



**KARBONDİOKSİT HÜCRESİ ÜRETİMİNE YÖNELİK POLİPROPİLEN  
MALZEMENİN KARAKTERİZASYONU**

**Ümit AĞBULUT**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ  
İMALAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

**GAZİ ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**OCAK 2018**

Ümit AĞBULUT tarafından hazırlanan “KARBONDİOKSİT HÜCRESİ ÜRETİMİNE YÖNELİK POLİPROPİLEN MALZEMENİN KARAKTERİZASYONU” adlı tez çalışması aşağıdaki jüri tarafından OY BİRLİĞİ ile Gazi Üniversitesi İmalat Mühendisliği Anabilim Dalında YÜKSEK LİSANS TEZİ olarak kabul edilmiştir.

**Danışman:** Doç. Dr. Onuralp ULUER

İmalat Mühendisliği Anabilim Dalı, Gazi Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Yüksek Lisans Tezi olduğunu onaylıyorum .....

**Başkan:** Yrd. Doç. Dr. İbrahim KARAAĞAÇ

İmalat Mühendisliği Anabilim Dalı, Gazi Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Yüksek Lisans Tezi olduğunu onaylıyorum .....

**Üye:** Yrd. Doç. Dr. Nuri ŞEN

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, Düzce Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Yüksek Lisans Tezi olduğunu onaylıyorum .....

Tez Savunma Tarihi: 12/01/2018

Jüri tarafından kabul edilen bu tezin Yüksek Lisans Tezi olması için gerekli şartları yerine getirdiğini onaylıyorum.

.....

Prof. Dr. Hadi GÖKÇEN

Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

## ETİK BEYAN

Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Tez Yazım Kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmada;

- Tez içinde sunduğum verileri, bilgileri ve dokümanları akademik ve etik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
  - Tüm bilgi, belge, değerlendirme ve sonuçları bilimsel etik ve ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu,
  - Tez çalışmada yararlandığım eserlerin tümüne uygun atıfta bulunarak kaynak gösterdiğimi,
  - Kullanılan verilerde herhangi bir değişiklik yapmadığımı,
  - Bu tezde sunduğum çalışmanın özgün olduğunu,
- bildirir, aksi bir durumda aleyhime doğabilecek tüm hak kayıplarını kabullendiğimi beyan ederim.

Ümit AĞBULUT

12/01/2018

KARBONDİOKSİT HÜCRESİ ÜRETİMİNE YÖNELİK POLİPROPİLEN  
MALZEMENİN KARAKTERİZASYONU

(Yüksek Lisans Tezi)

Ümit AĞBULUT

GAZİ ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

Ocak 2018

ÖZET

Bu tez çalışması, Tübitak 115M041 numaralı ve “Yüksek Isıl Dirençli Genleştirilmiş Perlit Esaslı ve Karbondioksit Hücreli Isı Yalıtım Levhasının Geliştirilmesi” başlıklı projenin bir iş paketi kapsamında gerçekleştirilmiştir. Projenin özgün yanını oluşturan karbondioksit hücreleri polimer esaslı kap içerisine CO<sub>2</sub> gazı hapsedilerek oluşturulmakta ve ana matriste yapay gözenek oluşturmak için kullanılmaktadır. CO<sub>2</sub> hücrelerini saran polimer kap malzemesi olarak ısı iletim katsayısı düşük, Petkim tarafından yerli olarak üretilebilen ve gaz geçirgenliği kabul edilebilir seviyede olan Poliproilen (PP) malzemesi seçilmiştir. Bu tez çalışmasında PP malzemesinin polimer kap olarak en ince kalınlıkta üretilebilirliğine yönelik reolojik karakterizasyonu yapılmıştır. Bu kapsamda, 115M041 numaralı proje bütçesiyle alınan ekstrüder makine için farklı L uzunluğunda (10, 15, 20 ve 30 mm) ve D çapında (1 ve 2 mm) 6 adet kapileri kalıp üretilmiştir. Üretilen kapileri kalıplar ile tek vidalı ekstrüder makineler için kapileri reometre düzeneği kurulmuştur. Kurulan düzenek ile PP malzemesi için kayma hızı değerleri 350-46,000 s<sup>-1</sup> aralığında elde edilmiştir. Elde edilen sonuçlar, kalıp çapının artması ile kayma gerilmesi ve viskozite değerlerinin yükseldiğini kayma hızı değerinin ise azaldığını, kalıp uzunluğunun artmasıyla kayma gerilmesi ve viskozite değerlerinin azaldığını göstermiştir.

Bilim Kodu : 91438

Anahtar Kelimeler : Üretim teknolojileri, kapiler reometre, reoloji

Sayfa Adedi : 107

Danışman : Doç. Dr. Onuralp ULUER

CHARACTERIZATION OF POLYPROPYLENE MATERIAL FOR CARBONDIOXIDE  
CELL PRODUCTION

(M. Sc. Thesis)

Ümit AĞBULUT

GAZİ UNIVERSITY

GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCES

January 2018

ABSTRACT

This thesis study was undertaken within a work package of Tübitak Project with 115M041 number entitled “Development of high thermal resistant, expanded perlite based thermal insulation panel with CO<sub>2</sub> cell”. Carbon dioxide cells, which are the unique side of this project, are formed by trapping CO<sub>2</sub> gas in a polymer-based membrane and the main matrix is used to form artificial pores. Polypropylene (PP) material, which has a low thermal conductivity coefficient and which can be produced locally by Petkim and is in an acceptable gas permeability level, has been selected as the polymer membrane material surrounding the CO<sub>2</sub> cells. In this thesis study, rheological characterization of PP material as polymer membrane in the thinnest thickness was made. Within this scope, 6 dies with different L lengths (10, 15, 20 and 30 mm) and D diameters (1 and 2 mm) were manufactured for the extruder machine which were bought by the project budget numbered 115M041. With manufactured capillary dies, capillary rheometer contrivance was installed for single screw extruder machines. With installed contrivance, the shear rate values for PP material was obtained at the range of 350-46,000 s<sup>-1</sup>. The results showed that the shear stress and viscosity values increased as the die diameter increased, the shear rate decreased as the die length increased, and the shear stress and viscosity values decreased as the die length increased.

Science Code : 91438

Key Words : Manufacturing technology, capillary rheometer, rheology

Page Number : 107

Supervisor : Assoc. Prof. Dr. Onuralp ULUER

## TEŞEKKÜR

Hayat boyunca hertürlü desteği veren çok kıymetli anneme, babama, ablalarıma ve yeğenlerime, çalıőmalarım boyunca yön gösteren danıőmanım Doç. Dr. Onuralp ULUER'e ve çeşitli katkıları nedeniyle Yrd. Doç. Dr. İbrahim KARAAĞAÇ'a, Yrd. Doç. Dr. Gökhan DURMUŐ'a, Prof. Dr. Mustafa AKTAŐ'a, bu zorlu süreçte yanımda olan değerli arkadaşlarım Ataollah KHANLARI ve Damla Nur ÇELİK'e, bilimin ve bilim insanlarının destekçisi TÜBİTAK'a 115M041 numaralı ve "Yüksek Isıl Dirençli Genleştirilmiş Perlit Esaslı ve Karbondioksit Hücreli Isı Yalıtım Levhasının Geliştirilmesi" başlıklı projeye 1003-Öncelikli alanlar Ar-Ge Projeleri Destekleme Programı kapsamında vermiő olduğu maddi destekten dolayı teőekkürü bir borç bilirim.

**İÇİNDEKİLER**

	<b>Sayfa</b>
ÖZET.....	iv
ABSTRACT.....	v
TEŞEKKÜR.....	vi
İÇİNDEKİLER.....	vii
ÇİZELGELERİN LİSTESİ.....	x
ŞEKİLLERİN LİSTESİ.....	xi
SİMGELER VE KISALTMALAR.....	xv
1. GİRİŞ.....	1
2. POLİMERLER.....	3
2.1. Genel Bakış.....	3
2.2. Polimerlere Eklenen Yaygın Katkı Malzemeleri.....	4
2.3. Plastikler.....	6
2.3.1. Plastiklerin sınıflandırılması.....	7
2.3.2. Plastiklerin fiziksel, kimyasal ve mekanik özellikleri.....	10
3. REOLOJİ.....	11
3.1. Reolojinin Tarihsel Gelişimi.....	11
3.2. Polimer Reolojisi.....	16
3.3. Reolojik Özelliklerin Belirlenmesinde Yaygın Kullanılan Yöntemler.....	18
3.3.1. Eriyik akış indeksi (Melt flow index) (ASTM D1238, ISO 1133).....	19
3.3.2. Rotasyonel (dönel) reometreler (ASTM C1749-17a).....	19
3.3.3. Kılcal kalıplar (ASTM D5422-09, ASTM D3835).....	20
4. LİTERATÜR TARAMASI.....	29
4.1. Enjeksiyon Makinelerinde Kılcal Kalıp Kullanımı.....	29



	<b>Sayfa</b>
4.2. Ekstrüder Makinelerinde Kılcal Kalıp Kullanımı.....	32
<b>5. AKIŞ TIPLERİ VE VİSKOZİTE MODELLERİ.....</b>	<b>41</b>
5.1. Akış Tipleri.....	41
5.1.1. Newtonun viskozite kanunu.....	41
5.1.2. Newtonyen akış.....	42
5.1.3. Newtonyen olmayan (Non-Newtonyen) akış.....	43
5.1.4. Zamana bağlı akış davranışı.....	44
5.2. Viskozite Modelleri.....	45
5.2.1. Zamana bağlı viskozite modelleri.....	46
5.2.2. Zamandan bağımsız akış davranışı.....	47
5.3. Viskozite Modelleri.....	50
5.3.1. Power Law (Güç yasası) modeli.....	51
5.3.2. Bird-Carreau-Yasuda modeli.....	53
5.3.3. Cross modeli.....	54
5.3.4. Cross-WLF modeli.....	54
5.3.5. Ellis modeli.....	56
5.3.6. Arrhenius modeli.....	56
<b>6. EKSTRÜZYON YÖNTEMİ.....</b>	<b>56</b>
6.1. Ekstrüzyon Makinesinin Kısımları.....	59
6.1.1. Huni.....	59
6.1.2. Vida (Burgu veya Helezon).....	59
6.1.3. Silindir (Kovan-Ocak).....	60
6.1.4. Soğutma ve vakumlama ünitesi.....	60
6.1.5. Çekici.....	60

	<b>Sayfa</b>
7. MATERYAL VE METOT.....	60
7.1. Materyal.....	61
7.1.1. Ekstrüder makinesi (NOVOMA NTB 30/25D).....	61
7.1.2. Ekstrüderin elektrik kontrol kabini.....	66
7.2. Kalıp Tasarımı.....	67
7.3. Metot.....	77
7.3.1. Eriyik PP malzemenin yoğunluk değişiminin tespiti.....	80
7.3.2. Malzemenin akış hızının tespiti.....	83
7.3.3. Bagley düzeltmesinin uygulanması.....	83
7.3.4. Güç kanunu indexinin tespiti ve Rabinowitsch düzeltmesi.....	85
7.3.5. Viskozitenin tespiti.....	87
8. SONUÇLAR VE TARTIŞMA.....	89
9. ÇIKARIM VE ÖNERİLER.....	99
KAYNAKLAR.....	101
ÖZGEÇMİŞ.....	107

