cilindra. Nitrirani sloj sastoji se od dve zone:

- a) zone hemijski vezanog azota čija je debljina 5-8 μ m
- b) zone difuzije

Ukupna debljina nitriranog sloja je oko 0,4mm.

Bimetalni cilindar – je dvoslojni cilindar koji se sastoji od osnovnog cilindra u koji se sa unutrašnje strane centrifugalno lije sloj od bimetalne legure.

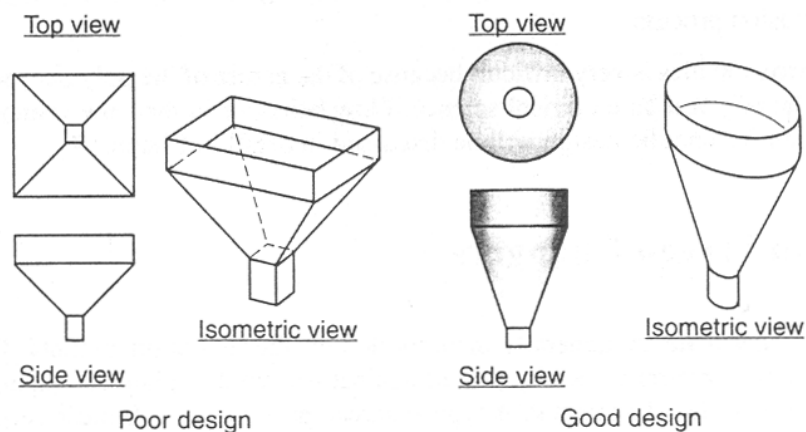
Tačka topljenja bimetalne legure je niža od tačke topljenja osnovnog materijala. Radni cilindar se sa donje strane zatvara, zagreva i naliva bimetalnom legurom uz sporo okretanje. Kad se postigne potrebna temperatura radni cilindar se počne obrtati velikom brzinom što dovodi do ravnomernog raspoređivanja rastopljene legure po površini cilindra. Dubina bimetalnog sloja je 1,5-2mm.

Komparativna ispitivanja pokazuju da je otpornost na habanje bolja kod bimetalnih nego kod nitriranih cilindara. Povećanjem zone hemijski vezanog azota kod nitriranog sloja povećava se i otpornost na habanje.

3.4 Levak (bunker) za punjenje

Levak služi za uvođenje granulata u sekciju za punjenje ekstrudera. U najvećem broju slučajeva uvođenje materijala je gravitaciono, ali na žalost to nije moguće kod svih materijala. Neki komadni materijali imaju slabe karakteristike tečenja pa se moraju uvoditi pomoću specijalnog uređaja. Ponekad je dovoljno da levak vibrira da bi se poboljšalo punjenje cilindra. Takođe, se ponekad primenjuje i mešanje kako bi se izbegla segregacija čestica materijala.

Da bi se postiglo kontinualno tečenje granulata, postepeno se povećava pritisak u zoni ulaza i primenjuje kružna konstrukcija levka. Nažalost, ekstruderi se obično grade sa pravougaonim levcima i otvorima. Na *slici 3.13* prikazane su dobre i loše konstrukcije levkova.

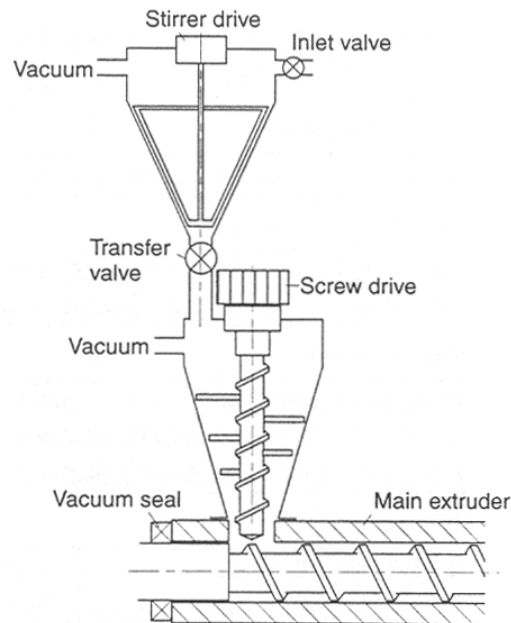


Slika. 3.13

Pravougaoni levak sa brzim (naglim) sužavanjem radi dobro sa rasutim materijalom ujedinačene krupnoće. Međutim, ako to nije slučaj postoje problemi u transportu. U tom slučaju bolje je koristiti bunkere kružnog preseka.

U slučaju niske gustine materijala postoje problemi u transportu zbog mešanja sa vazduhom. Tada se preporučuje upotreba vakuum sistema za punjenje. Na *slici 3.14* prikazan je vakuumski sistem

za punjenje sa dva vakuumirana levka. Gornji levak mora biti vakuumiran da bi materijal uopšte mogao da se naspe u njega. U donjem vakuum bunkeru postoji poseban puž za uvlačenje materijala.



Slika. 3.14

Kod konstruisanja levka treba imati u vidu da ugao nagiba zidova mora biti veći od ugla trenja kako bi se sprečilo habanje materijala levka.

3.5 Puž ekstrudera

Centralni deo svakog ekstrudera jeste puž čijim rotiranjem se transportuje materijal, zagreva, topi i potiskuje u alat, odnosno, izrađuje željeni profil.

Puž je cilindrična šipka promenljivog prečnika, obmotana helikoidnom zavojnicom određene geometrije. Spoljni prečnik puža je u većini slučajeva konstantan. Između puža i cilindra postoji mali zazor. Generalno odnos radijalnog zazora prema prečniku ($\Delta D / D$) puža je od 0,0005-0,0020. Puž se izrađuje od srednjeugljeničnog čelika, a podaci o materijalima koji se koriste u Evropi dati su u *tabeli 3.5*.

Table 3.5. European Equivalents or Similar Materials

US designation	European designation
8620	21NiCrMo2
4140 Heat treated	42CrMo4
Nitralloy 135M	41CrAlMoZ
304 Stainless steel	X5CrNi189
316 Stainless steel	X5CrNi189
H-13 Tool steel	X40CrMoV51
D-2 Tool steel	X155CrVMo121

3.6 Postavljanje alata

Kod ekstrudera alat se montira na prirubnicu radnog cilindra. Između alata i radnog cilindra, nalazi se međuploča male debljine sa puno otvora paralelnih osi puža. Ova ploča sprečava rotiranje rastopljenog polimera i omogućuje postavljanje tankog filtera. Filter ima ulogu da uklanja nečistoće, a u nekim slučajevima utiče na povećanje pritiska u glavi alata. Međuploča (breaker plate) omogućuje još i bolji prenos toplote sa metala na rastopljeni materijal, što doprinosi homogenizaciji temperature u rastopu.

Ako izlaz iz radnog cilindra ne odgovara alatu moguća je upotreba odgovarajućeg adaptera.

Alat je uređaj koji omogućuje formiranje profila tačno određenog oblika. Svi ostali elementi ekstrudera imaju jedinstveni cilj: snabdevanje alata rastopljenim polimerom u dovoljnoj količini i pod određenim pritiskom.

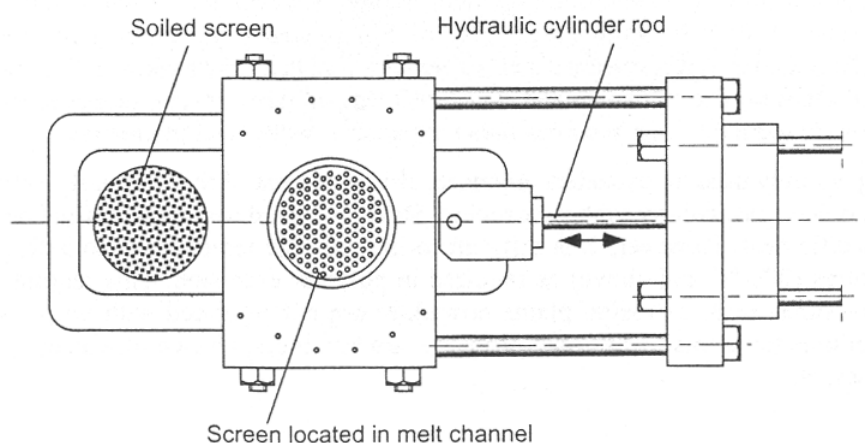
3.6.1. Filter

Filter postavljen ispred prekidne ploče (breaker plate) ima zadatak da odstrani nečistoće iz rastopljenog polimera. Gustina filtera zavisi od vrste polimera i uslova obrade, a broj otvora iznosi 100, 60, 30 (na određenoj površini). Filteri mogu biti izrađeni od žice, sinterovani i od fibera. Usporedne osobine date su u *tabeli 3.7*.

