

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**PLASTİK BORU ÜRETİMİ İÇİN SİRAL KANALLI
RADYAL EKSTRÜZYON KALIBININ SİSTEMATİK TASARIMI**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
Çağrı NART**

Anabilim Dalı : Makina Mühendisliğı

Programı : Isı – Akışkan

Tez Danışmanı: Prof.Dr. Kadir KIRKKÖPRÜ

HAZİRAN 2011

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**PLASTİK BORU ÜRETİMİ İÇİN SİRAL KANALLI
RADYAL EKSTRÜZYON KALIBININ SİSTEMATİK TASARIMI**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
Çağrı NART
(503091134)**

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 06 Mayıs 2011

Tezin Savunulduğu Tarih : 06 Haziran 2011

**Tez Danışmanı : Prof.Dr. Kadir KIRKKÖPRÜ (İTÜ)
Diğer Jüri Üyeleri: Yrd. Doç. Dr. Levent KAVURMACIOĞLU(İTÜ)
Prof.Dr. Seniha GÜNER(İTÜ)**

HAZİRAN 2011

ÖNSÖZ

Değerli deneyimleriyle bana yol gösteren saygıdeğer hocam Sn. Prof. Dr. Kadir Kırkköprü'ye, her zaman yanımda olan, bana her daim yol gösteren ve yardımlarını esirgemeyen Sn. Araş. Gör. Oktay Yılmaz'a ve bugünlere gelmemde en büyük paya sahip olan aileme en içten teşekkürlerimi sunarım.

Haziran 2011

Çağrı NART

Makine Mühendisi

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖNSÖZ	v
İÇİNDEKİLER	vii
KISALTMALAR	ix
ÇİZELGE LİSTESİ	xi
ŞEKİL LİSTESİ	xiii
SEMBOL LİSTESİ	xv
ÖZET	xvii
SUMMARY	xix
1.GİRİŞ	1
1.1.Tezin Amacı	2
1.2.Polimer Ekstrüzyonu	3
1.2.1.Ekstrüder vidası.....	4
1.2.2.Kalıp ve kalibre	4
1.2.3.Ekstrüzyonda karşılaşılan problemler	6
1.2.3.1.Kalıp çıkışında hızın dengelenmesi	6
1.2.3.2.Şişme	7
1.2.3.3.Kalıp çıkışında düzensiz eriyik akışı (Melt fracture)	8
2.POLİMERLER	11
2.1.Polimerlerin Özellikleri	12
2.2.Polimerlerin Sınıflandırılması	13
2.3.Polimerlerin Reolojik Özellikleri	14
2.3.1.Kayma viskozitesi	15
2.3.2.Kayma şekil değiştirme hızına bağlı viskozite modelleri	18
2.3.2.1.Kuvvet yasası (Power law)	18
2.3.2.2.Bird – Carreau modeli	18
2.3.2.3.Carreau - Yasuda modeli	19
2.3.3.Sıcaklık ve basıncın viskoziteye etkisi.....	19
2.3.3.1.Sıcaklık etkisi	20
2.3.3.2.Basınç etkisi	23
3.RADYAL SİRALLİ KALIP TASARIMI	25
3.1.Ekstrüzyon Kalıbı Optimizasyon Kriterleri	28
3.2.Radyal Spiral Kalıp Ön Tasarımı	30
3.2.1.Ön dağıtıcı	30
3.2.2.Elektrik-şebekesi benzeşimi metodu ile kalıbın ön tasarımı.....	31
3.3.Kalıp Çıkış Kısımının Geometrisinin Oluşturulması	38
3.4.Tüm Kalıp Geometrisi.....	39
4.DENEYLER	41
4.1.Kapiler Reometre Çalışma Prensibi	42
4.1.1.Temsili viskozite	45
4.1.2.Bagley düzeltmesi (Bagley correction) ve orifis kalıp.....	46

4.2.Deney Sonuçları	48
4.2.1.Giriş basınç kayıpları	48
4.2.2.Viskozite grafikleri ve değerlendirmeler.....	50
4.2.3.Kuvvet yasası parametrelerinin belirlenmesi	53
5.SAYISAL SİMÜLASYONLAR.....	55
6.SONUÇLAR VE ÖNERİLER.....	63
KAYNAKLAR.....	65
EKLER.....	67
EK A	69
EK B	73

KISALTMALAR

CAB	: Selüloz asetat butirat
CFD	: Computational fluid dynamics
HDPE	: Yüksek yoğunluklu polietilen
LDPE	: Düşük yoğunluklu polietilen
LLDPE	: Lineer düşük yoğunluklu polietilen
PE	: Polietilen
PP	: Polipropilen
PMMA	: Polimetil metakrilat
SAD	: Sayısal akışkanlar dinamiği
WLF	: Williams, Landel and Ferry

ÇİZELGE LİSTESİ

Sayfa

Çizelge 2.1: $\Delta E/R$ değerleri [10]	22
Çizelge 2.2: Bazı polimerler için T_g değerleri [4].....	22
Çizelge 3.1: Kalıp çeşitlerinin karşılaştırılması[13,15]	28
Çizelge 3.2: Kalıp boyunca basınç düşümü.....	39
Çizelge 4.1: Kapiler reometre özellikleri [10].....	41
Çizelge 4.2: 400-E (stearik asit kaplı) ve A-1(kaplamasız) kodlu kalsite ait bilgiler	42
Çizelge 4.3: PE 210 °C basınç kayıpları	48
Çizelge 4.4: PP için çeşitli sıcaklıklarda giriş basınç kayıpları	49
Çizelge 4.5: PP+%20 kalsit için çeşitli sıcaklıklarda giriş basınç kayıpları.....	50
Çizelge 4.6: Kuvvet Yasası Parametreleri	54
Çizelge 4.7: Bird-Carreau modeli sabitleri.....	54
Çizelge 5.1: Çeşitli ürün üretim hızlarında kütesel debiler	58
Çizelge 5.2: Maksimum cidar kayma gerilmeleri (* limit değerinin üzerinde).....	62
Çizelge B.1: PE için çeşitli sıcaklıklarda giriş basınç kayıpları	73
Çizelge B.2: PP+Kalsit kompozitler için 230 °C 'de giriş basınç kayıpları	73

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 1.1: (a) yıldız dağıtıcılı silindirik kalıp, (b) halka dağıtıcılı konik kalıp	2
Şekil 1.2: Profil üretimi için ekstrüzyon hattı [1]	3
Şekil 1.3: Ekstrüder vidası [3]	4
Şekil 1.4: Boru kalıbı (1.Mandrel, 2.Hava deliği, 3.Örümcek ayağı, 4.Merkezleme Civatası, 5. Kalıp Halkası, 6. Gevşeme Bölgesi) [4].....	5
Şekil 1.5: (a) film (b) kablo kaplamada kullanılan ekstrüzyon kalıbı [4].....	5
Şekil 1.6: Kalıp ve kalibrenin kısımları [1]	6
Şekil 1.7: Akışın dengelenmemiş olduğu kalıptan çıkan malzeme ve kesitteki hız dağılımı [1]	7
Şekil 1.8: Kesit çıkışında şişme (a)düşük hızlarda, (b)yüksek hızlarda [7]	7
Şekil 1.9: Akış boyunca polimer molekül zincir yapısının değişimi [7]	8
Şekil 1.10: Gerilme-şekil değiştirme hızı eğrisindeki kararsızlıklar [4].....	8
Şekil 1.11: LLDPE (linear low density polyethylene) 160 °C' de yüzey bozulmasının mikroskop ile yakından görünüşü [3].....	9
Şekil 2.1: Poliamid sentezi	11
Şekil 2.2: Polietilen sentezi	12
Şekil 2.3: Polimerlerin sınıflandırılması.....	13
Şekil 2.4: Plastik moleküllerinin dizilişi [1]	14
Şekil 2.5: Tüpsüz sifon etkisi [7]	15
Şekil 2.6: Silindir içinde dönen çubuk (a)yağ, (b) poliisobütilen [9]	15
Şekil 2.7: Açısal deformasyon [10]	16
Şekil 2.8: Polimer Eriyikler İçin Viskozite Değişimi. [11]	16
Şekil 2.9: Farklı akışkanlara ait gerilme-şekil değiştirme hızı eğrileri [10].....	17
Şekil 2.10: Kuvvet yasası modeli [1].....	18
Şekil 2.11: Bird – Carreau modeli [4]	19
Şekil 2.12: Sıcaklık ve basıncın PMMA polimerinin viskozitesine etkisi [4].....	20
Şekil 2.13: LDPE' nin farklı sıcaklıklarda viskozite eğrileri [6].....	20
Şekil 2.14: CAB için farklı sıcaklıklardaki viskozite eğrileri [4].....	21
Şekil 2.15: Bazı polimerler için a_T değerleri [4].....	23
Şekil 2.16: Basıncın T_g üzerine etkisi [4]	24
Şekil 3.1: Dairesel kesitli ekstrüzyon kalıp çeşitleri [5]	25
Şekil 3.2: Radyal spiral kalıp [4]	27
Şekil 3.3: Yandan beslemeli ön dağıtıcı (a), yıldız dağıtıcı (b) [13], [16].....	31
Şekil 3.4: Radyal spiralli kalıp için uyarlanmış elektrik şebekesi [18]	32
Şekil 3.5: Elektrik şebekesi benzeşiminde dirençler [13].....	32
Şekil 3.6: Spiral kanal geometrisi [2]	32
Şekil 3.7: Şekil faktörü f_p 'nin H/W ile değişimi [5]	34
Şekil 3.8: Spiral kalıptaki akış yolları için tanımlanan elektirik şebekesi [5]	34
Şekil 3.9: Sızıntı akışı sapması [19]	35
Şekil 3.10: Kalıp boyunca sızıntı akış (a) ve spiral kanal akış (b) debileri	36
Şekil 3.11: Kalıp boyunca basınç düşüşü	36
Şekil 3.12: İki spiral arası kalıp çıkışında debi dağılımı	37

Şekil 3.13: Kalıp çıkış kısmında akış hacmi geometrisi	38
Şekil 3.14: Halka kanal akışı için tanımlanmış $F(n,\beta)$ fonksiyonu [3]	38
Şekil 3.15: Radyal spiral kanallı kalıbın akış hacmi	39
Şekil 4.1: Kapiler reometre [10]	41
Şekil 4.2: Reometrelerin çalışma aralıkları [10]	43
Şekil 4.3: Yüzey bozulması(melt fracture)	44
Şekil 4.4: Dairesel kapilerde temsili şekil değiştirme hızının belirlenmesi [4]	45
Şekil 4.5: Dikdörtgensel ve dairese kanallar için temsili uzaklığın değişimi [4]	45
Şekil 4.6: Bagley düzeltmesi prensibi [4]	47
Şekil 4.7: Orifis kalıp [20]	47
Şekil 4.8: Bagley düzeltmesinde problem [4]	48
Şekil 4.9: PE 210 °C için giriş basınç kayıpları	49
Şekil 4.10: Katkısız PP için sıcaklığa bağlı viskozite grafiği	51
Şekil 4.11: PP+%20 kalsit kompozit eriyiği için çeşitli sıcaklıkla viskozite değişimi	51
Şekil 4.12: 230 °C 'de PP-kalsit kompozit eriyiklerinin konsantrasyona bağlı viskozite-şekil değiştirme eğrileri	52
Şekil 4.13: PE için çeşitli sıcaklıklarda viskozite değişimi	52
Şekil 4.14: Katkısız PP-230 °C için $\log \eta' - \log t$ değişimi	53
Şekil 5.1: Çözüm ağı yapısı	57
Şekil 5.2: Çözüm ağı yapısı (yakın görünüm)	57
Şekil 5.3: 230 °C ve 20 m/dk ürün üretim hızında akım çizgileri	58
Şekil 5.4: 230 °C ve 20 m/dk ürün üretim hızında hız vektörleri	59
Şekil 5.5: 230 °C ve 20 m/dk ürün üretim hızında şekil değiştirme hızı	59
Şekil 5.6: 230 °C ve 20 m/dk ürün üretim hızında basınç dağılımı	60
Şekil 5.7: 260 °C ve 20 m/dk ürün üretim hızında basınç dağılımı	60
Şekil 5.8: Kütleli debi - basınç düşümü	60
Şekil 5.9: 230 °C ve 20 m/dk ürün üretim hızında yüzeyde kayma gerilmesi	61
Şekil 5.10: 260 °C ve 20 m/dk ürün üretim hızında yüzeyde kayma gerilmesi	61
Şekil 5.11: 230 °C ve 20 m/dk üretim hızında spiral çıkışı hız dağılımı	62
Şekil A.1: PE 190 C 'de Bagley Doğrusu	69
Şekil A.2: PE 240 C 'de Bagley Doğrusu	69
Şekil A.3: PP 210 C 'de Bagley Doğrusu	70
Şekil A.4: PP 230 C 'de Bagley Doğrusu	70
Şekil A.5: PP 260 C 'de Bagley Doğrusu	70
Şekil A.6: PP+%20 Kalsit Kompozit 210 C 'de Bagley Doğrusu	71
Şekil A.7: PP+%20 Kalsit Kompozit 230 C 'de Bagley Doğrusu	71
Şekil A.8: PP+%20 Kalsit Kompozit 260 C 'de Bagley Doğrusu	71
Şekil A.9: 230 C 'de PP+%5 Kalsit Kompozit Bagley Doğrusu	72
Şekil A.10: 230 C 'de PP+%10 Kalsit Kompozit Bagley Doğrusu	72
Şekil A.11: 230 C 'de PP+%40 Kalsit Kompozit Bagley Doğrusu	72

SEMBOL LİSTESİ

A	:Alan
a_T	:Kaydırma katsayısı
a	:Carreau - Yasuda Modeli sabiti
C1, C2	:WLF Denklemi sabitleri
D_i	:Boru iç çapı
D_d	:Boru dış çapı
E₀	:Akış aktivasyon enerjisi
e₀	:Temsili uzaklık
F	:Kuvvet
f_p	:Şekil faktörü
g	:Basınç gradyanı
H	:Spiral kanal yüksekliği
H₁, H₂	:Ekstrüder vidasında boşluk
K	:Halka açış içim daralma katsayısı
l_m	:Kalıp boyu
m	:Kuvvet Yasası Modeli kıvrım faktörü
N	:Spiral sayısı
n	:Kuvvet Yasası Modeli indeksi
R	:Evrensel gaz sabiti
R	:Kapiler reometre yarıçapı
s	:Kuvvet yasası indeksi tersi
Q	:Hacimsel debi
T	:Sıcaklık
T_g	:Camsı geçiş sıcaklığı
V	:Hız
W	:Spiral kanal genişliği
τ	:Kayma gerilmesi
γ_i	:Kayma şekil değiştirme hızı
η	:Sanki-plastik akışkanlar için kullanılan kayma viskozitesi
η₀	:Sıfır kayma viskozitesi
η_∞	:Sonsuz kayma viskozitesi
λ	:Doğal zaman
ξ	:Camsı geçiş sıcaklığının basınç ile artım katsayısı
δ	:İç-dış hadde arasındaki boşluk
β	:Slit artım açısı
ψ	:Kanal derinliği azalım açısı
φ	:Spiral helis açısı

PLASTİK BORU ÜRETİMİ İÇİN SİRAL KANALLI RADYAL EKSTRÜZYON KALIBININ SİSTEMATİK TASARIMI

ÖZET

Siral kanallı polimer ekstrüzyon kalıpları çeşitli kesitlerde profil ve boru gibi ürünlerin üretiminde yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu çalışmada boru üretimi için radyal spiral kanallı ekstrüzyon kalıbı tasarımı yapılmıştır. Spiral geometrisi olarak logaritmik spiral seçilmiştir. Spiral kanallı ekstrüzyon kalıbı tasarımında en önemli iki aşama çıkış hız dağılımının homojen olması ve kalıp çıkışında şişmeden kaynaklanan geometri bozukluklarının olmamasıdır. Bu çalışmada boru üretimi için tasarım yapılacağından kalıp çıkışında şişme her yönde homojen olacak fakat geometride bozulmaya yol açmayacaktır. Bu nedenle çıkışta homojen hız dağılımına yoğunlaşılmalıdır.

İlk aşamada elektrik benzeşim metodu[2] kullanılarak kalıp çıkışında homojen hız dağılımı, minimum basınç düşümü ve kayma gerilmesi parametrelerini göz önüne alan analitik ön çalışma ile kalıbın geometrik parametreleri belirlenmiştir. Daha sonra tasarlanan spiral kalıbın SAD analizi ile sayısal simülasyonu yapılmıştır. Analitik sonuçlar sayısal simülasyon sonuçları ile karşılaştırıldığında analitik yaklaşımın kalıp dizaynında yol gösterici olabileceğini göstermiştir.

Tez kapsamında PE, PP ve PP+ kalsit katkılarının reolojik ölçümleri çeşitli sıcaklıklarda yapılmıştır. Viskozitenin sıcaklıkla düştüğü ve katkı oranından etkilenmediği görülmüştür. Yapılan deneylerle ile yüzey bozulması olmaması için maksimum kayma gerilmesi belirlenmiştir.

Kalıp çıkışında homojen hız dağılımının yanı sıra tasarımdaki diğer önemli parametreler minimum kayma şekil değiştirme hızı ve maksimum kayma gerilmesidir. Kalıp içerisinde malzemenin çok kalmasından dolayı bozulmaya uğramasını engellemek için şekil değiştirme hızı $5s^{-1}$ 'in üzerinde tutulmalıdır. Aynı zamanda yüzey bozulmasını engellemek için 130000 Pa yüzey gerilmesi değeri aşılmamalıdır.

SYSTEMATIC DESIGN OF RADIAL EXTRUSION DIE WITH SPIRAL GROOVE TO PRODUCTION OF PIPE

SUMMARY

Polimer extrusion dies are widely used to produce profiles and piping products for many years. In this study design of a radially spiral extrusion die for single layer pipe production is made. Logarithmic spiral is chosen as a spiral form. The most important parts in design process of extrusion die are to achieve balanced velocity profile at the die exit and to prevent irregular shaping at extruded polymer which is caused by swelling. In this study swelling expands polymer at radial direction equally but does not cause irregular shapes. So that we will focus on balancing polymer flow at die exit.

By using electrical network analysis [2] die geometry is estimated considering balanced velocity profile at die exit, minimum pressure drop through the die and not to exceed maximum shear stresses. Later CFD simulation of the is made and compared with analytical solutions.

In this study rheological experiments to determine viscosity of PP, PE and PP+ calcite grades are made. It is seen that viscosity decreases as increasing temperature. Increase in calcite grade does not effect viscosity. Maximum allowable shear stress to prevent melt fracture is also determined with experiments.

Besides balanced flow at die exit there are another important parameters such as minimum shear rate and maximum shear stress. Minimum shear rate must be greater than 5s^{-1} to prevent thermal degradation which is caused long resident time of polymer in die. In case of excess 130000 Pa shear stress melt fracture occurs. There should not be shear stress more than 130000 Pa anywhere in the die.

1.GİRİŞ

“Plastiklerin kullanımı günümüzde oldukça yaygındır. Plastikler hafif olmaları, demir türevi malzemelere göre üretim sıcaklıklarının düşük olması, yüksek sıcaklıklara çıkılmadığı takdirde dayanıklı olmaları ve ucuz olmaları nedeniyle tercih edilmektedir. Ev aletlerinden tıbbi malzemelere ve otomotiv sektörü gibi geniş bir yelpazede kullanılmaktadırlar.”[1]

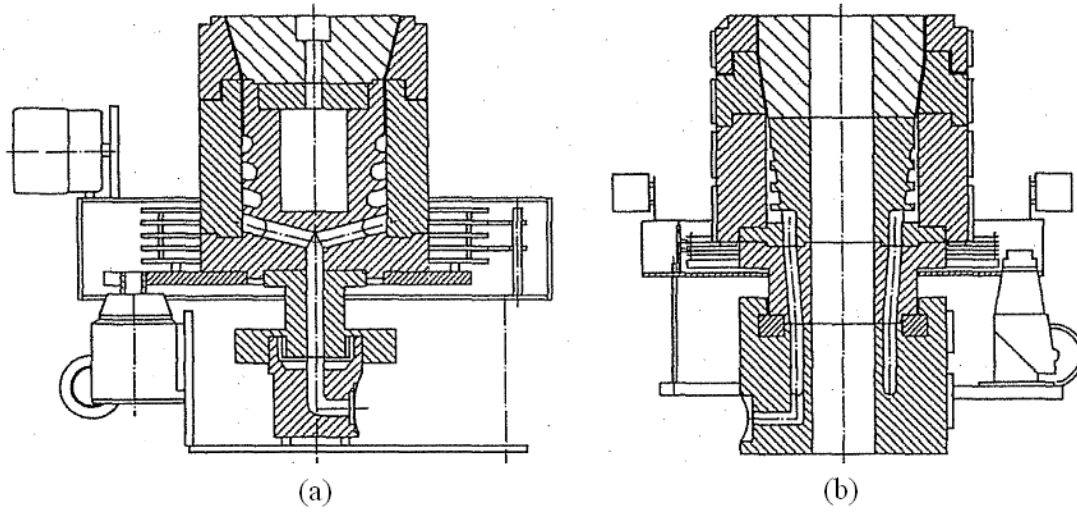
Polimer ekstrüzyonunda üretim süreklidir. Kalıptan kesintisiz malzeme çıkışı olmaktadır. Bu yöntemle çoğunlukla boru, kablo ve profil gibi ürünlerin üretimi yapılmaktadır. Bu tez kapsamında boru üretiminde kullanılabilen spiral kanallı radyal kalıpların tasarımı incelenecektir.

“Polimerlerin reolojik özellikleri hava, su gibi Newton tipi akışkanlara nazaran karmaşıktır. Newton tipi akışlarda viskozite sıcaklığa ve basınca bağlı iken, polimer akışkanlarda sıcaklık, basınç, şekil değiştirme hızı ve zaman gibi parametrelere bağlıdır. Ayrıca Newton tipi akışkanlar için geçerli olan cidarda kaymama sınır şartı polimer malzemeler için her zaman geçerli değildir. Bu sebeplerden ötürü polimer malzemelerle çalışmak Newton tipi akışlara göre zordur.”[1] Reolojik özellikleri etkileyen parametrelerin çok olmasından ötürü akışkan özelliklerini tanımlayan birçok model geliştirilmiştir. Literatürden (Michaeli, 2003), (Bird, 1987), (Tadmor, Gogos, 2006) polimer cinsi ve akış tipine uygun bir model seçilerek kullanılabilir.

Polimer ekstrüzyonunda spiral kanallı kalıplar günümüzde yaygın olarak kullanılmaktadır. Kalıp içerisinde iyi karışım sağlama ve çıkışta homojen hız dağılımı sağlama gibi kriterler göz önüne alındığında, spiral kanallı kalıplar diğer geleneksel kalıplara göre üstünlük sağlamaktadır.

Klasik eksenel spiral kalıplarda öncelikle ekstrüderden çıkan eriyik yıldız dağıtıcı veya halka şeklinde dağıtıcılarla birkaç akıma bölünür ve spiral kanallar beslenir. Son yıllarda her kanalı ayrı ayrı besleme yerine çevre boyunca uzanan askı tipi dağıtıcılar tercih edilmektedir[4]. Başlangıçta polimer eriyik, spirallerden beslenir ve kalıp boyunca ilerlerken azalan spiral derinliğinden dolayı sızıntı akışı oluşur. Kalıp

çışında spiral kanal içerisindeki akışın tamamı iç-dış hadde arasındaki boşluktan ilerler.



Şekil 1.1: (a) yıldız dağıtıcılı silindirik kalıp, (b) halka dağıtıcılı konik kalıp

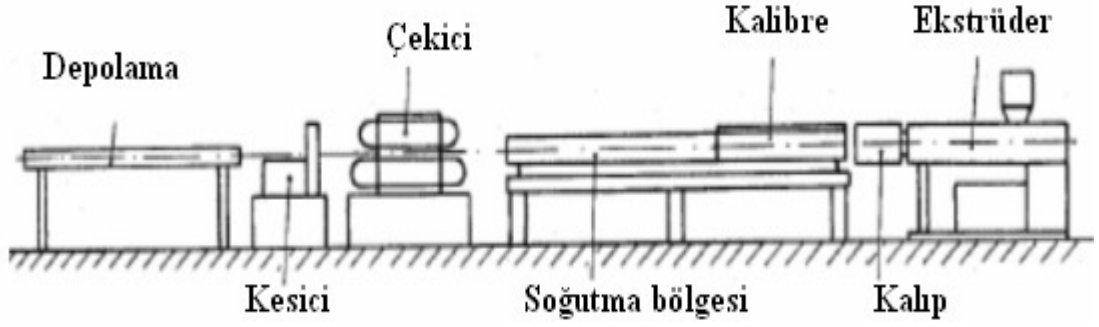
1.1.Tezin Amacı

Bu tez kapsamında boru üretimi için radyal spiral kanallı tek katmanlı ekstrüzyon kalıbı tasarımı yapılmıştır. Tasarımı yapabilmek için kalıp içi akışa hakim olunması gerekmektedir. Kalıbın içi gibi karmaşık bir geometride korumun ve momentum denklemlerinin analitik çözümü olmadığından Rauwendaal [2] 'ın çalışmasındaki elektrik şebekesi benzeşimi metodu örnek alınarak akış hacmi küçük hacimlere bölünerek analitik olarak çözülmüştür. Daha sonra SAD programı kullanılarak elektrik şebekesi benzeşimi metodu ile kıyaslama yapılmıştır. Elektrik şebekesi yöntemi, deneme yanılma yöntemi ile nihai tasarıma karar verme sürecinde SAD analizlerinde sarfedilen zamanın tasarrufu açısından önemli avantaja sahiptir.

Ekstrüzyon kalıbı tasarım aşamasında iki ana problem ile karşılaşilmektedir. Bunlar kalıp çıkışında hız dağılımının dengelenememesi ve kalıp çıkışında polimer malzemenin şişmesinden kaynaklanan geometri bozukluklarıdır. Boru üretiminde de şişme olacak fakat üretilen profil eksenel simetrik olduğundan geometrik bozulmaya yol açmayacaktır. Bu yüzden tasarım esnasında çıkışta hız profilin dengelenmesi, çarpılmanın olmaması üzerine yoğunlaşmıştır. Aynı zamanda kalıp boyunca basınç düşüşü, minimum ve maksimum şekil değiştirme hızı ve maksimum kayma gerilmesinin belirlenen sınırlar içinde kalmasına özen gösterilmiştir.

1.2.Polimer Ekstrüzyonu

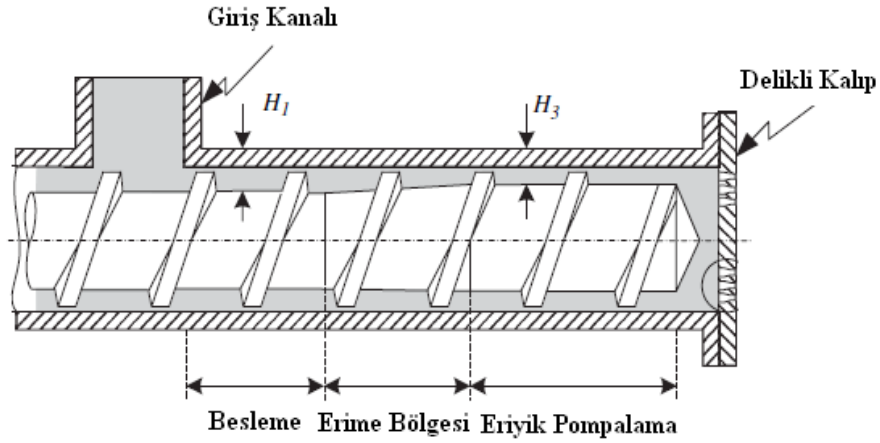
Ekstrüzyon enjeksiyondan farklı olarak sürekli bir üretim yöntemidir. Enjeksiyon yönteminde üretim sürekli değildir, vidalı ekstrüder enjeksiyon kalıbını doldurana kadar çalışmakta, sonraki aşamada ürünün kalıptan alınması için bekleme konumuna geçmektedir. Ekstrüzyonda film, boru, profil, levha üretimi ile kablo kaplama gibi çok çeşitli işlemler yapılabilmektedir. Şekil 1.2 'de bu çalışmanın da konusu olan boru üretimi için bir ekstrüzyon hattı ve üniteleri görülmektedir.