## ÇİZELGELERİN LİSTESİ

<b>Çizelge</b>	<b>Sayfa</b>
Çizelge 3.1. Reolojinin tarihsel gelişimi.....	11
Çizelge 4.1. Literatürde elde edilen kayma hızı değerleri.....	40
Çizelge 7.1. Ekstrüder makinenin teknik özellikleri.....	61
Çizelge 7.2. Bazı ticari firmaların ürettikleri kapiler kalıp çapları.....	67
Çizelge 7.3. 6159A basınç sensörü teknik özellikleri.....	68
Çizelge 7.4. 6159A0,4 sıcaklık sensörü teknik özellikleri.....	69
Çizelge 7.5. Üretilen kalıp boyutları.....	70
Çizelge 7.6. Radwag PS 510 R.1 hassas terazi teknik özellikleri.....	76
Çizelge 7.7. PP malzemenin özellikleri.....	78
Çizelge 7.8. Ekstrüder makine bölgelerinin sıcaklık değerleri.....	79
Çizelge 8.1. Eriyik kırılmalarının başlangıç devirleri (Çap:1 mm).....	97
Çizelge 8.2. Eriyik kırılmalarının başlangıç devirleri (Çap:2 mm).....	97

## ŞEKİLLERİN LİSTESİ

<b>Şekil</b>	<b>Sayfa</b>
Şekil 2.1. Bazı takviye malzemeler a) Cam elyafı b) Karbon elyafı.....	5
Şekil 2.2. Soğumada meydana gelen çarpılma olayını önleyici kaolin maddesi.....	5
Şekil 2.3. Ham petrolden elde edilen malzemelerin dağılımı.....	6
Şekil 2.4. Polimerizasyon oluşumu a)Metan b)Etilen c)Polietilen (polimer).....	7
Şekil 2.5. Yarı kristalin yapılu termoplastik malzemedeki zincir dizilimi.....	8
Şekil 2.6. Termosetlere ait molekül yapısı.....	9
Şekil 3.1. MFI cihazı şematik gösterimi.....	19
Şekil 3.2. Rotasyonel (dönel) reometre tipleri.....	20
Şekil 3.3. (a) Kapileri kalıp, (b) Şerit kalıp görünümü.....	21
Şekil 3.4. Kalıplara sensör montajı, kapiler kalıp (solda) ve şerit kalıp (sağda).....	23
Şekil 3.5. Hız profili, kayma hızı ve kayma gerilmesinin gösterimi.....	24
Şekil 3.6. Şerit kalıp şematik görünümü.....	24
Şekil 3.7. Bağley düzeltme faktörünün elde edilmesi.....	28
Şekil 4.1. Viskozite değerleri a) PP b) PP c) PS d) PS.....	30
Şekil 4.2. 200 °C ve 230 °C Akış eğrileri a) PP b) PP c) PS d) PS.....	31
Şekil 4.3. Şerit kalıp setinin şematik gösterimi.....	32
Şekil 4.4. PS malzeme reometre karşılatırmaları (200°C).....	33
Şekil 4.5. FEP malzemesi için elde edilen verilerin modellerle karşılaştırılması.....	34
Şekil 4.6. Farklı L/D oranına sahip kalıplardan elde edilen sonuçların kıyaslanması....	35
Şekil 4.7. LDPE malzemesi için deneysel sonuçların modellerle karşılaştırılması.....	36
Şekil 4.8. LDPE için kalıplardan ve ticari reometreden elde edilen sonuçlar.....	36
Şekil 4.9. Farklı L/D oranları için elde edilen kayma hızı değerleri.....	37
Şekil 4.10. Ekstüder üzerinde şerit kalıp gösterimi.....	37

<b>Şekil</b>	<b>Sayfa</b>
Şekil 5.1. Viskoz davranış çeşitleri.....	42
Şekil 5.2. Akış modeli.....	42
Şekil 5.3. Reopektik, Tikotropik ve zamandan bağımsız akış tipleri.....	45
Şekil 5.4. Zamandan bağımsız akışkanlar.....	47
Şekil 5.5. Kayma İncelmesi Davranışı.....	48
Şekil 5.6. Farklı akış tipleri için akış eğrileri.....	51
Şekil 5.7. Power-Law Modeli.....	52
Şekil 5.8. Kayma incelmesi bölgesi.....	53
Şekil 6.1. Tek vidalı bir ekstruderin şematik gösterimi.....	58
Şekil 6.2. : Farklı tasarımlara sahip ekstruder vidaları.....	60
Şekil 7.1. Ekstrüder makine (Novoma NTB 30/25D).....	62
Şekil 7.2. Kullanılan ekstrüder vidalar.....	62
Şekil 7.3. Kullanılan ekstüder vidalar.....	62
Şekil 7.4. Breaker plate görünümü.....	63
Şekil 7.5. Breaker plate teknik resmi.....	63
Şekil 7.6. Ekstrüzyon çıkışı üzerinde breaker plate.....	64
Şekil 7.7. Kovan üzerinde bulunan rezistanlar ve sıcaklık kontrol sensörleri (4 adet)...	64
Şekil 7.8. Sıcaklık kontrol paneli.....	65
Şekil 7.9. Cebri soğutma fanları.....	65
Şekil 7.10. Ekstrüder tahrik elemanı 5.5 kW AC motor ve redüktör.....	66
Şekil 7.11. Ekstrüder kontrol paneli.....	67
Şekil 7.12. 6159A Basınç sensörü.....	68
Şekil 7.13. 6159A0,4 Sıcaklık sensörü.....	69
Şekil 7.14. Kistler 2859 sinyal şartlandırıcı.....	69

<b>Şekil</b>	<b>Sayfa</b>
Şekil 7.15. 1 mm çaplı kalıp teknik resmi.....	70
Şekil 7.16. Üretilen 1 mm çaplı kalıp (3 adet).....	71
Şekil 7.17. 2 mm çaplı kalıp teknik resmi.....	71
Şekil 7.18. Üretilen 2 mm çaplı kalıp (3 adet).....	72
Şekil 7.19. Tutucu kafa teknik resmi.....	72
Şekil 7.20. Ürettirilen tutucu kafa.....	73
Şekil 7.21. Seramik tipi meme rezistans.....	73
Şekil 7.22. Rezistansın kalıp üzerine bağlanması.....	74
Şekil 7.23. Kapileri kalıp montajı.....	74
Şekil 7.24. Kapileri kalıp montajı.....	75
Şekil 7.25 Eriyik malzemenin kalıptan çıkışı.....	75
Şekil 7.26. Hassas terazi.....	76
Şekil 7.27. Deney düzeneği.....	77
Şekil 7.28. Reolojik özelliklerin hesaplanması için uygulanan akış şeması.....	78
Şekil 7.29. Etüv fırında PP malzemenin nem alma işlemi.....	79
Şekil 7.30. Eriyik PP malzemesinin kalıptan çıkışı.....	80
Şekil 7.31 Ekstrüde edilen PP malzemenin ağırlığının ölçülmesi.....	81
Şekil 7.32. Yoğunluk-Devir ilişkisi (L/D:15, çap:1 mm, 190 °C).....	82
Şekil 7.33. Yoğunluk-Sıcaklık ilişkisi (L/D:20, 75 rpm, çap:2 mm).....	82
Şekil 7.34. Bagley eğrisinin temsili gösterimi (çap 1mm için).....	84
Şekil 7.35. Basınç düşüşünün tespiti (Bagley eğrisi) (D:1 mm, 50 rpm).....	84
Şekil 7.36. Kayma gerilmesi-Görünür kayma hızı grafiği (L/D:30, çap:1 mm).....	85
Şekil 7.37. $\log(\tau_w)$ - $\log(\tau_a)$ eğrisi (L/D:20, çap:1 mm ve 230 °C).....	86
Şekil 7.38. Kayma gerilmesi-Gerçek kayma hızı grafiği (L/D:30, çap:1 mm).....	86

<b>Şekil</b>	<b>Sayfa</b>
Şekil 8.1. L/D:15 (çap 1 mm) kayma gerilmesi-kayma hızı grafiği.....	89
Şekil 8.2. (L/D:20 çap 1 mm) Kayma gerilmesi – Kayma hızı grafiği.....	89
Şekil 8.3. (L/D:30 çap 1 mm) Kayma gerilmesi – Kayma hızı grafiği.....	90
Şekil 8.4. (L/D:10 çap 2 mm) Kayma gerilmesi – Kayma hızı grafiği.....	90
Şekil 8.5. (L/D:15 çap 2 mm) Kayma gerilmesi – Kayma hızı grafiği.....	91
Şekil 8.6. (L/D:20 çap 2 mm) Kayma gerilmesi – Kayma hızı grafiği.....	91
Şekil 8.7. Newtonyen akıştan sapma (kayma incelmesi).....	92
Şekil 8.8. Newtonyen bölgeden sapma (viskozite-kayma hızı eğrisi).....	92
Şekil 8.9. L/D:15 (çap 1 mm) Viskozite-Kayma hızı grafiği.....	93
Şekil 8.10. (L/D: 20 çap 1 mm) Viskozite – Kayma gerilmesi grafiği.....	93
Şekil 8.11. (L/D:30 çap 1 mm) Viskozite – Kayma Gerilmesi grafiği.....	94
Şekil 8.12. (L/D:10 çap 2 mm) Viskozite – Kayma hızı grafiği.....	94
Şekil 8.13. (L/D:15 çap 2 mm) Viskozite – Kayma gerilmesi grafiği.....	95
Şekil 8.14. (L/D:20 çap 2 mm) Viskozite – Kayma gerilmesi grafiği.....	95
Şekil 8.15. Eriyik malzemenin kırılarak çıkması (melt fracture).....	96

## SİMGELER VE KISALTMALAR

Bu çalışmada kullanılmış simgeler ve kısaltmalar, açıklamaları ile birlikte aşağıda sunulmuştur.

<b>Simgeler</b>	<b>Açıklamalar</b>
<b>D</b>	Çap
<b>h</b>	Yükseklik
<b>K</b>	Kıvamlılık parametresi
<b>l</b>	Uzunluk
<b>n</b>	Güç kanunu indeksi
<b>P<sub>1</sub></b>	Birinci sensörden okunan basınç değeri
<b>P<sub>2</sub></b>	İkinci sensörden okunan basınç değeri
<b>P<sub>3</sub></b>	Üçüncü sensörden okunan basınç değeri
<b>P'</b>	Basınç grandyanı
<b>R</b>	Yarıçap
<b>N</b>	Azot
<b>t</b>	Süre
<b>w</b>	Genişlik
<b>Q</b>	Hacimsel debi
<b>τ<sub>a</sub></b>	Görünür kayma gerilmesi
<b>η<sub>a</sub></b>	Görünür viskozite
<b>γ<sub>a</sub></b>	Görünür kayma hızı
<b>τ<sub>w</sub></b>	Duvarda meydana gelen kayma gerilmesi
<b>η''</b>	Düzeltilmiş viskozite
<b>γ̇</b>	Kayma hızı
<b>∂V</b>	Hız
<b>∂x</b>	Tabakalar arasındaki mesafe
<b>τ<sub>0</sub></b>	Kritik kayma gerilimi (başlangıç gerilimi)
<b>λ</b>	Zamana bağlı bir parametredir
<b>η<sub>p</sub></b>	Bingham plastik viskozitesi değeri,
<b>η<sub>0</sub></b>	Sıfır kayma hızı viskozitesi



**Simgeler** $\eta_{\infty}$  $^{\circ}\text{C}$  $\Delta P$ **Açıklamalar**

Sonsuz kayma hızı viskozitesi

Santigrat derece

Basınç Değişimi

**Kısaltmalar****AC****C****CO<sub>2</sub>****FEP****H****HDPE****LDPE****LCPS****MFI****PA****PE****PP****PS****PU****PVC****UP****O****TPS****Açıklamalar**

Alternatif akım

Karbon

Karbondiyoksit

Teflon

Hidrojen

Yüksek yoğunluklu polietilen

Alçak yoğunluklu polietilen

Copolyester ve Poliesteramid

Eriyik akış indeksi

Poliamid

Polietilen

Polipropilen

Polistiren

Poliüretan

Polivinilklorid

Poliester

Oksijen

Termoplastik nişasta

## 1. GİRİŞ

Polimerik malzemelerden üretilen plastik parça kullanım oranı hergeçen gün artmakta ve farklı uygulama alanları bulmaktadır. Polimer malzemeler düşük yoğunluk, düşük ısı ve elektriksel iletkenlik (yalıtkanlık), kolayca şekil verilebilirlik, demir ve türevlerine göre daha düşük sıcaklık değerlerinde şekillendirilebilirlik, düşük maliyet ve geri dönüştürülebilirlik gibi özellikleri sebebiyle sıklıkla tercih edilmektedirler. Bu malzemeler, iplikten son model uçaklarda kullanılan ekipmanlara kadar çok değişik ve farklı alanlarda yaygın bir kullanıma da sahiptir.