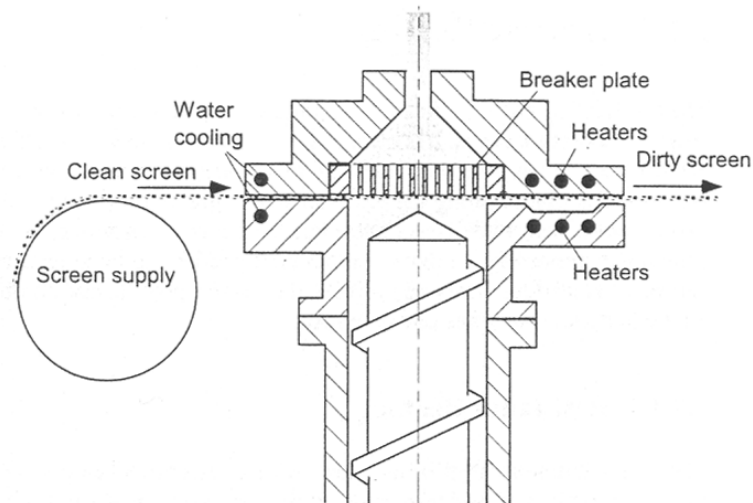
Tkanje žičanog filtera može biti različito, a obično se koriste filteri sa pravougaonim (kvadratnim) tkanjem. Za dobro filtriranje primenjuju se različiti materijali i njihove kombinacije.

Zamena filtera mora biti brza kako bi se proces ekstruzije što manje ometao. Zagušenje filtera dovodi do pada pritiska u alatu što je signal za njegovu zamenu. Mehanizam za zamenu filtera može biti sa šiberom (*slika 3.15*) što podrazumeva zaustavljenje ekstrudera. Kod jako zaprljanog polimera zamena filtera vrši se vrlo često, npr. svakih 5-10 min.

Znatno kvalitetniji sistem za filtriranje je automatski sistem (*slika 3.16*). Kod ovog filtriranja filter se neprekidno kreće malom brzinom.



Sl. 3.15



Sl. 3.16

3.7 Sistem za zagrevanje i hlađenje

Zagrevanje ekstrudera se zahteva radi dovođenja mašine na radnu temperaturu koja je određena vrstom polimera koji se obrađuje. Zagrevanje se vrši na tri načina:

1. električno pomoću grejača,
2. pomoću zagrejanog fluida,
3. pomoću vodene pare.

3.7.1. Električno zagrevanje

Ovaj način zagrevanja je najčešće u upotrebi. Ima velike prednosti u odnosu na druge. Može da pokriva široko temperaturno područje, sistem je čist, jednostavan za održavanje, jeftin i ima visok stepen iskorišćenja energije. Električni grejači postavljeni su u grupama oko radnog cilindra. Manji ekstruderi imaju 2 do 4 grupe grejača a veliki 5 do 10. U većini slučajeva, temperatura svakog grejača se kontroliše nezavisno, pa se temperaturni profil može uspostaviti, prema zahtevu, uzduž cilindra. Temperaturni profil može biti:

- ravan,
- uzlazni,
- padajući,
- kombinovani,

zavisno od zahteva obrade i vrste polimera.

3.7.1.1. Elektro-otporni grejači

Ova vrsta električnih grejačaja je uobičajena kod ekstrudera. Princip rada baziran je na Omovom zakonu.

Snaga grejača:

$$Q = R \cdot I^2 = U \cdot I = \frac{U^2}{R}$$

I – struja U – napon R – otpor grejača

Gornja relacija važi za jednosmernu i monofaznu naizmjeničnu struju. Kod trofaznog grejača snaga se dobija iz relacije:

$$Q = 3 \cdot U \cdot I$$

Ranije konstrukcije grejača bile su od žice koja je izolovana liskunom, a ceo grejač bio je obmotan fleksi limom. Ovakvi grejači su jeftini, ali i relativno nepouzdana sa ograničenom snagom do 50 kW/m² i max. temperaturom do 500⁰C. Noviji grejači imaju snagu od 165 kW/m², visok stepen iskorišćenja i dobar kontakt sa cilindrom ekstrudera. Za dobar prenos toplote od grejača do radnog cilindra koriste se komercijalne paste.

Keramički grejači, sa keramički izolovanim namotajem imaju snagu do 160 kW/m², a max. temperatura je 750⁰C. Nedostatak im je nefleksibilnost namotaja.

Sledeći tip grejača je tzv. uliveni, koji se dobijaju ulivanjem provodnika u polucilindrične plašteve – blokove. Imaju dobru pouzdanost i dug radni vek, snaga im je do 55 kW/m², a max. temperatura 400⁰C. Grejači uliveni u bronzu imaju snagu 80 kW/m², a max. temperaturu 550⁰C.

3.7.1.2. Indukcioni grejači

Indukcioni grejač sastoji se od primarnog namotaja obmotanog oko cilindra, kroz koji se propušta naizmjenična struja. U radnom cilindru se indukuje sekundarna struja koja se pretvara u toplotu.

Dubina grejanja se reguliše sa frekvencijom struje. Kod frekvencije od 50-60 Hz, dubina je 25mm, što odgovara većini standardnih ekstrudera. Prednost ovog grejača je značajna redukcija temperaturnog gradijenta u zidu cilindra, jer se toplota stvara neposredno u njemu.. sledeća prednost ovog grejača je smanjeno zaostajanje u odnosu na ulaznu snagu, tj. brza reakcija pri podešavanju temperature. Ovi grejači imaju bolji koeficijent iskorišćenja energije. Takođe ovi grejači omogućuju da neposredno oko cilindra budu postavljeni elementi za hlađenje. Njihov jedini nedostatak je visoka cena.

3.7.2. Grejanje fluidom

Ovaj sistem zagrevanja koristi se za temperature do 250⁰C. Grejač može biti izgrađen iscela ili iz segmenata radi održavanja lokalne temperature, a ovo rešenje je skuplje. Kod ovog sistema koriste se specijalni fluidi koji ispuštaju otrovne pare. Ovaj sistem može da vrši i funkciju hlađenja.

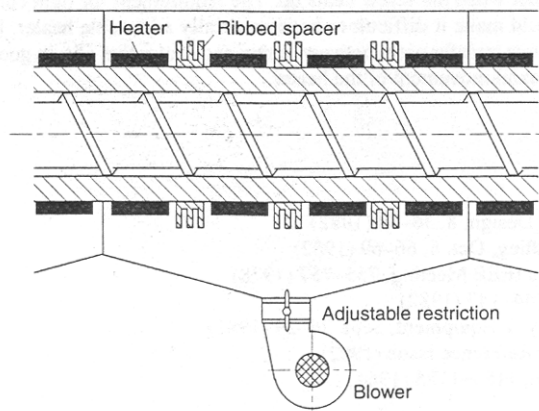
Para se sve ređe koristi za zagrevanje ekstrudera, uglavnom je prisutna kod starijih ekstrudera, posebno kod prerade gume. Rade sa max. temperaturama od 200⁰C. Preko ove temperature u sistemu se povećava pritisak. Ima puno praktičnih problema: korozija, zaptivanje...

3.7.3. Hlađenje ekstrudera

Hlađenje ekstrudera je potrebno kod većine operacija. Međutim, hlađenje treba svesti na minimum jer to predstavlja gubitak energije. Zagrevanje ekstrudera generalno smanjuje snagu pogonskog motora, odnosno, energiju za njegovo pokretanje.