Şekil 1.2 :Profil üretimi için ekstrüzyon hattı [1]

Genel olarak bir ekstrüzyon ünitesi ekstrüder, kalıp, kalibre, çekici, kesici ve depolama ünitelerinden meydana gelir. Ekstrüder kalıba gönderilecek malzemeleri istenilen basınç ve sıcaklıkta kalıba pompalar. Kalıpta üretilmek istenen geometrinin şekli verilir. Kalıp çıkışında kalibreye giden malzemeye hem son şekli verilir hem de bir miktar soğutulur. Daha sonra malzemenin istenilen sıcaklığa düşmesini sağlayan soğutma bölgesine geçilir. Bir sonraki kısım olan çekicinin hızı ile istenirse oynama yapılarak malzemenin boyutları değiştirilebilir. Son olarak ürün istenilen uzunluklarda kesilerek depolanır.

1.2.1.Ekstrüder vidası

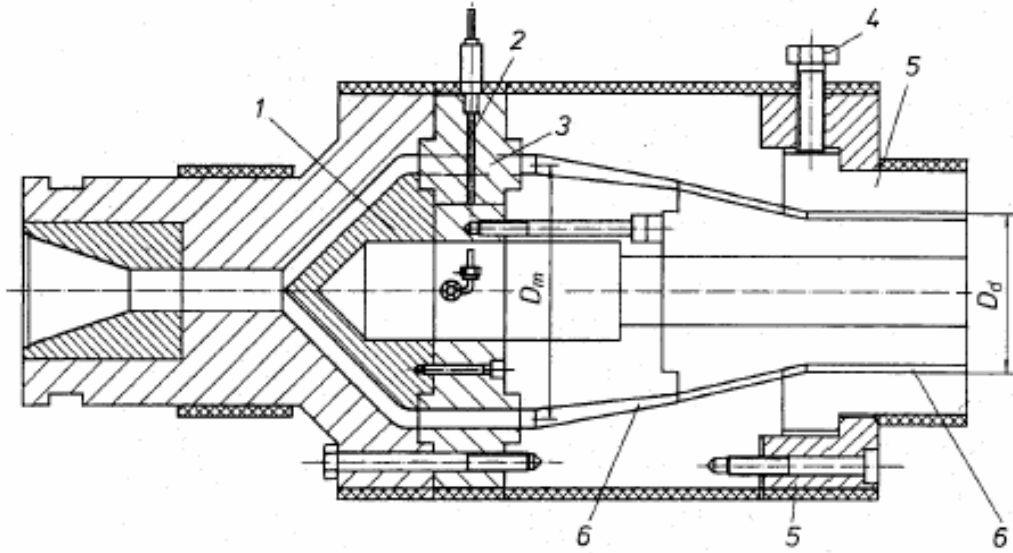


Şekil 1.3 :Ekstrüder vidası [3]

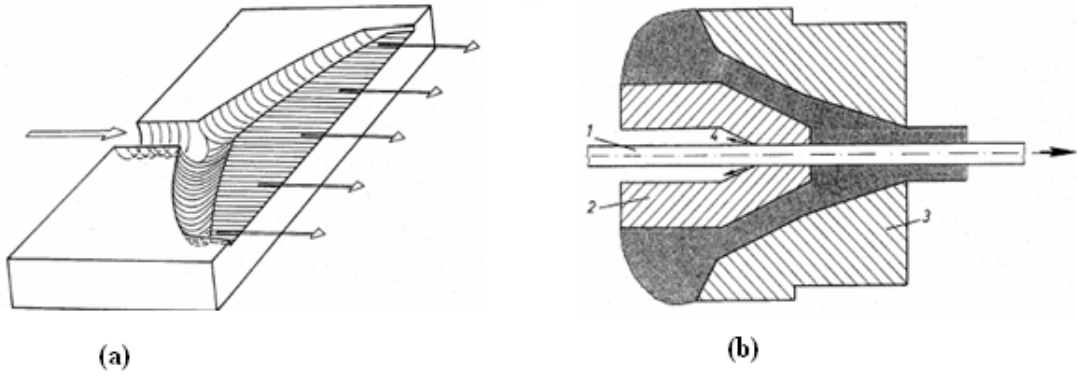
Şekil 1.3 'de görüldüğü gibi ekstrüzyon vidası 3 ana kısımdan oluşmaktadır. Giriş kanalından giren granüller erime başlamadan önce bir miktar karıştırılarak ilerler ve erime bölgesinde eriyik hale geçer. Bu aşamada ekstrüzyon vidası içindeki boşluk H_1 ' den H_2 ' ye düşürülerek eriyik sıkıştırılır ve kalıba doğru pompalanır. Son kısımdaki delikli kalıp ile de vida içerisindeki eriyik basıncı artırılarak malzemenin iyice kaynaşması sağlanır[3].

1.2.2.Kalıp ve kalibre

Kalıp, çıkış kesiti vasıtası ile malzemeye şeklini veren kısımdır. Kalıp malzemeye son şeklini veremez çünkü kalıp çıkışında şişme olur. Kalıp çıkışında sıcak olan eriyik soğuduğu süreye kadar şekil değişimine maruz kalır. Kalıp içerisinde malzeme mümkün olduğu kadar az tutulmalı ve kalıp içerisinde ölü noktalar olmamasına özen gösterilmelidir. Her iki durumda da malzemenin içeride yüksek sıcaklığa uzun süre maruz kalmasından dolayı yapısında bozulmalar gözükülecektir. Kalıp dizaynında tüm bu etkenler göz önüne alınmalıdır. Aşağıda boru, film ve kablo üretimi için kalıp şekilleri verilmiştir.

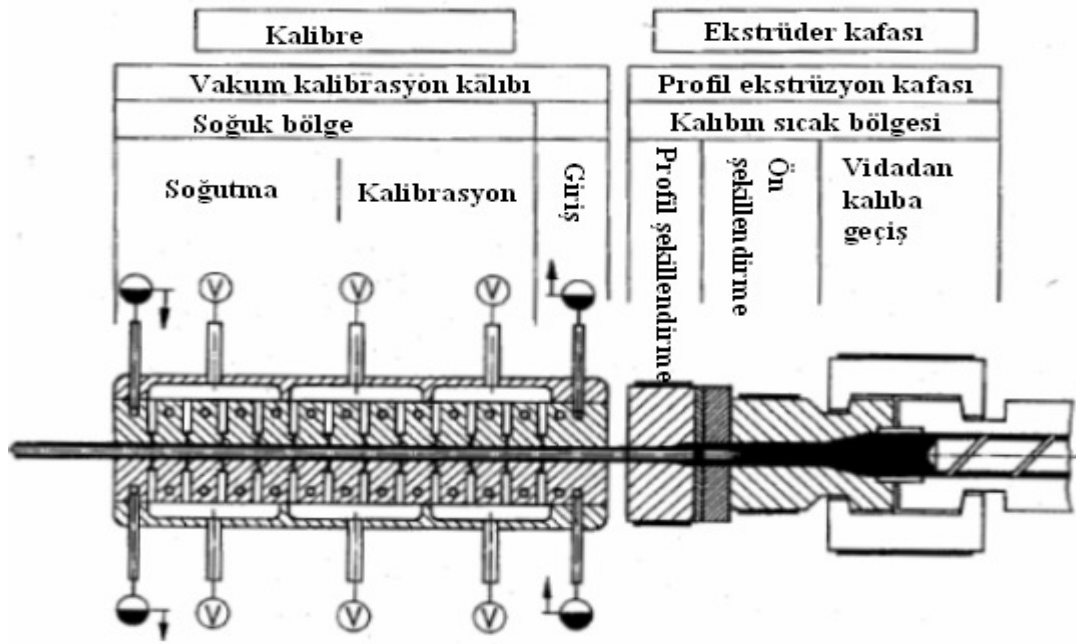


Şekil 1.4 : Boru kalıbı (1.Mandrel, 2.Hava deliği, 3.Örümcek ayağı, 4.Merkezleme Cıvatası, 5. Kalıp Halkası, 6. Gevşeme Bölgesi) [4]



Şekil 1.5 : (a) film (b) kablo kaplamada kullanılan ekstrüzyon kalıbı [4]

“Kalibre (ölçülendirme kalıbı) kalıptan eriyik halde gelen malzemeyi soğutarak sıcaklığını erime noktasının altına kadar düşürür ve katılaştırır. Bunun yanı sıra yarı bitmiş ürünün şekilsel rijitliğini de dıştan vakumlama, içten vakumlama, sürtünmeyle vakumlama vb. gibi yöntemlerle sağlar. Uzun kalibreler ürünün ölçülerindeki küçülmeden dolayı konik yapırlar.”[1]



Şekil 1.6 :Kalıp ve kalibrenin kısımları [1]

Üretim hızı kalıp dizaynı ile ekstrüder vidasının yanı sıra kalibreye de bağlıdır. Polimer eriyiğin ısı iletimi düşük olduğu için kalibrenin ve diğer soğutma sistemlerinin soğutma kapasitesi de önemlidir. Kalibrenin soğutma sisteminin kapasitesindeki artım üretim hızının da artırılabilmesine olanak sağlayacaktır[4].

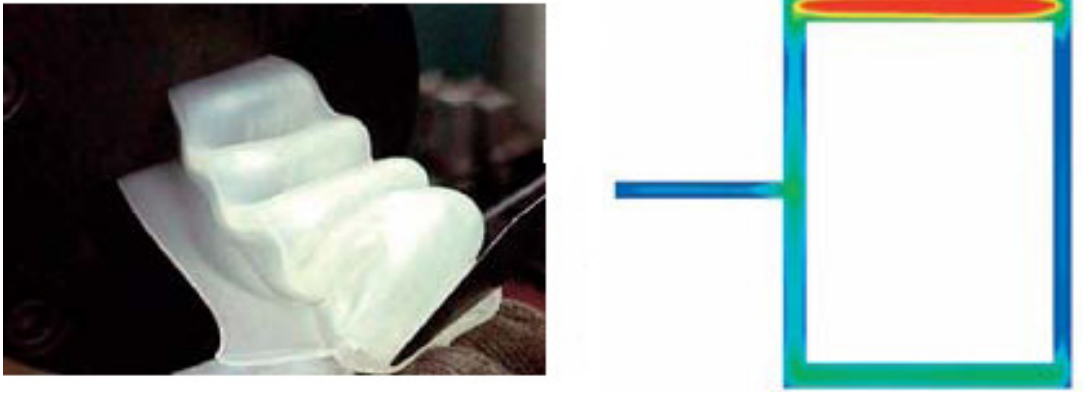
1.2.3.Ekstrüzyonda karşılaşılan problemler

- Kalıp dizaynında keskin köşelerin yuvarlatılmaması durumunda durma noktalarının ve ölü bölgelerin oluşması ve malzemede bozulmaya yol açması
- Plastik eriyikte ani kesit değişimleri sonucu aşırı elastik deformasyonların oluşması
- Eriyiğin kalıptan geçme süresi uzun olması durumunda eriyiğin uzun süre sıcaklığa maruz kalıp degradasyona uğraması (bozulması)
- Akışın kalıp çıkışında dengelenememesi
- Şişme problemleri ve kalıptan düzensiz çıkış (melt fracture) [5]

1.2.3.1.Kalıp çıkışında hızın dengelenmesi

Kalıp çıkışında geometrinin düzgün olması için çıkış kesiti boyunca hız değerlerinin aynı olması veya sapmanın çok az olması istenmektedir. Buna akış dengelenmesi adı

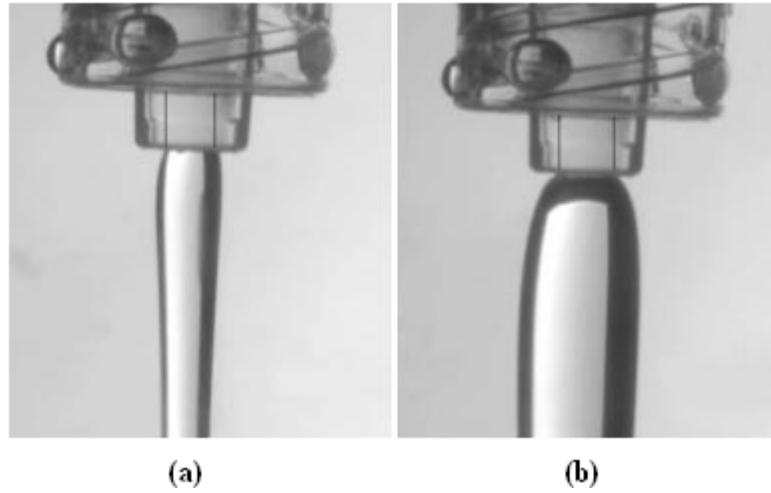
verilmektedir. Şekil 1.7’ da akış dengelenmesinin olmadığı durumlarda kalıp çıkışıındaki bozulma görülmektedir.



Şekil 1.7 : Akışın dengelenmemiş olduğu kalıptan çıkan malzeme ve kesitteki hız dağılımı [1]

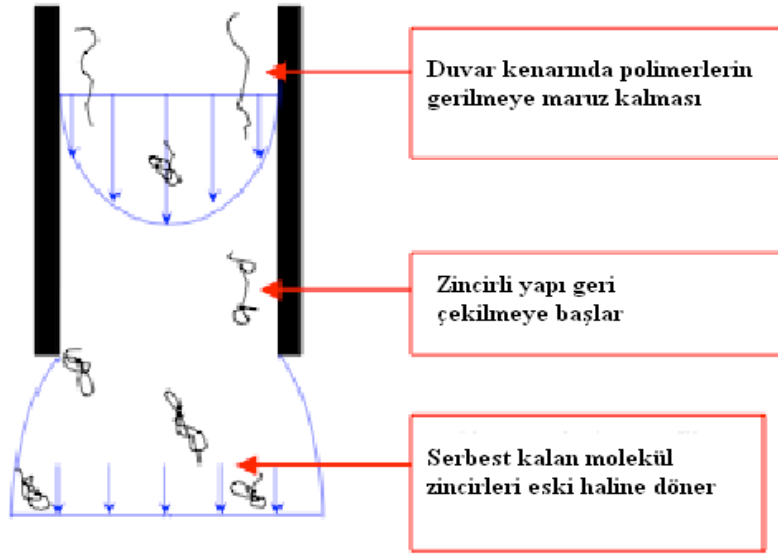
1.2.3.2.Şişme

Polimer eriyikler kalıp çıkışında belli miktarlarda şişerler; yani malzeme, kalıp çıkış kesitinden farklı bir profile sahip olarak çıkar. Dairesel kesitli olan boru gibi ürünlerde ise çapta büyüme olur. Dairesel kesitli ürünlerde sadece 1 boyutta genişleme olacağından profil üretimine göre hesaplanması daha kolaydır[1].



Şekil 1.8 : Kesit çıkışında şişme (a)düşük hızlarda, (b)yüksek hızlarda [7]

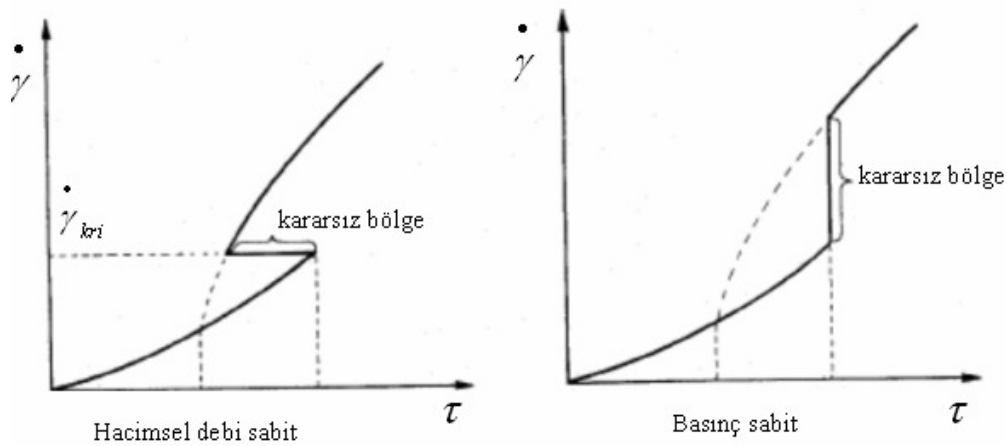
Şişme olayına büyük oranda polimerin elastik özelliği sebep olmaktadır. Kalıp içerisinde akan eriyik dar bir kesitten geçerken moleküller çekme gerilmesine maruz kalırlar. Kalıp çıkışında bu gerilmeler ortadan kalktığından birikmiş elastik enerjiden ötürü malzeme eski karmaşık yapısına dönerek çıkışta şişmeye neden olmaktadır. Bu aşamalar Şekil 1.9’ de görülmektedir.



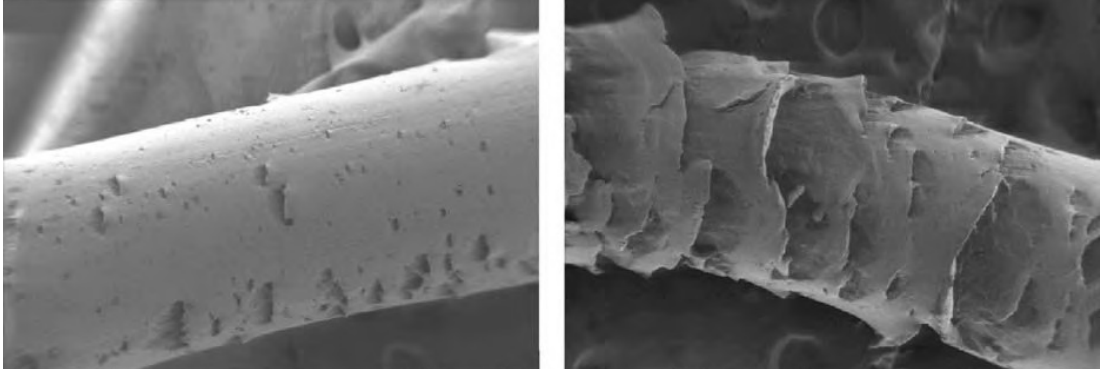
Şekil 1.9 : Akış boyunca polimer molekül zincir yapısının değişimi [7]

1.2.3.3. Kalıp çıkışında düzensiz eriyik akışı (Melt fracture)

Akış davranışlarının öğrenilmesi için yapılan deneylerde özellikle HDPE için Q hacimsel debisi, belli bir değeri geçtikten sonra τ kayma gerilmesinde süreksiz değişimler olduğu görülmüştür veya sabit basınçta kayma gerilmesi belli bir değeri geçtikten sonra debide değişimler olduğu görülmüştür. Şekil 1.9’ da görüldüğü üzere “İki durumda da $\tau - \dot{\gamma}_i$ (Kayma gerilmesi – Şekil Değiştirme Hızı) eğrisinde süreksizlikler oluşur. Polimerin molekül yapısından dolayı kayma gerilmesi belli bir değeri aştıktan sonra moleküllerin zincirli yapısı tekrar toparlanmaya adapte olamamakta ve yüzey bozulmasına yol açmaktadır.” [1, 3]



Şekil 1.10 : Gerilme-şekil değiştirme hızı eğrisindeki kararsızlıklar [4]



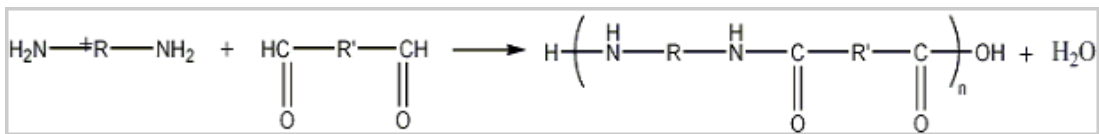
Şekil 1.11 :LLDPE (linear low density polyethylene) 160 °C’ de yüzey bozulmasının mikroskop ile yakından görünüşü [3]

2.POLİMERLER

Polimerler son çeyrek yüzyılda günlük yaşamımızda ve endüstrinin hemen her dalında karşımıza çıkmaktadırlar. Çelikten ve diğer konvansiyonel maddelerden yapıları ve kullanım alanları bakımından farklılaşırlar. Polimer kullanımının ana amacı mümkün olduğunca hafif, ekonomik ve dayanıklı ürünler üretmektir. Tüm bu özelliklerin bir maddede görülebilmesi çok ender bir durumdur. Bu sebeple polimerlere çeşitli özellikler ekleyebilmek için katkı maddeleri kullanılmaktadır.

“Çeşitli mineral dolgular plastiklerin çeşitli özellikleri artırmak için endüstride geniş çapta kullanılır. Genellikle üretim maliyetini düşürmek için kullanılmaktadır. Üründeki geliştirme eklenen dolgu maddesinin partikül şekli, büyüklüğü ve polimer matris ve dolgu arasında yüzey etkileşimi gibi faktörlere bağlıdır. Mineral katkıları arasında en çok kullanılanlar arasında kalsit gelmektedir. Kalsit şekil itibarı ile izotropik partiküller olarak adlandırılmaktadır. Polipropilen (PP) otomotiv, elektronik ve tesisat uygulamalarında sıkça karşımıza çıkmaktadır. Fakat yüksek çekme oranı ve oda sıcaklığında düşük darbe dayanımı gibi sebeplerden ötürü kullanım alanları sınırlıdır. Bunu aşmak için PP dolgu maddesi olarak kalsiyum karbonat kullanılmaktadır.”[8]

“Polimerler düşük molekül ağırlığına sahip bileşenlerden sentezlenen yüksek molekül ağırlığına sahip maddelerdir. Bu işlem polimerizasyon olarak adlandırılır. Polimer biliminin gelişmesi sırasında bilimsel olarak tercih edilen iki tip sınıflama sistemi oluşmuştur. Birinci tip sınıflandırmada polimerlerin yapısına göre ayırım kullanılır ve buna göre polimerleri *yoğuşma* (condensation) ve *katılma* (addition) polimerleri olarak iki gruba ayırır.”[9]



Şekil 2.1 :Poliamid sentezi

“Katılma polimerleri, monomerleri reaksiyona girdiğinde küçük bir molekül oluşturmayan polimerlerdir. Yoğunlaşma polimerlerine benzemeksizin, katılma polimerizasyonu reaksiyonunda monomeriyle aynı molekül formülüne sahip polimerler elde edilir. Katılma polimerizasyonuna giren başlıca monomerler karbon-karbon çift bağına sahiptirler. Bu tip monomerlere *vinil* monomer adı da verilir. Örnek olarak Şekil 2.2’ deki polietilen sentezi gösterilebilir.”[9]



Şekil 2.2 :Polietilen sentezi

2.1.Polimerlerin Özellikleri

“Plastikler çok çeşitlidirler ve özellikleri çok geniş bir aralıkta değişebilmektedir. Aşağıda plastıklara ait genel özellikler verilmiştir:

- Yoğunlukları düşüktür,
- Kolay şekil verilebilir ve işlenebilirler,
- Katkı maddeleri ile özellikleri değiştirilebilir,
- Isı ve elektrik iletkenlikleri düşüktür,
- Saydamdırlar,
- Korozyona ve kimyasal maddelere karşı dayanıklıdırlar,
- Yeniden işlenebilirler.

İşleme sıcaklıkları düşük (genellikle 120 ile 320 °C arasında değişir) olduğundan üretim için harcanan enerji metal malzeme ile üretime göre daha azdır. Ayrıca büyük miktarlarda üretime müsaittirler ve son işleme gerek kalmadan karmaşık parçalar üretilebilir.”[1]

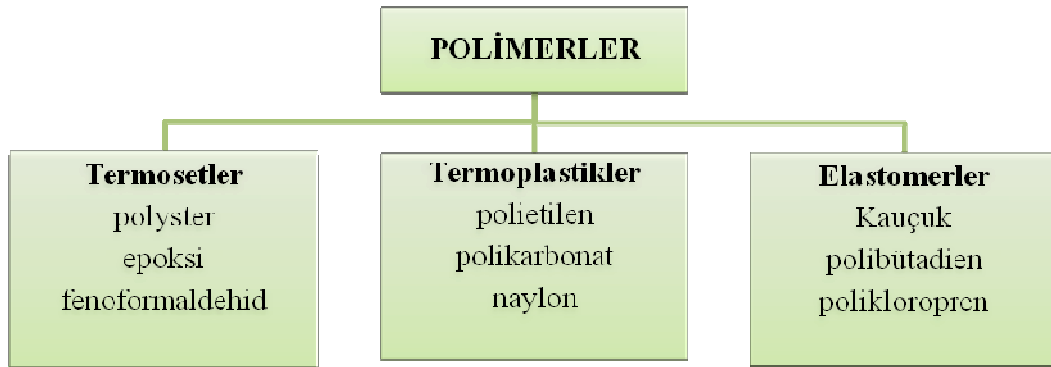
Katkı maddeleriyle plastik malzemelerin özellikleri değiştirilebilir. Bu katkı maddeleri:

- Ekonomik nedenlerle ilave edilen kalsit, mineral ve talaş vb. dolgu maddeleri,
- Plastik malzemelerin mekanik özelliklerini (çekme mukavemeti ve elastik modülü gibi) değiştiren dolgu maddeleri,

- Malzemeleri boyamak için renk pigmentleri,
- Çalışma özellikleri ile mekanik özellikleri değiştirmek için katılan yumuşatıcılar,
- Plastiklerin bozunmalarını önlemek için katılan stabilizatörlerdir.