Bu tez çalışmasında ısı yalıtım levhası geliştirmeye yönelik Tübitak 115M041 numaralı projenin özgün yönünü oluşturan hücrelerin (yapay gözenek) üretiminde Polipropilen (PP) malzemenin kullanılabilirliği araştırılmıştır. Kullanılabilirlik kavramı, PP malzemenin reolojik karakterizasyonu ile üretilebilirlik açısından ilişkilendirilmiştir. Reoloji malzemenin uygulan bir gerilim değeri altındaki akış ve deformasyonu ile ilgilenen bir bilim dalıdır.

Günümüzde, reolojik özelliklerin tespitine yönelik birçok ticari reometre mevcuttur. Ancak ticari reometrelerin fiyatlarının oldukça yüksek olması sebebiyle alternatif reolojik özellik tespitine yönelik çalışmalara sıklıkla rastlanmaktadır. Bu tez çalışmasında reolojik özellikleri tek vidalı ekstrüder, ASTM D5422-09 standardı referans alınarak vida tipi kapileri reometreye dönüştürülmüştür. Bunun için iki farklı çap ( $\emptyset$  1 ve 2 mm) ve her çap için 3 farklı akış uzunluğu oranı (L/D) kullanılmıştır. Farklı kapileri kalıplar, 190 °C – 230 °C sıcaklık aralığında ve 5-125 rpm proses şartlarında denenmiştir. Deneylerde ölçülen basınç ve hacimsel debi verileri ile PP'in farklı şartlar altındaki viskozite değişimi karakterize edilmiştir.

Bu tez çalışması toplamda sekiz bölümden oluşmaktadır. İkinci bölümde; polimerler ve plastiklerle ilgili genel bilgiler verilmiştir. Üçüncü bölümde; reoloji biliminden bahsedilmiştir. Dördüncü bölümde, literatürde yer alan benzer çalışmalara yer verilmiştir. Beşinci bölümde, polimerik malzemelerin şekillendirilmesinde en çok kullanılan yöntem olan ekstrüzyon ile şekillendirme yöntemi ve ekstrüder makinesi hakkında bilgiler verilmiştir. Yedinci bölümde, tez kapsamında kullanılan makine, cihaz, ekipman ve malzemelerden bahsedilmiştir. Sekizinci bölümde ise bulgular tartışılmıştır. Dokuzuncu ve son bölümde ise tez çalışmasından elde edilen çıkarımlar ve öneriler paylaşılmıştır.



## 2. POLİMERLER

### 2.1. Genel Bakış

Plastik ve polimer kelimeleri günümüzde sıklıkla birbirleriyle karıştırılmakta ve bu iki tabir, genellikle aynı şeyleri tanımlıyorlarmış gibi birbirleri yerine kullanılmaktadırlar. Ancak, plastik ve polimer kelimeleri temelde farklı kavramları temsil etmektedir. Öncelikle polimer, polimerizasyon sonucunda oluşmuş olan saf maddedir ve genellikle uzun zincir ve benzeri molekülleri tanımlamak amacıyla kullanılmaktadır. Ayrıca, polimerler çok nadir olarak saf halde katkı malzemesi ilave edilmeksizin kullanılmaktadırlar. Plastik kelimesi ise, polimerik malzemelere çeşitli katkıları ilave edildikten sonra şekillendirilmiş ürün için kullanılan bir tabirdir. Kısacası, polimerin işlenmiş haline plastik denmektedir.

Polimerleri doğru anlayabilmek için sınıflandırılmalarına ihtiyaç duyulmaktadır. Amacına uygun olarak polimerleri aşağıdaki gibi geniş bir kategoride sınıflandırmak mümkündür.

- Doğada bulunup, bulunmamasına göre (doğal, yapay),
- Isıya karşı gösterdikleri davranışa göre (termoplastik, termoset plastik),
- Zincirin kimyasal ve fiziksel yapısına göre (Düz, dallanmış, çapraz bağlı, kristal, amorf polimerler),
- Molekül ağırlıklarına göre (oligomer, makromolekül),
- Zincir yapısına göre (homopolimer, kopolimer),
- Sentezlenme şekillerine göre,

Genelde 3 malzeme formu polimer işlemlerini ifade etmek amacıyla kullanılmaktadır. Bunlar;

1. Granül: Prosesin başlangıcı ve devamı için besleme stoğuna atılan henüz şekil verilmemiş formdur.
2. Eriyik: Malzemenin daha kolay şekil verilebilmesi amacıyla akıcı hale dönüştürüldüğü formudur.
3. Katı: Malzemenin son ürün halini aldığı formdur.

Polimerik malzemelerin en temel özellikleri aşağıdaki gibi sıralanabilir.

- Hafiflerdir ve kalıplanarak şekillendirmeye uygundur,
- Polimer esaslı malzemeler elektriğe ve ısıya karşı iyi yalıtkanlardır,

- Kayma gerilmesine karşı duyarlıdırlar ve kayma dirençleri düşüktür.
- Kimyasal olarak tepkimeye girmezler ve kimyasal etkilere dayanıklılıkları yüksektir. Asitlere ve bazlara karşı dirençlidirler.
- Genellikle suya karşı dayanıklılıkları oldukça iyidir ancak bazıları su buharına karşı duyarlı olup su da bozulabilirler,
- Yüksek sıcaklığa karşı dayanıksızdırlar.
- Enerji absorbe edebilme kabiliyetine sahiptirler, tokluk değerleri yüksektir.

Sayılan özelliklerin bazı uygulamalar için yetersiz kalması durumunda ya da iyileştirme yapma ihtiyacı gerektiği durumlarda polimerik malzemelere birtakım katkı malzemeleri ilave edilebilmektedir. Aşağıdaki bölümde polimerik malzemelere ilave edilen yaygın katkı malzemelerinden kısaca bahsedilmiştir.

## **2.2. Polimerlere Eklenen Yaygın Katkı Malzemeleri**

Doğada işlenmiş birçok ticari polimer bulmak mümkündür. Bu polimerleri birbirlerinden ayıran çeşitli özellikleri mevcuttur (kimyasal yapısı, yoğunluğu, elektrik ve ısı iletkenliği, dayanımı vb.). Katkı malzemeleri en bilindik ve sade şekliyle ilave edildiği malzemenin yetersiz olduğu düşünülen özelliklerini iyileştirilmek amacıyla kullanılmaktadır [1].

Polimerlere ilave edilen katkı maddeleri kullanım amaçlarına göre çeşitlilik göstermektedir, bu katkı maddelerinden bazılarının adları; antistatik katkılar, pigmentler, dolgular, yağlayıcılar, takviyeler, bağlayıcı katkılar, kararlılaştırıcılar, alev önleyiciler, ultraviyole ışın dengeleyiciler ve benzeridir [2].

Antistatik katkılar, polimerlerin işlenmesi ya da kullanımları sırasında kazandıkları dielektrik özellikleri sebebiyle bünyelerinde oluşan statik elektriklenmeyi engellemek amacıyla elektrik iletkenlik katsayısı düşük olan katkıdır. Antistatik katkılar, havada bulunan nemi polimerik malzeme üzerine çekerek polimerik malzemenin yüzey iletkenlik değerini artırır ve oluşan statik elektriği boşaltır [2]. Bu katkı malzemesi direk olarak granül içine ya da yüzeysel püskürtme ile polimerik malzemeye uygulanabilmektedir. Pigmentler, renklendiriciler olarakta adlandırılmaktadırlar. Polimerik malzemeye estetik bir görünüş sağlamak ve homojen bir görüntü kazandırmak amacıyla kullanılırlar [1]. Dolgular, inorganik malzemedен üretilmiş elyaf veya tabaka şeklindeki katkıdır. Kullanım

amaçları, polimer malzemenin mekanik özelliklerini arttırmaktır [2]. Yağlayıcılar, eriyik halde polimerlerin viskozitesini düşürmek ve şekil değiştirme özelliklerini artırmak amacıyla kullanılmaktadır. Takviyeler, polimerlerin mekaniksel, elektriksel ve ısıal özelliklerini iyileştirir ayrıca boyut kararlılığı sağlarlar [1]. Şekil 2.1’de sık kullanılan bazı takviye malzemelerin (cam elyafı ve karbon elyafı) verilmiştir.



Şekil 2.1. Bazı takviye malzemeler a) Cam elyafı b) Karbon elyafı

Bağlayıcı katkı maddeleri, polimerlerin cam elyafı gibi inorganik dolgu malzemeleri ile daha güçlü bağ kurmasını sağlamak amacıyla kullanılmaktadırlar. Kararlılaştırıcı katkılar, polimerik malzemelerin örneğın sıcaklık değişimlerinden dolayı kimyasal ve boyutsal kararlılıklarını korumalarını sağlamak amacıyla kullanılmaktadırlar [2]. Bu işlem için en sık kullanılan maddelerden birisi olan kaolin Şekil 2.2’de gösterilmiştir.



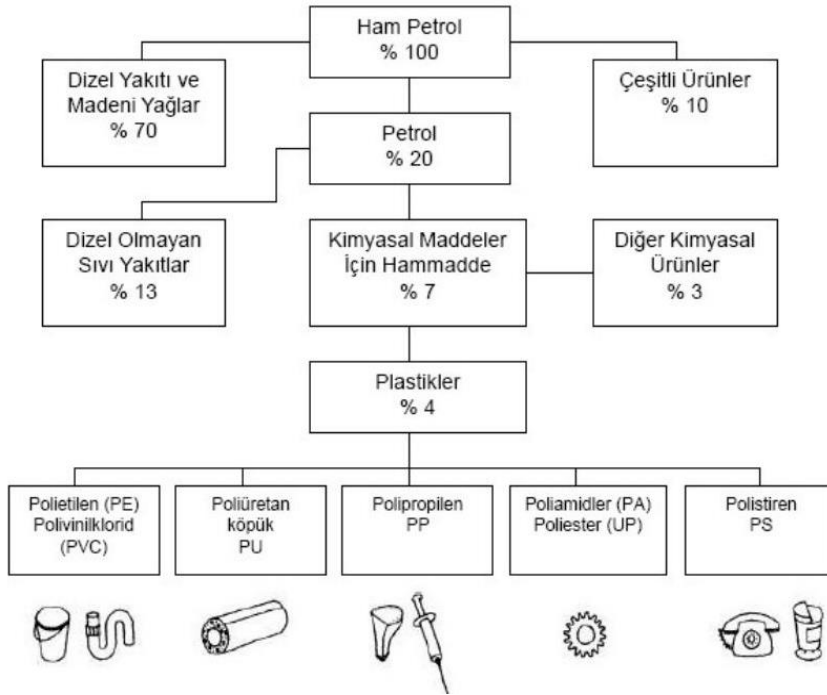
Şekil 2.2. Soğumada meydana gelen çarpılma olayını önleyici kaolin maddesi

Alev önleyici katkı malzemeleri, polimerlerin organik kökenli olmalarından kaynaklı yanıcı etkisinin şiddetini düşürmek veya alevin ilerlemesini önlemek amacıyla kullanılmaktadırlar [2]. Ultraviyole ışın dengeleyiciler, ultraviyole ışının etkisiyle zamanla plastik malzemenin renk değiştirmesi ve görünümünde bozulma meydana gelmesini engellemek ya da geciktirmek amacıyla ilave edilirler. Ayrıca bu ışıandan kaynaklı malzemenin kimyasında

meydana gelmesi muhtemel değişiklikleri önleyerek malzemenin kimyasal kararlığını da uzun süre korumasına imkân sağlarlar.