Proces ekstrudiranja i oprema su projektovani tako da se potrebna toplotna energija u najvećem delu dobija transformacijom mehaničke energije (koja nastaje smicanjem – trenjem) u toplotnu energiju. Mehanička energija učestvuje sa 70-80% u ukupno potrebnoj energiji ekstruzije.

Najveći deo energije dobija se od puža, pa postoji mogućnost da je ta energija veća od potrebne, što dovodi do potrebe za hlađenjem. Većina ekstrudera hladi se vazduhom pomoću duvaljki (*slika 3.17*).



Sl. 3.17

Kod većih ekstrudera hlađenje se vrši duvanjem vazduha preko grejača i rashladnih rebara koja su postavljena u žljebove između grejača (slika 3.17).

Kod manjih ekstrudera obično nije potrebno hlađenje pomoću prinudne cirkulacije jer je površina cilindra dovoljno velika za pouzdano hlađenje.

Hlađenje nije potrebno ni kod adijabatskih ekstrudera kod kojih nema nikakve razmene toplote sa okolinom.

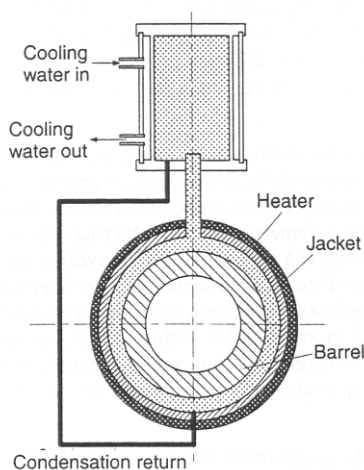
Kod ekstruzije, generalno, je povoljnije da se toplota potrebna za topljenje polimera dobije transformacijom mehaničke energije koja se dešava u neposrednom kontaktu sa materijalom. Količina toplote koja se dobija od grejača relativno je mala, ali postoji problem visokog temperaturnog gradijenta, koji je potreban da bi se ostvario brz prenos toplote od zida cilindra na materijal. Tako visok temperaturni gradijent i dugo zagrevanje stvara uslove za degradaciju polimera. Udeo mehaničke energije kod ekstrudera treba da je veća od 50% a manji od 90%.

Vazdušno hlađenje ekstrudera je povoljno jer je proces smanjenja temperature relativno spor, tj. hlađenje nije naglo, za razliku od vodenog hlađenja.

Za intenzivnije hlađenje koristi se voda. Ovaj sistem promjenjuje se npr. kod sekcije za punjenje (poglavlje 3.3) gde se razvija velika toplota. Problem kod vodenog hlađenja je mogućnost pojave vodene pare ako se voda zagreje preko tačke ključanja, što dovodi do destabilizacije procesa hlađenja.

Za »omekšavanje« procesa hlađenja razvijen je i patentiran sistem hlađenja sa parom (slika 3.18).

Toplota koju para pokupi pri cirkulaciji oko radnog cilindra, odvodi se pomoću toplotnog razmenjivača tj. hladnjaka. Ovakav sistem hlađenja ima »glatku« karakteristiku i kvalitetniji je od vodenog sistema. Hlađenje ekstrudera vrši se i pomoću ulja ili kombinovano sa duvanjem vazduha.



Sl. 3.18

3.7.4. Zagrevanje i hlađenje puža

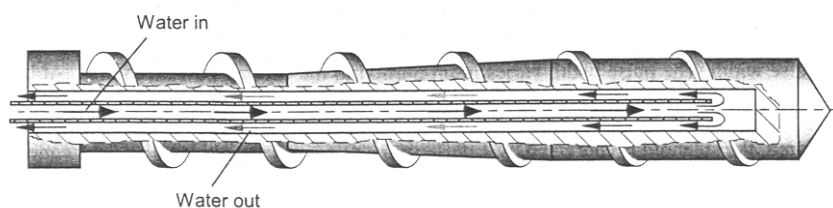
Unutrašnja površina cilindra čini oko 50% kontakta sa polimerom, dok druga polovina pripada kontaktu sa površinom puža. Preko tih površina vrši se prenos toplote bilo da se radi o zagrevanju ili hlađenju. Kod mnogih ekstrudera puž niti se posebno zagreva niti hladi. To su tzv. neutralni puževi. Zagrevanje i hlađenje puža je potrebno u slučaju intenzivnog spoljašnjeg grejanja, odnosno hlađenja.

Hlađenje ili zagrevanje puža je komplikovanije u odnosu na cilindar jer se puž okreće.

Odvođenje energije iz puža može se vršiti preko kliznih ležajeva i drugih uređaja. Međutim, efikasno hlađenje puža vrši se vodom koja se pomoću cevi uvodi u središte puža, ispušta na vrhu i vraća nazad (slika 3.19). Umesto vode može se koristiti i ulje. Dužina uvedne cevi utiče na temperaturno polje i intenzitet hlađenja i mora se podešavati. Ponekad ova cev ima zaptivke koji omogućuju optimiranje mesta ispuštanja vode tj. optimiranje hlađenja puža. Kroz isti sistem vrši se i zagrevanje puža.

Intenzitet hlađenja, odnosno, zagrevanja puža utiče na viskoznost polimera, a time utiče i na pritisak utiskivanja. Pri tome važnu ulogu ima i dubina zavojnice puža, pa se cela konstrukcija ekstrudera mora optimizirati.

Zagrevanje puža ponekad je potrebno, a izvodi se ubacivanjem električnih grejača u puž. Napajanje grejača obavlja se preko kliznih prstenova. Kod ovog sistema moguća je kontrola i regulacija temperature po sekcijama. Ako su grejači montirani u hladan puž, prilikom rada puža može doći do gubitka kontakta i lošeg prenosa toplote. Za dobar kontakt može se koristiti specijalna pasta. Podešavanje temperature puža može se vršiti aksijalnim pomeranjem grejača. Ako je grejač zalepljen onda nema mogućnosti podešavanja temperature.



Sl. 3.19

3. INSTRUMENTI I KONTROLA – UPRAVLJANJE

Instrumentacija ekstrudera je najkritičniji deo svakog ekstrudera. Proces ekstrudiranja je zatvoren proces, a nadzor i kontrola je moguća isključivo kontrolom obratka, odnosno profila. U slučaju pojave poremećaja u procesu, dijagnosticiranje procesa jedino je moguće pomoću merno-regulacionog sistema.

Praćenje toka rada ekstrudera moguće je jedino pomoću dobre instrumentacije, a najbolje je ako je to moguće pratiti kontinualno. Osnovni parametri koji se prate su:

- pritisak,
- temperatura,
- snaga i
- brzina.

Minimalni set instrumenata ekstrudera obuhvata merenje:

1. pritiska u alatu i iza filtera,
2. brzinu obrtanja puža,
3. temperaturu rastopa u alatu,
4. temperaturu uzduž cilindra i alata,
5. parametre hlađenja,
6. potrošnju energije zagrevanja po zonama,
7. potrošnju energije pogona,
8. temperaturu rashladne vode u ulaznoj zoni,
9. protok vode u ulaznoj zoni.

Osim navedenog kod ventiliranih ekstrudera meri se nivo vakuuma. Kod nekih ekstrudera detaljnije se meri temperatura materijala unutar cilindra i spolja na obratku radi snimanja distribucije temeperatura.

Gornji parametri odnose se na unutrašnjost ekstrudera, međutim eksterno se prati još:

- brzina linije, tj. brzina obratka,
- dimenzije obratka,
- protok rashladne tečnosti,
- zatezna sila obratka.

Na rad ekstrudera utiču i parametri okoline:

- temperatura vazduha,
- vlažnosti,
- napon napajanja, itd.

Postojanje instrumentacije omogućuje brzo dijagnosticiranje problema u procesu ekstruzije i njihovo otklanjanje.