“Isı iletim katsayıları çok düşüktür. Bu sebeple yalıtım malzemesi olarak kullanılabilirler. Fakat bu özelliği kalıp çıkışında geç soğumaya yol açtığından aynı zamanda bir dezavantajdır. Elektrik iletkenliklerinin çok düşük olmasından ötürü kabloları kaplamada kullanılır. Ayrıca korozyondan metaller kadar etkilenmezler.”[1]

2.2.Polimerlerin Sınıflandırılması



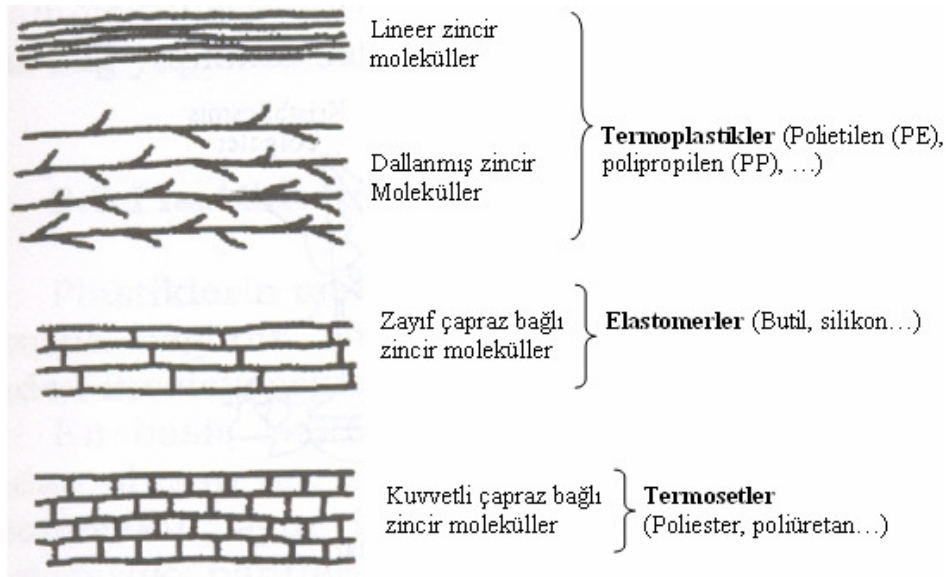
Şekil 2.3 :Polimerlerin sınıflandırılması

“Termoset polimerler en basit tanımıyla, kritik bir sıcaklığın üzerinde kalıcı olarak sertleşen ve tekrar ısıtıldığında yumuşamayan polimerlerdir. Termoset kelimesinin kökenine baktığımızda, bu polimerler termoset adını, ısıl işlem altında kalıplandıkları (polimerize oldukları) için (*termo*) ve verilen şekil bir daha bozulamayacağı için (*set*), almışlardır. Termoset reçinesini çapraz-bağlantı ajanıyla (sertleştirici olarak bilinen *hardener* ile) karıştırdığımız zaman başlayan polimerizasyon reaksiyonu sırasında moleküller arasında sık kovalent çapraz bağlar kurulur. Bu çapraz bağların yarattığı molekül ağı başta eriyebilen ve çözünebilen bir madde olan reçineyi, polimerizasyon sonunda erimeyen ve çözünmeyen bir polimer haline getirir. Bu maddeler boyutsal bir kararlılığa sahiptir ve darbe dirençleri yüksektir.” [9]

“Genel olarak *plastik* adıyla da anılan termoplastikler, ısıtıldığı zaman eriyebilen ve yeniden şekillendirilebilen polimerlerdir. Bir kere eritildikten sonra enjeksiyon kalıplama ve ekstrüzyon gibi yaygın kullanılan tekniklerle hemen hemen her türlü

şekilde kalıplanabilirler. Üretimde ya da kalıplama esnasında eriyik halden soğutulan termoplastik polimerler kolaylıkla kristal yapıyı kuramazlar. Çünkü polimer zincirinin çokça kıvrılan ve büzülen yapısını, düzenli bir yapıya sokup, polimerin kristal oluşturması için yüksek enerjiye ihtiyaç vardır. Termoplastikleri oluşturan kristalleşebilen zincirler ise tam anlamıyla mükemmel bir kristal yapı kuramaz. Bunun yerine hem amorf hem de kristal yapıyı barındıran yarı-kristaller oluştururlar. Yarı-kristalin içindeki amorf yapı elastikiyet sağlarken, kristal yapı da mukavemeti ve bükülmezliği sağlar.”[9]

“Çekme kuvveti altında çok yüksek oranda uzama gösteren ve kuvvet kaldırıldığında anında ilk uzunluğuna dönen, çapraz bağlanmış kauçuğumsu polimerlere, elastomer adı verilir. Elastomer adıyla olarak anılan bu polimer, gösterdiği yüksek elastikiyet sayesinde bu ismi almıştır. Elastomerlerin en önemli bu özelliği, tamamen molekül yapılarının içerdiği düşük çapraz-bağ yoğunluğuna sahip ağısı yapıdan kaynaklanmaktadır. En sık kullanılan ve bilinen elastomerler *poliizopiren* (ya da doğal kauçuk), *polibütadiyen*, *poliizobütilen*, ve *poliüretan*dır.”[9]

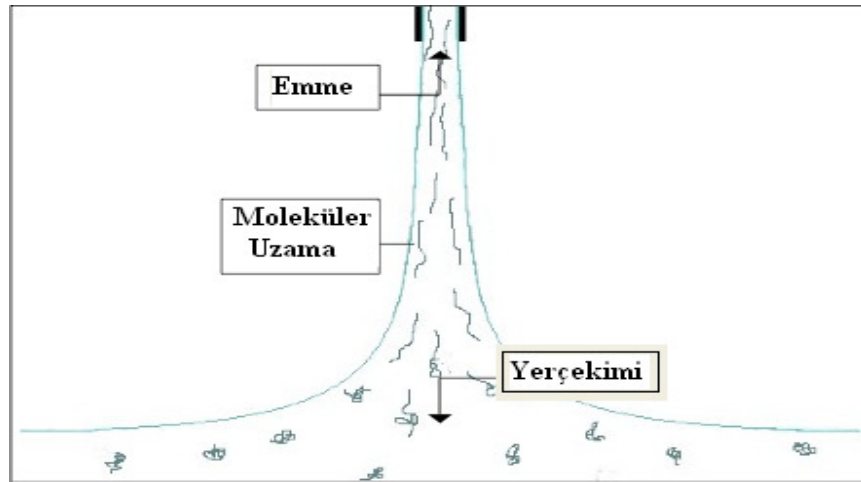


Şekil 2.4 :Plastik moleküllerinin dizilişi [1]

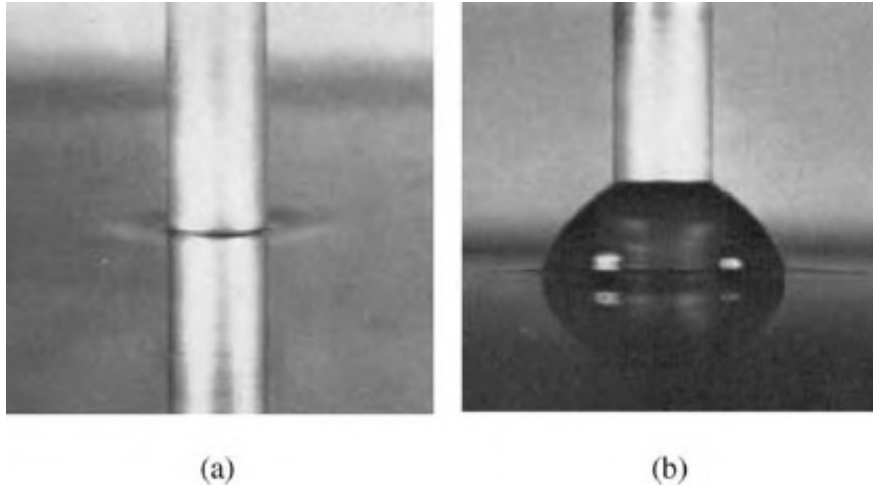
2.3.Polimerlerin Reolojik Özellikleri

Reoloji, cisimlerin yük, şekil değiştirme ve zaman faktörleri altındaki davranışlarını inceleyen özel bir bilim dalıdır. Polimerlerin reolojik özellikleri hava, su, gaz gibi Newton tipi akışkanlardan farklılık gösterir. Karmaşık zincirli moleküler

yapılarından dolayı açılmal deformasyona uğradıklarında iç yapılarında normal gerilmeler oluşur. Şekil 2.5’ de görüldüğü gibi akış doğrultusunda polimer moleküllerinin uzaması sonucu oluşan gerilmeler yerçekimini yenerek tüp çekilmiş olmasına rağmen emme etkisi devam etmektedir. Şekil 2.6 ‘ da ise yine gerilmeye maruz kalan polimer moleküllerde oluşan normal gerilmelerden dolayı akışkanın çubuğa tırmandığı görülmektedir. Çubuk akışkan içerisinde döndürülürken Newton tipi akışkan olan (a) yağ merkezkaç kuvvetler etkisi ile radyal doğrultuda yığılırken, (b) polimer olan poliisobütilen çubuğa doğru tırmanmaktadır.



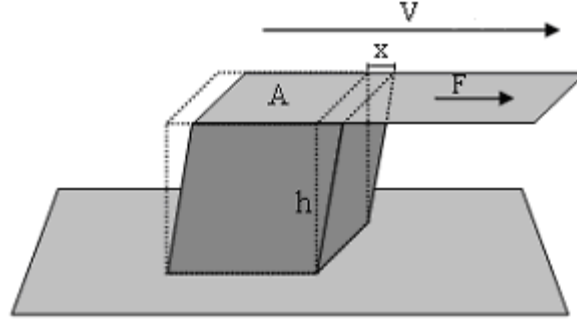
Şekil 2.5 :Tüpsüz sifon etkisi [7]



Şekil 2.6 :Silindir içinde dönen çubuk (a)yağ, (b) poliisobütilen [9]

2.3.1.Kayma viskozitesi

Viskozite, akışa karşı direnç temelinde kayma viskozitesi ve uzama viskozitesi olmak üzere ikiye ayrılır. Kayma viskozitesi polimerin kalıp içerisinde akarken Şekil 2.7’ de görüldüğü gibi kayma gerilmesine karşı akışkanın gösterdiği dirençtir.



Şekil 2.7 :Açısal deformasyon [10]

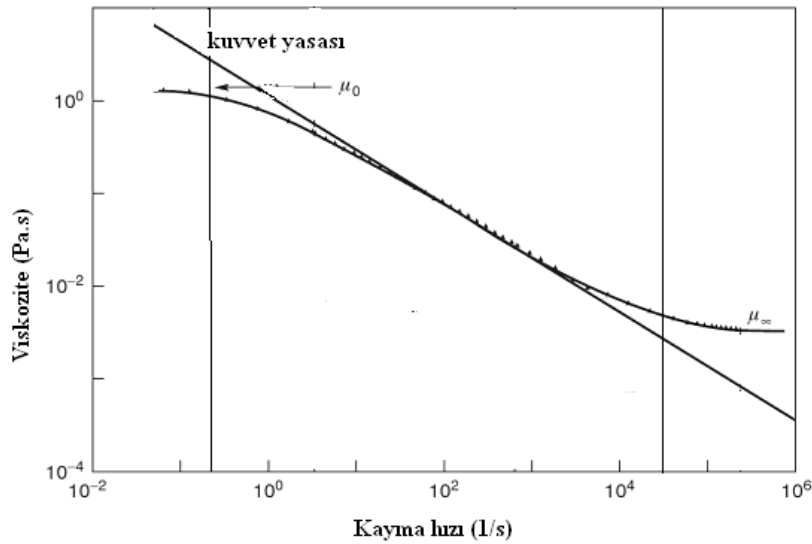
$$\dot{\gamma} = V/h \quad (2.1)$$

$$\tau = F/A \quad (2.2)$$

Newton tipi akışkanlar için kayma viskozitesi;

$$\eta = \tau/\dot{\gamma} \quad (2.3)$$

Polimer eriyikler, kan, mayonez, diş macunu gibi Newton tipi olmayan akışkanlarda durum farklıdır. Kayma gerilmesi ile şekil değiştirme hızı arasındaki oran sabit değildir. Polimerik akışkanların akışlarında şekil değiştirme hızı arttıkça $\tau/\dot{\gamma}$ oranı azalır.

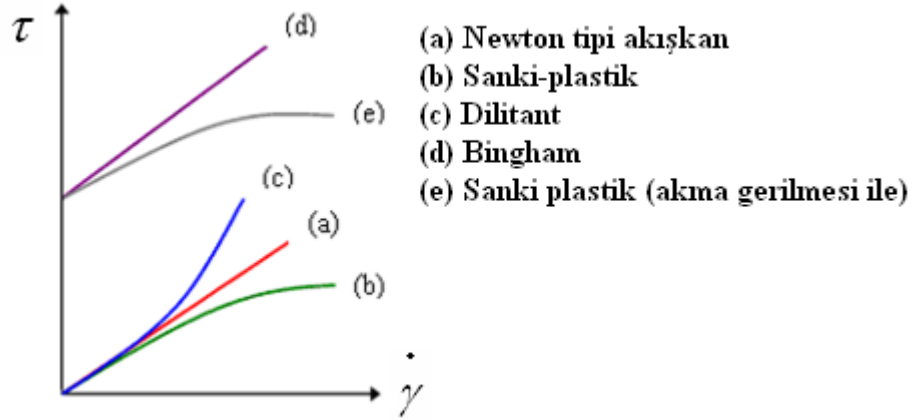


Şekil 2.8 :Polimer Eriyikler İçin Viskozite Değişimi. [11]

Şekil 2.8’ de görüldüğü gibi düşük kayma gerilmelerinin olduğu ilk kısımda eriyik Newton tipi akışkan gibi davranmaktadır. $\dot{\gamma}$ sıfıra giderken viskozitenin aldığı değer

sıfır kayma viskozitesi olarak adlandırılır. Orta kayma hızı değerlerinde kuvvet yasası (power law) geçerlidir. Logaritmik eksenle viskozite- kayma hızı eğrisi çizildiğinde düz bir eğri elde edilir. Son olarak yüksek hızlara çıkıldığında viskozite sabit bir değere ulaşır.

Şekil 2.9’ da farklı akışkan tipleri için kayma gerilmesi- şekil değiştirme hızı eğrileri gösterilmektedir.



Şekil 2.9 : Farklı akışkanlara ait gerilme-şekil değiştirme hızı eğrileri [10]

Newton tipi akışkanlar: Viskozitenin kayma şekil değiştirme hızı ile değişmediği, sabit olduğu akışkanlardır.

Sanki-plastik akışkanlar: Polimer akışları bu sınıfa girmektedir. Bu tip akışlarda viskozite artan kayma şekil değiştirme hızı ile azalır. Sanki- plastik akışkanlar uzun ve birbirine dolaşık moleküllere sahiptirler. Artan şekil değiştirme hızı ile molekül zincirlerinin karmaşık yapısı azalır ve bu durum viskozitenin azalmasını sağlar. Şekil değiştirme hızının azalması durumunda moleküller eski haline dönerek viskozitede artışa sebep olur.

Dilatant akışkanlar: Artan şekil değiştirme hızı ile viskozitesi artan akışkanlardır. Artan hız partikülleri daha sıkı bir yapıya geçirerek viskozitenin artmasına yol açar. Şeker ve pirinç nişastasının sulu çözeltileri buna örnek verilebilir.

Bingham plastikler: Akışkanın harekete geçmesi için minimum bir akma gerilmesi değerinin aşılması gerekir. Akışkan, akma gerilmesinin altında katı gibi davranış gösterirken, kritik değer aşıldıktan sonra akışkanlaşma başlar. Örnek olarak diş macunu, ketçap ve krem verilebilir [10].

2.3.2.Kayma şekil değıştirme hızına bağı viskozite modelleri

Polimerler için literatürde birçok viskozite modeli bulunmaktadır. Aşağıda en çok kullanılan modeller sunulacaktır.

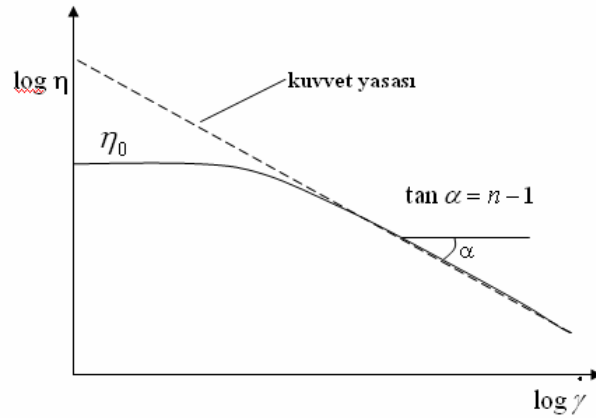
2.3.2.1.Kuvvet yasası (Power law)

En çok kullanılan ve analitik çözüm yapmak için en elverişli modeldir. Şekil 2.8’ de görülen ara bölgede çalışıldığında yani akışkan çok düşük veya yüksek şekil değıştirme hızına maruz kalmadığında bu model kullanılabilir.

$$\tau = m\dot{\gamma}^n \quad \dot{\gamma} = \frac{dV_x}{dy} \quad (2.4)$$

$$\eta = m\dot{\gamma}^{n-1} \quad (2.5)$$

m [Pa.sⁿ] kıvam faktörü olmak üzere, n akışkanın Newton tipi davranıştan sapma derecesini gösterir. Newton tipi akışkanlarda n = 1, dilatant akışkanlarda n > 1, sanki-plastik akışkanlarda ise n < 1 ‘dir[4].



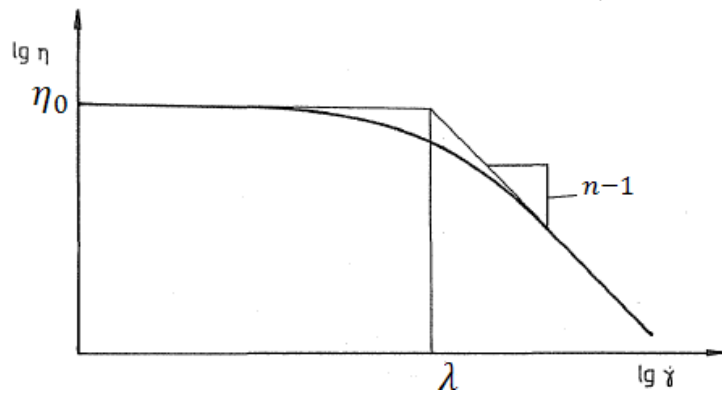
Şekil 2.10 :Kuvvet yasası modeli [1]

2.3.2.2.Bird – Carreau modeli

Bu model polimer akışkanların viskozitesini kuvvet yasasına göre daha geniş şekil değıştirme hızı aralığında temsil eder. Sayısal çözümlerde en çok tercih edilen modeldir. Düşük kayma şekil değıştirme hızlarında polimer eriyik viskozitesini temsil edebilir.

$$\eta = \eta_{\infty} + (\eta_0 - \eta_{\infty})(1 + \lambda^2 \dot{\gamma}^2)^{\frac{n-1}{2}} \quad (2.6)$$

Burada η_{∞} , kayma şekil değiştirme hızı sonsuza giderken viskozitenin aldığı değerdir. Polimer akışkanlar için η_{∞} sıfır alınabilir. λ , doğal zaman (natural time) olarak adlandırılır ve viskozitenin azalmaya başladığı kayma şekil değiştirme hızı değerinin tersidir, diğer bir deyişle -1 . kuvvetidir. η_0 sıfır kayma viskozitesi değeri olmaktadır ve kayma şekil değiştirme hızı sıfıra yakın iken viskozitenin değeridir. n , kuvvet yasası indeksi olup Newton tipi davranıştan sapmanın derecesidir [1, 12].



Şekil 2.11 :Bird – Carreau modeli [4]

2.3.2.3.Carreau - Yasuda modeli

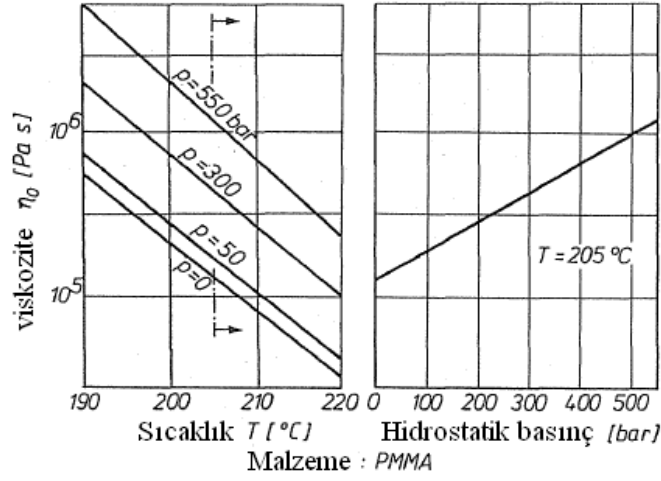
$$\eta = \eta_{\infty} + (\eta_0 - \eta_{\infty})(1 + (\lambda \dot{\gamma})^a)^{\frac{n-1}{a}} \quad (2.7)$$

Bird – Carreau modelindeki kullanılan üsteki 2 yerine bu modelde a sabiti vardır. a sabiti, sabit viskozite bölgesiyle kuvvet yasası bölgesi arasındaki geçişin şeklini belirler. $a < 1$ geçiş bölgesini uzatır, $a > 1$ ise geçiş ani olur. Model beş ayrı parametreyle (η_0 , η_{∞} , λ , a ve n) kontrol edildiğinden çok esnektir. Bundan dolayı en çok kullanılan kayma viskozite modelidir[1, 12].

2.3.3.Sıcaklık ve basıncın viskoziteye etkisi

Kayma şekil değiştirme hızı yanı sıra, sıcaklık ve hidrostatik basınç da polimer eriyiğin viskozitesinin belirlenmesinde önemli bir faktördür. Şekil 2.12’ de basınç ve sıcaklık ile viskozite değişimi görülmektedir. Basıncın 550 bar mertebelerine

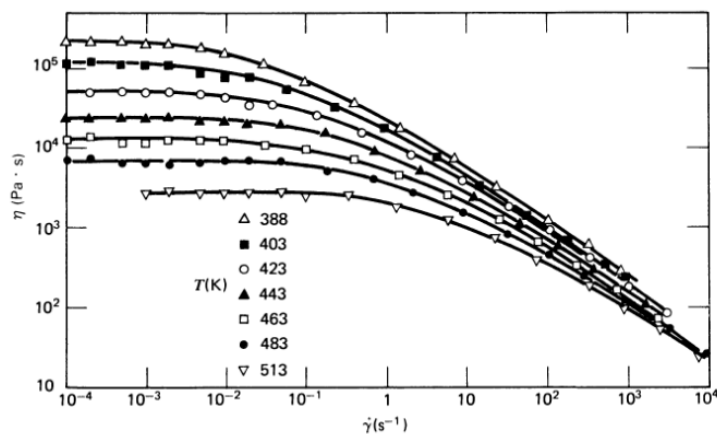
artmasının PMMA (polymethyl methacrylate) için viskoziteyi 10 kat arttırdığı görülmüştür. Böyle durumlarda viskozitenin sabit tutulması istenirse sıcaklık artırılmalıdır[4].



Şekil 2.12 : Sıcaklık ve basıncın PMMA polimerinin viskozitesine etkisi [4]

2.3.3.1. Sıcaklık etkisi

Kayma viskozitesi üzerine sıcaklığın etkisinin proses koşulları ve son ürün kalitesi üzerine büyük etkileri vardır. Sıcaklıktaki artış moleküllerin enerjilerini artırarak serbest hareketlerini hızlandıracak ve moleküller arası etkileşimi zayıflatacaktır. Bu nedenle artan sıcaklık ile viskozite azalmaktadır[8]. Şekil 2.13 'de düşük yoğunluklu polietilen için sıcaklıkla viskozitenin değişimi görülmektedir.



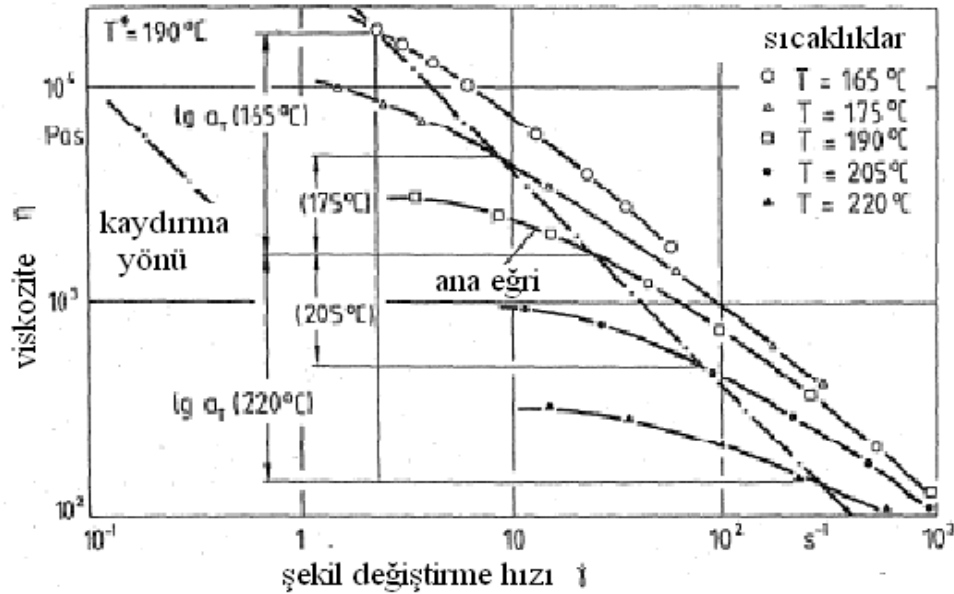
Şekil 2.13 : LDPE' nin farklı sıcaklıklarda viskozite eğrileri [6]

Sıcaklıkla viskozite bağımlılığını tanımlamak için yaygın olarak kullanılan iki ifade bulunmaktadır. Arrhenius Eyring ve Williams, Landel and Ferry (WLF). Şekil 2.13'

de de görüldüğü gibi düşük kayma şekil değiştirme hızlarında (özellikle sıfır kayma viskozite bölgesinde) sıcaklığın viskoziteye etkisi yüksek kayma hızlarındakine göre oldukça fazladır. Polimer eriyiklerin farklı sıcaklıklardaki viskozite eğrileri şekil olarak birbirine benzerler (Şekil 2.14). Bundan dolayı tek bir eğri ile sıcaklıktan bağımsız olarak viskozite fonksiyonları gösterilebilir. Bu eğri referans eğri adını alır ve sıcaklıktan bağımsızdır. Bu eğri şu şekilde elde edilir: Viskozite o sıcaklıktaki sıfır kayma viskozitesine bölünür ve kayma şekil değiştirme hızı sıfır kayma viskozitesi ile çarpılır[1, 4].

Herhangi bir sıcaklıkta bilinen viskoziteden başka bir sıcaklıktaki viskoziteyi hesaplayabilmek için a_T katsayısının bilinmesi gerekir. a_T katsayısı Arrhenius veya WLF ifadelerinden biriyle hesaplandıktan sonra T sıcaklığındaki viskozite bulunabilir.

$$a_T = \frac{\eta_0(T)}{\eta_0(T_0)}, \quad \log a_T = \log \frac{\eta_0(T)}{\eta_0(T_0)} \quad (2.8)$$



Şekil 2.14 :CAB için farklı sıcaklıklardaki viskozite eğrileri [4]

Arrhenius denklemi,

$$a_T = \exp \left[\frac{E_0}{R} \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_0} \right) \right] \quad (2.9)$$

Burada E_0 polimerin akış aktivasyon enerjisidir ve birimi J/mol' dür. R evrensel gaz sabiti olup değeri 8,314 J/mol.K dir[4].

Çizelge 2.1: $\Delta E/R$ değerleri [10]

Polimer	$\Delta E/R$
LDPE	4.5×10^3 K
HDPE	2.83×10^3 K
PP	5.14×10^3 K

Arrhenius Kuralı $T_g + 100$ °C ‘den büyük sıcaklıklar için uygundur ve özellikle yarı kristalli termoplastikler (PE, PP...) için gayet iyi sonuç verir[1]. T_g camısı geçiş sıcaklığı polimerler için ayırt edici bir özelliktir. Polimerler camısı geçiş sıcaklığının altındaki sıcaklıklarda sert ve kırılganken, üstündeki sıcaklıklarda yumuşak ve esnektirler.