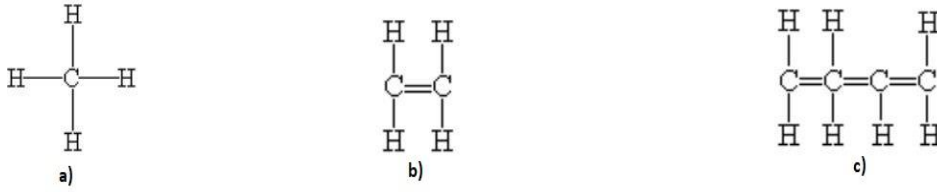
### 2.3. Plastikler

Plastik ilk olarak elde edildiğinde toz ya da granül şeklinde olabilir. Genellikle, plastik petrol rafinerilerinde kullanılan ham haldeki petrolün işleme sonucunda arta kalan artık malzemelerden elde edilmektedir. Plastik sektörü girdilerinin %90'ını petrokimya sanayinden temin etmektedir [3]. Yapılan bilimsel araştırmalara göre, yeryüzünde bulunan petrolün yalnızca %4'lük kısmı polimerlerin elde edilmesi için kullanılmaktadır. Şekil 2.3'te ham petrolden elde edilen malzemelerin dağılımlarını gösteren bir şema mevcuttur [1,3].



Şekil 2.3. Ham petrolden elde edilen malzemelerin dağılımı

Plastikler, karbonun (C); Hidrojen (H), Oksijen (O), Azot (N) ve diğer organik ya da inorganik elementler ile bir araya gelmesi sonucu monomer olarakta adlandırılan, basit yapıdaki moleküllü grupta bulunan bağın koparılması ve polimer adı verilen uzun ve zincirli bir yapıya dönüştürülmesi ile meydana gelen malzemelerdir. Küçük moleküllerin bir araya gelerek daha büyüklerini meydana getirme işlemine ise polimerizasyon adı verilmiştir. Polimeri oluşturan en temel bileşiklerden birisi de metandır. Bir polimerin oluşumu için meydana gelen yapı Şekil 2.4'te verilmiştir.



Şekil 2.4. Polimerizasyon oluşumu a)Metan b)Etilen c)Polietilen (polimer)

### 2.3.1. Plastiklerin sınıflandırılması

Plastikler; en genel olarak bağ mekanizmaları, moleküler yapıları gibi özelliklerine göre sınıflandırılabilirler. Buna göre 3 tip plastik türü vardır; termoplastikler, termosetler ve elastomerler [1]. Bazı kaynaklar, elastomerleri termosetler başlığı altında inceleyerek bu katagoriyi ikiye de ayırabilmektedirler. Aşağıdaki bölümlerde bu 3 malzeme türünden detaylıca bahsedilmiştir.

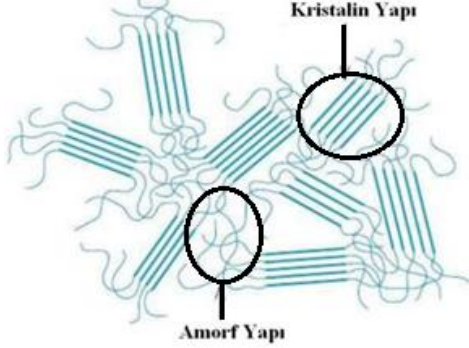
#### Termoplastikler

Termoplastikler, uzun molekül zincirlerine sahiptirler ve ısıtıldıkları zaman zincirler arası bağ (çekim) kuvvetlerin zayıflaması sonucu yumuşamaya ve esnekleşmeye başlarlar. Isıtma işlemi belli bir sıcaklık değerini (camsı geçiş sıcaklığı,  $T_g$ ) geçtikten sonra zincir hareketliliği bایلir ve erime sıcaklığına ulaşınca ( $T_m$ ) termoplastik malzemeler daha eriyik hale gelirler. Erimiş haldeki termoplastik malzeme soğumaya bırakıldığında tekrar katılaşmaktadır. Sıcaklığın etkisiyle yumuşama ve soğumaya bırakılarak katılaşma döngüsü, termoplastik malzemeler için uzun çevrimler boyunca tekrar tekrar yapılabilmektedir. Bu şekillendirme süreci boyunca termoplastikler hiçbir kimyasal değişikliğe uğramazlar. Öte yandan, malzemelerin ısı etkisiyle yumuşayabilmeleri, üretim proseslerinde kullanılan yöntemlerin belirlenmesi için oldukça önemlidir. Sıcaklığın etkisiyle termoplastiklerde meydana gelen yumuşamanın bir de dezavantajı vardır. Yumuşamalarından dolayı sıcaklığa karşı hassas olurlar ve bu yüzden kullanılacağı yerler için ortam sıcaklığı, kullanılabilirlik aralığını daraltmaktadır.

Termoplastiklerin yapıları rastgele, düzenli dizilmiş veya her iki dizilimi de bünyesinde barındıran zincir yapısından oluşmaktadır. Zincir yapısı rastgele dizilmiş ise amorf, düzenli dizilmiş ise kristalin ya da her ikisini içeren yapıda ise yarı kristalin yapı denilmektedir. Yarı



kristalin özellikli bir termoplastik malzeme içerisinde amorf ve kristalin yapı oluşturan zincir dizilişi Şekil 2.5'te görülmektedir.



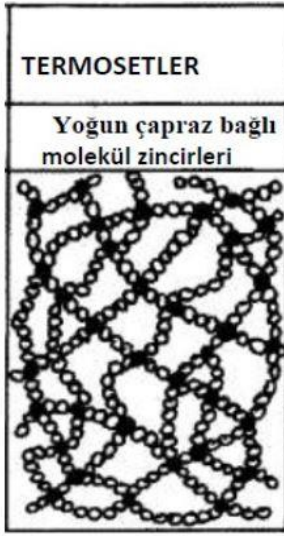
Şekil 2.5. Yarı kristalin yapılı termoplastik malzemede zincir dizilimi

En yaygın kullanılan termoplastikler aşağıdaki gibi 3 gruba ayrılabilir.

1. Sellülozikler,
  - Polieter,
  - Poliesterler,
2. Poliamitler (Naylon),
3. Viniller,
  - Poliesterler (polivinilklorür),
  - Polialkoller,
  - Polikarbürler.

### Termosetler

Termosetler, iki adımda gerçekleşen bir kimyasal tepkime sonucu oluşurlar. İlk adımda, termoplastik üretiminde de olduğu gibi uzun zincir moleküllerini oluşturan bir tepkime gerçekleşmektedir. İkinci adımda ise, oluşan bu uzun zincirler Şekil 2.6'daki gibi birbirleriyle çapraz bağlar oluşarak bir araya gelmektedir.



Şekil 2.6. Termosetlere ait molekül yapı

Uzay ağı polimeri olarak adlandırılan termoset malzemeler sahip olduğu, rijitlik, yüksek mukavemet, yüksek kullanım sıcaklığı ve dış etkenlere karşı dayanımları yönünden termoplastiklerden çok daha üstündürler. Ancak, termoset malzemelerin belirgin olumsuz geri dönüşüme uygun olmamaları, sıcaklıkla tekrar yumuşamamaları ve plastikleşmemeleri termoset plastiklerin olumsuz özellikleri olarak sayılabilir. Termosetlerde, sıcaklık sonucu meydana gelen hasarlar kalıcıdır. En yaygın olarak kullanılan termoset malzemeler aşağıdaki gibilerdir;

- Fenoplastlar,
- Aminoplastlar,
- Poliesterler,
- Polieteler,
- Poliüretanlar.

### Elastomerler

Bir çekme kuvveti altında, çok yüksek oranlarda uzama davranışı sergileyen ve uygulanan bu kuvvet kaldırıldığında sahip olduğu ilk uzunluk değerine geri dönebilen, çapraz bağlarla tutunan kauçuğumsu polimerlere elastomer adı verilmektedir.

Elastomerler termosetlerden daha az çapraz bağ bulundurlar, ancak elastomerler daha az çapraz bağ içerirler. Bu nedenle, normal şartlarda kauçuğumsu bir davranış sergilerler.

Elastomerlerin yapısında bulunan bağların parçalanması, yüksek sıcaklık gerektirir ve parçalanmış bağ tekrar eski haline gelemez. Bu yüzden, elastomerler de tıpkı termosetler gibi geri dönüştürülemezler. Sıcaklığa maruz kalan elastomerlerin yapısı ve geometrisi bozulur ve tekrar kullanılamayacak şekile gelirler [1].

En yaygın kullanılan elastomerler şöyle sıralanabilir:

- Poliizopiren (Doğal Kauçuk),
- Polibütadiyen,
- Poliizobütilen,
- Poliüretandır

Termoset malzemelerin sıklıkla kullanıldığı alanlar; lifler kullanılarak güçlendirilmiş kompozitler, diş dolguları, polimerik kaplamalar ve elektronik çiplerdir.

### **2.3.2. Plastiklerin fiziksel, kimyasal ve mekanik özellikleri**

Plastik malzemelerin sahip olduğu mekanik özellikleri diğer birçok malzemeden farklı olarak sıcaklığa, zamana ve deformasyon hızına bağlı olarak büyük değişiklikler göstermektedir. Genel olarak, amorf bir yapıya sahip olmalarından dolayı zincir oluşumu tesadüfidir ve bu sebepten dolayı nispeten düşük dayanıma sahiptirler. Bunun yanı sıra, sahip oldukları mekanik dayanımları ilk üretildikleri andan itibaren geri dönüşüme uğradıkça zayıflama eğilimindedir. Tıpkı metallerde olduğu gibi hem elastik hem de plastik olarak şekil değiştirebilirler. Kimyasal etkilere karşı dayanımları yüksektir bu sebepten doğada yok olmazlar. Birçok plastik malzeme için kesin bir erime noktası da yoktur.

### 3. REOLOJİ

Reoloji, kısaca maddenin uygulanan bir gerilim altındaki akışını ve şekil değiştirmesini inceleyen bilim dalı olarak tanımlanmaktadır [4]. Reometreler ise malzemenin akış özelliklerini belirlemek üzere geliştirilen ve kullanılan deneysel ölçüm cihazlardır [5]. Reoloji kavramının doğuşu Simplicius ve Heraclitus'un bir alıntısı olan "Πάντα ῥεῖ" (Panta rei) ya da "everything flows" [6-10] yani "her şey akar" kelimelerinden ilham alınarak doğmuştur.