4.1 Najvažniji parametri

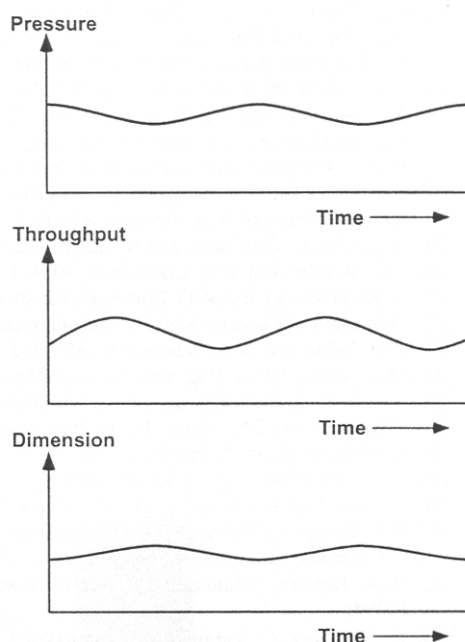
Najvažniji parametri kod ekstrudera su PRITISAK i TEMPERATURA i oni najbolje pokazuju kako ekstruder radi – dobro ili loše. Promenom ovih parametara (kao kod čoveka), identifikuje se stanje ekstrudera.

4.2 Merenje pritiska

Merenje pritiska rastopljenog polimera vrši se iz dva razloga:

1. Monitoring i upravljanje
2. Sigurnost i zaštita

Pritisak u alatu mora biti dovoljan da savlada otpore rečanju rastopa, u protivnom ne dobijaju se dobri izlazni parametri obratka (*slika 4.1*). Zapisivanjem pritiska tokom vremena dobija se dokumentovani uvid u promenu ovog parametra tokom vremena.



Sl. 4.1

Sa stanovišta sigurnosti praćenje pritiska je neophodno jer previsok pritisak može izazvati eksploziju ekstrudera. Pritisak se u ekstruderu može povećati naglo (brzo) bez prethodnog upozorenja i dovesti do katastrofalnih posledica. Radi toga je potrebno da postoji sistem neprekidnog nadgledanja pritiska sa mogućnošću zaustavljanja mašine pri previsokom opterećenju.

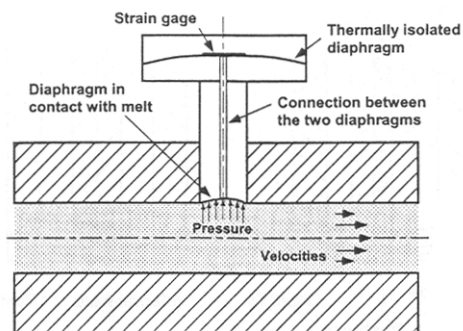
4.2.2. Tipovi mernih sondi za pritisak

Pritisak u ekstruderu meren je vrlo rano u početku primene ovih mašina. Merenje je vršeno pomoću burdmove cevi (manometra) ispunjene mašću. Ovakav način merenja odvija se sa puno praktičnih problema.

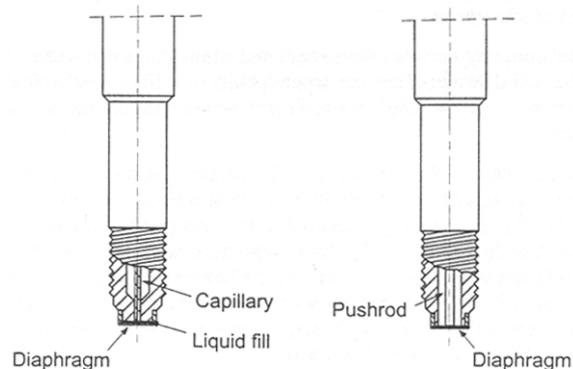
Danas su u primeni dva tipa sondi za merenje pritiska:

1. instrument sa mernim trakama,
2. piezoelektrični instrumenti.

Sonda sa mernim trakama (*slika 4.2*) daje dobre rezultate, a opterećenje mernih traka, zalepljenih na membranu, sa rastopljenog polimera prenosi se posredno pomoću tečnosti zatvorene u kapilari ili pomoću mehaničke veze tj. šipke (*slika 4.3*).



Sl. 4.2



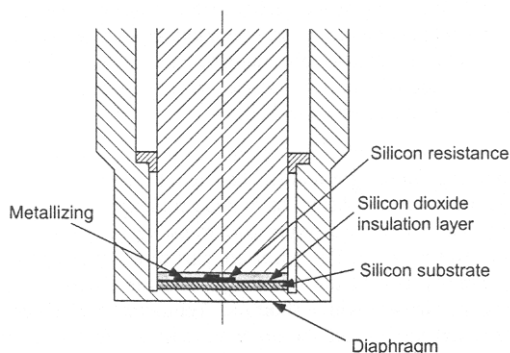
Sl. 4.3

U oba slučaja instrumenti imaju dve elastične membrane – donju koja je u kontaktu sa rastopom i gornju na kojoj su zalepljen merne trake. U nekim slučajevima instrument je napunjen živom, a problemi nastaju pri oštećenju membrane i izlivanju iste u polimer.

Kod nekih davača (sondi) pritiska kapilarna cev se puni sa gasom. Problem kod ovih instrumenata je u tome što gas drastično menja karakteristike sa promenom temperature. Tačnost davača pritiska kreće se u granicama od 0,5 do 3%. Rešenje sa mehaničkom vezom (slika 4.3) daje dobre rezultate.

Sledeći tip mernih sondi su instrumenti koji koriste komprimovan vazduh. Ovi instrumenti takođe su osetljivi na promenu temperature.

Piezoelektrični davač pritiska (slika 4.4) vrlo je pouzdan instrument i koristi se za merenje pritiska u širokom dijapazonu u uslovima visokih temperatura. Kod njih se koristi efekat silicijumskog kristala koji pod dejstvom opterećenja indukuje električni impuls. Ovi instrumenti imaju tu prednost što brzo reaguju i omogućuju registrovanje pritiska sa frekvencijom od nekoliko KHz. Nedostatak ovih instrumenata je nemogućnost preciznog merenja stacionarnog stanja pritiska, pa je njihova primena limitirana samo na merenje promenljivih pritisaka.



Sl. 4.4

Piezoelektrični instrumenti mogu rade ispravno na temperaturama do 120⁰C.

Za merenje pritiska koriste se i optičke sonde (firma FOS – Germany) proizvodi ove uređaje. Merenje u ovom slučaju bazirano je na merenju krivljenja dijafragme pomoću optičkog sistema. Ovi instrumenti mogu da prate promenu pritiska frekvencijom do 50KHz.

Uporedni prikaz pojedinih sondi za merenje pritiska dat je u tabeli 4.1.

Transducer type	Robustness	Temperature sensitivity	Dynamic response	Total error
Pneumatic	Good	Poor	Poor	About 1.5%
Capillary strain gauge*	Fair	Fair	Fair	0.5 to 3%
Pushrod strain gauge	Fair	Poor	Fair	About 3%
Piezo-electric	Good	Poor	Good	0.5–1.5%
Piezo-resistive	Good	Good	Good	0.2 to 0.5%
Optical	Good	Good	Good	About 0.5%

Tabela 4.1.

Mehaničke izvedbe dijafragmi koje se izrađuju od nerđajućeg čelika date su na slici 4.5. Spoj membrane sa telom sonde je zavar koji predstavlja kritično mesto. U membrani vlada dvoosno naponsko stanje (zatezno). Zbog agresivnosti polimera membrane se grade od hemijski jako otpornog čelika.

4.3 Merenje temperature

Kod ekstrudera temperatura se meri na različitim mestima: uzduž cilindra, u rastopljenom polimeru i u alatu. Merenje se vrši primenom različitih instrumenata.