Çizelge 2.2: Bazı polimerler için T_g değerleri [4]

Polimer	T_g (°C)
HDPE	-120
LDPE	-70
PP	-10
PS	70
PVC	80

Williams – Lendel – Ferry (WLF) denklemi,

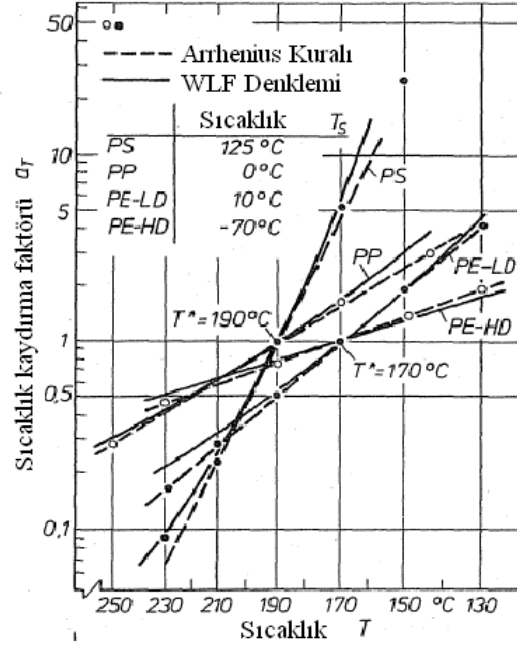
$$\log a_T = \log \frac{\eta(T)}{\eta_0(T_s)} = -\frac{C_1(T - T_s)}{C_2 + (T - T_s)} \quad (2.10)$$

T_s , standart sıcaklık camısı geçiş sıcaklığının 50 °C fazlasına eşittir. WLF sabitleri C_1 ve C_2 sırasıyla 8.86 ve 101.6 K’ ne eşittir. Referans olarak T_s yerine herhangi bir sıcaklık kullanılmak istenirse;

$$\log a_T = \log \frac{\eta(T)}{\eta(T_R)} = \log \left(\frac{\eta(T)}{\eta(T_s)} \cdot \frac{\eta(T_s)}{\eta(T_R)} \right) \quad (2.11)$$

$$\log a_T = \frac{C_1(T_R - T_s)}{C_2 + (T_R - T_s)} - \frac{C_1(T - T_s)}{C_2 + (T - T_s)} \quad (2.12)$$

Şekil 2.15’ de kaydırma faktörünün her iki model ile kıyaslaması görülmektedir.

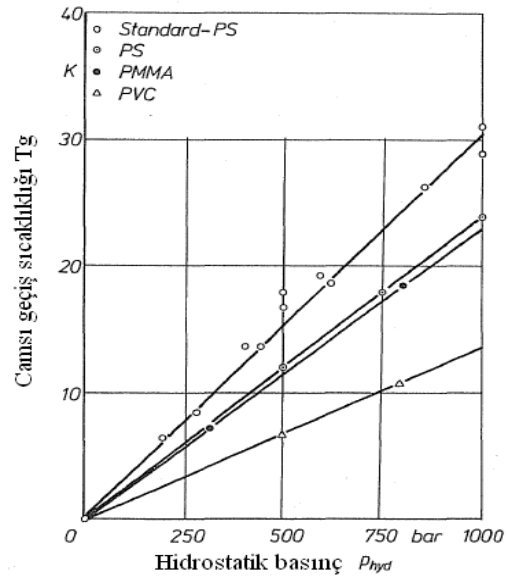


Şekil 2.15 : Bazı polimerler için a_T değerleri [4]

2.3.3.2.Basınç etkisi

Basıncın artması ile polimerin sıkışması sonucu akışkanlığı azalmakta, viskozitesi artmaktadır. Basınç ile camısı geçiş sıcaklığının da lineer olarak değiştiği bilinmektedir. Verilen basınçtaki camısı geçiş sıcaklığı, T_g hesaplanarak WLF denkleminde yerine koyularak viskozite hesapmış olur. Şekil 2.16' da camısı geçiş sıcaklığının basınç ile değişimi görülmektedir.

$$T_g(p) = T_g(1 \text{ bar}) + \xi \cdot p \quad (2.13)$$

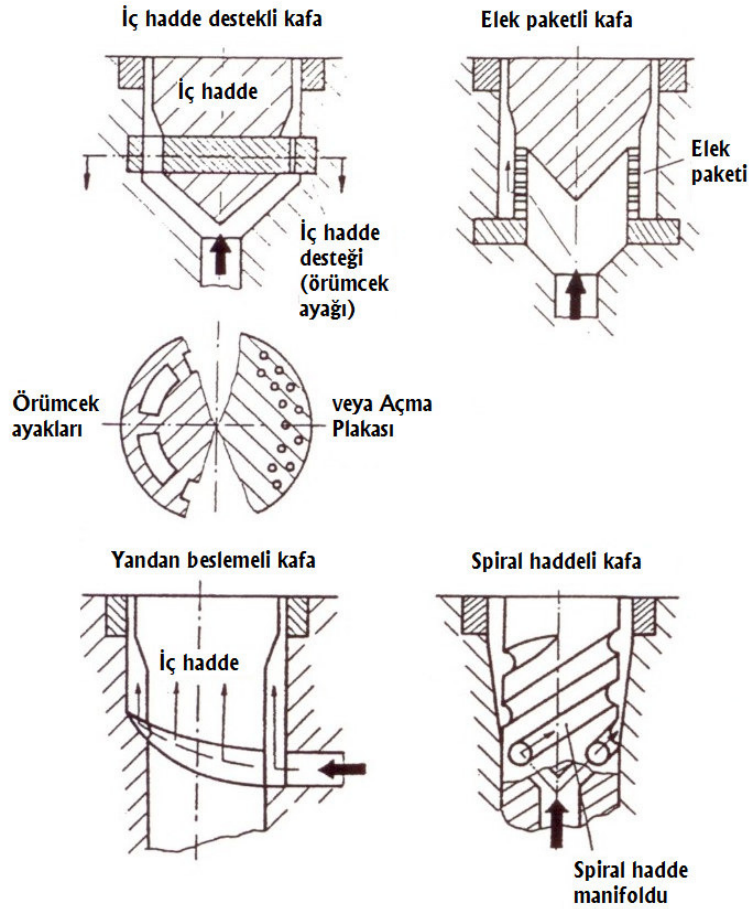


Şekil 2.16: Basıncın T_g üzerine etkisi [4]

3.RADYAL SPİRALLİ KALIP TASARIMI

Ekstrüzyon kalıbının işlevi, eriyiği ekstrüderden almak ve çekici ekipmana, kesit ölçülerinde mümkün olan en az sapmayla şekillendirilmiş bir ürün olarak en yüksek hızda göndermektir. Polimer eriyiklerin halka şeklindeki kesitlerden ekstrüzyonunda kullanılan kalıplar, boru, hortum, film ve ön-form üretiminde ve kablo-boru kaplama işlemlerinde kullanılır [4, 13].

Dairesel kesitli ürün çıkışının olduğu durumlarda genellikle Şekil 3.1’ de görülen 4 çeşit kalıp kullanılmaktadır[4]. Bunlar arasından spiral haddeli kalıplar, polimerde birleşme hattının olmaması ve diğer alternatiflerine göre homojen bir karışım sağlaması bakımından öne çıkmaktadır[14].



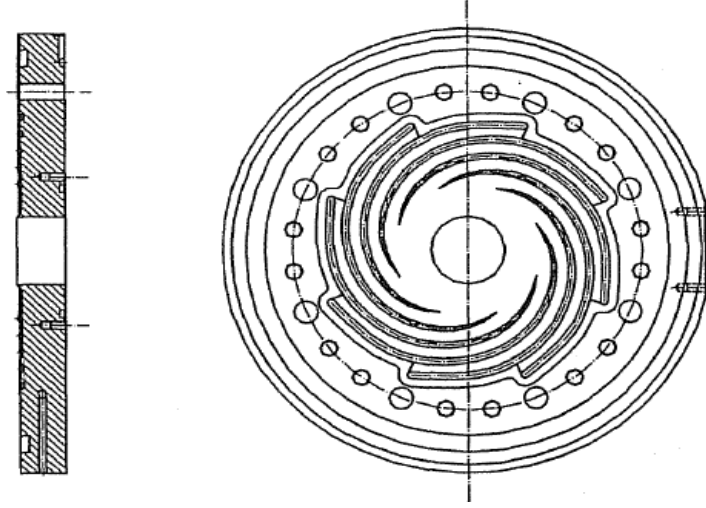
Şekil 3.1 :Dairesel kesitli ekstrüzyon kalıp çeşitleri [5]

“Şekil 3.1’ de verilen kalıplar arasında, merkezden besleme sayesinde iyi bir eriyik dağılımı sağladığı ve eriyiği çalışma koşullarından bağımsız şekilde dağıttığı için, iç hadde destekli merkezden beslemeli kalıplar geçmişte en çok kullanılan kalıp tipleri olmuştur. Bununla birlikte, örümcek ayaklarının akış izleri ya da bir başka deyişle birleşme hattı görünümü bırakması önemli bir dezavantaj olmuştur. Bunlar her zaman görünmeyebilir ancak yapısal olarak mevcut olup mekanik mukavemeti düşük bölümlerin oluşumuna yol açar.”[13]

“Elek paketli kafalar genellikle büyük çaplı poliolefin boruların üretiminde kullanılır. Bu kafalarda eriyik, üzerinde çok sayıda delik yer alan (her biri 1 ila 2.5 mm çapında) boru şeklindeki bir elek paketinden geçerek kafa çıkış kısmına ilerler. Bu boru şeklindeki elek paketi dış hadde ve iç haddeyi birbirine bağlayan parçadır. Bu kafaların örümcek ayaklı kafalara göre daha küçük ve dolayısıyla daha hafif olmaları en büyük avantajlarıdır.”[13]

Yandan beslemeli kafaların en büyük zorluğu, manifoldun eriyiği tüm çevre boyunca düzgün şekilde dağıtacak biçimde tasarlanabilmesidir. Bu tür kafalarda, yukarıda belirtilen birleşme hattı sorunu da sıklıkla görülmektedir[13].

“Klasik spiral haddeli kafalarda, ekstrüderden gelen eriyik önce birkaç ayrı akışa ayrılır. Yıldız veya halka şeklindeki dağıtıcı sistemler bu amaçla kullanılabilir. Bu birincil dağıtıcılar, iç hadde içine çoklu yivler şeklinde oyulan spiral kanallara boşalır. Son yıllarda, her kanala ayrı ayrı boşalma yaklaşımı yerini çevre boyunca uzanan askı-biçimli dağıtıcılara ve bunları takip eden yayvanlaşan dişlere (smear thread) bırakmıştır. Bu tasarımın avantajı, daha fazla spiral kanalı ve eriyik katmanıyla çalışan daha küçük bir dağıtım sistemidir.”[13]



Şekil 3.2 :Radyal spiral kalıp [4]

Ekstrüzyon prosesine bakıldığında, spiral kısmında kanal derinliği giderek azalır ve iç hadde ile dış hadde arasındaki boşluk genellikle artar. Bu şekilde bir spiralde akan eriyik kendiliğinden iki akış yoluna ayrılır. Birinci akış yolu iki spiral arasında yer alan düzlükte aksel doğrultudadır. İkinci akış yolu spiral kanal doğrultusunda tanımlanmaktadır. Sonuç olarak, dairesel çıkış boşluğu çevresindeki her nokta, tüm spiral dağıtım sistemi kanallarından gelen teğetsel eriyik akımlarının birbirini kesmesi ile oluşur.

“Bu düzenlemede herhangi bir birleşme hattı olmadığından, istenen fiziksel homojenlik yanında iyi bir termal homojenlik de (yani tek bir eriyik sıcaklığı) elde edilir. Bu dağıtım sisteminin en büyük faydalarından biri, birleşme hatlarının ve akış izlerinin tamamen ortadan kaldırılmasıdır. Bunun bir başka çeşidi olan radyal spiral dağıtıcılarda, kanallar iç hadde etrafına klasik yöntemde olduğu gibi sarılmaz; bunun yerine kanalları içeren radyal bir düzlemde yer alır. Bu durumda eriyik kalıbın dış çevresinden beslenir. Kanal derinlikleri merkeze doğru azalır. Eriyik başlangıçta tamamen spiral kanalda akarken, spiral kanal sonunda tüm akışkan parçacıkları aradaki boşluğa taşınmış olmaktadır. Bu tasarım, modüler uygulamaları içeren büyük bir esnekliğe, farklı modüllerin başarılı termal izolasyonuna, katman sayısı birden çok olduğunda geçiş süreleri (residence time) arasında daha az farka ve mevcut sistemlere kolaylıkla monte edilebilmeye olanak sağlar.”[13]

Çizelge 3.1: Kalıp çeşitlerinin karşılaştırılması[13,15]

	Spiral haddeli manifold	Radial spiral kalıp
Basınç düşüşü	Birleşme öncesi dirençler benzer. Her katman için ayrı optimum kanal tasarımı.	Her birleşme noktasından sonra ilave direnç. Büyük kafalarda istenmeyen uzun akış yolları.
Geçiş süresi	Her katman için birleşecekleri noktaya kadar ayrı ayrı tayin edilebilir	Her birleşme noktasından sonra ayrı ayrı tayin edilemez. Uzun akış yollarından dolayı büyük kafalarda uygun değil
Dağıtım, çalışma noktasına bağlılık	Binme (overlap) sayısı sınırsız. Geniş çalışma noktası aralığı.	Binme (overlap) sayısı sınırlı. Dar çalışma noktası aralığı.
Eriyik birleşmesi	Sırayla veya tek bir noktada olabilir (katman yapısına bağlı olarak).	Sadece sırayla gerçekleştirilebilir. Bazı yapılar ve hammaddeler için uygun değil.
Katman yapısının değişkenliği	Birleşme konfigürasyonu optimize edilebilir.	Tüm çok katmanlı akışlar kararlı olmalıdır
Çeşitli katmanların sıcaklık kontrolü	Genellikle mümkün değil.	Her disk için ayrı sıcaklık kontrolü.
İç kanal ve iç soğutmaya uygunluk	Besleme ve ön-dallanmaya bağlı.	Yandan beslemeye bağlı.

3.1.Ekstrüzyon Kalıbı Optimizasyon Kriterleri

Dairesel olarak simetrik ürünlerin üretiminde spiral haddeli ekstrüzyon kalıpları; düzgün akışkan dağılımı ve ürün et kalınlığı, birleşme çizgilerinin olmaması gibi kriterlerin yerine getirilmesinde sıradışı bir başarı yakalamıştır. Günümüz tasarımları ayrıca aşağıda belirtilen niteliklere sahip olmalıdır[15].

Reolojik kriterler:

- Düşük basınç kaybı ve kısa geçiş süresi (akış kanalı kesitleri ve uzunlukları)
Basınç düşüşü ve geçiş süresi arasında ikilem olduğunda, kritik dönüşlerin ve akış dallanmalarının olduğu yerlerde geçiş süresi kriteri önceliğe sahipken; deliklerde ve diğer basit akış kanallarında kabul edilebilir bir geçiş süresi ile birlikte düşük basınç kaybı kriteri önceliğe sahip olmaktadır[15].

- Kalıp cidarlarında kayma gerilmesi değerleri en düşük ve en yüksek sınırlar (sırasıyla çökme ve “melt fracture”) içinde kalmalıdır. Kayma hızları (shear rate) 5 s^{-1} (tercihen 10 s^{-1}) ile 50 s^{-1} arasında olmalıdır. Böylelikle kabul edilebilir malzeme ve renk seçimine izin verecek elverişli cidar kayma gerilmesi sağlanmış olur. Kablo ve iletken kaplama kafaları gibi birkaç durumda ve düşük vizkoziteli eriyiklerde kayma şekil değiştirme hızları 1000 s^{-1} 'e kadar çıkabilir[15].
- Eş-ekstrüzyonda arayüzey düzensizliklerinin önlenmesi, özellikle çok büyük katman kalınlık oranlarında (belirli katmanlar tüm katman kalınlığının sadece %1'ini oluşturabilir.) Kayma vizkoziteleri ve elastik özellikleri çok farklı olan polimerler, arayüz düzensizliklerine yol açma eğilimi gösterebilir. Eş-ekstrüzyonda eriyiklerin bir araya getirilme şekli -sırayla, tek bir noktada veya ikisinin birleşimi- büyük öneme sahiptir ve sistemin genel kullanılabilirliğini tayin edebilir. Yapıştırıcı ara katmanların bulunduğu yapılarda, önce yapıştırıcı ve bariyer katmanlar birleşir; ardından bu birleşik katman ana katmanla birleşir[15].
- Düzensiz elastik deformasyonun ve oryantasyonun önlenmesi
- Ölü noktaların önlenmesi (hızlı malzeme veya renk değişimleri)

Termodinamik kriterler:

- Söz konusu hammaddelerin dağılımına ve ısı transferine özen gösterilmesi (ısıtma, yalıtım); eş-ekstrüzyon kafalarındaki ara katmanlar dahil.
- Kalıp geometrisindeki simetriye özen gösterilmesi[15].

Operasyonel mühendislik kriterleri:

- Çarpılmanın (warping) olmaması ve sertlik
- Basit montaj, sökölme ve temizleme (akış kanalı yüzeylerine yapışan eriyik olmaması ya da çok az miktarda olması)
- Sıkı geçmiş düzlemsel kalıp yüzeyleri
- Kolay merkezleme
- Mümkün olan en kısa malzeme ve renk değişim süreleri (sistemin kendi bütünlüğü içinde, ekstrüder, filtre, adaptör ve kafa dahil), dolayısıyla fire miktarında azalma[15].

İmalat kriterleri:

- Ucuz imalat
- Kısa toplam uzunluk
- Modüler yapı [13, 15]

3.2.Radyal Spiral Kalıp Ön Tasarımı

Bu çalışmada, 32 mm çapında, 3.6 mm et kalınlığında bir plastik borunun 20 m/dk hızında üretimi için yıldız tipi dağıtıcılarla beslenen spiral kalıbın tasarımı ele alınmaktadır. Polimer eriyik, Kuvvet Yasasına uyan Newton-tipi olmayan polipropilen (PP) olarak belirlenmiştir. Kuvvet Yasası indeksi $n=0.33$ ve $m=25846$ Pa.s' dir.

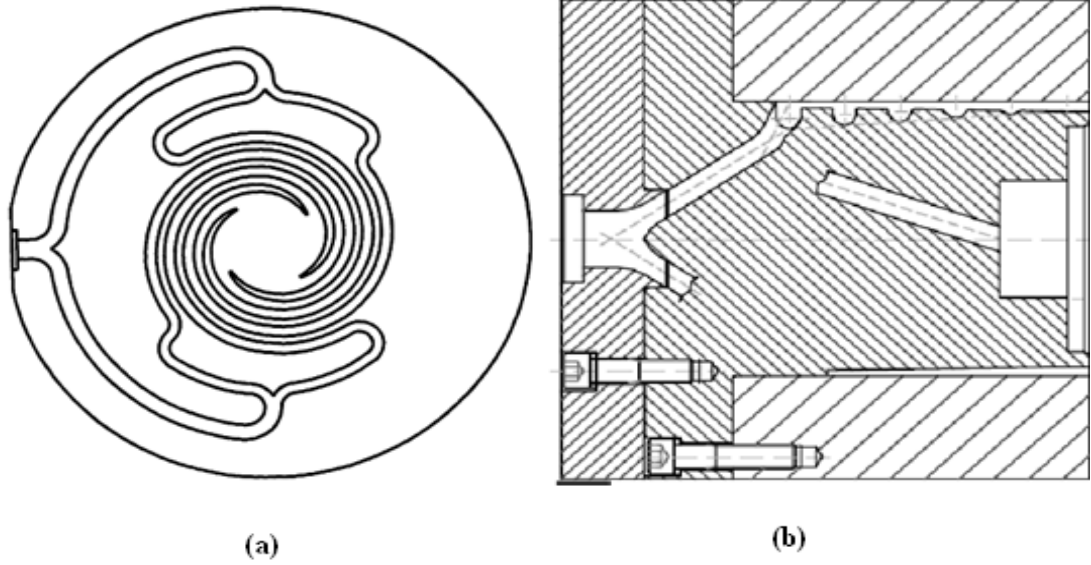
İstenen özelliklerde boru üretimi için kalıba beslenmesi gereken toplam eriyik hacimsel debisi Denklem 3.1 kullanılarak $Q_t=1.0707 \times 10^{-4}$ m³/s olarak hesaplanmıştır. D_d ve D_i sırasıyla boru dış ve iç çapını belirtmektedir. $\bar{v}$ boru üretim hızını belirtmektedir.

$$Q_T = \bar{v} \frac{\pi(D_d^2 - D_i^2)}{4} \quad (3.1)$$

Tasarım koşulu olarak kalıp içerisindeki akışta kayma şekil değiştirme hızı $(\dot{\gamma}_w)$ 'nun 150 s^{-1} 'yi ve kayma gerilmesi (τ_w) 'nun “melt fracture” (polimer eriyiğin kalıptan düzensiz çıkışı) olayının gerçekleşmesinde sınır değer olarak kabul edilen 130000 Pa ' ı geçmemesi istenmektedir. Yıldız dağıtıcı girişinden kalıp çıkışına kadar olan basınç kaybı 150 bar ' ı aşmamalıdır.

3.2.1.Ön dağıtıcı

Literatürdeki [16, 17] çalışmalarda radyal spiral kalıp için genellikle yandan beslemeli ön dağıtıcı kullanıldığı görülmektedir. Yandan beslemeli tasarım kalıp çapında büyümeye ve dolayısıyla kalıp ağırlığında artışa sebep olduğu için yıldız tipi dağıtıcı tercih edilmiştir. Şekil 3.3' de yandan besleme ve yıldız tipi dağıtıcı görülmektedir. Yıldız tipi dağıtıcıda her bir spiral eşit miktarda eriyikle beslenir.

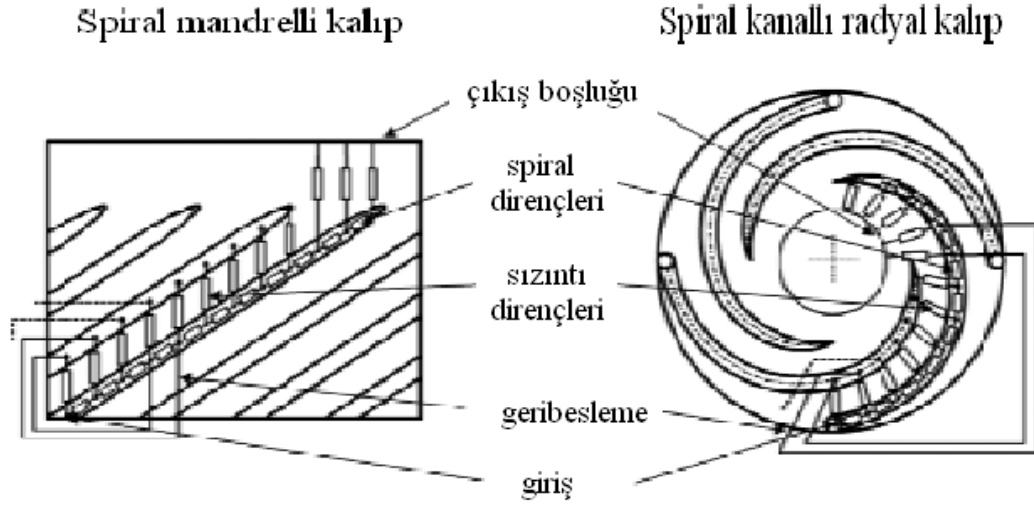


Şekil 3.3 :Yandan beslemeli ön dağıtıcı (a), yıldız dağıtıcı (b) [13], [16]

3.2.2.Elektrik-şebekesi benzeşimi metodu ile kalıbın ön tasarımı

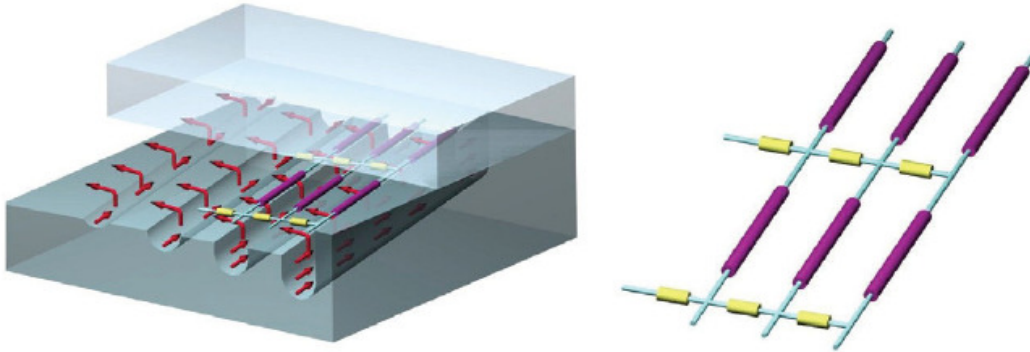
Radyal spiral kanallı kalıbın analitik tasarımı yapılırken Rauwendaal [2] 'ın çalışmasındaki analitik yöntem kullanılmıştır. Şekil 3.4' de Rauwendaal [2] 'ın modelinin radyal spiralli kalıp için uyarlanmasıyla ortaya çıkan elektrik şebekesi görülmektedir. Rauwendaal'ın modelinin radyal spiralli kalıp için uyarlanması aşamasında aşağıdaki kabuller yapılmıştır.

- 1.Eş basınç eğrileri kalıbın radyal (r) doğrultusuna diktir.
- 2.Spiral kanal içindeki akış; genişliği W , yüksekliği H olan dikdörtgen kesitte basınç gradyanının sebep olduğu akış olarak düşünülebilir.
- 3.İç ve dış hadde arasındaki akışın yüksekliği δ olan dikdörtgen kesitte olduğu kabul edilebilir.
- 4.Spiral kanal içerisindeki akış ve sızıntı akışı birbirini etkilememektedir.

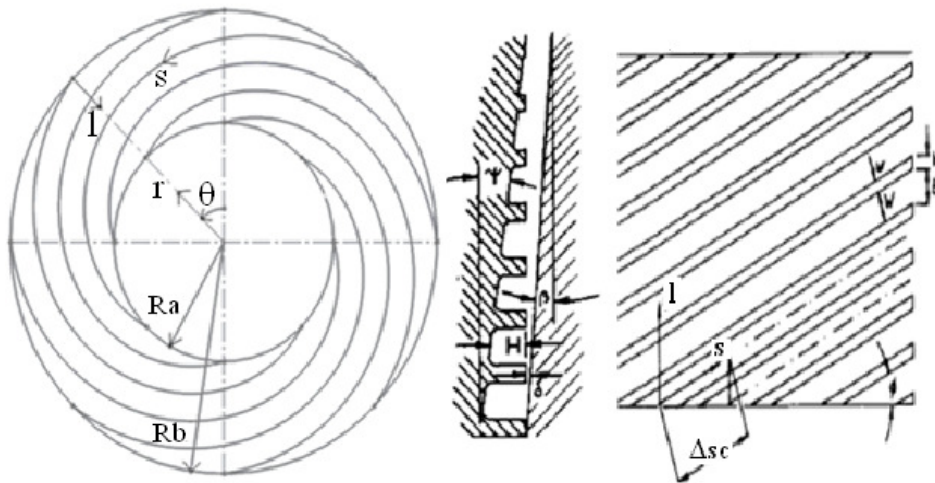


Şekil 3.4 :Radyal spiralli kalıp için uyarlanmış elektrik şebekesi [18]

Şekil 3.5’ de akış dirençleri daha net bir biçimde görülmektedir. Basınç düşümünün birer direnç boyunca spiral ve sızıntı akışı doğrultusunda eşit olduğu kabul edilmektedir.



Şekil 3.5 :Elektrik şebekesi benzeşiminde dirençler [13]



Şekil 3.6 :Spiral kanal geometrisi [2]

Şekil 3.6' de R_a ve R_b sırası ile iç ve dış çapları göstermektedir. s spiral kanaldaki akış doğrultusu, l de radyal doğrultuya ters sızıntı akışının gerçekleştiği doğrultudur. İlk girişte tamamı spiralde olan akışkan s ve l doğrultularında ilerlerken azalan H spiral derinliği nedeni ile spiralden çıkarak sızıntı akışını oluşturur. Kalıp çıkışında spiral kanal içerisindeki akışkan tamamen iç-dış hadde arasındaki boşluğa boşalır. Spiral geometrisi logaritmik tip olarak belirlenmiştir.