#### 3.1. Reolojinin Tarihsel Gelişimi

Reoloji ile ilgili yapılan çalışmalar yüzyıllardan beridir bu alanda çalışma yapan araştırmacıların yaşamış olduğu dönemlerdeki teknolojinin de izin verdiği şekilde devam ettirilmektedir. Pascal'ın 1663 yılında yapmış olduğu "Viskoz olmayan akışlar" çalışmasıyla birlikte reolojik çalışmaların temeli atılmıştır. Bu yıldan itibaren günümüze kadar reoloji bilimini ilgilendiren birçok çalışma bilim dünyasına girmiştir. Çizelge 3.1'de [11] reolojik özelliklerin tarihsel gelişimine yönelik çalışmalar özetlenmeye çalışılmıştır.

Çizelge 3.1. Reolojinin tarihsel gelişimi

Yıl	Yazar(lar)	Çalışma Konusu/Alanı
1663	B. Pascal	Viskoz olmayan akışlar hakkında ilk bilimsel çalışma yayınlandı
1678	R. Hooke	Elastik yaylar üzerine ilk çalışma yayınlandı
1687	I. S. Newton	Viskoz akışkanlar üzerine ilk çalışma yayınlandı
1705	Bernoulli kardeşler	Bernoulli denklemi yayınlandı
1807	T. Young	Elastik (Young's) modülü açıklandı
1820	C. Navier	İleride Navier-Stokes denklemi haline gelecek Newtonyen akışkanların davranışı tanımlandı
1822	A. Cauchy	Gerilim ve gerinim tanımlandı ayrıca Cauchy deformasyon tensörü formüle edildi

Çizelge 3.2. (devam) Reolojinin tarihsel gelişimi

1829	S.Poisson	Poisson oranı, $\nu$ tanımlandı
1839	G.Hagen	İlk kapiler viskozimetre tasarlandı
1840	J. L. M. Poiseuille	Kapiler viskozimetre tasarlandı ve kan reolojisi üzerine ilk çalışma yapıldı
1845	G. G. Stokes	3 boyutlu Newtonyen akış modeli formüle edildi
1849	G. G. Stokes	Kapileri üzerinde parabolik hız dağılımı çalışması yapıldı
1859	A. V. Lourenço	Molekül ağırlığının artması ile viskozite değerinin de arttığı ilk kez ortaya koyuldu
1861	A. Lipowitz	Hamur, et gibi rijit olmayan malzemelerin sertliğini ölçmek için penetrometre tasarlandı
1861	T. Graham	Koloit deyimi ilk kez kullanıldı
1867	J. C. Maxwell	Viskoelastik Maxwell modelini formüle edildi
1873	J. D. Van der Waals	Molekül içi kuvvetler üzerine çalışmalar yayınlandı
1874	L. Boltzmann	Süperpozisyon prensibi yayınlandı
1881	M. Margules	Eş merkezli iki silindir arasında kayma hızında viskoziteyi tanımlayan denklemler türetildi
1886	M. M. Couette	Eş merkezli iki silindir arasında kayma hızında viskoziteyi tanımlayan denklemler türetildi
1888	M. M. Couette	Viskoziteyi ölçmek için ilk eş merkezli silindir; Couette aygıtı tasarlandı
1890	W. Thomson- Kelvin	Bugün Kelvin modeli olarak bilinen ve viskoelastik katı anlamına gelen “katı viskozitesi” tanımı yapıldı
1890	W. Voigt	Viskoelastik katılar üzerine yapılan deneysel sonuçlar paylaşılmaya başlandı
1891	W. Ostwald	Ostwald viskozimetresi olan kapiler viskozimetre tasarlandı
1894	J. Finger	Test numunelerinde kayma ve uzama sonucu oluşan deformasyonlar için Finger-Gerinim tensörü formüle edildi

Çizelge 3.3. (devam) Reolojinin tarihsel gelişimi

1905	F. T. Trouton	Bugün, Trouton viskozitesi olarak bilinen uzama ve kayma viskozitesi arasındaki ilişki tanımlandı
1906	A. Einstein	Emülsiyon viskozitesini katı parçacıkların hacmine bölünmesiyle türetilen yeni bir denklem türetildi
1916	E. Bingham	Akma gerilmeli akışkanlar: Bingham akışı tanımlandı
1920	H. Staudinger	Staudinger tarafından makro molekülüler olarak adlandırılan rijit çubuklu polimerler tanımlandı
1922	E. Bingham	Reoloji alanına çok katkıda bulunan “Fluidity and Plastikity” adlı kitap yayınladı
1923	A. De Waele	Viskozite ve deformasyon hızı arasında bir güç ilişkisi olan güç kanunu modeli (power-law model) yayımlandı
1925	W. Ostwald	De Waele’den 2 yıl sonra, viskozite ve deformasyon hızı arasında; power-law modeli ya da Ostwald-de Waele modeli olarak adlandırılan güç ilişkisi türetildi
1927	S. B. Ellis	Akış davranışları üzerine çalışmalar yayımlandı
1928	E. Hatschek	Reoloji alanına çok katkıda bulunan “The Viscosity of Liquids” adlı kitap yayınladı
1929	E. Bingham	Reoloji Topluluğu kuruldu
1929	R.Eisenschitz, B.Rabinowitsch Ve K. Weissenberg	Reolojik enerji üçgeni önerildi
1929	B. Rabinowitsch	Kapiler viskozimetrelerde Newtonyen olmayan akışkanların kayma hızı değerleri için düzeltilmesi türetildi
1929	H. Jeffreys	“Elasto-viskoz” (viskoelastik akışkanlar) malzemelerin tanımlandığı “The Earth” kitabı yayımlandı
1931	A. Nadai	Gelecekte, reoloji bilimine çok katkı sağlayacak olan “Plasticity” isimli kitap yayımlandı
1934	M. Mooney	Kayma diski viskozimetresi tasarlandı
1934	M. Mooney ve R. H. Ewart	Koni ve paralel reometre ilk kez kullanıldı
1935	H. Freundlich	İlk kez “Tiksotropi” deyimini kullanıldı

Çizelge 3.4. (devam) Reolojinin tarihsel gelişimi

1935	J. M. Burgers	Maxwell ve Kelvin-Voigt modelleri birleştirilerek yeni bir viskoelastik model geliştirildi
1936	E. Guth and R. Simha	Viskozite için 1906 yılında Einstein'ın geliştirdiği denklem $\mu = \mu_0(1 + 2.5\phi + 14.1\phi^2)$ olarak değiştirildi
1938	G. W. S. Blair	“An Introduction to Industrial Rheology” adlı kitap yayınladı ve tarihte ilk kez “reoloji” kelimesi bir kitabın başlığında kullanılmış oldu
1940	M. Mooney	Kauçuk elastikliği üzerine çalışmalar yayınlandı
1945	M. Reiner	Polimer eriyikleri için uygulanabilecek akışkan viskozite teorileri önerildi
1945	Brookfield Company	İlk Brookfield rotasyonel (dönel) viskozimetresi ticari olarak satışa konuldu, (Stoughton, Massachusetts)
1946	M. S. Green ve A. V. Tobolsky	Çarpraz bağlı olmayan polimerler için geçici bir ağ modellemesi ileri sürüldü
1946	R. J. Russell	Paralel disk ve koni-paralel reometreler kullanarak normal gerilmeler ölçüldü
1947	K. Weissenberg	Bugün, Weissenberg etkisi olarak bilinen çubuk tırmanışı (rod climbing) keşfedildi
1948	R. S. Rivlin	Polimerik eriyiklere akış viskozite teorileri uygulandı
1948	G. W. S. Blair	Reoloji üzerine ilk Uluslararası Kongre düzenlendi
1953	P. E. J. Rouse	Rouse modeli olarak bilinen, çarpraz bağlı polimerler için bead-spring modeli önerildi
1955	M. L. Williams, R. F. Landel ve J. D. Ferry	Zamana bağlı süper pozisyon prensibi ortaya sürüldü
1955	Haake Company	Rotasyonel (dönel) viskozimetre ticari olarak satışa sürüldü ( Berlin ve Karlsruhe)
1956	B. H. Zimm	Seyreltik polimer süspansiyonları için Rouse modeliyle etkileşim içinde olan hidrodinamiği de içeren yeni bir model “Rouse-Zimm“ modeli geliştirildi
1956	A. Lodge	Geçici Ağ Modellemesi Green ve Tobolsky tarafından genişletildi

Çizelge 3.5. (devam) Reolojinin tarihsel gelişimi

1956	F. R. Eyrich	“Rheology–Theory and Applications” kitabı yayınlandı
1957	E. B. Bagley	Bugün, Bagley düzeltme faktörü olarak bilinen, kapiler viskozimetreler için giriş basıncı düzeltmeleri türetildi
1958	W. P. Cox ve E. H. Merz	Salınım testlerindeki frekans ve rotasyonel (dönel) viskozimetrelerdeki deformasyon hızı arasında bir ilişki öne sürüldü (Cox-Mertz ilişkisi)
1960	R. B. Bird, W. E. Stewart ve E. Lightfoot	Reolojiye çok katkı sunacak olan “BSL” kısaltmasıyla “Transport Phenomena” kitabı yayınlandı
1960	A. S. Lodge	Reolojiye çok katkı sunacak olan “Elastik Liquids” adlı kitap yayınlandı
1960	M. Reiner	Reolojiye çok katkı sunacak olan “Deformation, Strain and Flow” kitabı yayınlandı
1962	A. Kaye	Sonralarda K-BKZ modeli olarak isimlendirilecek olan viskoelastik model geliştirildi
1963	B. Bernstein, E. Kearsley ve L. Zapas	Kaye tarafından 2 yıl önce yayınlanan Viskoelastik modeli daha da geliştirildi ve K-BKZ modeli olarak geliştirilerek değiştirildi
1965	M. M. Cross	Küçük kayma hızlarıyla kayma incelmesi davranışı gösteren akışkanlar için gelecekte çok sık kullanılacak olan Cross modeli öne sürüldü
1966	H. Giesekus	Viskoelastik model geliştirilerek Giesekus modeli olarak bilinen yeni bir model geliştirildi
1967	S. F. Edwards	Polimerler için Entaglement Teorisi öne sürüldü
1968	P. J. Carreau	Küçük ve büyük kayma hızlarında geçerli viskozite modeli olan Bird-Carreau modeli geliştirildi
1969	J. Meissner	Tek eksenli uzama reometrisi tasarlandı
1971	P. G. DeGennes	Polimer molekülleri için Reptation modeli önerildi
1977	R. B. Bird, R. C. Armstrong ve O. Hassager	Gelecekte reoloji bilimine çok katkı sağlayacak olan “Dynamics of Polymeric Liquids” adlı kitap yayınlandı



Çizelge 3.6. (devam) Reolojinin tarihsel gelişimi

1977	R. B. Bird, O. Hassager, R. C. Armstrong ve C. F. Curtis	Gelecekte reoloji bilimine çok katkı sağlayacak olan “Kinetic Theory” kitabı yayınlandı
1982	J. M. Dealy	Gelecekte reoloji bilimine çok katkı sağlayacak olan “Rheometers for Molten Plastics” adlı kitap yayınlandı
1985	R. B. Bird ve H. Giesekus	Lineer olmayan deformasyon davranışı için bir model geliştirildi
1986	M. Doi ve S. F. Edwards	Reptation modeli daha kapsamlı bir hale dönüştürüldü
1990	J. M. Dealy ve K. F. Wissbrun	Gelecekte reoloji bilimine çok fayda sağlayacak olan “Melt Rheology and Its Role in Plastics Processing” isimli kitap yayınlandı
1994	C. W. Macosko	Gelecekte reoloji bilimine çok fayda sağlayacak olan “Rheology: Principles, Measurements and Applications” isimli kitap yayınlandı
1997	P. J. Carreau, D. C. R. DeKee ve R. P. Chhabra	Gelecekte reoloji bilimine çok fayda sağlayacak olan “Rheology of Polymeric Systems – Principles and Applications” isimli kitap yayınlandı

Çizelge 3.1’den de görüldüğü üzere reolojik çalışmalar yaklaşık 350 yıldır bilim dünyasını meşgul etmektedir. Ancak geçen bu sürede bile reoloji tam anlamıyla anlaşılammış ve maddenin reolojik özellikleriyle ilgili sorulan en temel sorulara bile hala tam anlamıyla net bir cevap verilemiştir. Bahsedilen konuyla ilgili olarak Bölüm 3.2’de Polimer Reolojisi başlığı altında bir değerlendirme yapılmıştır.