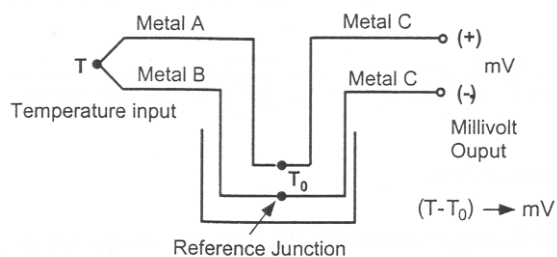
4.3.1. Metode merenja temperature

Kod ekstruzije temperatura se meri pomoću:

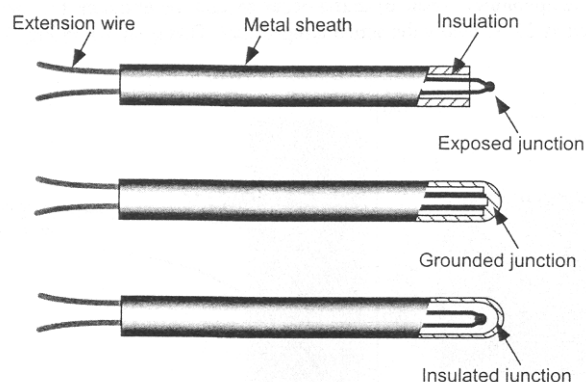
1. elektrootpornih instrumenata,
2. termoparova,
3. pirometara.

Elektrootporni instrumenti bazirani su na promeni otpora provodenju električne struje sa promenom temperature. Mogu biti provodnički (konduktivni) ili poluprovodnički. Kod konduktivnih instrumenata primenjuju se elementi od platine, pogotovo za visoke temperature. Slično tome postoje i instrumenti od poluprovodnika, a zbog svojih malih dimenzija primenjuju se tamo gde druge instrumente nije moguće ugraditi. Nedostatak im je što imaju nelinearnu karakteristiku otpor-temperatura.

Instrumenti sa termoparom često se koriste kod ekstrudera. Šema ovog instrumenta data je na slici 4.10., a na slici 4.11. date su različite izvedbe. Promena temperature termopara izaziva promenu električnog napona što predstavlja podlogu za merenje temperature.



Sl. 4.10



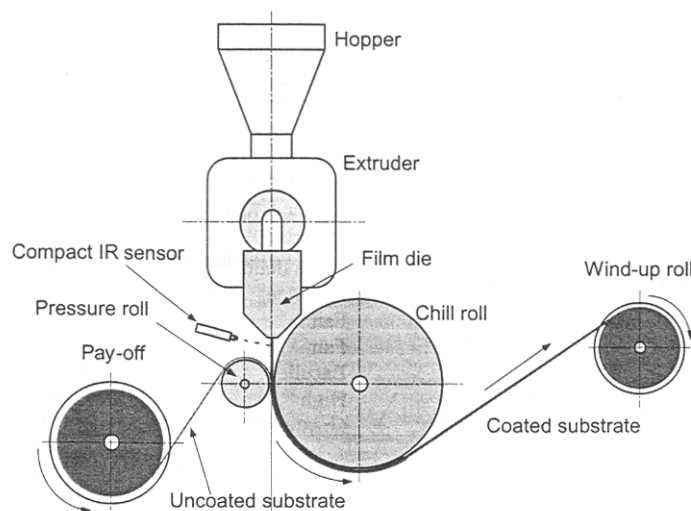
Sl. 4.11

Kontaktno merenje temperature kod ekstrudera nije preporučljivo jer se oštećuje površina ekstrudera. Za bezkontaktno merenje temperature koriste se infracrveni (IR) senzori. Ovi instrumenti mogu se koristiti za merenje temperature obratka po izlasku iz alata, a takođe se mogu koristiti za merenje temperature unutar ekstrudera. IR merenje koristi se kod izrade folije (filma) duvanjem, livenja filma, biaksijalnog oblikovanja, prevlačenja itd.

Bezkontaktno merenje temperature ima sledeće prednosti:

- nema mogućnosti zagađivanja i oštećenja obratka.
- moguće merenje temperature i pri velikoj brzini obratka,
- merenje je moguće kako na malim tako i na velikim površinama,
- izlazni signal instrumenta može biti analogni ili digitalni.

Primer merenja IR instrumentom dat je na slici 4.12.



Sl. 4.12

Uporedne karakteristike senzora date su u tabeli 4.3.

Table 4.3. Comparison of Various Temperature Sensors

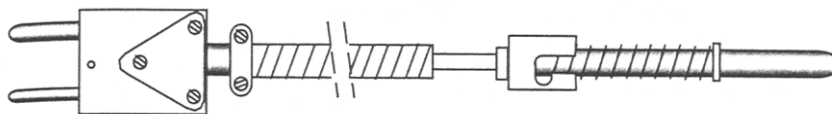
	Thermocouple	RTD	Thermistor
Reproducibility	1–8 °C	0.03–0.05 °C	0.1–1 °C
Stability	1–2 °C in 1 year	<0.1% in 5 years	0.1–3 °C in 1 year
Sensitivity	0.01–0.05 mV/°C	0.2–10 Ohm/°C	100–1000 Ohm/°C
Interchangeability	Good	Excellent	Poor
Temperature range	–250 to 2300 °C	–250 to 1000 °C	–100 to 280 °C
Signal output	0–60 mV	1–6V	1–3V
Minimum size	25 µm diameter	3 mm diameter	0.4 mm diameter
Linearity	Excellent	Excellent	Poor
Response time	Good	Fair	Good
Point sensing	Excellent	Fair	Excellent
Area sensing	Poor	Excellent	Poor
Cost	Low	High	Low
Unique features	Greatest economy, wide range, common in extrusion	Greatest accuracy, very stable, less common in extrusion	Greater sensitivity, rarely used in extrusion

Tabela 4.3.

4.3.2. Merenje temperature cilindra

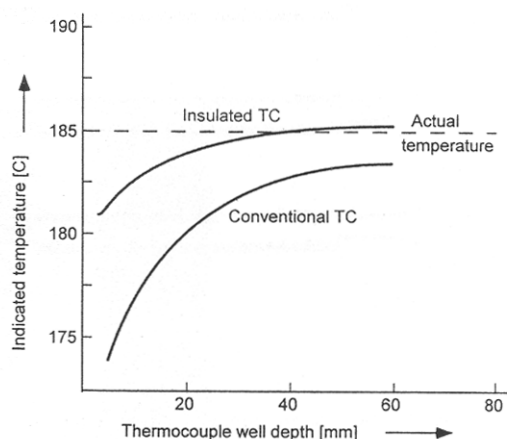
Merenje temperature uzduž cilindra ima za cilj dobijanje informacija za upravljanje procesom i za upravljanje grejačima. Po mogućstvu potrebno je da se temperatura meri na unutrašnjoj površini

cilindra. Loše je ako se to radi na površini grejača. Merni instrument za temperaturu postavlja se u zid cilindra i opterećen je oprugom radi boljeg naleganja (slika 4.13.).

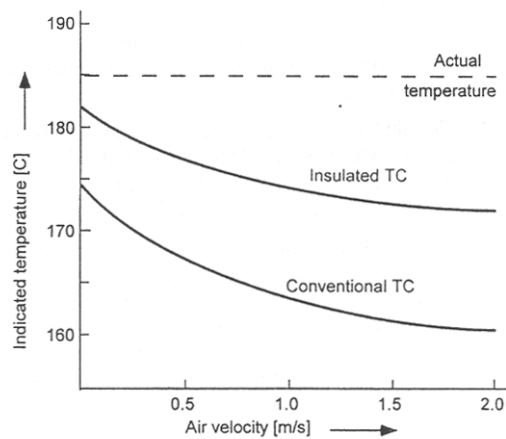


Sl. 4.13

Radi zaštite termoinstrument je obložen metalnom oblogom što dovodi do greške u merenju. Dubina postavljanja instrumenta takođe utiče na tačnost merenja (slika 4.14.). Ako se ekstruder hladi vazduhom, takođe se pojavljuje greška u merenju temperature (slika 4.15.)