Logaritmik spiralde yarıçapın θ açısına bağlı değişimi,

$$r = ae^{b\theta} \quad (3.2)$$

şeklindedir. Spiral kanal derinliği;

$$H(l) = H_0 - l \tan \psi \quad (3.3)$$

İç-dış hadde arasındaki aralığın l kordinatına bağlı değişimi,

$$\delta(l) = \delta_0 - l \tan \beta \quad (3.4)$$

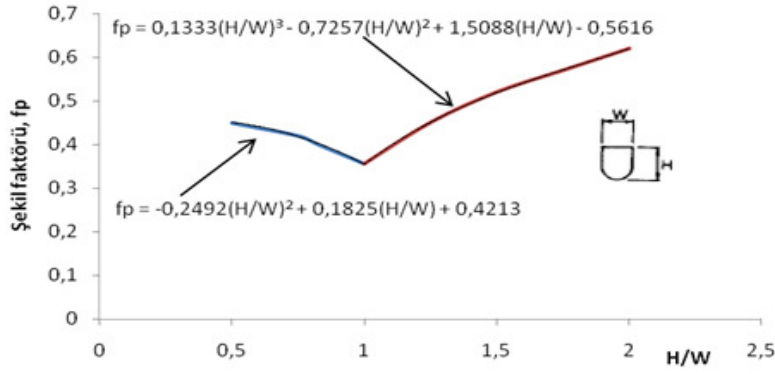
şeklindedir. Spiral ve birim genişlikteki kanalda sızıntı akışları debileri sırası ile,

$$Q_{sp} = \frac{f_p W H^2}{2(1/n + 2)} \left(\frac{H g_s}{2m} \right)^{1/n} \quad (3.5)$$

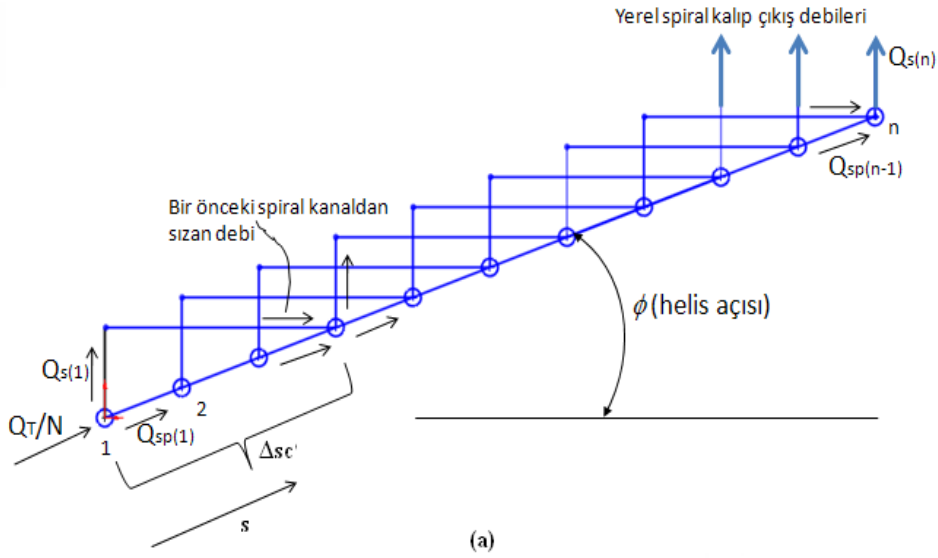
$$Q_s = \frac{\delta^2}{2(1/n + 2)} \left(\frac{H g_i}{2m} \right)^{1/n} \quad (3.6)$$

Dikdörtgen kesitli kanalda (slit die) olduğu düşünülen spiral kanaldaki akışta debi ile basınç düşüşü arasındaki ilişkiyi tanımlayan ifadede şekil faktörü f_p kullanılır. Şekil faktörü Şekil 3.7' de görülmektedir. g_s ve g_i , sırasıyla Şekil 3.6 'daki s ve l doğrultusundaki basınç gradyenleridir. θ spiral yerel helis açısı olmak üzere g_s ve g_i arasındaki ilişki Denklem 3.7 ile ifade edilebilir.

$$g_s = g_i \sin \theta \quad (3.7)$$



Şekil 3.7 :Şekil faktörü f_p 'nin H/W ile değişimi [5]



Şekil 3.8 : Spiral kalıptaki akış yolları için tanımlanan elektrik şebekesi [5]

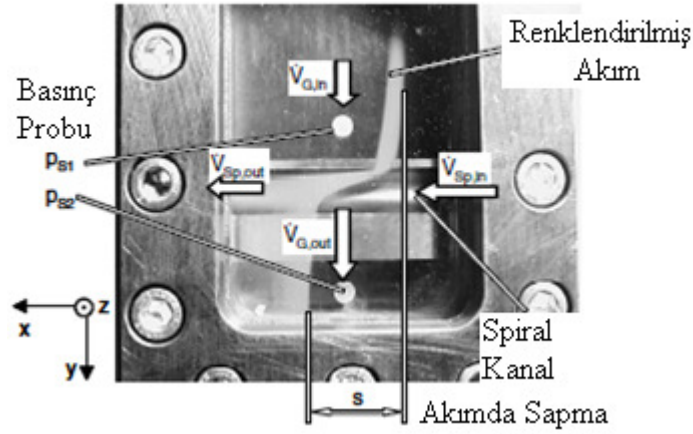
İlk Δs_c (Şekil 3.8) boyunca spiral kanal içerisindeki akış, bir önceki spiral kanaldan sızan akıştan etkilenmemektedir. Bu bölümde kütle korunumu yazılır ise;

$$Q_{sp}(s+\Delta s) = Q_{sp}(s) - Q_s(s) \quad s \leq \Delta s_c \quad (3.8)$$

Birinci Δs_c mesafesinden sonra spiral kanal içerisindeki akış, bir önceki spiral kanaldan sızan akıştan etkilenmektedir, bu kısımda kütle korunumu aşağıdaki gibi ifade edilebilir.

$$Q_{sp}(s+\Delta s) = Q_{sp}(s) + Q_s(s - \Delta s_c) - Q_s(s) \quad s > \Delta s_c \quad (3.9)$$

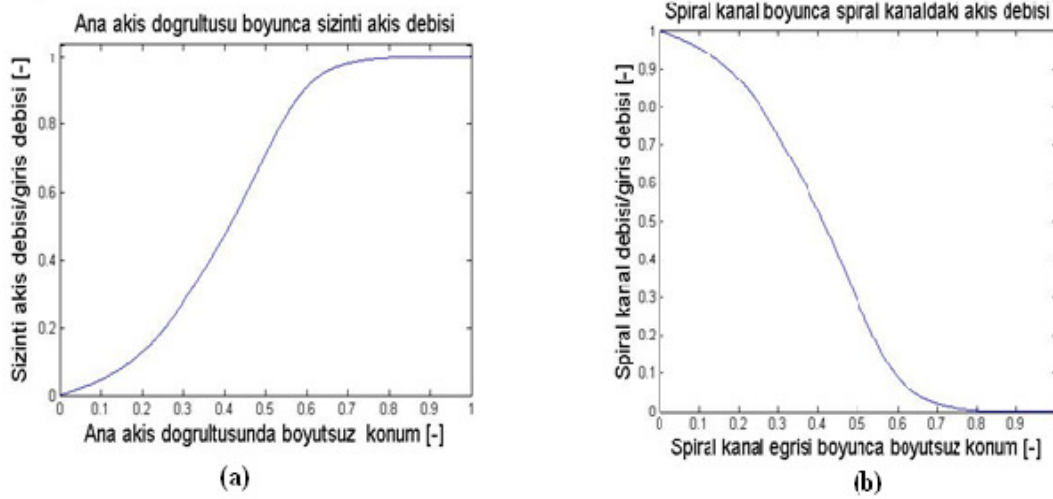
Sızıntı akışında spiraldeki akıştan dolayı sapma meydana gelmektedir. Şekil 3.9' da akıştaki sapmanın akım içine renkli partiküller salınarak deneysel incelenmesi görülmektedir.



Şekil 3.9 :Sızıntı akışı sapması [19]

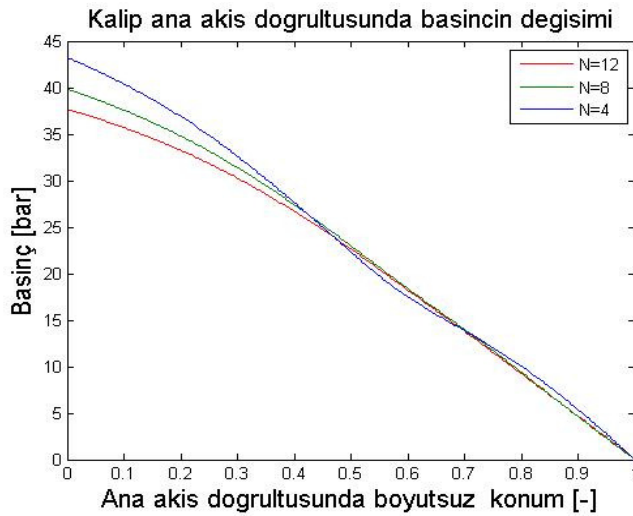
Denklem (3.2) ile (3.9) arasındaki ifadeler kullanılarak spiral kanallı kalıp içerisindeki debi dağılımı ve basınç değişimi Matlab kodu yardımı ile analitik olarak kolaylıkla bulunabilmektedir. Matlab kodu ile ön tasarım yaparken basınç düşümü, spiral çıkışında hız dağılımı ve sızıntı akışının kalıp boyunca kademeli artması gibi faktörler öncelikli olarak göz önünde bulundurulmuştur. Ayrıca maksimum ve minimum kayma şekil değiştirme hızları ve yüzeyde maksimum kayma gerilmesi gibi parametreler de istenilen sınırlar içinde olmalıdır. Kalıp çıkışında olabildiğince homojen hız dağılımı ve toplam basınç kaybının makul değerlerde tutulması sağlanacak şekilde tekrarlı denemelerden sonra spiral kanal sayısı $N=8$, spiral kanal başlangıç derinliği $H_0=28$ mm, spiral kanal genişliği $W=20$ mm, aralık artım açısı $\beta=0,2^\circ$, girişte iç ve dış hadde arasındaki aralık miktarı $\delta_0=4.1$ mm ve spiral kanal derinliğinin azalış açısı $\psi=5.55^\circ$ olarak belirlenmiştir. Aşağıda Matlab kodundan elde edilmiş 210°C ' de katkısız PP için grafikler yorumlanmıştır.

Şekil 3.10' da sırasıyla kalıp boyunca sızıntı akış debisi ve spiral kanal boyunca akış debileri görülmektedir. Beklendiği üzere sızıntı akışında artış olurken, spiraldeki akış azalmaktadır. Kalıp geometrisini belirlerken sızıntı akışının kalıp boyunca kademeli artışı istenmektedir. Mümkün olduğunca Şekil 3.10(a)'daki eğrinin kalıp boyunca boyutsuz uzunluk ve boyutsuz sızıntı akışı debileri 0.5 değerinde çakıştırılmaya çalışılır.



Şekil 3.10 : Kalıp boyunca sızıntı akış (a) ve spiral kanal akış (b) debileri

Şekil 3.11' de kalıp boyunca basınç düşümü görülmektedir. Spiral sayısındaki artış basınç düşümünü artırmaktadır. Fakat diğer parametrelerde düşüldüğünde kullanılabilecek maksimum spiral sayısı sınırlıdır. Bu çalışmada spiral sayısı 8 olarak alınmıştır.

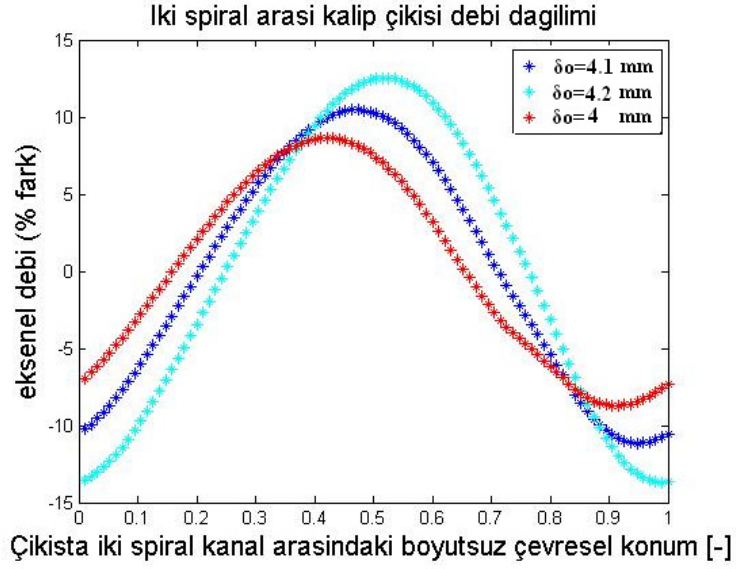


Şekil 3.11 : Kalıp boyunca basınç düşüşü

Şekil 3.12' de spiral kalıp girişinde iç-dış hadde arasındaki aralık miktarının kalıp çıkışında iki spiral arasında debi dağılımına etkisi verilmiştir. Kalıp çıkışında çarpılmanın engellenmesi için eksenel debi farkının %10 değerini aşmaması istenmektedir. Görüldüğü üzere iç-dış hadde arasındaki farkın azalması bu durum için eksenel debi farkını azaltmaktadır. δo , sızıntı akış debisini de etkilemektedir. Bundan dolayı deneme yanılma ile optimum değer olan $\delta o=4.1$ seçilmiştir.

$$sapma(\%) = 100 \times \frac{V_{ort} - V}{V_{ort}} \quad (3.10)$$

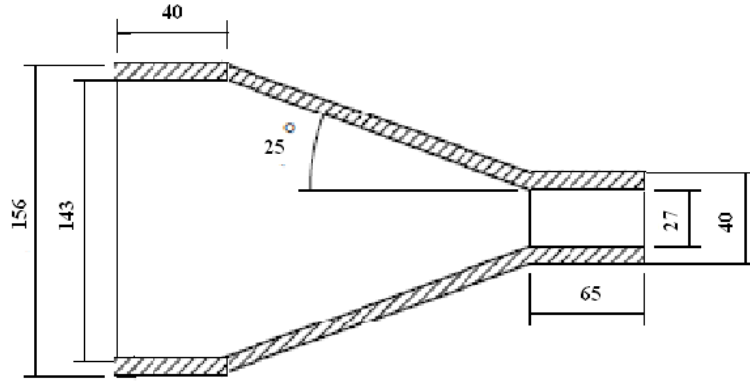
V_{ort} spiral çıkışında ortalama hızı göstermektedir.



Şekil 3.12 :İki spiral arası kalıp çıkışında debi dağılımı

3.3.Kalıp Çıkış Kısımının Geometrisinin Oluşturulması

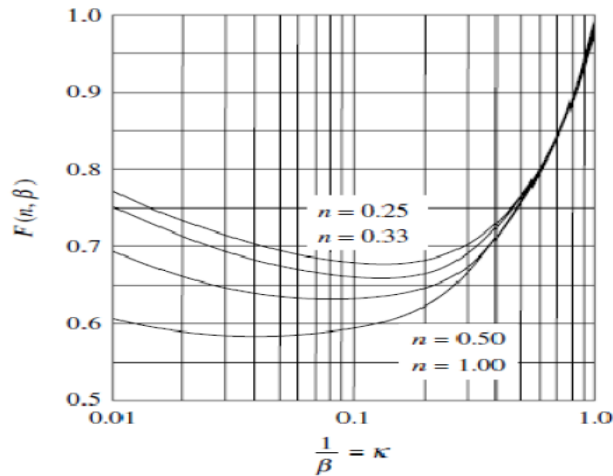
Şekil 3.13’ de kalıp çıkış kısmının geometrisi görülmektedir. Bu kısımda basınç düşüşü halka kesitte Newton tipi olmayan akışkanların akışı için Denklem 3.11 yardımı ile hesaplanır. Konik olan kısımda ise Matlab kodu yardımı ile akış hacmi küçük parçacıklara bölünerek hesaplama yapılır.



Şekil 3.13 :Kalıp çıkış kısmında akış hacmi geometrisi

$$\Delta P = \frac{4mL}{D_0} \left(\frac{8Q(1/n + 2)}{\pi D_0^3 F(n, \beta)} \right)^n \left(\frac{1}{1-K} \right)^{2n+1}, K = \frac{D_i}{D_0} \quad (3.11)$$

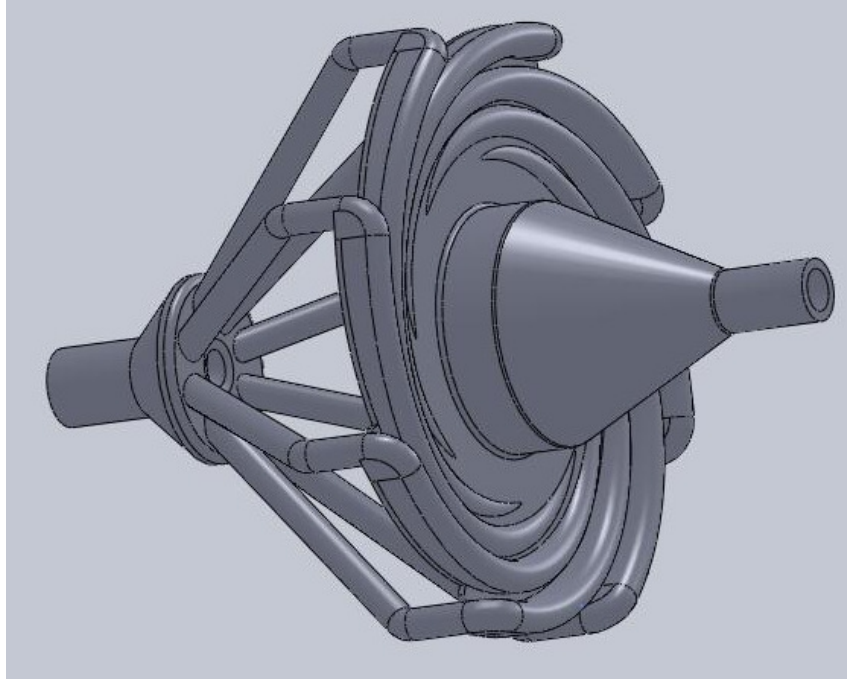
Denklem (3.11) Newton-tipi olmayan akışkanlar için geçerli bir ifade olup, halka kanalın uzunluğu L, dış çapı D_0 ve iç çapı D_i ile ifade edilmektedir. $F(n, \beta)$ fonksiyonu Şekil 3.14 ile tanımlanmaktadır.



Şekil 3.14 :Halka kanal akışı için tanımlanmış $F(n, \beta)$ fonksiyonu [3]

3.4.Tüm Kalıp Geometrisi

Spiral ve çıkış kısmı tasarlanan kalıp için bir sonraki adım dağıtıcı sistemi seçmektir. Dağıtıcı sistem olarak yıldız dağıtıcı seçilmiştir (Şekil 3.3). Yıldız dağıtıcının yandan beslemeli tasarıma göre avantajları; kalıp çapını çok fazla arttırmaması ve spiral kanal sayısını sınırlandırmamasıdır. Şekil 3.15’ de Solidworks yazılımı ile çizilen tüm akış hacmi görülmektedir.



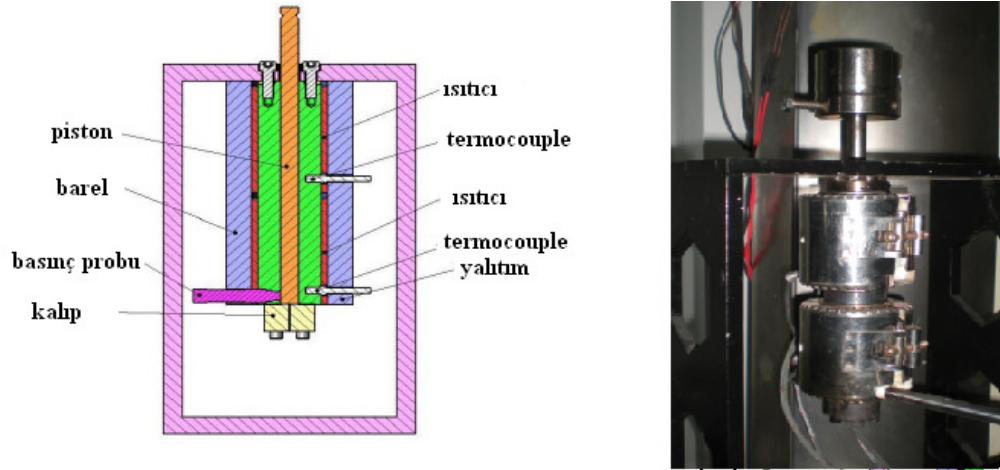
Şekil 3.15 : Radyal spiral kanallı kalıbın akış hacmi

Çizelge 3.2: Kalıp boyunca basınç düşümü

	Basıç Kaybı [bar]
Kalıp çıkışı kısmı (radyal kalıptan sonra)	87
Radyal spiral kalıp	40
Spiral kalıp sonrası homojenizasyon	10
Yıldız dağıtıcı	58
Ana besleme kanalı	1
Toplam	196

4.DENEYLER

Bu tez çalışması kapsamında tasarımı Gökgöz [10] tarafından tasarlanan ve imal ettirilen kapiler reometre ile PE, PP ve PP-kalsit kompozit eriyiklerin kayma viskoziteleri ölçülmüştür. Kapiler reometre, ısıtılan bir haznedeki eriyik materyalin piston yardımıyla sabit hızda küçük çaplı kalıp deliğinden akıtıldığı bir cihazdır. Şekil 4.1’ de kapiler reometrenin bileşenleri görülmektedir. Reometrenin özellikleri ise çizelge halinde Çizelge 4.1’ de verilmiştir.



Şekil 4.1 :Kapiler reometre [10]

Çizelge 4.1: Kapiler reometre özellikleri [10]

Barel	Uzunluk=200mm, Çap=15mm
Piston	Uzunluk=260mm, Çap=14mm
Basınç ölçüm aralığı	0-2000 bar
Basınç probu hassasiyeti	% 0.5
Kalıp	Çap= 1mm Uzunluk=5, 10, 20 ve 25 mm
Isıtma aralığı	Oda sıcaklığı-400 °C
Isıtıcı ceket	Uzunluk=90mmÇap=50mm Güç=450 W

Reometre ile ölçümü yapılacak olan malzemeler arasında; katkısız PP ve PE ile %5, %10, %20, %40 kalsit (aşağıda katkı özellikleri için Çizelge 4.2 verilmiştir) katkılı PP bulunmaktadır. Ölçüm sıcaklıkları katkısız PP ile %5, %10, %20, %40 kalsit katkılı PP için 210 °C, 230 °C, 260 °C' dir. Katkısız PE için 190 °C, 210 °C, 240 °C' de ölçümler yapılmıştır.

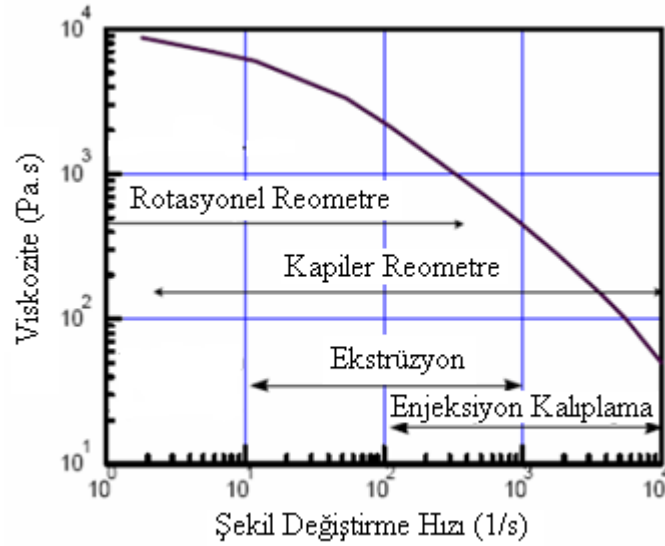
Çizelge 4.2: 400-E (stearik asit kaplı) ve A-1 (kaplama yok) kodlu kalsite ait bilgiler

45 µm elek bakiyesi	% 0
En büyük tane büyüklüğü (D %97)	8,08 µm
Ortalama tane büyüklüğü (D %50)	1,87 µm
2 µm altı tane yüzde miktarı	% 56.99

4.1.Kapiler Reometre Çalışma Prensibi

Kapiler reometrenin temel çalışma prensibi haznede eritilen polimerin belli bir hız ile kalıptan akıtılmasıdır. Bu sırada kalıp girişi öncesi basınç değeri okunmaktadır. Bilinen basınç düşümü ve piston hızı ile viskozitenin hesabı ilerleyen kısımlarda açıklanacaktır.

Kapiler reometreler bazı avantajlarından dolayı tercih edilmektedir. Geniş kayma şekil değiştirme hızı ve sıcaklık aralığında ölçüm yapabilmektedir. Yüzey bozulması (melt fracture) gibi bazı ekstrüzyon prosesi problemleri önceden tahmin edilebilir. Dezavantajları ise kalıp içerisinde malzemenin çok kaldığı takdirde bozulması ve eriyiğin kayma gerilmesine maruz kalmasından dolayı oluşan aşırı ısınma problemleridir[10]. Şekil 4.2' de kapiler reometrenin çalışma aralığı görülmektedir.



Şekil 4.2 :Reometrelerin çalışma aralıkları [10]

Ölçümler alınırken her deneyin 3 defa tekrarı yapılmıştır. Tüm ölçümlerin tutarlı ve sistematik olması için aşağıda belirtilen şekilde standart bir çalışma yapılmıştır.

- (İlk çalıştırmada) Kalıp sıcaklığı göstergeden ayarlanır. Sıcaklık ayarlanan değere ulaştıktan sonra 15 dk sistemin termal dengeye gelmesi için beklenir.
- Granüller kademeli olarak pistonla bastırılarak doldurulur. Eriyik içerisinde hava boşluğu kalmaması gerekir.
- 6 dk granüllerin termal dengeye gelmesi için beklenirken piston 3 mm/dk hız ile hareket ettirilir.
- Granüller termal dengeye geldikten sonra 7-10 mm/dk hız ile granüllerin sıkışması sağlanır. Basınç değeri stabil olunca hareket durdurulur. Ve çekme cihazı hareket konsolu geri çekilir. Piston hafifçe sağa sola döndürülür. Basınç göstergesinde okunan değer " P_g " olarak not edilir.
- Çekme cihazı hareket konsolu, pistonla temas edinceye kadar aşağıya indirilir. Daha sonra 5 mm/dk hız ile piston ilerletilir. Basınç değeri stabil olduktan sonra istenen V_p piston hızına ayarlanır.
- Ölçüm sonuçları alınırken basınç değerinin stabil olması beklenir. Bu sırada baloncuk oluşumu olup olmadığı ve malzemenin renginin sararıp sararmadığı kontrol edilir. Sorunlu malzeme (baloncuklu, sarı) sonuçları kullanılmaz.
- Yüzeyi bozuk olan numuneler kesilerek alınır. Ve test koşulları (sıcaklık, kalıp boyu, numune, piston hızı V_p) not edilir.



Şekil 4.3 :Yüzey bozulması(melt fracture)

Yoğunluk ölçümü için;

- Yoğunluk hesabı: 14 mm/dk piston hızıyla baloncuksuz 3 numune alınır.
- Basınç değeri 150 barın altında olmalıdır.
- 5 mm' lik kalıp kullanılır.
- 1 gr dan fazla numune ile hesap yapılmalıdır.

Verilen piston hızı piston alanını çarparak hacimsel debiyi bulabiliriz. Newton tipi silindirik kanallardaki akışlar için geçerli olan Denklem 4.1 kullanılarak cidarda kayma şekil değiştirme hızı bulunur.

$$\dot{\gamma}_a = \frac{4\dot{V}}{\pi R^3} \quad (4.1)$$

$\dot{\gamma}_a$ görünür şekil değiştirme hızı (apparent or Newtonian shear rate) olarak adlandırılır. Diğer yandan duvarda kayma gerilmesi (τ_w) Denklem 4.2 yardımı ile hesaplanır.