### 3.2. Polimer Reolojisi

Reolojinin sıvıların akış ve katıların deformasyon özellikleriyle ilgilenen bir bilim dalı olduğu önceki bölümlerde bahsedilmişti. Bu tanıma göre polimer reolojisi, polimerik malzemelerin deformasyonu ve akışıyla ilgilenmektedir. Doğada, çeşitli polimerik

malzemeler bulunduğu için, polimer reolojisini polimerik malzemelerin de tabiatına göre farklı kategorilere ayırmak mümkündür. Bu kategoriler aşağıda şekilde sıralayabiliriz;

- Homojen polimerlerin reolojisi,
- Karışabilir polimer harmanlarının reolojisi,
- Karışmayan polimer harmanlarının reolojisi,
- Partikül dolgulu polimerlerin reolojisi,
- Fiberglas reolojisi,
- Organokil nanokompozitlerin reolojisi,
- Polimerik köpüklerin reolojisi,
- Termosetlerin reolojisi,
- Blok kopolimerlerin reolojisi,
- Sıvı-kristalin polimerlerin reolojisi.

Polimerik malzemelerin her biri kendisine özgü reolojik özelliklere sahiptir. Dolayısıyla, farklı polimerik malzemelerin reolojik davranışları hakkında yorum yapılabilmesi için farklı teorilere ihtiyaç duyulmaktadır. Bununla birlikte, şu anda, bazı polimerik malzemelerin reolojik davranışını tarif edebilen kapsamlı bir teorem mevcut değildir. Bu nedenle, polimerik malzemelerin deneysel olarak gözlemlenen reolojik davranışını yorumlamak için ampirik korelasyonlara başvurmamız gerekmektedir. Polimerik malzemelerin reolojik özellikleri kimyasal yapılarına göre değişmektedir. Bu nedenle, polimerik malzemelerin reolojik özelliklerini kimyasal yapılarıyla ilişkilendirebilmek üzerine yapılan çok sayıda çalışma da mevcuttur. Ancak, örneğin, “*Neden polistrenin reolojik özellikleri, aynı akış koşulları altında polietilenin reolojik özelliklerinden çok farklıdır?*” gibi çok temel bir soruyu bile şu anda yanıtlayabilen kapsamlı bir moleküler teori bulunmamaktadır [11].

Polimer zincirlerindeki hareketliliği maddenin akışkanlığı ya da reoloji kavramlarını dikkate alarak farklı bir açıdan da incelemek gerekir. Öncelikle bilindiği üzere polimerik malzemeler, camsı geçiş sıcaklığının altındaki değerler için akıcı fazda değildirler. Bu bölgede Hooke elastikliği olarak bilinen bir davranışı yani geri kazanılan ya da çok az bir esneklik kabiliyeti özelliğini yansıtmaktadırlar. Hali hazırda katı halde bulunan polimerler ise camsı geçiş sıcaklığının üzerindeki değerler için bir yük uygulandığı zaman yapısındaki moleküllerin kısmi bir oriyantasyonu sonucu esnemektedirler. Polimerik zincirlerin kısmende olsa çarpaz bağlı olması ya da bu zincirlerin birbirlerine karışmış olması

sebebiyle uygulanan yük kaldırıldığı zaman zincirler önceki konumuna ve malzeme de yine önceki boyutlarına geri dönme eğilimi gösterecektir. Elastomer (kauçuğumsu) malzemelerde sergilenen bu davranışa visko-elastisite denilmektedir. Sıcaklık değeri, camsı geçiş bölgenin üzerine çıktıkça polimerik malzeme ergimekte ve akışkan hale geçebilmektedir. Ergimiş haldeki polimerik malzemenin viskozite değerleri yüksek olduğundan dolayı bu akışa viskoz akışta denir ve bu akış Newton'un viskozite kanununa uymayan (Non-Newtonyen) akış tipinin bir örneğidir. Bu durum, polimerin yapısında bulunan zincirlerin birbirlerine karışmış olmasından kaynaklanmaktadır. Benzer şekilde, eriyik polimere bir basınç uygulandığı zaman zincir karmaşıklığı genişlediğinden ya da bu zincirlerin koparılmasından dolayı viskozite değerlerinde büyük ölçüde değişim (azalma) yaşanmaktadır. Akışkanlar için kayma viskozitesi; kayma gerilmesi ve kayma gerinim hızının birbirlerine oranı ile belirlenmektedir. Polimerik malzemeler için viskozite değeri kayma gerilmesi, kayma gerinim hızı ve sıcaklık faktörlerine bağlı olarak değişmektedir.

### **3.3. Reolojik Özelliklerin Belirlenmesinde Yaygın Kullanılan Yöntemler**

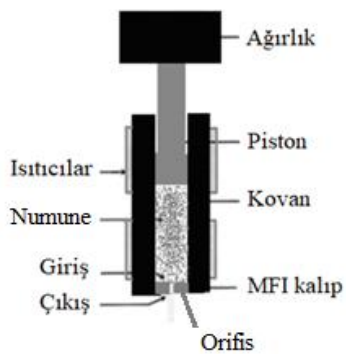
Başarılı bir şekilde reolojik özelliklerinin ölçülmesi, hesaplanması ve değerlendirilmesi için en uygun yöntemin ve doğru aygıtın seçilmesi son derecede önem arz etmektedir. Geçmişten günümüze, viskozimetre ve reometre tasarımları sıcaklık başta olmak üzere diğer işlem parametreleri dikkate alınarak yapılmaktadır. Tasarlanmış bu cihazların, kısa süre içerisinde malzemeye ait akış özelliklerini en doğru şekilde kullanıcıya aktarması beklenmektedir. Reolojik ölçümlerde temel prensip gerilim ve kayma hızı ile bazı durumlarda da visko-elastisite arasında bulunan ilişkinin ortaya konulmasıdır [12]. Ancak, polimerlerin reolojik özellikleri, küçük moleküler ağırlık sapsmalarına karşı bile hassastırlar. Özellikle amorf ve yarı-kristalin olan polimerik malzemeler için aynı test şartlarında ve aynı cihaz ile ölçülen malzemelerin bile reolojik özellikleri arasında bir takım farklılıklar çıkmasının mümkün olabileceği unutulmamalıdır.

Tez çalışmasının bu bölümünde, rolojik özelliklerin tespiti edilmesi amacıyla yaygın olarak kullanılan reometrelerden kısaca bahsedilecektir. En yaygın kullanılan reometre tipleri aşağıda sıralanmıştır;

1. Eriyik Akış İndeksi (MFI),
2. Rotasyonel (Dönel) Reometreler,
3. Kalıp aparatlar.

### 3.3.1. Eriyik akış indeksi (Melt flow index) (ASTM D1238, ISO 1133)

Eriyik akış indeksi (MFI), kısaca polimer eriyiklerin akışını tanımlayan bir yöntemdir. Pratikte kullanımın basit oluşu ve hızlı sonuç vermesinden dolayı çok yaygın olarak tercih edilmektedir. MFI, granül halindeki plastik hammaddelerin karakteristiğinin analiz edilmesi için kullanılmaktadır. Malzemenin belli bir yük ve sıcaklık altında, belirli bir zaman dilimi içerisinde akma miktarının hesaplanmasını sağlamaktadır. Bu zaman dilimi, 10 dakikadır. Silindir içerisine konulan numune, deney sıcaklığında ve üzerine eklenen ağırlık vasıtasıyla (genellikle 1,2-21,6 kg aralığında) 10 dakika boyunca kılcal bir orifis/delik içerisinden akıtılır. Numunenin, 10 dakika boyunca akması sağlanır ve akan miktarın kütlesi tartılır bulunur. Tartılan bu değer, g/10.dk ya da  $\text{cm}^3/10.\text{dk}$  olarak ifade edilir. MFI cihazının şematik bir gösterimi aşağıda Şekil 3.1’de verilmiştir.



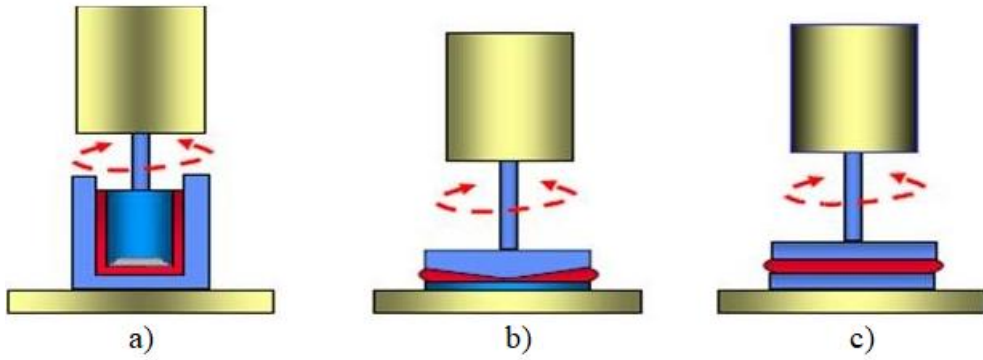
Şekil 3.1. MFI cihazı şematik gösterimi

### 3.3.2. Rotasyonel (dönel) reometreler (ASTM C1749-17a)

Rotasyonel (dönel) reometreler, Newtonyen ve Newtonyen olmayan akışkanların reolojik özelliklerini tespit etmek amacıyla kullanılan reometrelerdir. Bilindiği üzere, Newtonyen olmayan akışkanların karakterize edilebilmesi ancak farklı kayma hızları için viskozite değerlerinin ölçülmesi ile mümkündür. Bu tip reometreler için kayma hızı değeri rotasyon (dönme) hızı ile orantılıdır. Farklı dönme hızları için ölçüm yapılması ile farklı kayma hızı büyüklüklerine karşılık gelen kayma gerilmeleri değerlerinin ölçülebilmesi mümkündür. Böylelikle, akışkanın reolojik karakterizasyonunun yapılabilmesine imkân sağlanmaktadır. Bu tip reometrelerin bazıları, sıvının viskozitesinin sıcaklıkla değişimini inceleme olanağını da sunan bir donanıma da sahiptirler. Bu tip reometreler için ölçüm yöntemindeki küçük

farklılıklardan dolayı 3 farklı çeşit rotasyonel reometre tipi vardır [13]. Bunlar aşağıda verilmiş ve Şekil 3.2'de şematik olarak gösterilmiştir;

- Konsantrik (ortak merkezli) silindir reometreler; çok düşükten ortalama değere sahip viskozite ölçümlerinde kullanılır (Bkz. Şekil 3.2a).
- Koni-plaka reometreler; çok düşükten yüksek viskozite değerlerine sahip viskozite ölçümlerinde kullanılır (Bkz. Şekil 3.2b).
- Paralel-plaka reometreler, çok düşük viskozite ölçümleri ile yumuşak katıların viskozite ölçümleri için kullanılır (Bkz. Şekil 3.2c).