Sl. 4.14



Sl. 4.15

4.3.3. Merenje temperature rastopljenog polimera

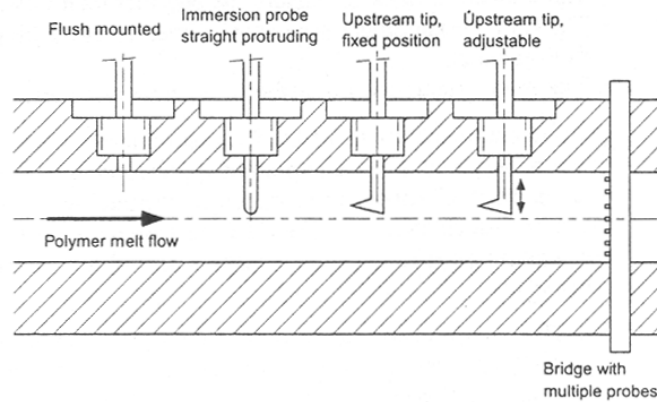
Praćenje temperature rastopljenog polimera (polimera u cilindru) je vrlo važno za proces ekstrudiranja i kvalitet profila, ali je uvek problematično zbog nemogućnosti postavljanja mernih sondi u unutrašnjost radnog cilindra. Zbog obrtanja puža došlo bi do oštećenja mernih sondi, a alternativa bi bilo postavljanje instrumenata u žljebove puža što je prilično komplikovano. Sledeća varijanta je ugradnja instrumenata u zid cilindra i puža. Poslednja varijanta nije prihvatljiva zbog permanentnog ometanja tečenja materijala.

Kada se analizira temperatura rastopa uzduž ekstrudera, treba imati u vidu da je promena temperature izražajniya u radijalnom pravcu. U zoni plastifikacije promena temperature u radijalnom pravcu iznosi od 30° - 80° C/mm što pokazuje da je radijalni temperaturni gradijent reda 50.000° C/m, a to je oko tri puta više u odnosu na gradijent u aksijalnom pravcu. Sledeći problem merenja temperature u polimeru odnosi se na zonu čvrstog stanja polimera gde nijedan instrument ne pokazuje pravo stanje jer je teško ostvariti kontakt čvrste čestice u pokretu sa vrhom merne sonde. Zona čvrstog stanja i zona plastifikacije prostiru se na oko 2/3 dužine radnog cilindra, a u njima je otežano merenje temperature polimera.

Iz izloženog sledi da je merenje temperature polimera moguće jedino u poslednjoj trećini radnog cilindra. Svakako da se merenje temperature polimera u prethodne 2/3 cilindra izvodi merenjem temperature u dubini zida cilindra.

Merenje temperature uzduž cilindra ne vrši se kod svih mašina generalno, nego samo kod posebno instrumentalizovanih mašina, za posebne svrhe ispitivanja. Merenje temperature polimera moguće je na kraju puža gde su zavojnice manje visine i ne pretil opasnost od oštećenja instrumenata.

Brojni pokušaji i ispitivanja temperature polimera vršena su pri proticanju rastopljenog polimera kroz kanal. Na slici 4.16. prikazane su različite varijante sonde za merenje temperature rastopljenog polimera pri strujanju kroz kanal.



Sl. 4.16

Prva varijanta (flush mounted) je dobra jer ne ometa tečenje rastopa, ali instrument nije ubačen u rastop. Rezultat se više odnosi na temperaturu kontaktne površine rastopa sa zidom cilindra. Jedan od problema ovog merenja je u tome što se maksimalna temperatura ne pojavljuje na zidu cilindra već u dubini rastopljenog materijala.

Druga varijanta je merenje temperature rastopa sa uronjenim instrumentom. Ovaj sistem merenja radi se značajnom greškom zbog trenja materijala pri tečenju preko sonde, što izaziva dodatno lokalno zagrevanje. Povoljnija je varijanta sa senzorom postavljenim paralelno sa tokom materijala (treća varijanta na slici 4.16.). sonda mora biti tako dimenzionisana da bude mehanički otporna, što je kritično pri pokretanju i zaustavljanju ekstrudera. Poslednja varijanta merenja temperature rastopljenog polimera (slika 4.16.) omogućuje snimanje temperature profila po dubini jer se sonda može radijalno pomerati.

4.3.3.1. Ultrazvučno merenje temperature rastopa (UTT – Ultrasound Transmission Time)

Istraživanja IKV iz Ahena pokazala su da se vreme transmisije ultrazvuka može upotrebiti za merenje temperature rastopljenog polimera, na osnovu čega je razvijen bezkontaktni metod merenja. Prednosti ovog sistema su:

- sonda ne ometa tečenje,
- ne merenje ne utiče energija trenja.

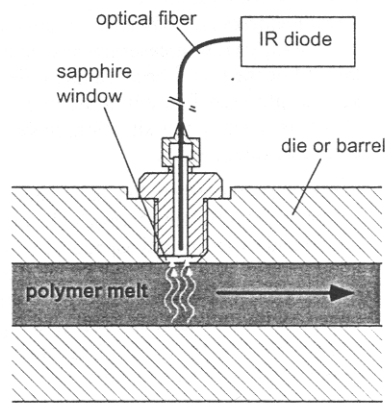
Ovakvi instrumenti (UTT) pojavili su se 1976. ali nemaju širu primenu.

4.3.3.2. Infracrveno merenje temperature rastopa (IR – Infra Red)

Infra crvene sonde (IR sonde) za merenje temperature rastopa u alatu i radnom cilindru imaju komercijalnu primenu. Koriste se manje ili više za merenje prosečne temperature rastopa na dubini 1-5mm. Merenje temperature rastopa IR metodom bazirano je na optičkim svojstvima polimera na različitim temperaturama.

Prednost IR metode je u tome što je vreme odziva u milisekundama.

Na slici 4.17. prikazan je IR sistem za merenje temperature. Na vrhu sonde nalazi se safirni prozor koji ima dobra optička svojstva i dobru otpornost na habanje. Pomoću optičkog kabla signal se dovodi do elektronskog uređaja za očitavanje temperature.



Sl. 4.17

4.4 Ostala merenja

Osim temperature i pritiska, koji predstavljaju osnovne parametre ekstruzije, kod ove tehnologije postoje i drugi parametri koji se ne mogu ignorisati.

4.4.1. Merenje snage

Merenje i praćenje ukupne snage ekstrudera, odnosno potrošnje električne energije, vrlo je jednostavno ugradnjom ampermetra u strujno kolo i uz merenje napona napajanja. Kod jednosmernog napajanja snaga je proizvod struje i napona, a kod naizmeničnog stuje potrebne su određene korekcije.

Aproksimativna potrošnja struje kod jednosmernog napajanja izračunava se na osnovu izraza:

$$Z = 0.9 \frac{N_{act}}{N_{max}} \cdot I_a \cdot V_a$$

N_{act} aktuelni broj obrtaja,

N_{max} maksimalni broj obrtaja,

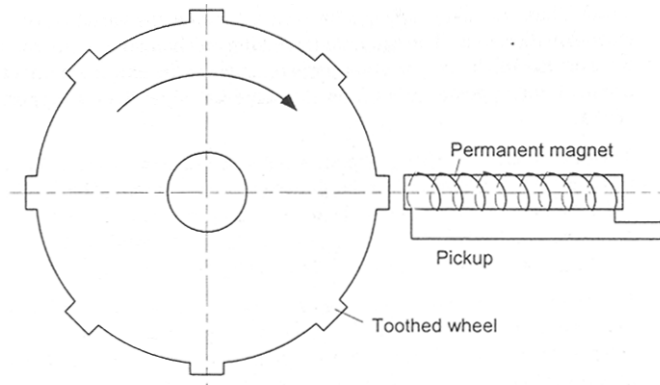
I_a , V_a aktuelna struja i napon.

Dobar način merenja snage ekstrudera jeste merenje obrtnog momenta na pužu, a snaga se dobija kao proizvod ugaone brzine i obrtnog momenta ($P = M \omega$).

Snaga grejača određuje se merenjem struje i napona.

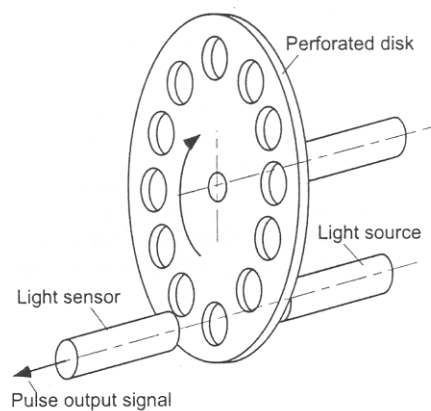
4.4.2 Merenje brzine obrtanja

Solenoid sa permanentnim magnetom u kombinaciji sa zupčastim točkom (slika 4.18.) omogućuje vrlo precizno merenje broja obrtaja. Namotaj solenoida nalazi se u konstantnom magnetnom polju permanentnog magneta, koje se menja nailaskom isturenog zuba, indukujući napon u namotaju, na osnovu čega se dobija stvarni broj obrtaja vratila.