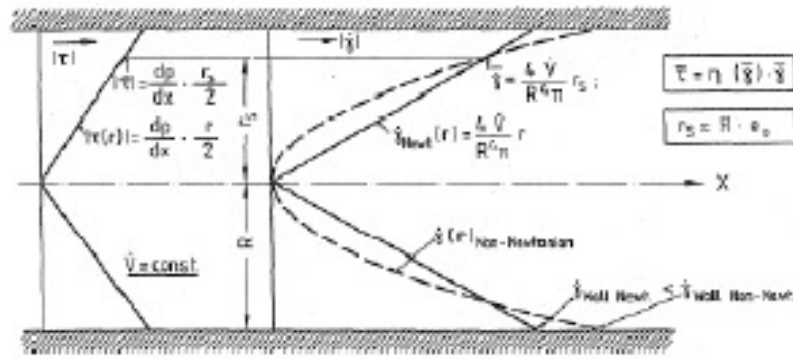
$$\tau_w = \frac{\Delta P_c \cdot R}{2L} = \frac{\Delta P_c \cdot D}{4L} \quad (4.2)$$

ΔP_c kapiler boyunca basınç düşüşünü, L kalıp boyunu belirtmektedir. Denklem 4.1 ve 4.2 kullanılarak görünür viskozite hesaplanır.

$$\eta_{ap} = \frac{\tau_w}{\dot{\gamma}_a} = \frac{\pi R^4 \cdot \Delta P}{8\dot{V}L} \quad (4.3)$$

4.1.1. Temsili viskozite

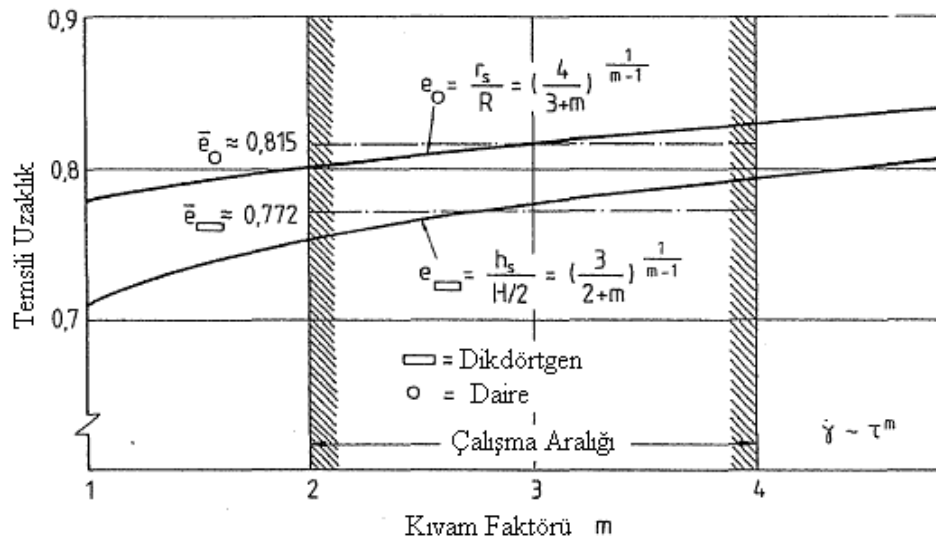
Chmiel ve Schümmer tarafından geliştirilen Newton tipi akışkan için belirlenen viskozite değerinden Newton tipi olmayan akışa geçmek için temsili viskozite kavramı kullanılır. Şekil 4.4' de görüldüğü gibi kalıp cidarlarında Newton tipi akışkanın şekil değiştirme hızı Newton tipi olmayan akışkana göre daha küçüktür. Kesikli çizgiler Newton tipi olmayan, düz çizgi ise Newton tipi akış için şekil değiştirme hızını temsil etmektedir. Görüldüğü üzere akış kanalı içerisinde bunlar bir noktada eşit değerlere sahiptirler. Bu mesafe temsili yarıçap(r_s) olarak tanımlanır.



Şekil 4.4 :Dairesel kapilerde temsili şekil değiştirme hızının belirlenmesi [4]

Dairesel kesitli bir kanalda temsili uzaklık (e_0) Denklem 4.4 ile verilmektedir.

$$e_0 = \frac{r_s}{R} \quad (4.4)$$



Şekil 4.5 : Dikdörtgensel ve dairesel kanallar için temsili uzaklığın değişimi [4]

Böylece görünür şekil değiştirme hızı($\dot{\gamma}_a$) ve temsili uzaklığın(e_0) çarpımı ile gerçek şekil değiştirme hızı($\dot{\gamma}_w$) değeri bulunup, Denklem 4.6 ile doğru viskozite hesaplanabilir.

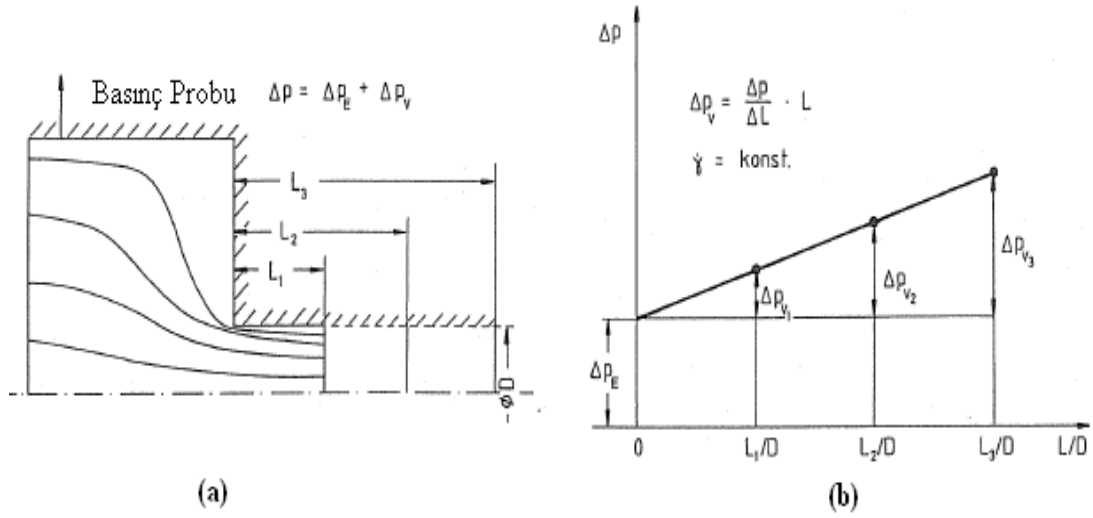
$$\dot{\gamma}_w = e_0 \cdot \dot{\gamma}_a \quad (4.5)$$

$$\eta_T = \frac{\tau_w}{\dot{\gamma}_w} \quad (4.6)$$

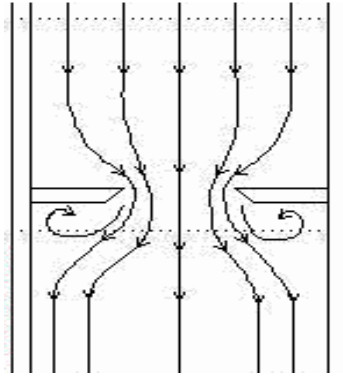
4.1.2. Bagley düzeltmesi (Bagley correction) ve orifis kalıp

Ölçüm yapılan kapiler reometrede kalıp çapı 1mm ve dairesel olduğundan basınç probu kapiler içine yerleştirilememektedir. Basınç probu hazne içinde olduğunda kesit daralması sonucu meydana gelen giriş basınç kayıpları dikkate alınmalıdır. Giriş basınç kaybı sadece kesit değişimine bağlı, kalıp boyundan bağımsızdır. Farklı kayma şekil değiştirme hızlarında ve farklı L/D oranlarında basınç ölçümleri yapılarak Şekil 4.6(b)' de görülen eğri oluşturulur. L/D oranının sıfıra eşit olduğu noktadaki basınç düşümü giriş basınç kaybını vermektedir.

Bagley düzeltmesinin bir alternatifi ise kalıp boyunun neredeyse sıfır olduğu orifis plaka kullanmaktır(Şekil 4.7). Böylece Şekil 4.6' dakine benzer grafik oluşturulmadan doğrudan sıfır kalıp boyundaki basınç kaybı bulunmuş olur. Orifis kalıp kullanmanın duvarda kaymanın olduğu durumlarda büyük avantajı bulunmaktadır. Çünkü kapiler boyunca akış yoktur. Ayrıca Bagley düzeltmesi yönteminden daha hızlıdır.



Şekil 4.6 :Bagley düzeltmesi prensibi [4]

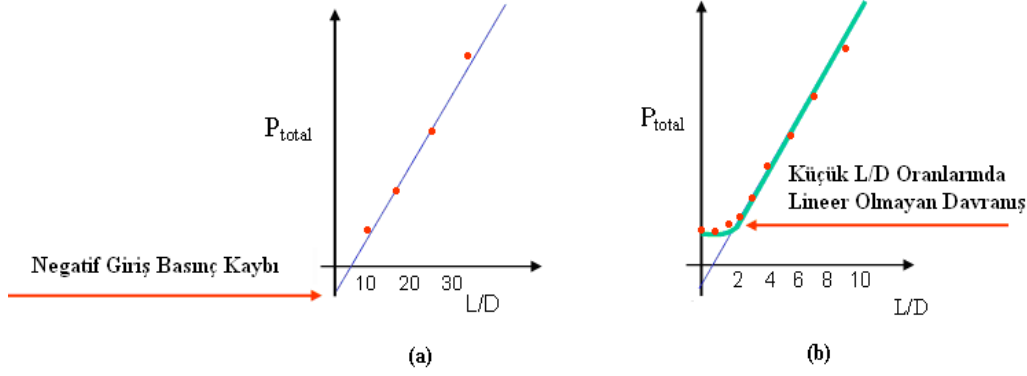


Şekil 4.7 :Orifis kalıp [20]

Hesaplanan giriş basınç kaybı (ΔP_e) okunan toplam basınç kaybından çıkartılarak kapiler boyunca basınç düşümü (ΔP_c) hesaplanarak Denklem 4.2' de yerine koyulur.

$$\Delta P_c = \Delta P_m + \Delta P_e \quad (4.7)$$

Bazı durumlarda giriş basınç kayıpları negatif çıkmaktadır(Şekil 4.8a). Bu durum fiziksel olarak mümkün değildir. Cidarda kaymadan dolayı veya akışkanın viskoelastik özelliklerinden dolayı düşük şekil değiştirme hızlarında Şekil 4.8(b)' de görüldüğü gibi lineer olmayan davranış görülebilmektedir[4].



Şekil 4.8 :Bagley düzeltmesinde problem [4]

4.2. Deney Sonuçları

Tez kapsamında katkısız PE, katkısız PP, PP+%5 kalsit, PP+%10 kalsit, PP+%20 kalsit ve PP+%40 kalsit eriyiklerinin kayma viskoziteleri ölçülmüştür. Her numune tipi için 3 farklı sıcaklıkta testler gerçekleştirilmiştir. Katkısız PP ve PP+%20 kalsit numuneneleri için 210,230 ve 260 $^{\circ}\text{C}$ 'de; PP+%5 kalsit, PP+%10 kalsit ve PP+%40 kalsit numuneleri için 230 $^{\circ}\text{C}$ 'de, PE numunesi için 190, 210 ve 240 $^{\circ}\text{C}$ 'de ölçüm yapılmıştır. Örnek olarak PE 210 $^{\circ}\text{C}$ için yapılan ölçüm Çizelge 4.3' de görülmektedir.

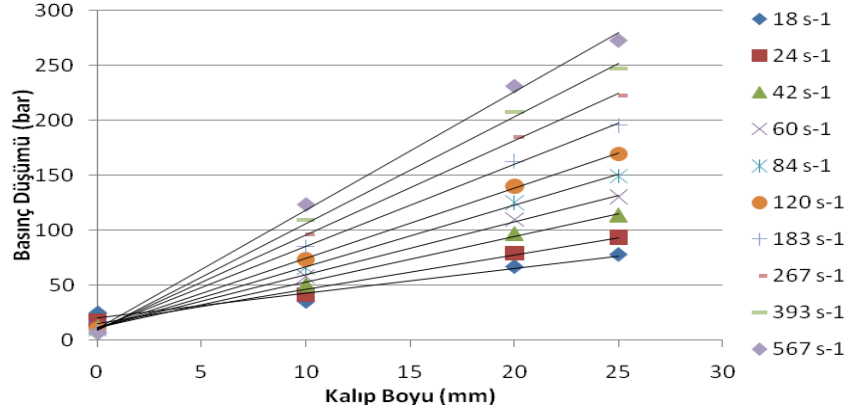
Çizelge 4.3: PE 210 $^{\circ}\text{C}$ basınç kayıpları

Görünür şekil değiştirme hızı (s^{-1})	Basınç kaybı $L=25\text{mm}$ (bar)	Basınç kaybı $L=20\text{mm}$ (bar)	Basınç kaybı $L=10\text{mm}$ (bar)
18	78,10	66,92	34,91
24	93,55	78,77	41,07
42	114,10	97,20	50,74
60	130,12	109,69	57,82
84	149,11	125,08	65,83
120	169,11	140,06	73,46
183	195,34	162,50	85,10
267	222,07	184,58	96,22
393	247,05	207,14	109,11
567	272,95	231,32	123,46

4.2.1.Giriş basınç kayıpları

Deney ölçümleri değerlendirilirken kısım 4.1.2' de bahsedildiği gibi giriş basınç kayıpları bulunmalı ve okunan basınç düşüm değerlerinden çıkarılmadır. Örnek olarak Şekil 4.9' da PE 210 $^{\circ}\text{C}$ için giriş basınç kaybı grafiği verilmiştir. Her bir şekil

değiştirme hızı değeri için Bagley doğrulaması yapıldığında uydurulan doğrusal eğri ile giriş basınç kayıpları hesaplanır. Eğrinin y eksenini kestiği noktadaki değerler giriş basınç kayıplarını vermektedir.



Şekil 4.9 :PE 210 °C için giriş basınç kayıpları

Örnek olarak Çizelge 4.4’ de PP için çeşitli sıcaklıklarda giriş basınç kayıpları sunulmuştur. Çizelge 4.5’ deki PP+%20 kalsit numunesindeki giriş basınç kayıplarına bakıldığında -10 bar mertebelerinde olduğu görülmektedir. Bu durum fiziksel olarak mümkün değildir. Bu da bize polimer malzemenin cidarda kayması olasılığını akla getirmektedir. Bu probleme yol açabilecek diğer bir gerekçe polimer eriyiklerin viskoelastik özelliklerinden dolayı, kısa kalıp boylarıyla çalışmada Bagley düzeltmesi kullanımının hatalara neden olması gösterilebilir. Diğer numuneler için giriş basınç kayıpları EK-B’ de verilmiştir.

Çizelge 4.4: PP için çeşitli sıcaklıklarda giriş basınç kayıpları

210 C		230 C		260 C	
Görünür şekil değiştirme hızı [s ⁻¹]	Giriş basınç kaybı [bar]	Görünür şekil değiştirme hızı [s ⁻¹]	Giriş basınç kaybı [bar]	Görünür şekil değiştirme hızı [s ⁻¹]	Giriş basınç kaybı [bar]
18	-1,9504	18	0,7554	18	2,0581
24	0,2656	24	1,6535	24	2,4153
33	-0,0223	33	0,8985	33	2,0853
42	1,9663	42	0,8846	42	1,5329
51	0,0655	60	1,3579	60	1,324
60	0,8797	75	0,0957	75	2,6183
66	-0,9154	84	1,2236	102	2,4754
75	-0,3579	93	0,955	132	3,9374
84	0,1745	102	1,1691		
		114	1,6073		

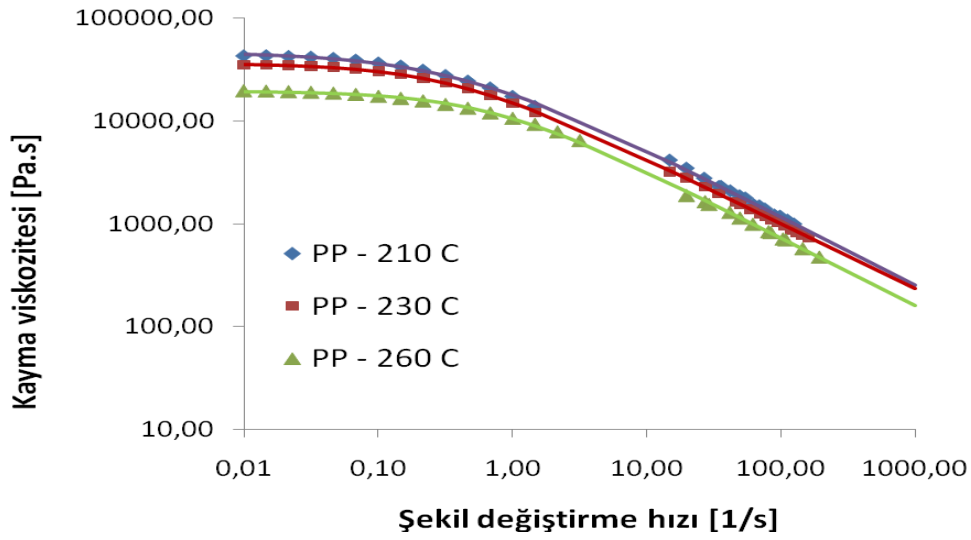
Çizelge 4.5: PP+%20 kalsit için çeşitli sıcaklıklarda giriş basınç kayıpları

210 C		230 C		260 C	
Görünür şekil değiştirme hızı [s^{-1}]	Giriş basınç kaybı [bar]	Görünür şekil değiştirme hızı [s^{-1}]	Giriş basınç kaybı [bar]	Görünür şekil değiştirme hızı [s^{-1}]	Giriş basınç kaybı [bar]
18	-2,45357	18	-10,8326	18	-1,49917
24	-2,15952	24	-11,615	24	-2,02595
33	-1,21	33	-10,466	33	-2,29929
51	-0,47119	51	-9,81143	51	-2,28
60	-1,58143	60	-9,92786	66	-1,47488
75	-1,9619	75	-9,87071	93	-1,38405
102	-1,0469	102	-8,65881	120	1,73964
132	-2,18048	132	-6,72857	168	5,2369
150	-1,72929	150	-5,92714		
168	-0,583333	168	-4,02571		

Giriş basınç kayıpları toplam basınç düşümünden çıkarıldıktan sonra kısım 4.1' de anlatıldığı üzere viskoziteler hesaplanabilir.

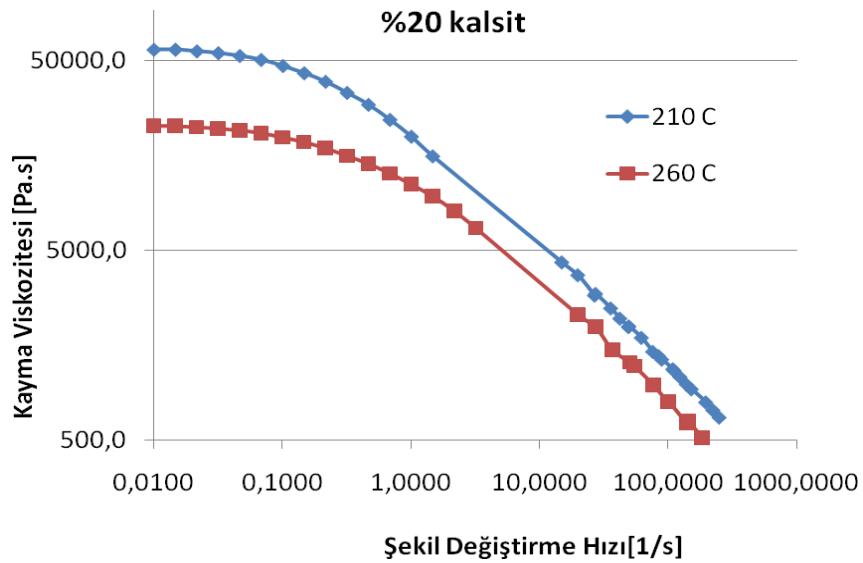
4.2.2. Viskozite grafikleri ve değerlendirmeler

Şekil 4.10' da katkısız PP için çeşitli sıcaklıklarda viskozite – şekil değiştirme hızı eğrileri verilmiştir. Düşük hızlardaki değerler rotasyonel reometre ile Kısasöz [8] tarafından ölçülmüştür. Yüksek şekil değiştirme hızlarında kapiler reometre ile yapılan ölçümlerin rotasyonel reometre ile yapılan ölçümlerle uyumlu olduğu görülmektedir. Beklendiği gibi viskozite sıcaklık artışı ile azalmaktadır.



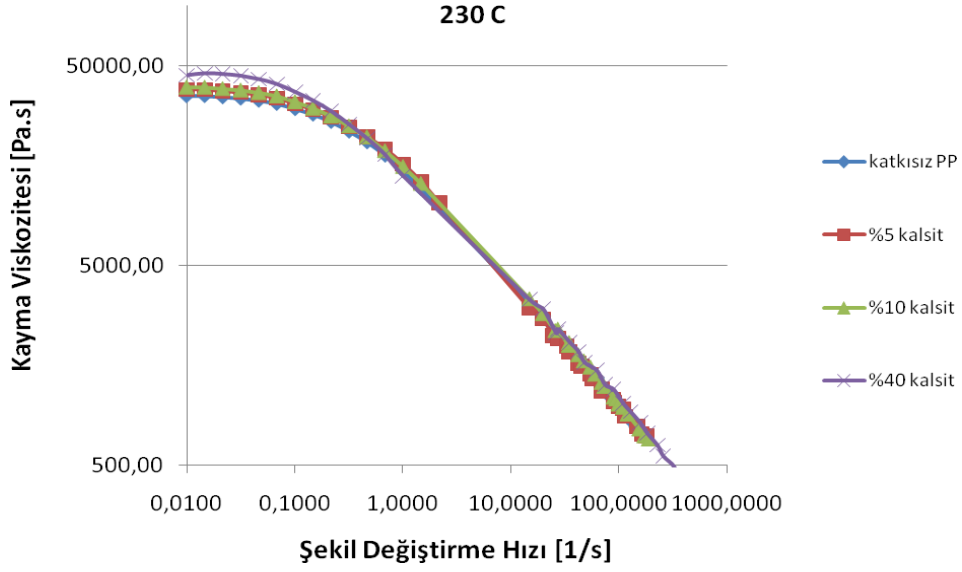
Şekil 4.10 : Katkısız PP için sıcaklığa bağlı viskozite grafiği

Şekil 4.11’de PP+%20 kalsit katkılı malzeme için viskozite eğrileri görülmektedir. Yine ölçümlerde beklenildiği gibi sıcaklıkla viskozitede düşme gözlemlenmiştir ve sonuçlar rotasyonel reometre (Kısasöz [8]) değerleri ile uyumludur. 230 ⁰C için giriş basınç kayıpları negatif ve değeri çok yüksek çıktığından grafiğe eklenmemiştir.



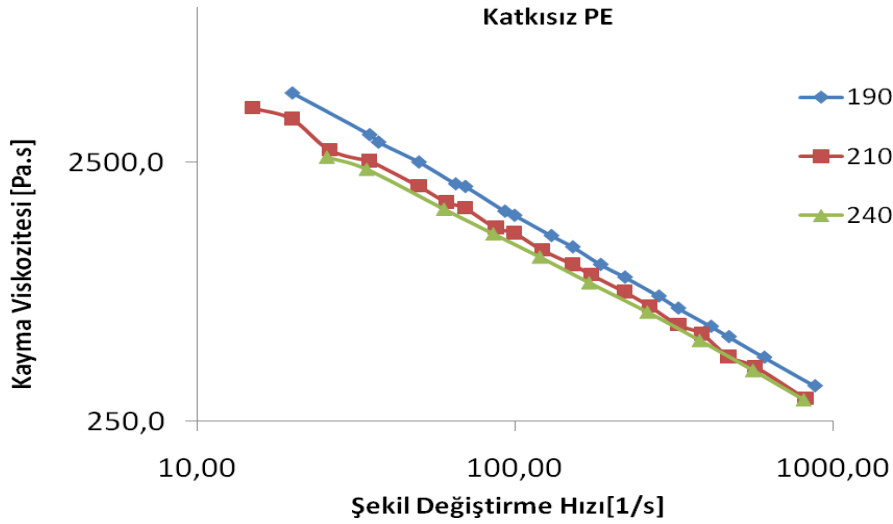
Şekil 4.11 : PP+%20 kalsit kompozit eriyiği için çeşitli sıcaklıkla viskozite değişimi

Şekil 4.12 ’de 230 ⁰C’ de çeşitli kalsit katkı yüzdelerinde viskozite eğrileri görülmektedir. Ölçümler sonucu kalsit katkı yüzdesinin viskozite üzerinde kayda değer bir etkisi gözlemlenmemiştir. Düşük hızlardaki değerler rotasyonel reometre ile Kısasöz[8] ‘nin ölçümlerinden alınmıştır.



Şekil 4.12 : 230 °C 'de PP-kalsit kompozit eriyiklerinin konsantrasyona bağlı viskozite-şekil değiştirme eğrileri

Şekil 4.13'de katkısız PE için çeşitli sıcaklıklarda kapiler reometre verileri ile çizilmiş viskozite eğrileri görülmektedir. Beklenildiği gibi sıcaklık artışı ile viskozitede azalma gözlenmektedir.



Şekil 4.13 : PE için çeşitli sıcaklıklarda viskozite değişimi

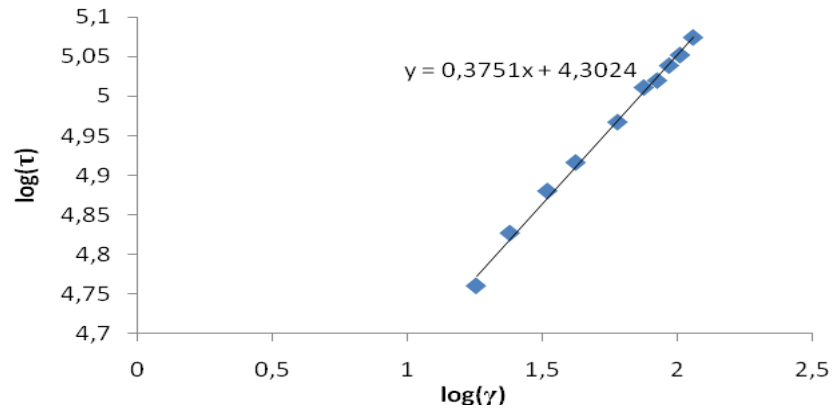
4.2.3.Kuvvet yasası parametrelerinin belirlenmesi

Kuvvet yasasında m kıvam faktörünü $[\text{Pa.s}^n]$, an ise akışkanın Newton tipi davranıştan sapma derecesini gösterir. Denklem 2.4' ün her iki tarafının da logaritmasını alırsak;

$$\log \tau = \log(m \dot{\gamma}^n) \quad (4.8)$$

Denklem aşağıdaki şekilde tekrar düzenlenirse;

$$\underbrace{\log \tau}_y = \underbrace{\log m}_b + \underbrace{n}_a \underbrace{\log \dot{\gamma}}_x, \quad y = ax + b \quad (4.9)$$



Şekil 4.14 :Katkısız PP-230 ^0C için $\log \dot{\gamma} - \log \tau$ değişimi

$$a = n = 0,3751 \quad (4.10)$$

$$b = \log m = 4,3024 \Rightarrow m = 20063 \quad (4.11)$$

$$\tau = 20063 \dot{\gamma}^{0,3751} \quad (4.12)$$

Çizelge 4.6:Kuvvet Yasası Parametreleri

Malzeme	Sıcaklık $^{\circ}\text{C}$	Kıvam Faktörü(m)	Kuvvet Yasası İndeksi (n)
Katkısız PP	210	25692	0,331
	230	18418	0,375
	260	12352	0,44
PP+%20 Kalsit	210	26823	0,335
	230	31995	0,281
	260	18554	0,317
PP+%5 Kalsit	230	15795	0,401
PP+%10 Kalsit	230	19828	0,361
PP+%40 Kalsit	230	21289	0,347
Katkısız PE	190	36717	0,313
	210	24858	0,356
	240	21903	0,369

Çizelge 4.7 ‘de sayısal simülasyonlarda kullanılan Bird-Carreau modeli sabitleri verilmiştir.