Şekil 3.2. Rotasyonel (dönel) reometre tipleri

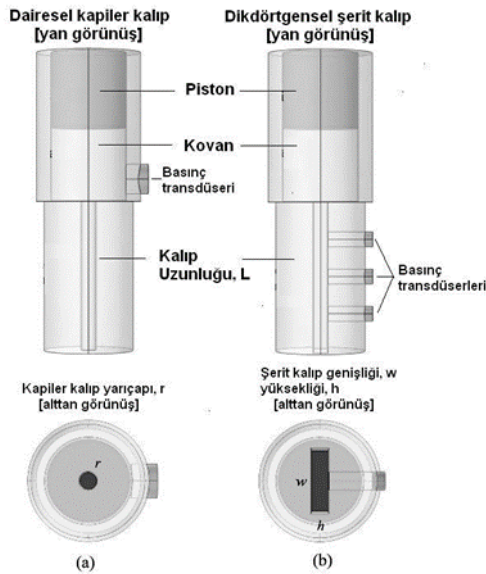
### 3.3.3. Kılcal kalıplar (ASTM D5422-09, ASTM D3835)

Ticari reometreler genel olarak kılcal (MFI gibi) ve rotasyonel (dönel) reometre olmak üzere iki geniş kategoriye ayrılmaktadır [14]. Her iki ticari reometre tipi de farklı amaçlara yönelik kullanılmaktadır. Örneğin kılcal reometreler, genelde kayma viskozitesi verilerini elde etmek için tercih edilirken dönel reometreler viskoelastik özellikleri belirlemek amacıyla daha sık kullanılmaktadır. Ayrıca kılcal reometrelerin maliyeti 150.000\$ ve rotasyonel reometrelerin maliyeti 90.000\$'a kadar ulaşabilmektedir [15].

Bu cihazların maliyetlerinin oldukça yüksek olması, araştırma yapan üniversiteleri ve AR-GE çalışması yapan firmaları mevcut ticari reometrelere alternatif olarak reolojik özellikleri belirlemeye imkân sağlayan yeni ve daha ucuz yöntemlerin geliştirilmesine iten güç olmaktadır. Bu amaç için genellikle en tercih edilen yöntem reolojik özelliklerin el ile hesaplanmasını sağlayan ve sonuçlarının gerek literatürle gerekse de ticari reometrelerden elde edilen sonuçlar ile oldukça uyum içerisinde olan kılcal kalıplardır.

Bu kalıplardan reolojik özelliklerin hesaplanması için farklı ve çok karmaşık geometrilere sahip kalıplara ait çalışmalara literatürde sıklıkla rastlamak mümkündür. Ancak karmaşık geometrili ekstrüzyon kalıplarının tasarımlarında genel olarak akış kesitlerinin dikdörtgensel, dairesel, eliptik ve halka tipi şeklinde kanallara ayrılması sıklıkla başvurulan bir yaklaşımdır çünkü polimerik eriyik akış için bu tip basit profilli kanallara ait debi-basınç düşüşü değerlerini analitik olarak ifade etmek daha kolaydır [16]. Dairesel, dikdörtgensel, halka tipi ve eliptik kanallar için birçok çalışma yapılmış ve analitik ifadeler türetilmiş [17-19] olmakla birlikte en kullanışlı ve en basit geometri tipleri dikdörtgensel ve dairesel kesite sahip olan şerit kalıp ve kapileri kalıplardır.

Tez çalışmasının bu bölümünde, reolojik özellikleri hesaplamaya yönelik sıklıkla tercih edilen kalıp geometrisine sahip olan kapileri (dairese) ve şerit (dikdörtgensel) kalıplar hakkında genel bilgiler verilmiştir. Kapileri ve şerit kalıp reometreleri, sıklıkla eriyik malzemelerin kayma viskozitesini belirlemek amacıyla kullanılmaktadırlar [20]. Prensip olarak, bu kalıplar üzerinden kayma viskozitesinin hesaplanması için kalıp boyunca farklı akış hızlarındaki basınç kayıpları ölçülmektedir [21,22]. Şerit ve kapileri kalıba ait şematik bir görünüm aşağıda bulunan Şekil 3.3'te verilmiştir.



Şekil 3.3. (a) Kapileri kalıp, (b) Şerit kalıp görünümü

Şekil 3.3'ten de görüldüğü üzere kalıpların sahip olduğu geometriye bağlı olarak birbirlerine karşı üstünlüklerinden ve zayıflıklarından bahsetmenin mümkün olduğu anlaşılmaktadır. Örneğin şerit kalıp, kapileri kalıbın aksine keskin kenarlara sahiptir. Şerit kalıpta keskin

köşelerden dolayı  $x$  ve  $y$  koordinatlarında hız vektörlerinde ve basınç kayıplarında ani sıçramalar meydana gelmesi yüksek ihtimaldir. Bu etkiyi azaltmak amacıyla elde edilen sonuçlar bir kenar etkisiyle (end affect) düzeltilmeli ya da tasarım bu etkiyi ihmal etmeye imkân sağlayacak şekilde yapılmalıdır.

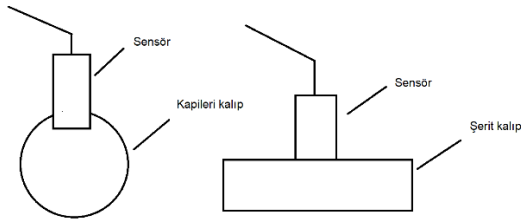
Örneğin, bir şerit kalıpta kenar etkisini göz ardı etmek için genişliğin ( $w$ ), yükseklikten ( $h$ ) en az 10 kat daha fazla olması gerekmektedir [23,24].

Şerit kalıp için dikkat edilmesi gereken en önemli noktalar, şerit genişliği ile yükseklik oranının hesabı ve kalıp çıkışında üniform bir şekilde akış dağılımının sağlanabilmesidir [25]. Esas olarak, iyi tasarlanmış bir kalıp ile kalıbın tüm genişliği boyunca basınç kaybı dengelenebilir ve üniform hız dağılımı elde edilebilir. Bu nedenle akış kanalının geometrisi; malzemenin reolojik özellikleri, çalışma koşullarına bağlı olarak tasarlanmalıdır. Geleneksel kalıplar bu faktörleri de dikkate alarak tasarlanmasına rağmen kalınlık tekdüzeliğini kontrol etme konusunda bazı sınırlamalara sahiptir. Örneğin, belirli bir kesitten geçen daha hızlı bir akış, o bölgeden geçen hacimsel debinin artmasına ve daha yüksek gerinim oranı nedeniyle nihai ürünün bu kesitte kalınlık artışına sebep olacaktır [24,26].

Özetle, günümüzde malzemelerin reolojik özelliklerini ölçmeye yönelik birçok aparat ve cihaz mevcuttur. Ancak, kapileri reometre, polimerlerin reolojik özelliklerini ölçmek için kullanılan en basit ve en popüler reolojik araçtır [27-31]. Bunun nedeni, diğer ticari reometre ve kalıp çeşitlerine göre bir takım avantajlara sahip olmasından kaynaklanmaktadır. İlk olarak, ölçüm yapılacak bölgeyi yüksek işleme sıcaklığında yüksek viskoziteli eriyik ile tamamen doldurmak nispeten kolaydır. Ayrıca kayma hızı ve akış geometrisi enjeksiyon kalıplama ve ekstrüzyon yöntemlerinde elde edilen gerçek şartlara benzemektedir [32].

Kapileri ve şerit kalıbın arkasındaki teorik kavramlar ve denklemler temelde aynı olsa da bu kalıpların sahip olduğu kanal geometrisinden (dairesel ve dikdörtgensel kesit gibi) dolayı farklı eşitliklerle temsil edilmektedir. Ancak, kapileri kalıbın çeşitli polimerik malzemelerin reolojik özelliklerini belirlenmesinde doğruluğu birçok çalışma ile gösterilmiş olsa da şerit kalıp kullanımı kapileri kalıba göre daha sınırlıdır. Kapileri kalıp kullanımının en önemli avantajlarından birisi de kalıp içerisinde oldukça basit bir akış profilinin gerçekleşiyor olmasıdır. Bununla birlikte en önemli dezavantajı ise kapilerin kalıp içerisine geometrik şartlar nedeniyle basınç sensörlerinin kusursuz montajının yapılamaz olmasıdır. Şerit kalıpta

ise kapileri kalıbın tam aksine monte edilecek olan basınç sensörlerinin kalıp boşluğuna kusursuz montajı mümkündür [26]. Aşağıda verilen Şekil 3.4a'da kapiler kalıba montaj edilen sensörün Şekil 3.4b'de ise şerit kalıba montaj edilen sensörün şematik resimleri gösterilmiştir. Şekil 3.4a'da görüldüğü üzere, kapileri kalıba monte edilen sensör, kalıbın silindirik geometrili bir akış kanalına sahip olmasından dolayı akış profillerini bozabilecek şekilde kalıp içerisine girmektedir. Şekil 3.4b'de görülen şerit kalıp uygulamasında ise, kalıbın düz bir yüzeye sahip olmasından dolayı kusursuz montajı görülmektedir.



Şekil 3.4. Kalıplara sensör montajı, Kapileri kalıp (solda) ve Şerit kalıp (sağda)

#### Ölçülen kapileri ve şerit kalıp verilerinden reolojik özelliklerin hesaplanması

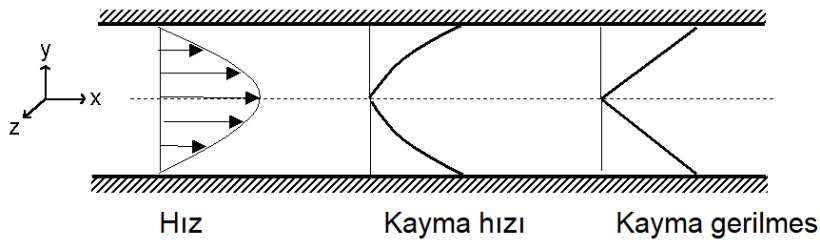
Şerit kalıp, polimer eriyiklerinin reolojik özelliklerini ölçmek amacıyla yaygın olarak kullanılmaktadır [20,33,34]. Han'ın yaptığı çalışmaları [24,26,34-36] dayanarak, polimerik malzemelerde, şerit kalıp ve kapileri kalıp arasında çıkış basınçları açısından hiçbir farkın olmadığını söylemek mümkündür. Eriyikler için viskozite akış eğrileri incelendiğinde, şerit kalıp ve kapileri kalıp ile elde edilen sonuçlar kuvvetli bir ilişki içerisindedir. Şerit kalıplar için kullanılan eşitliklerin çoğu Han (1971,1974), Eswaran (1963) ve Wales (1965) çalışmalarına aittir. Şerit kalıp ve kapileri kalıbın arkasındaki teorik kavramlar ve denklemler, kanal geometrisinde (örneğin dairesel ya da dikdörtgensel) meydana gelen ana farklılıklar ile aynıdır.