Sl. 4.18

Optički merač broja obrtaja dat je na slici 4.19., a sastoji se od diska sa otvorima koji predstavljaju optički prekidač.



Sl. 4.19

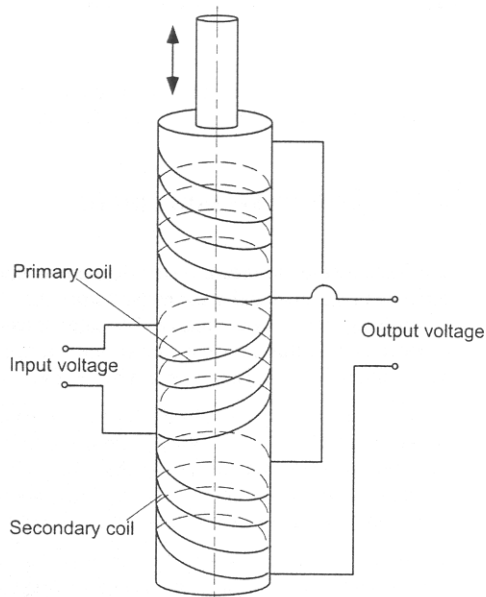
4.4.3 Merenje debljine obratka (obratka)

Za merenje debljine obratka primenjuju se različite metode kojie se mogu svrstati u dve grupe:

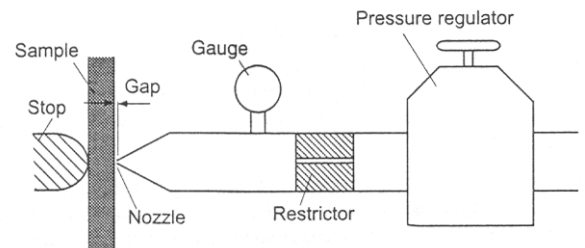
1. kontaktne,
2. bezkontaktne.

Merenje debljine obratka može se vršiti precizno ručno pomoću mikrometra.

Za kontinualno merenje debljine obratka i registrovanje podataka koristi se linearno promenjivi diferencijalni transformator (LVDT – linear variable differential transformer) slika 4.20. Pomeranje jezgra transformatora izaziva promenu indukovanog napona u sekundarnom kalemu što predstavlja signal debljine obratka. Drugi način merenja debljine je pneumatski (slika 4.21). Promena debljine utiče na promenu pritiska vazduha što predstavlja impuls za debljinu obratka.



Sl. 4.20



Sl. 4.21

Pneumatski instrument je vrlo precizan (do 0.0001 mm) za debljine od 0-2mm.

Sledeći način merenja debljine je baziran na merenju električnog kapaciteta ploča koje naležu na obradak, a koji se menja promenom rastojanja između ploča, odnosno promenom debljine obratka.

Merenje debljine ekstrudata može se vršiti i pomoću ultrazvučnog instrumenta. Takođe u istu svrhu primenjuju se piezoelektrični-ultrazvučni instrument.

4.4.4 Praćenje stanja površine

Kod ekstruzije filmova i folija male debljine, vrlo je važno stanje tj. kvalitet površine, koja se mora pratiti. Mala odstupanja kvaliteta površine u nekim slučajevima (trake za snimanje zvuka i slike, ploče, CD..., zatim visoko transparentne folije, itd.) isključuju mogućnost upotrebe ekstrudiranog proizvoda. Praćenje stanje površine od strane čoveka praktično je nemoguće za oštećenja npr. prečnika 1mm koja se kreću brzinom od 5m/s.

Za praćenje stanja površine primenjuju se elektronski davači koji prikupljaju podatke po čitavoj širini trake, pa kada greške pređu dozvoljenu granicu javlja se alarm koji upozorava da je potrebno preduzeti odgovarajuće mere za poboljšanje kvaliteta trake.

Neki komercijalni sistemi bazirani su na laserskom skeniranju površine, sa brzinom od 5000 skeniranja u sekundi.

Merenje transparentnosti folije vrši se takođe automatski merenjem intenziteta propuštenog snopa svetlosti i njegovim poređenjem sa intenzitetom svetlosti na izvoru.

Praćenje boje površine bazirano je na spektralnoj distribuciji svetlosti odbijene od površine obratka. Postoje komercijalni instrumenti ovog tipa colometri i spektrofotometri.

Orijentacija molekula kod polimera ima veliki uticaj na fizička svojstva, pa je IKV-Ahen razvio sisteme za određivanje anizotropije ekstrudata.

4.5 Upravljanje temperaturom

Dinamično ponašanje ekstrudata u značajnoj meri je određeno sistemom upravljanja temperature. Varijacija temperature u mnogome zavisi od sistema upravljanja. Sistemi upravljanja

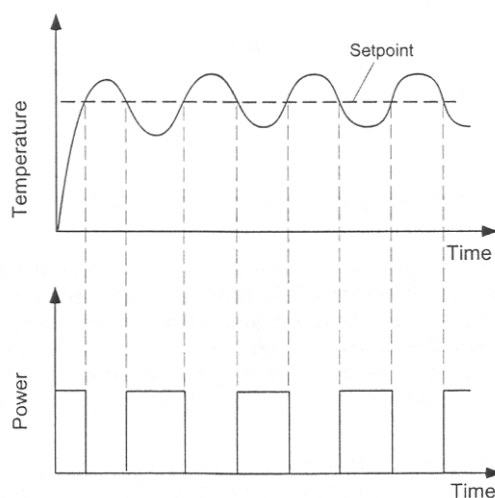
temperaturom mogu biti sa zatvorenom petljom ili povratni sistemi. Promenljiva veličina se meri i podatak šalje upravljačkoj jedinici iz koje se šalje signal u aktuator koji treba da izvrši korekciju veličine koja se prati.

Postoje dva načina da se promenjiva drži u određenim granicama:

1. on-off metod,
2. metod kontinualnog podešavanja.

4.5.1 On-off sistem upravljanja temperaturom

Kod ovog sistema upravljanja temperaturom, izvor energije je uključen kada je izmerena temperatura niža od propisane, odnosno, isključen kada je temperatura iznad pripisane vrednosti, što e dijagramski ilustrovano na slici 4.22.



Sl. 4.22

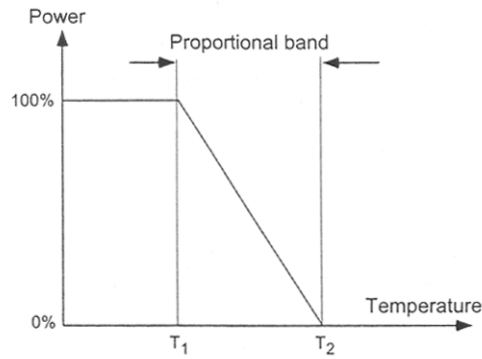
Problemi koji se javljaju kod ovog sistema prouzrokovani su kašnjenjem i inercijom sistema zagrevanja i hlađenja. Veličina odstupanja od nominalne temperature može se podešavati.

4.5.2 Proporcionalno upravljanje temperaturom

Nedostatak on-off sistema je taj što je izvor energije ili 100% angažovan ili potpuno isključen. Za prevazilaženje ovog problema potrebno je da izvor energije ima mogućnost podešavanja ulazne snage. Samo tako je moguće održavati stacionarno stanje temperature.

4.5.2.1. Proporcionalni sistem za upravljanje temperaturom

Proporcionalni sistem upravljanja ima mogućnost podešavanja ulazne snage od 0 do 100%, zavisno od stvarne temperature. Opseg temperatura u kojem se ulazna snaga podešava od 0 do 100% naziva se proporcionalnim opsegom. Proporcionalni opseg postavlja se oko nominalne temperature i opisuje se procentualnim iznosom nominalne temperature. Kod kontrolera za 500⁰C ako je proporcionalni opseg 5% onda je to 25⁰C oko nominalne temperature. Na slici 4.15 prikazana je prenosna funkcija za povratno-dejstvujući kontroler.