Çizelge 4.7: Bird-Carreau modeli sabitleri

	210 $^{\circ}\text{C}$	230 $^{\circ}\text{C}$	260 $^{\circ}\text{C}$
η_0 (Pa)	42655	33916	18587
λ (s)	2,13	2,71	2,08
N	0,328	0,37	0,39

5.SAYISAL SİMÜLASYONLAR

Bu çalışma kapsamında polimer malzemenin akış davranışları üzerine deneyler yapılmış ve Fluent 6.3.26 yazılımı kullanılarak deneyler için sayısal simülasyonlar gerçekleştirilmiştir. Nümerik çözüm için yaratılan ağ yapısı Şekil 5.1’de görülmektedir. Çıkış kesit yüzeyinde efektif basınç 0 bardır.Cidarlarda kaymama sınır şartı kabulü yapılmıştır ve kalıp girişinde eriyik debisi Denklem 3.1 ile hesaplanmıştır. Çözüm alanı toplam 498814 adet hücreden oluşmaktadır. Radyal spiral kalıp içerisindeki sıkıştırılamaz ve laminerdir. Polimer eriyiğin yüksek viskozitesinden dolayı atalet ve yerçekimi kuvvetleri ihmal edilmiştir. Simülasyonlar katkısız PP için viskozite modeli olarak Bird- Carreau (Denklem 2.6) kullanılarak gerçekleştirilmiştir.

Kalıp içerisindeki akış alanının tümüyle tanımlanabilmesi için hız vektörünün, yoğunluğun, basıncın ve viskozitenin her noktada her an bilinmesi gerekmektedir. Malzemenin reolojik özelliğini belirten; şekil değiştirme hızı ile viskozite arasındaki ilişkiyi belirten bağıntı olarak Bird- Carreau kullanılmıştır. Sadece akış alanının incelendiği, sıcaklık dağılımının incelenmediği durumlarda kütle ve momentum korunum denklemlerinin eş zamanlı çözümü gerekmektedir.

İzotermal polimer eriyiklerin akış hacmini tanımlayabilmek için;

- Kütle korunumu
- Momentum korunumu
- Malzeme reolojik denkleminin

bilinmesi gerekmektedir. Enerji korunumu ısı geçişinin olduğu durumlarda dahil edilir.

Aşağıda en genel hali ile süreklilik denklemi (Denklem 5.1) verilmektedir. Polimer eriyik akışkanlarda akışkanın sıkıştırılamaz ve zamandan bağımsız olduğu kabulü ile kütle korunumu Denklem 5.2 ile gösterilebilir.

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho V_x)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho V_y)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho V_z)}{\partial z} = 0 \quad (5.1)$$

$$\frac{\partial V_x}{\partial x} + \frac{\partial V_y}{\partial y} + \frac{\partial V_z}{\partial z} = \nabla \cdot \vec{V} = 0 \quad (5.2)$$

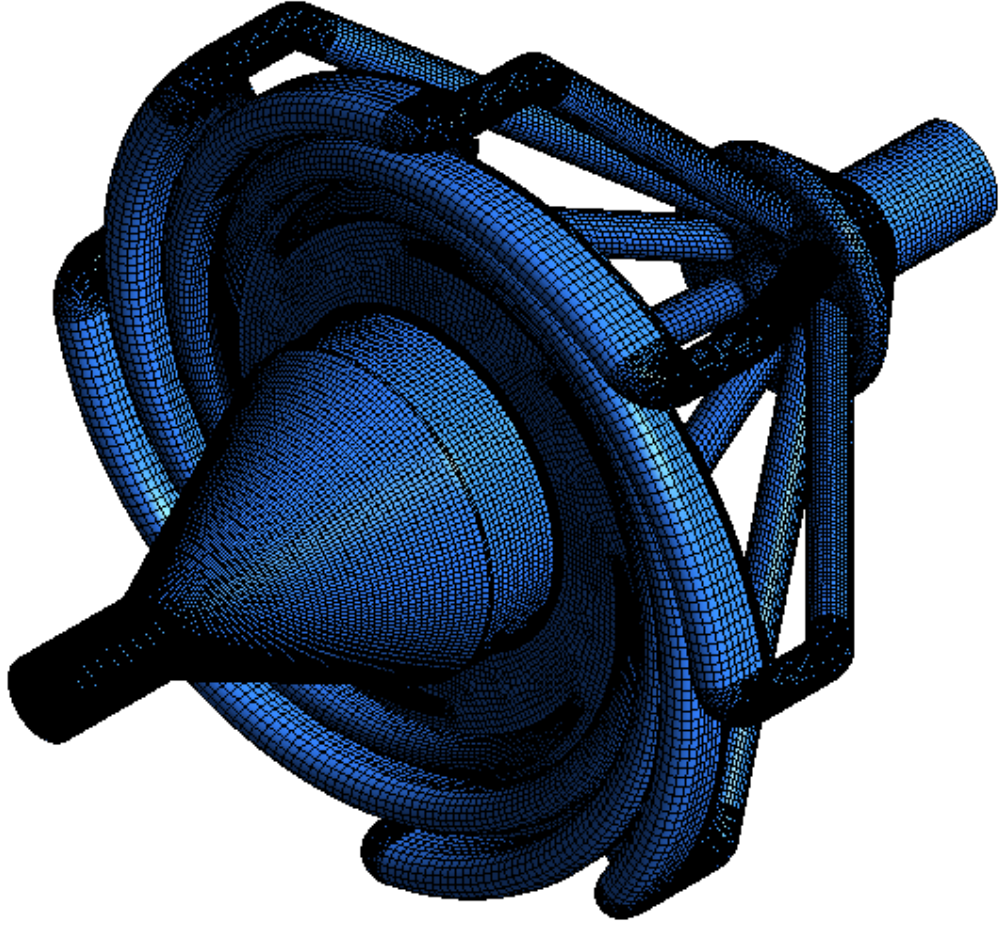
Akış içerisindeki birim kütlenin momentum değişimi; basınç değişiminden, sürtünme kayıplarına neden olan viskoz kuvvetlerden ve yerçekimi kuvvetinden kaynaklanmaktadır. Aşağıda genel hali ile momentum korunum denklemi verilmektedir.

$$\rho \frac{D\vec{V}}{Dt} = -\nabla p - \nabla \tau_{ij} + \rho \vec{g} \quad (5.3)$$

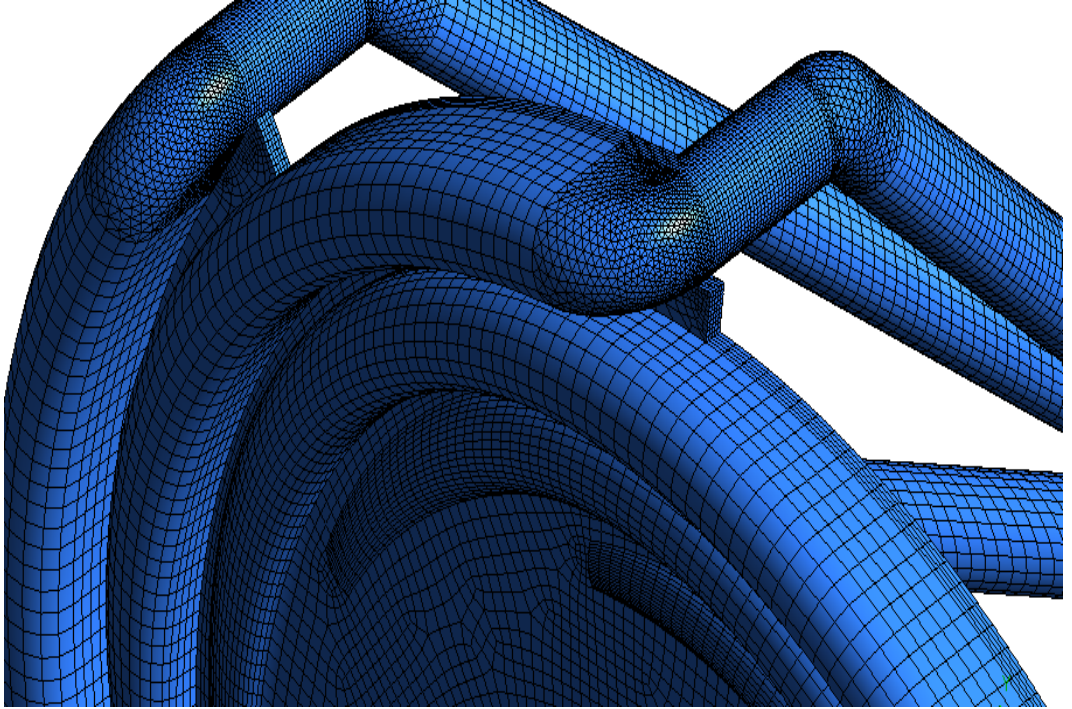
Denklem 5.3' de eşitliğin sol tarafı birim hacim için atalet kuvvetini, sağ tarafındaki terimler sırasıyla basınç kuvveti, viskoz (sürtünme) kuvvetleri ve birim hacim başına yerçekimi kuvvetini göstermektedir. Aşağıda momentum korunumunun kartezyen koordinatlarda x bileşini verilmektedir.

$$\rho \frac{DV_x}{Dt} = -\frac{\partial p}{\partial x} - \left(\frac{\partial \tau_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yx}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zx}}{\partial z} \right) + \rho g_x \quad (5.4)$$

Polimer eriyik akışlarında hız düşük olduğundan Reynolds sayısı düşüktür. Bu nedenle Denklem 5.4' ün sol tarafındaki atalet kuvvetleri ihmal edilebilir. Polimer eriyik akışlarında ana etken basınç ve viskoz kuvvetler olduğundan, bunların yanında çok küçük kalan yerçekimi kuvveti de ihmal edilebilecek mertebelerdedir.



Şekil 5.1 :Çözüm ağı yapısı



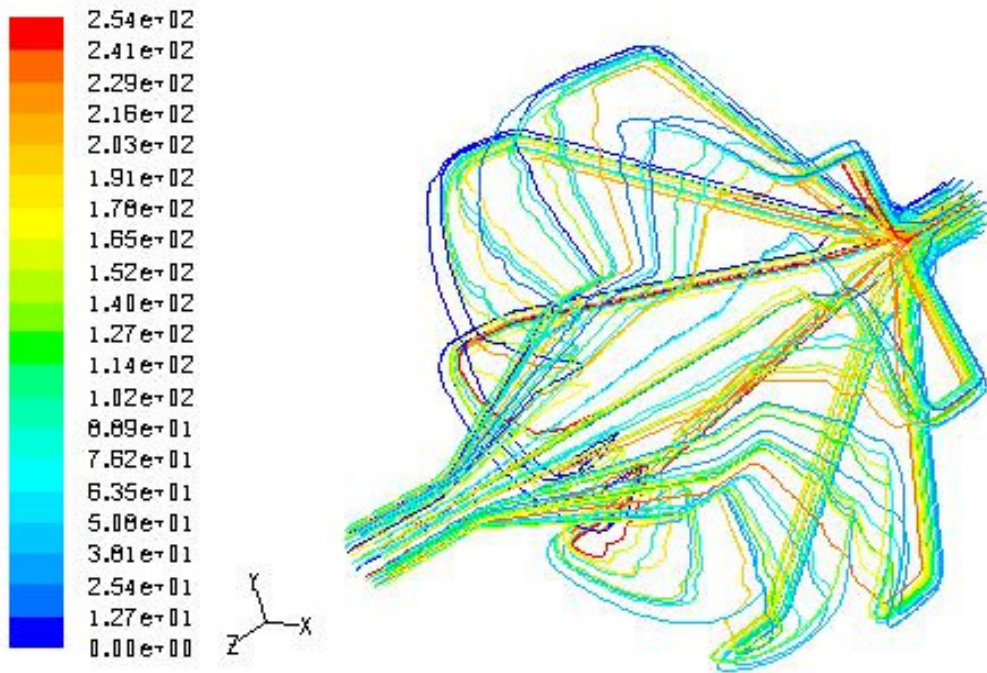
Şekil 5.2 : Çözüm ağı yapısı (yakın görünüm)

Kalıp içi akış parametrelerinin incelenmesi amacı ile 210 °C, 230 °C, 260 °C' de ve 10, 20, 30, 40, 50 m/dk ürün üretim hızlarında simülasyonlar yapılmıştır. Çizelge 5.1 'de çeşitli ürün hızlarında hacimcel debi miktarları verilmiştir.

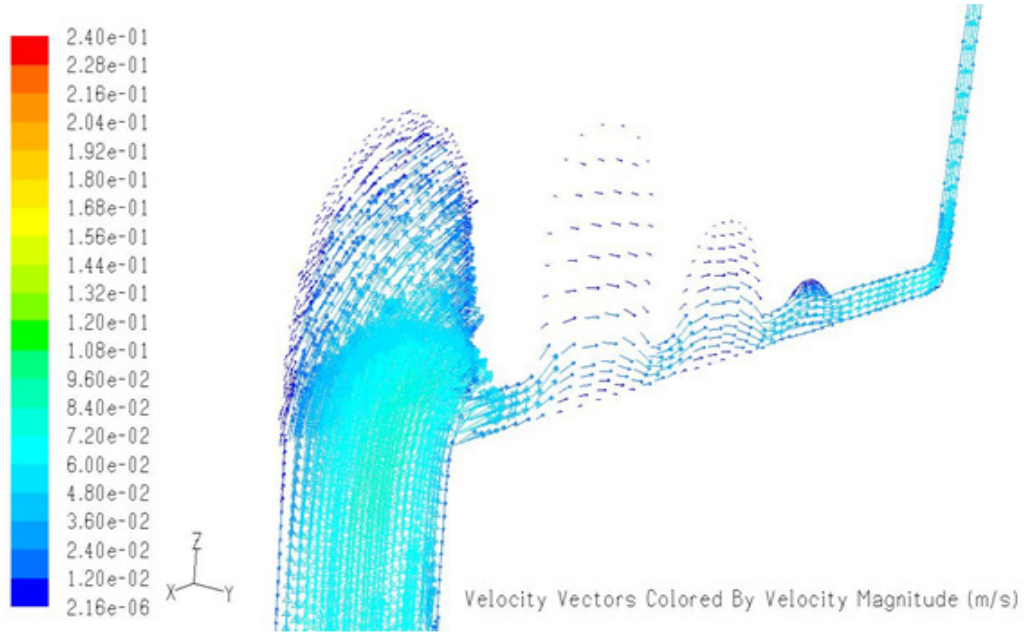
Çizelge 5.1: Çeşitli ürün üretim hızlarında kütleli debiler

Ürün üretim hızı (m/dk)	Kütleli debi (kg/dk)
10	2,92
20	5,84
30	8,76
40	11,69
50	14,61

Aşağıda 230 °C ve 260 °C sıcaklıklarda ve 20 m/dk ürün üretim hızlarında elde edilen sonuçlar irdelenmektedir. Şekil 5.3' de kalıp içerisinde akım çizgileri görülmektedir. Spiral kanal içerisindeki hız vektörleri de Şekil 5.4' te verilmiştir. Hız vektörlerinde de görüldüğü gibi akışkan spiral kanaldan akarken bir yandan da iç-dış hadde arasındaki boşluğa sızıntı akışı olmaktadır. Bu durumda spiral kanal içerisindeki akış ve sızıntı akışı temas halindedir, dolayısıyla analitik yöntemde yapılan kabulün aksine birbirini etkilemektedir.

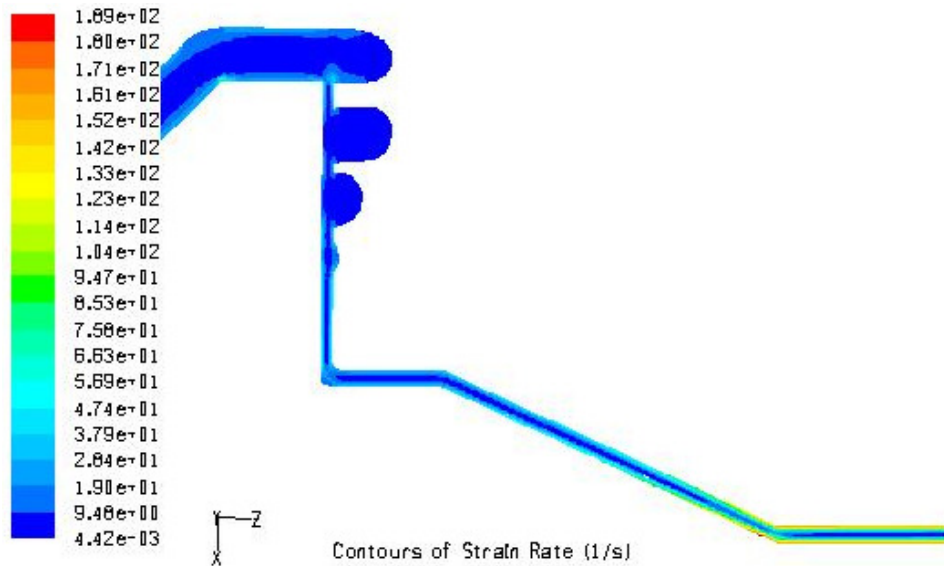


Şekil 5.3 :230 °C ve 20 m/dk ürün üretim hızında akım çizgileri

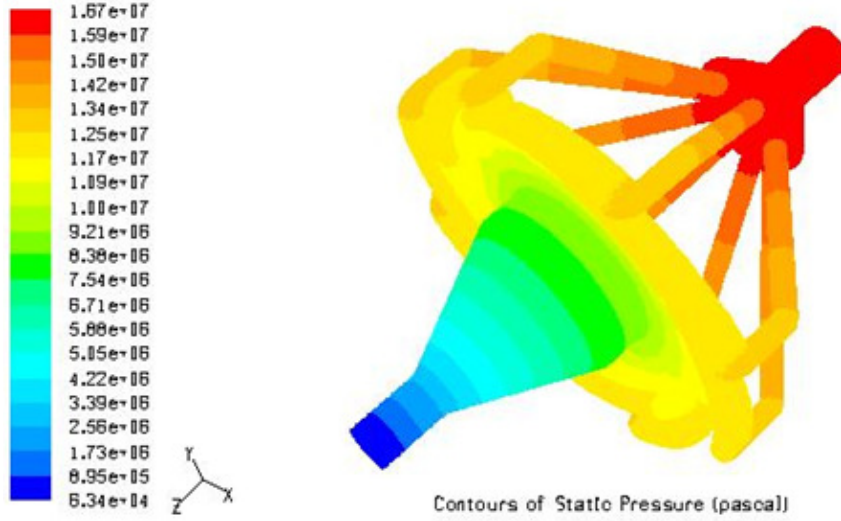


Şekil 5.4 : 230 °C ve 20 m/dk ürün üretim hızında hız vektörleri

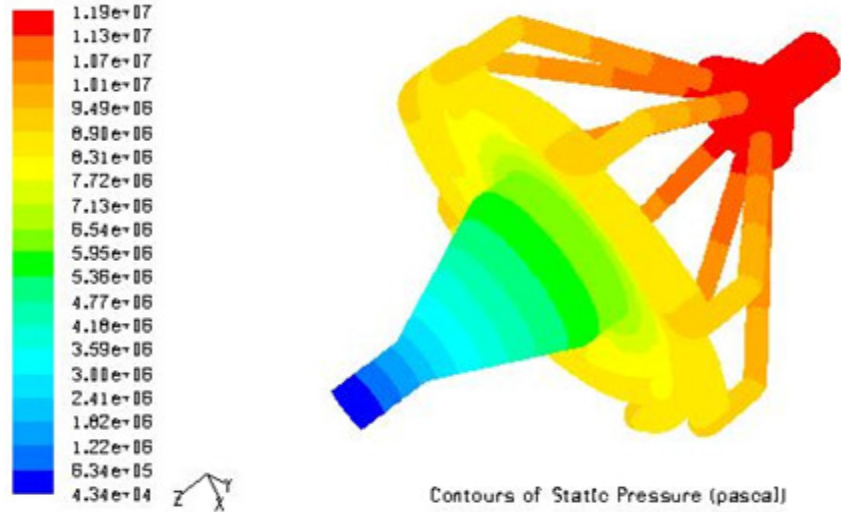
Şekil 5.5'te kayma şekil değiştirme hızları görülmektedir. Şekil değiştirme hızında sınır değer 3 s^{-1} 'dir. Daha düşük hızlarda malzeme kalıp içerisinde çok fazla bekleyecek ve bozulmaya uğrayacaktır. 230 °C ve 20 m/dk üretim hızında minimum şekil değiştirme hızı 4.60877 s^{-1} , 260 °C ve 20 m/dk üretim hızında minimum şekil değiştirme hızı 4.72216 s^{-1} 'dir. Her iki durumda da tasarım kriterlerine uygundur. Şekil 5.6 ve 5.7' de basınç dağılımı görülmektedir. Kalıp boyunca basınç düşümü ekstrüderin sağlayabildiği maksimum basıncı geçmemelidir. 20 m/dk üretim hızında 230 °C ve 260 °C' de toplam basınç düşümü sırası ile 167 bar ve 119 bar mertebelerindedir.



Şekil 5.5 : 230 °C ve 20 m/dk ürün üretim hızında şekil değiştirme hızı

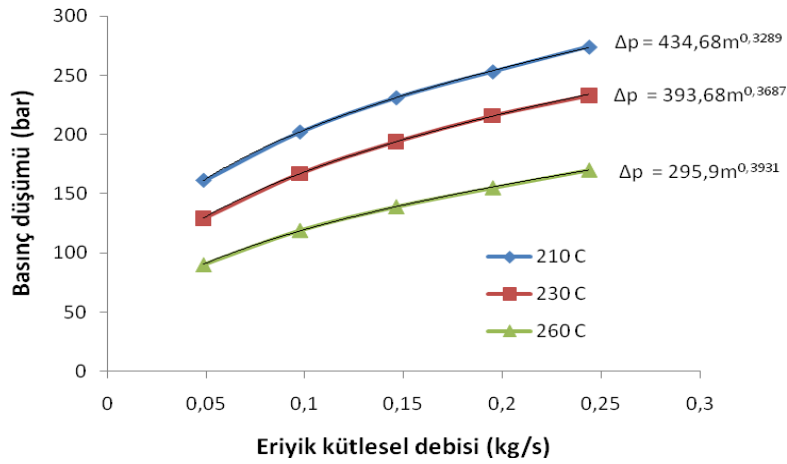


Şekil 5.6 : 230 °C ve 20 m/dk ürün üretim hızında basınç dağılımı



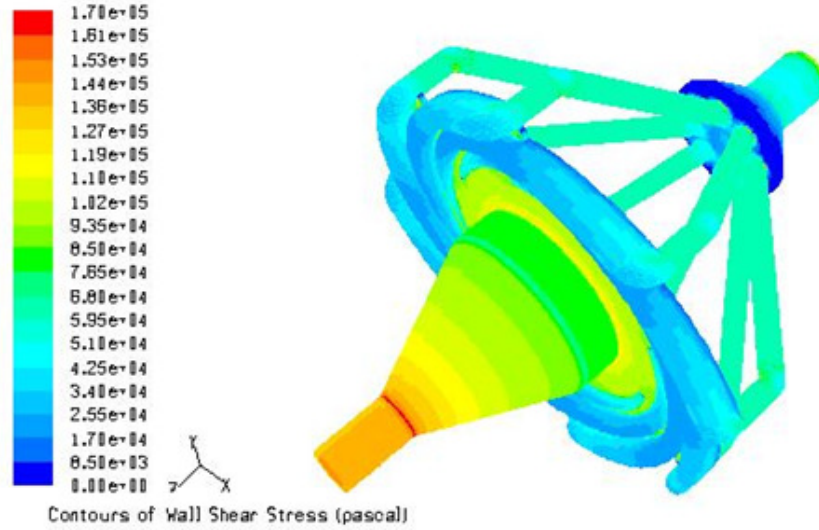
Şekil 5.7: 260 °C ve 20 m/dk ürün üretim hızında basınç dağılımı

Şekil 5.8 'de debi değişimi ile basınç düşümü görülmektedir.

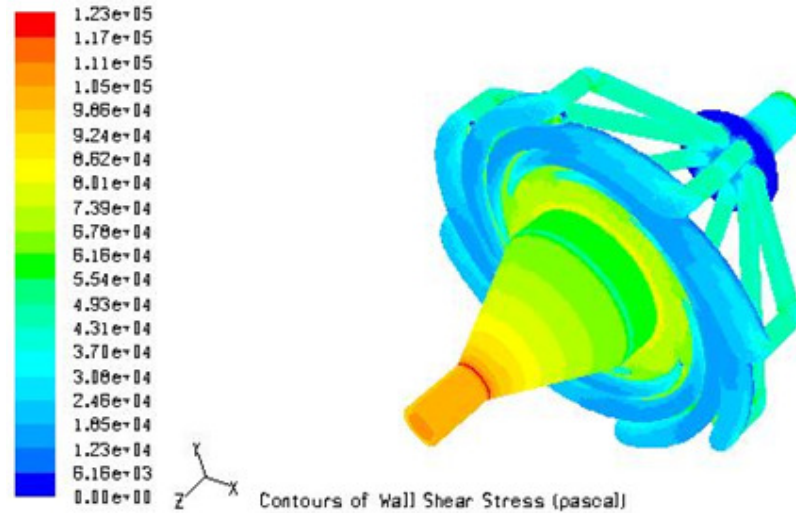


Şekil 5.8: Kütleli debi - basınç düşümü

Polimer kalıp içerisinde akarken kritik değerin üzerinde kayma gerilmesine maruz kalırsa ürün yüzeyinde dalgalanmalar oluşmaktadır. Bu durum yüzey bozulması (melt fracture) olarak adlandırılır. Şekil 5.9 ve 5.10’da yüzeylerdeki kayma gerilmesi görülmektedir. Yapılan deneyler sonucu sınır değer 130000 Pa olarak belirlenmiştir. 20 m/dk üretim hızında 230 °C ve 260 °C’ de maksimum kayma gerilmesi değerleri sırası ile 171000 Pa ve 123000 Pa’ dır. Yüzeyde bozulma olmadan üretim yapılabilmesi için kalıp 260 °C’ ye tutulmalıdır.