Sl. 4.25

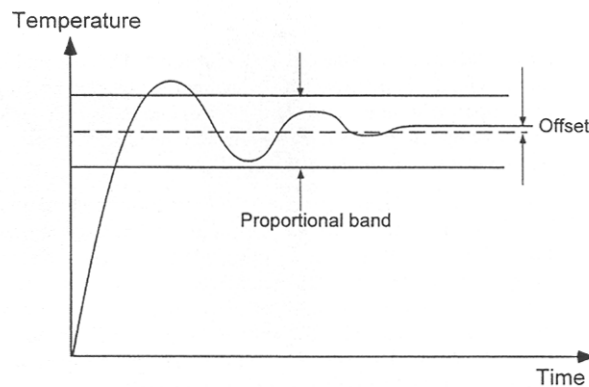
Kontroler sa povratnim dejstvom omogućuje da sa porastom temperature opada ulazna snaga i obrnuto. Ako je temperatura ispod T_1 grejač će raditi sa 100% snage, a ako je $t > T_2$ tada će ulazna snaga biti nula. U takozvanom proporcionalnom intervalu (od T_1 - T_2) angažovana snaga će se menjati proporcionalno. Interval proporcionalnosti kod većine kontrolera može se podešavati kako bi se uspostavila stabilnost u upravljanju sistemom.

Stepen osetljivosti proporcionalnog kontrolera definiše se kao:

$$\sigma_{ain} = \frac{100\%}{\text{proporcionalni interval } [\%]} \quad (4.6)$$

za proporcionalni interval od 5% $\sigma_{ain} = 20 \dots$

Razlika stvarne i nominalne temperature predstavlja temperaturno odstupanje ili ofset (slika 4.27). U normalnim uslovima rada ekstrudera, održavanje temperature obezbeđeno je sa 50% snage grejača.



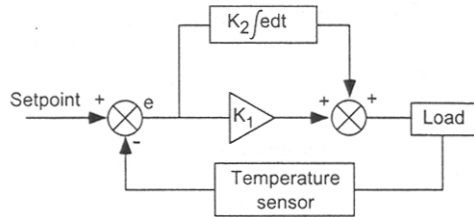
Sl. 4.27

4.5.2.2. Proporcionalni i integralni sistem za upravljanje temperaturom (PI)

Kod ovog sistema upravljanja prisutne su dve komponente:

$$\text{izlaz} = K_1 \cdot e + K_2 \cdot \int e \cdot dt \quad (4.8)$$

Prvi deo izraza odnosi se na proporcionalni sistem upravljanja, a drugi na integralni. Devijacija ili greška se integrali po vremenu i rezultat se dodaje devijaciji signala da bi se pomerio proporcionalni interval. Blok dijagram ovog sistema dat je na slici 4.30.

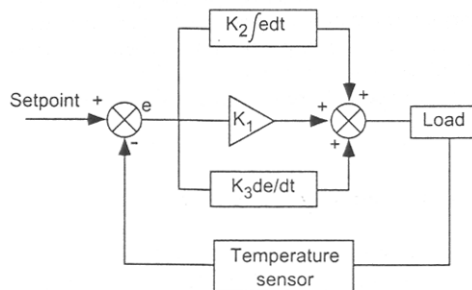


Sl. 4.30

Integrator podešava interval proporcionalnosti tako da je devijacija jednaka nuli.

4.5.2.3. Proporcionalni + integralni + diferencijalni sistem za upravljanje temperaturom (PID)

Resetovanje je relativno spor proces. Vreme odziva može se skratiti dodavanjem drugog korektivnog sklopa u sistemu upravljanja, koji utiče na veličinu promene temperature. Blok dijagram PID sistema dat je na slici 4.32.



Sl. 4.32

Drugi korektivni element uzima u obzir brzinu poremećaja, tj. njegovu promenu sa vremenom:

$$izlaz = K_1 \cdot e + K_2 \cdot \int e \cdot dt + K_3 \cdot \frac{de}{dt} \quad (4.9)$$

Diferencijalno upravljanje sprečava prebacivanje i podbacivanje referentne tačke.

4.5.3 Kontroleri

4.5.3.1. Temperaturni kontroleri

Postoje dva tipa kontrolera:

- *analogni* i
- *digitalni*.

Analogni kontroler sastoji se od niza elektronskih komponenti (otpornika, kondenzatora, integralnih kola, pojačala koji omogućuju izvođenje algoritma upravljanja). Kod digitalnog kontrolera mikroprocesor zamenjuje pojedinačne elektronske komponente koje su prisutne kod analognog kontrolera. Analogni signal kod ovog kontrolera pretvara se u digitalni, a potom se izvodi upravljanje prema postavljenom algoritmu.

Mikroprocesorski kontroleri imaju veliku fleksibilnost i mogućnosti promene načina upravljanja reprogramiranjem, tj. promenom softvera bez zamene hardvera.

Temperaturni kontroler nije u mogućnosti da rukuje (upravlja) sa grejačima sa visokom tačnošću, pa se zbog toga, između temperaturnog kontrolera i grejača postavlja kontroler snage.

4.5.3.2. Kontroleri snage

Relativno jeftin proporcionalni (sa vremenom) kontroler je živin kontaktor, koji jedino stvara buku pri uključivanju i isključivanju. Ovaj problem je rešen upotrebom kontrolera koji se aktivira (uključuje i isključuje) pri vrednosti napona nula.

Nedostatak kontaktora je njihov relativno kratak radni vek, koji na primer iznosi oko 1 milion aktiviranja. Ako se aktiviranje dešava svakih 20s, to znači da se kontaktor mora zameniti novim nakon 230 dana, pa ako mašina ima 6 kontrolera, to znači da prosečno 1 mesec godišnje neće raditi.

Noviji tip kontrolera je proporcionalni kontroler, koji je ekstremno brži u odnosu na kontaktor (red veličina 0.5ms).

4.5.3.3. Dvostruko izlazni Kontroleri snage

Održavanje temperature u cilindru ekstrudera podrazumeva kontrolu rada grejača. Međutim, značajan deo toplote nastaje mehaničkim putem na osnovu trenja. U određenim uslovima temperatura se mora korigovati hlađenjem, pa je zbog toga potrebna dvostruka kontrola.

Ako se proporcionalno upravljanje koristi za grejače onda se isti sistem koristi i za hlađenje. Međutim, mnogi ekstruderi imaju PID kontrolere za grejače, a on-off kontrolere za hlađenje. Izbor kontrolera temperature zavisi od namene ekstrudera i zahteva u pogledu tačnosti održavanja zadate temperature.

4.6 Totalno upravljanje procesom

Definitivni trend ekstrudera vodi ka totalnoj kontroli, odnosno, upravljanju procesom. Kod totalnog sistema upravljanja, merenje i upravljanje temperaturom je povezano sa upravljanjem pritiskom, praćenjem debljine obratka, snage motora, brzine obrtanja puža i drugih funkcija ekstrudera. Između diskretnog sistema merenja temperature i totalnog upravljanja postoje mnoge međuvarijante. Na primer merenje i upravljanje temperaturom topljenja je često prisutno kod ekstrudera. Takođe sistem za upravljanje pritiskom rastopljenog polimera je često ugrađen u ekstruder. Postoje noviji komercijalni procesori ugrađeni u ekstrudere koji upravljaju pritiskom i temperaturom rastopa, kao i debljinom obratka. Postoji tendencija totalnog upravljanja celom fabrikom koja se bavi preradom plastike. Treba još napomenuti da kontrolni sistem ekstrudera može biti u mogućnosti da upravlja sa sirovim materijalom – doziranje, mlevenje, dodavanje aditiva, upravljanje sa pomoćnim ekstruderima, upravljanje snagom i temperaturom pogonske pumpe, biaksijalnom orijentacijom obratka, upravljanje odsecanjem na dužinu i drugim radnjama vezanim za rad ekstrudera.