Şekil 5.9 : 230 °C ve 20 m/dk ürün üretim hızında yüzeyde kayma gerilmesi



Şekil 5.10 : 260 °C ve 20 m/dk ürün üretim hızında yüzeyde kayma gerilmesi

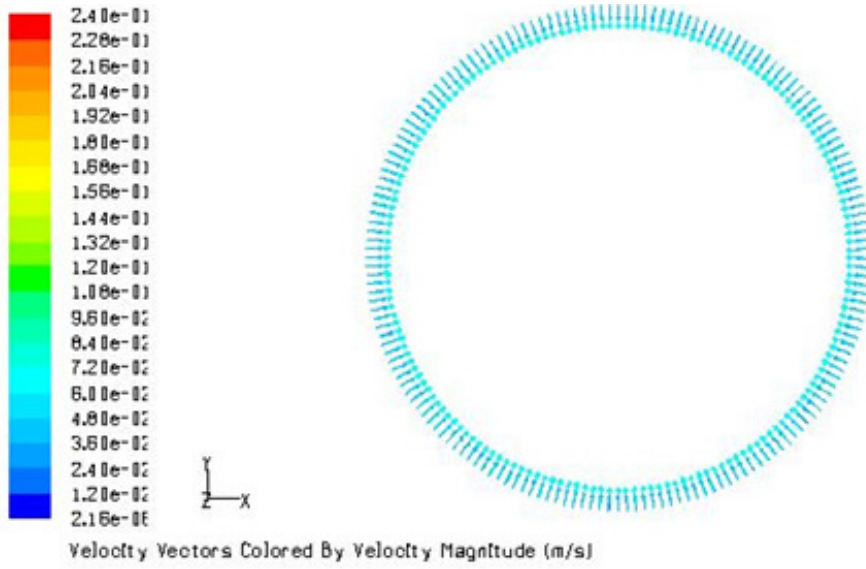
Çizelge 5.2’ de maksimum kayma gerilmeleri görülmektedir. * ile sunulan değerler izin verilen maksimum kayma gerilmesini aşan değerlerdir. Yüzey bozulması olmaması için belirlenen kritik kayma gerilmesinin altında kalarak üretim yapılabilecek proses koşulları 260 °C’ de 10 ve 20 m/dk üretim hızlarındadır.

Çizelge 5.2: Maksimum cidar kayma gerilmeleri (* limit değerin üzerinde)

Ürün Hızı (m/dk)	Maksimum Kayma Gerilmesi (Pa)		
	210 C	230 C	260 C
10	156000*	131000*	93800
20	196000*	170000*	123000
30	224000*	198000*	145000*
40	247000*	221000*	162000*
50	267000*	238000*	177000*

Bir diğer önemli parametre ise spiral çıkışında hız dağılımının homojen olmasıdır.

Şekil 5.11' de hız dağılımının dairesel olarak homojen olduğu görülmektedir.



Şekil 5.11: 230 °C ve 20 m/dk üretim hızında spiral çıkışı hız dağılımı

6.SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu tez çalışmasında tek katmanlı boru üretimi amacıyla kullanılabilecek yıldız dağıtıcı ile beslenen kalıp içerisindeki akış, kalıp çıkış kesitinde akışın dengelenmesi amacıyla sayısal simülasyonlarla incelenmiştir. Simülasyonlarda yapılan deneyler sonucu elde edilen Bird-Carreau Viskozite Modeli sabitleri (Çizelge 4.7) kullanılmıştır, polimerlerin viskoelastik özellikleri ihmal edilmiştir.

Radyal kalıbın spiral kanallı kısmı, elektrik-şebekesi benzeşimi metodu kullanılarak kalıp çıkış kesitinde olabildiğince üniform hız dağılımı sağlanması açısından geometrik parametreleri optimize edilmiştir. Yapılan sayısal simülasyonlar ile kalıp çıkış kesitinde homojen hız dağılımı elde edilmesi açısından gerçekleştirilen kalıp tasarım geometrisinin oldukça uygun olduğu anlaşılmıştır. Elektrik benzeşim metodu ile 210 °C 'de katkısız PP için toplam basınç kaybı 195 bar hesaplanmışken aynı koşullarda simülasyon sonucuna göre 196 bar çıkmıştır. Sapmanın çok az olduğu görülmektedir. Analitik yöntemden elde edilen basınç değerleri SAD analizinin sonuçlarından elde edilenlere göre çok az yüksek olmasının nedeni de analitik yöntemde spiral akışı ile sızıntı akışı arayüzeyinin birbirini etkilemediği kabulü olabilir.

20 m/dk üretim hızında 230 °C ve 260 °C' de maksimum kayma gerilmesi değerleri sırası ile 171000 Pa ve 123000 Pa' dır. Yüzeyde bozulma olmadan ve maksimum hız ile üretim yapılabilmesi için kalıp 260 °C ve 20 m/dk üretim hızında çalıştırılmalıdır.

KAYNAKLAR

- [1] **Yılmaz O.**, 2007, Polimer Malzemelerin Ekstrüzyonunun Deneysel ve Sayısal Olarak İncelenmesi, *Yüksek Lisans Tezi*, Fen Bilimleri Enstitüsü, İTÜ, İstanbul.
- [2] **Rauwendaal C.** , 1987, Flow Distribution in Spiral Mandrel Dies, *Polymer Engineering and Science*, 27, 3.
- [3] **Zehev Tadmor, Costas G. Gogos**, 2006, Principles of Polymer Processing, John Wiley and Sons, New York,
- [4] **Walter Michaeli**, 2003, Extrusion Dies for Plastics & Rubber, Hanser Publishers, 3rd edition.
- [5] **Balaban M., Gören G.**, 2010, Plastik Boru Üretimi İçin Spiral Kanallı Ekstrüzyon Kalıbının Sistemik Tasarımı, *Lisans Tezi*, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul
- [6] **Bird R. B., Armstrong R. C., Hassager O.**, 1987, Dynamics of polymeric liquids, Wiley-Interscience publication, New York.
- [7] **Christopher W. MacMinn, Gareth H. McKinley**, 2004, Tubeless Siphon and Die Swell Demonstration, Department of Mechanical Engineering Massachusetts Institute of Technology, Cambridge MA 02139
- [8] **Kıyasöz E.**, 2010, Rheological Properties of Calcite Filled Polypropylene Composites, *Yüksek Lisans Tezi*, Fen Bilimleri Enstitüsü, İTÜ, İstanbul
- [9] **Url-1** <<http://www.polimernedir.com>>, alındığı tarih 27.05.2011
- [10] **Gökgöz I.**, 2008, Design and the Application of a Capillary Rheometer to the Determination of the Flow Characteristics of HDPE, *Yüksek Lisans Tezi*, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul
- [11] **R. P. Chhabra, John Francis Richardson**, 2008, Non-Newtonian flow and applied rheology, Elsevier, UK
- [12] **Polyflow 3.10 User Guide**, 2003. *Fluent Inc.*
- [13] **Mustafa Doğu**, 2008, Spiral Ekstrüzyon Kafaları Geometrik Ve Reolojik Açından Tasarımı, *Dizayn Grup*
- [14] **A. Limper, H. Stieglitz**, Recent Research On Mathematical Design Of Spiral Mandrel Dies, University Of Paderborn, Institute Of Polymer Engineering, Pohlweg 47 - 49, 33098 Paderborn, Germany
- [15] **Peter Fischer**, 1998, New Spiral Mandrel Dies, Johannes Wortberg, *ETA GmbH*
- [16] **John Perdikoulis**, 1997, Analysis and Design of Annular Dies for Mono- and Multi-Layer Polymer Flows, *Doctor of Philosophy Thesis*, University of Waterloo, Waterloo, Ontario, Canada

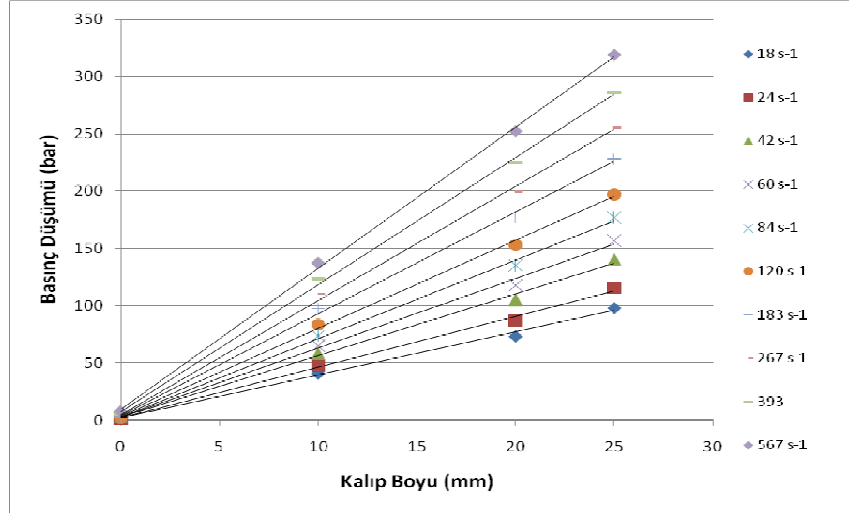
- [17] **Sagar, Planeta**, 2005, Extrusion Die with Supply Groove Transfer , *US6866498*
- [18] **B. Rotter, W. Michaeli**, 2002, Coupled Rheological and Mechanical Design of Stackable Spiral Dies, IKV, Germany, *ANTEC*
- [19] **Walter Michaeli, Peter Blömer**, 2004, Analysis of Flow in a Spiral Mandrel Die, RWTH Aachen University, *ANTEC*
- [20] **Url-2** < <http://www.pc-education.mcmaster.ca>>, alındığı tarih 27.05.2011

EKLER

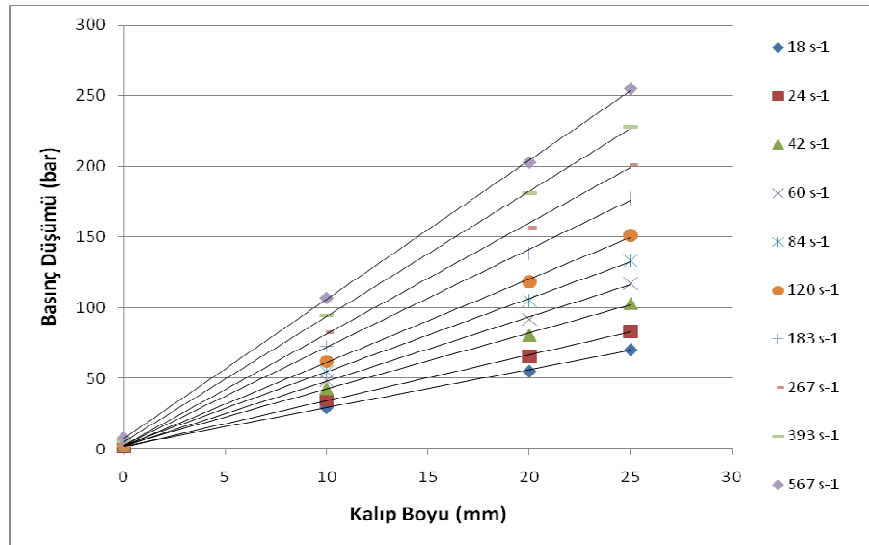
EK A: Bagley Korelasyon Doğruları

EK B: Giriş Basınç Kayıpları

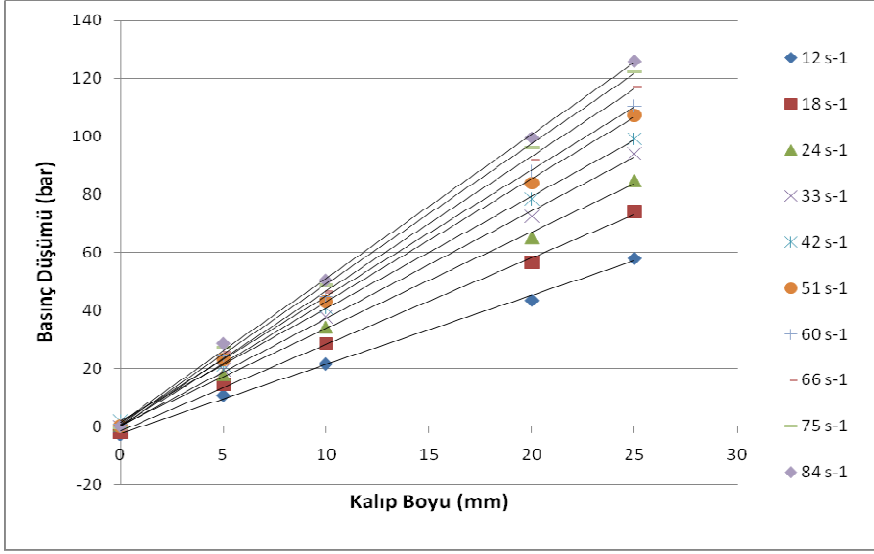
EK A



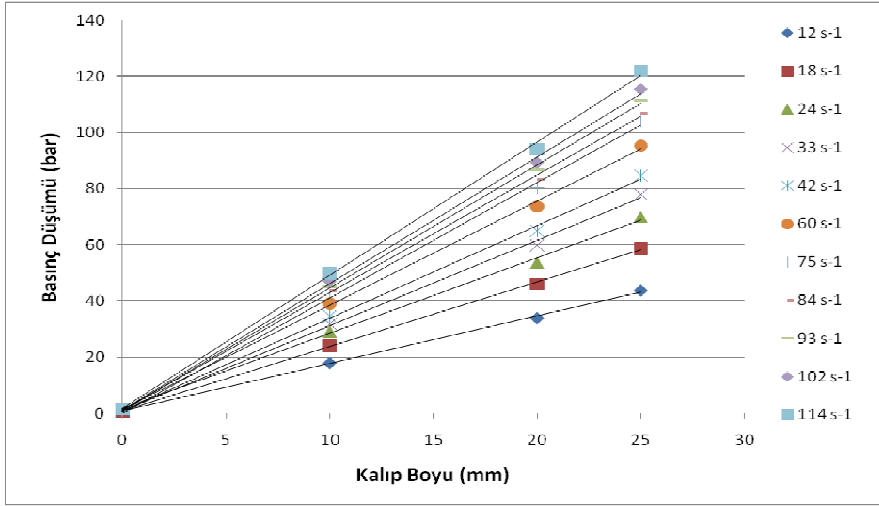
Şekil A.1: PE 190 C 'de Bagley Doğrusu



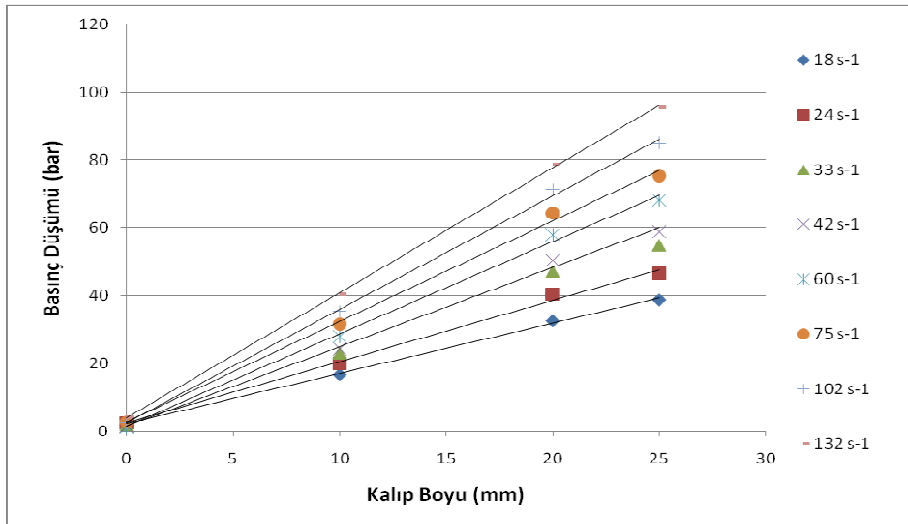
Şekil A.2: PE 240 C 'de Bagley Doğrusu



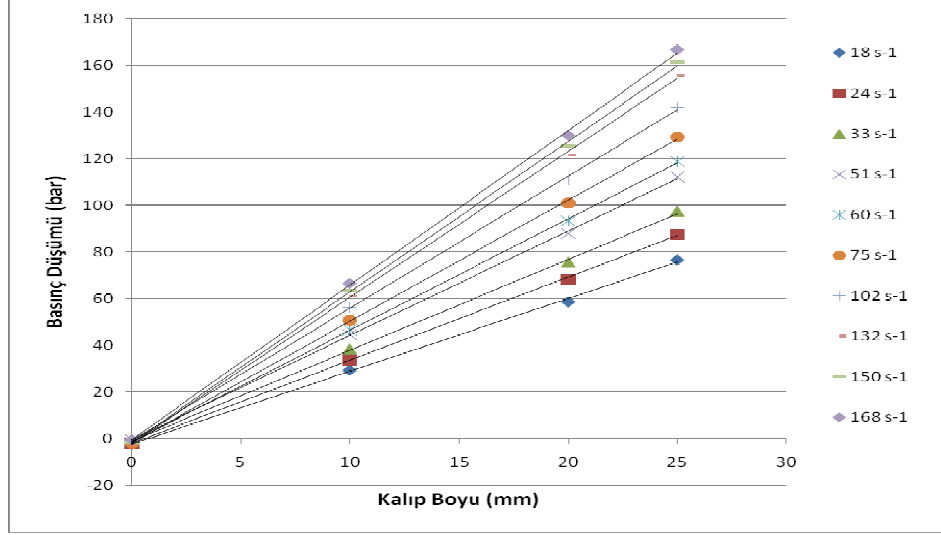
Şekil A.3: PP 210 C 'de Bagley Doğrusu



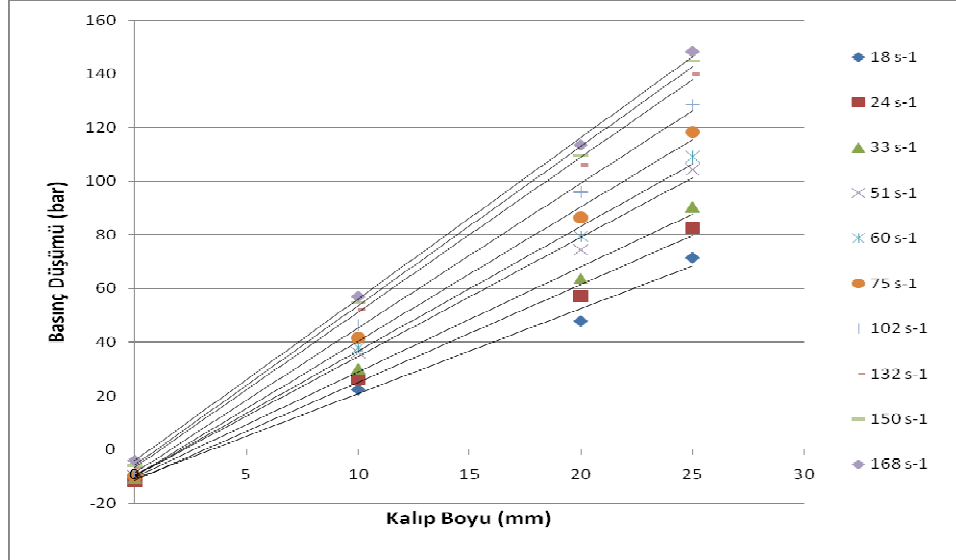
Şekil A.4: PP 230 C 'de Bagley Doğrusu



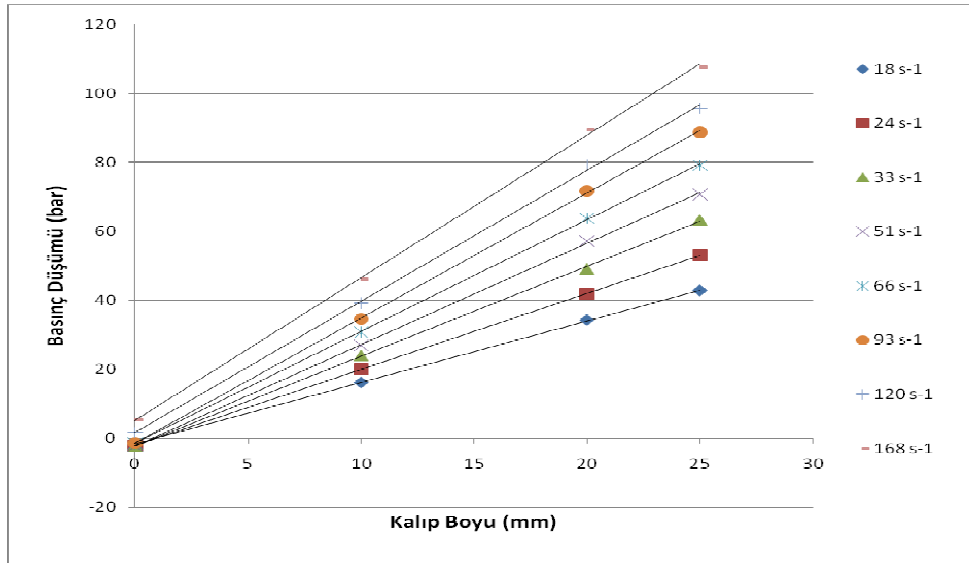
Şekil A.5: PP 260 C 'de Bagley Doğrusu



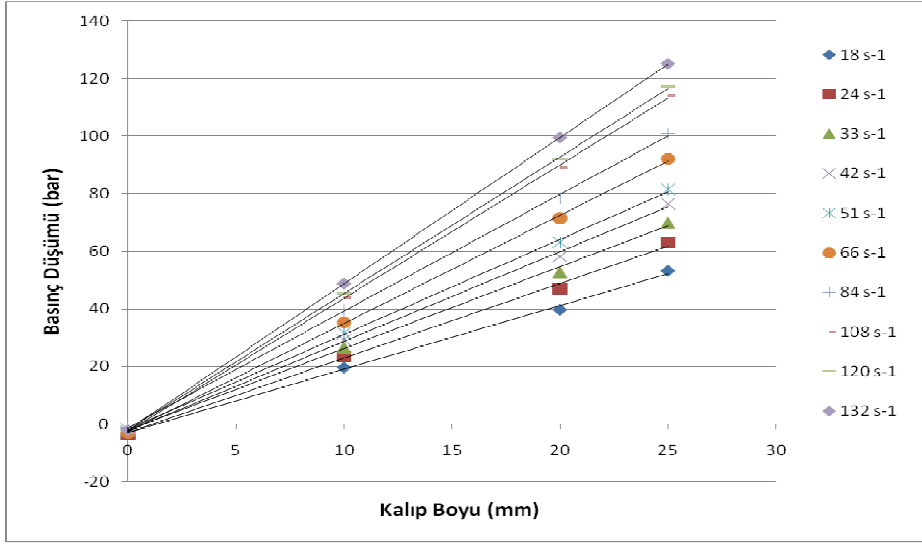
Şekil A.6: PP+%20 Kalsit Kompozit 210 C 'de Bagley Doğrusu



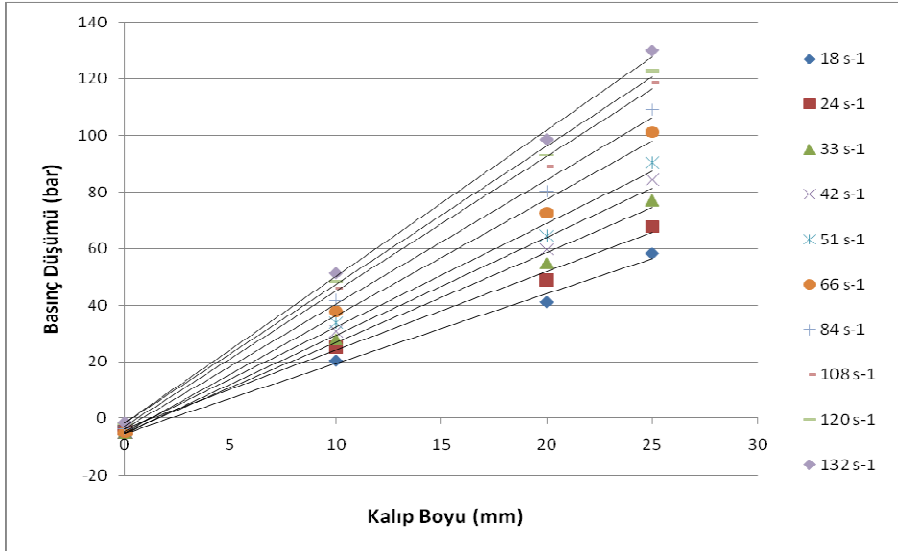
Şekil A.7: PP+%20 Kalsit Kompozit 230 C 'de Bagley Doğrusu



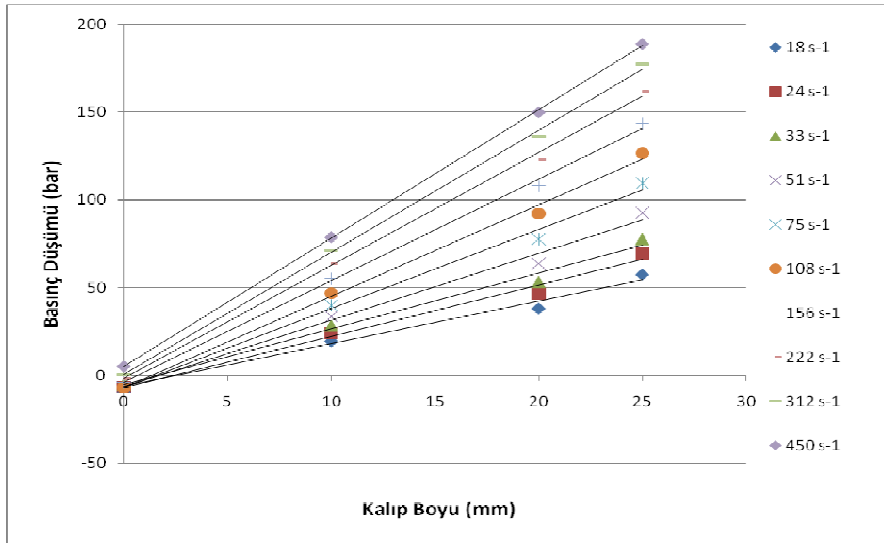
Şekil A.8: PP+%20 Kalsit Kompozit 260 C 'de Bagley Doğrusu



Şekil A.9: 230 C 'de PP+%5 Kalsit Kompozit Bagley Doğrusu



Şekil A.10: 230 C 'de PP+%10 Kalsit Kompozit Bagley Doğrusu



Şekil A.11: 230 C 'de PP+%40 Kalsit Kompozit Bagley Doğrusu

EK B

Çizelge B.1: PE için çeşitli sıcaklıklarda giriş basınç kayıpları

190 C		210 C		240 C	
Görünür şekil değiştirme hızı [s-1]	Giriş basınç kaybı (bar)	Görünür şekil değiştirme hızı [s-1]	Giriş basınç kaybı (bar)	Görünür şekil değiştirme hızı [s-1]	Giriş basınç kaybı (bar)
24	1,78336	18	6,34902	18	2,28714
42	2,72484	24	6,27926	24	2,14711
60	3,27143	42	8,79365	42	2,95876
84	4,57709	60	9,89016	60	2,61116
120	7,35569	84	10,5762	84	2,87024
183	9,66141	120	9,89548	120	2,64711
267	12,4397	183	11,8914	183	2,98807
393	14,8855	267	12,6357	267	2,98194
567	15,789	393	17,5779	393	5,63709
		567	24,3878	567	7,96577

Çizelge B.2: PP+Kalsit kompozitler için 230 °C 'de giriş basınç kayıpları

%5 Kalsit		%10 Kalsit		%40 Kalsit	
Görünür şekil değiştirme hızı [s-1]	Giriş basınç kaybı (bar)	Görünür şekil değiştirme hızı [s-1]	Giriş basınç kaybı (bar)	Görünür şekil değiştirme hızı [s-1]	Giriş basınç kaybı (bar)
24	1,78336	18	6,34902	18	2,28714
42	2,72484	24	6,27926	24	2,14711
60	3,27143	42	8,79365	42	2,95876
84	4,57709	60	9,89016	60	2,61116
120	7,35569	84	10,5762	84	2,87024
183	9,66141	120	9,89548	120	2,64711
267	12,4397	183	11,8914	183	2,98807
393	14,8855	267	12,6357	267	2,98194
567	15,789	393	17,5779	393	5,63709
		567	24,3878	567	7,96577