Şerit kalıp kullanırken daha doğru sonuçlar elde etmek için, kalıp uzunluğu boyunca en az üç noktadan basınç ölçümü gerekmektedir. Uzunluk ekseninde boyunca basınç gradyanları bilindiği takdirde, kayma gerilmesini ve kayma viskozitesini elde etmek mümkündür [34,35]. Basınç gradyanı, kalıp boyunca meydana gelen basınç düşüşlerinin kalıp uzunluğuna oranıyla yaklaşık olarak elde edilmektedir. Ancak, hesaplanan bu değerler kalıp girişinde ve çıkışında basınç kayıplarını da içermektedir (bagley etkisi ve kenar etkisi). Bu nedenle ölçülen basınç gradyanı, olması gerektiğinden fazla çıkmaktadır. Farklı



uzunluklarda kalıplar ile aynı hacimsel debiye sahip eriyik malzemeler için ölçümler tekrarlanarak sonuçlardan kenar etkisi ya da bağley etkisi azaltılabilmektedir [36].

Şerit ve kapileri kalıplarda dikdörtgen ya da dairesel kesitli akış geometrileri için basınç gradyanları biliniyorsa kayma gerilmesi ve viskoziteyi hesaplanabilmektedir. Kayma gerilmesi, kalıp merkezinden kalıp yüzeylerine doğru (kalıp duvarı) doğrusal bir şekilde artmaktadır (Bkz. Şekil 3.5) [37-39].

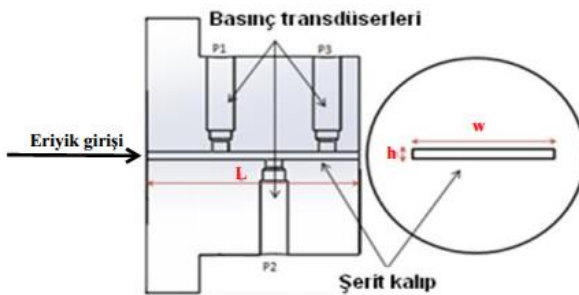


Şekil 3.5. Hız profili, kayma hızı ve kayma gerilmesinin gösterimi

Şerit ve kapileri kalıpların geometrisi ve eriyik malzemenin hacimsel debisi ile birlikte sensörlerden okunan basınç değerleri kullanılarak kayma gerilmesi, kayma hızı ve viskozite hesaplanabilmektedir.

Geometrik ifadelerden türetilen sayısal eşitlikleri ve basınç değerlerini anlamlı hale getirmek için türetilmiş eşitlikler literatürde uzun yıllardan beridir mevcuttur. Bu denklemlerin tam türevli hali Han'ın 1974 yılında yaptığı çalışmalarında [34,35] mevcuttur. Bu tez çalışmasında da reolojik verilerin elde edilmesi amacıyla şerit ve kapileri kalıba ait eşitlikler üzerinde kısa bir özet yapılacaktır.

Bir şerit kalıp üzerinde nihai ürünün çıktığı bölge ve sembollerinin gösterimi Şekil 3.6'da verilmiştir.



Şekil 3.6. Şerit kalıp şematik görünüm

Kalınlık (h) doğrultusunda kalıp yüzeylerinde meydana gelen görünür kayma gerilmesi şerit kalıp için Eş. 3.1 ve kapileri kalıp için Eş. 3.2 için kullanılarak hesaplanmaktadır.

$$\tau_a = \frac{p'.h}{2} \quad (3.1)$$

$$\tau_a = \frac{p'}{4.(L/D)} \quad (3.2)$$

Eşitlik 3.1'de h akış kesitinin kalınlığını ve p' şerit kalıp içi akış uzunluğunca ölçülen basınç gradyanını temsil etmektedir. Eşitlik 3.2'de R, kapileri kalıp yarıçapını ve L akış uzunluğunu temsil etmektedir. Eşitlik 3.3'te yer alan  $\Delta P$  ise basınç değişimini göstermektedir. Eğer basınç profili doğrusal ise şerit kalıp için  $\Delta P$  Eş. 3.3'teki gibi olmalıdır.

$$\Delta P = P_1 - P_2 = P_2 - P_3 \quad (3.3)$$

Basınç gradyanı p' şerit ve kapileri kalıp için Eş. 3.4'te verilen eşitlikle hesaplanmaktadır.

$$p' = \frac{\Delta P}{L} \quad (3.4)$$

Ergiyikteki, görünür kayma hızı ( $\dot{\gamma}_a$ ) şerit kalıp için Eş. 3.5 ve kapileri kalıp için Eş. 3.6 kullanılarak hesaplanmaktadır.

$$\dot{\gamma}_a = \frac{6.Q}{w.h^2} \quad (3.5)$$

$$\dot{\gamma}_a = \frac{32.Q}{\pi.D^3} \quad (3.6)$$

Eşitlik 3.5-3.6'da yer alan w, şerit kalıp genişliği ve Q, hacimsel debiyi temsil etmektedir. Bu durumda, görünür viskozite ( $\eta_a$ ) şerit kalıp için Eş. 3.7 ve kapileri kalıp için Eş. 3.8 kullanılarak hesaplanabilmektedir.

$$\eta_a = \frac{\tau_a}{\dot{\gamma}_a} = \frac{\Delta P.h^3.w}{12.Q.L} \quad (3.7)$$

$$\eta_a = \frac{\tau_a}{\dot{\gamma}_a} = \frac{\pi.\Delta P.R^4}{8.Q.L^2} \quad (3.8)$$

Eşitlik 3.1-3.8 incelendiğinde, kayma gerilmesi değeri hesaplanmadan önce akış uzunluğu boyunca meydana gelen basınç değişimleri ölçülerek basınç gradyanlarının hesaplanmasının gerektiği görülmektedir.

Ek olarak, şerit kalıplar için kesitin sonsuz genişlikte olduğu ve genişlik, yüksekliğin 10 katından fazla olduğu tasarımlar için kenar etkisini görmezden gelmenin mümkün olduğundan bahsedilmişti [18,19]. Genişliğin, yüksekliğin 10 katından daha az olduğu durumlar için ise kalıp yüzeylerinde hesaplanan görünür kayma gerilmesi ( $\tau_a$ ) düzeltilmiş kayma gerilmesi ( $\tau_w$ ) Eş. 3.9 ile hesaplanmaktadır [24].

$$\tau_w = \frac{h}{2\left(1+\frac{h}{w}\right)} \frac{\Delta P}{L} \quad (3.9)$$

$$\tau_w = \frac{\Delta P \cdot R}{2 \cdot L} \quad (3.10)$$

Ölçme kaynaklı gerçekleşebilecek hataların sonuçlara olan etkisini azaltmak için kullanılan birçok düzeltme vardır [36]. Polimerik akışkanlar gibi Newtonun viskozite kanuna uymayan akışkanlar için kullanılan en yaygın düzeltmeler Rabinowitsch düzeltmesi [27,38,39] ve Bagley düzeltmeleridir.

### Düzeltilmeler

Bu bölümde kapileri ve şerit kalıplar için en yaygın kullanılan düzeltilmelerden olan Weissenberg-Rabinowitsch düzeltmesi ve Bagley düzeltilmelerinden bahsedilmiştir.

#### *Weissenberg-Rabinowitsch düzeltmesi*

Rabinowitsch düzeltmesi; kapileri ve şerit kalıp reometrelerinden elde edilen görünür değerleri, gerçek verilere dönüştürmek için kullanılan en yaygın düzeltme faktörüdür [18,33]. Kararlı ve basit bir kayma hızı akışı kontrol edilebilirdir çünkü hız profilleri eriyiğin içerisinde aktığı plakaların geometrisine ve hareketine bağlıdır. Ancak, kapileri ve şerit kalıp içerisinde meydana gelen tam gelişmiş bir akış için tamamen kontrol edilebilir olduğu söylenememektedir. Çünkü hız profilleri malzemenin özelliklerinden de etkilenebilmektedir. Bu nedenle, görünür viskozite hesabı için kullanılan eşitlikler polimer eriyik davranışları tam olarak temsil etmemektedir. Polimer eriyiklerin kayma hızı değerlerinin

hesaplanmasında daha doğru sonuçlar elde etmek amacıyla kayma gerilimi–kayma hızı eğrisi eğimi için Weissenberg-Rabinowitsch düzeltmesinin kullanılması uygun olacaktır [37]. Yukarıda bahsedilen eşitliklerden elde edilen görünür değerler aşağıda verilen Eş. 3.11 ve Eş. 3.12 kullanılarak gerçek değerler elde edilebilir [38-41].

$$n = \frac{\partial \log(\tau_w)}{\partial \log(\dot{\gamma}_a)} \quad (3.11)$$

$$\dot{\gamma}_w = \left[ \frac{3n+1}{4n} \right] \cdot \dot{\gamma}_a \quad (3.12)$$

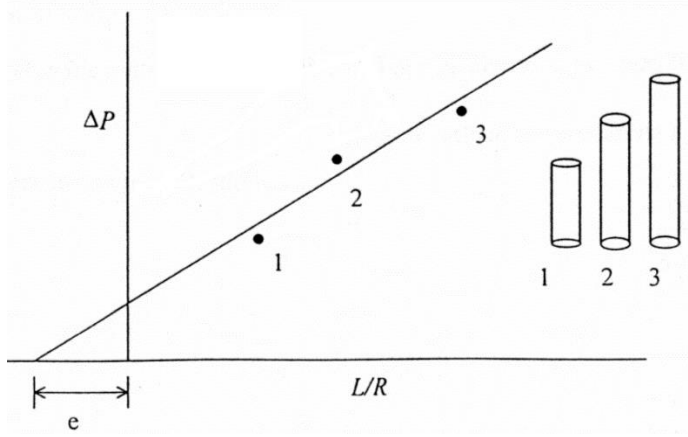
Burada;  $\dot{\gamma}_w$  düzeltilmiş (gerçek) kayma hızı ve n kayma hassasiyeti değerini etmektedir. Kayma hassasiyeti bazı kaynaklarda power-law index (güç kanunu indeksi, akış üssü) ya da newtonyen akıştan sapma derecesi olarakta adlandırılmaktadır.

#### *Bagley Düzeltmesi*

Akış eğrileri; kalıp geometrisi, hacimsel debi ve kalıpta meydana gelen basınç kaybı gibi birçok parametreden etkilenmektedir. Kalıp geometrisi sabittir, hacimsel debi ise çıkan üründen kolayca hesaplanabilir. Oysa, basınç düşüşü değerleri oldukça küçük olduklarından dolayı kovan içerisinden ve kalıp boşluğundan geçip atmosfer basıncına ulaşmaya kadar birçok giriş ve çıkış faktörlerinden kolaylıkla etkilenebilmekte ve değişebilmektedir. Bu yüzden hesaplamasında da birtakım zorluklar vardır. Bagley düzeltmesi, bu gibi durumlarda karşılaşılan basınç etkilenmelerini ortadan kaldırmak için kullanılır [26]. Bagley düzeltmesi şerit kalıplar için kullanılmazlar [33]. Kapileri kalıplar için Bagley düzeltmesi kullanılarak elde edilen gerçek kayma gerilmesi Eş. 3.13 kullanılarak hesaplanabilmektedir.

$$\tau_w = \frac{P}{4 \cdot \left( \frac{L}{D} + e \right)} \quad (3.13)$$

Burada, e Bagley düzeltme faktörüdür ve aşağıda Şekil 3.7'de gösterildiği gibi elde edilir.



Şekil 3.7. Bagley düzeltme faktörünün elde edilmesi

## 4. LİTERATÜR TARAMASI

Literatür incelendiğinde reolojik özelliklerin şerit ve kapileri kalıp kullanılarak tespitine yönelik yapılmış çok sayıda çalışmaya rastlamak mümkündür. Bu bölüm içerisinde şerit ve kapileri kalıp kullanılarak yapılmış reoloji çalışmaları özetlenmiştir.

### 4.1. Enjeksiyon Makinelerinde Kılcal Kalıp Kullanımı

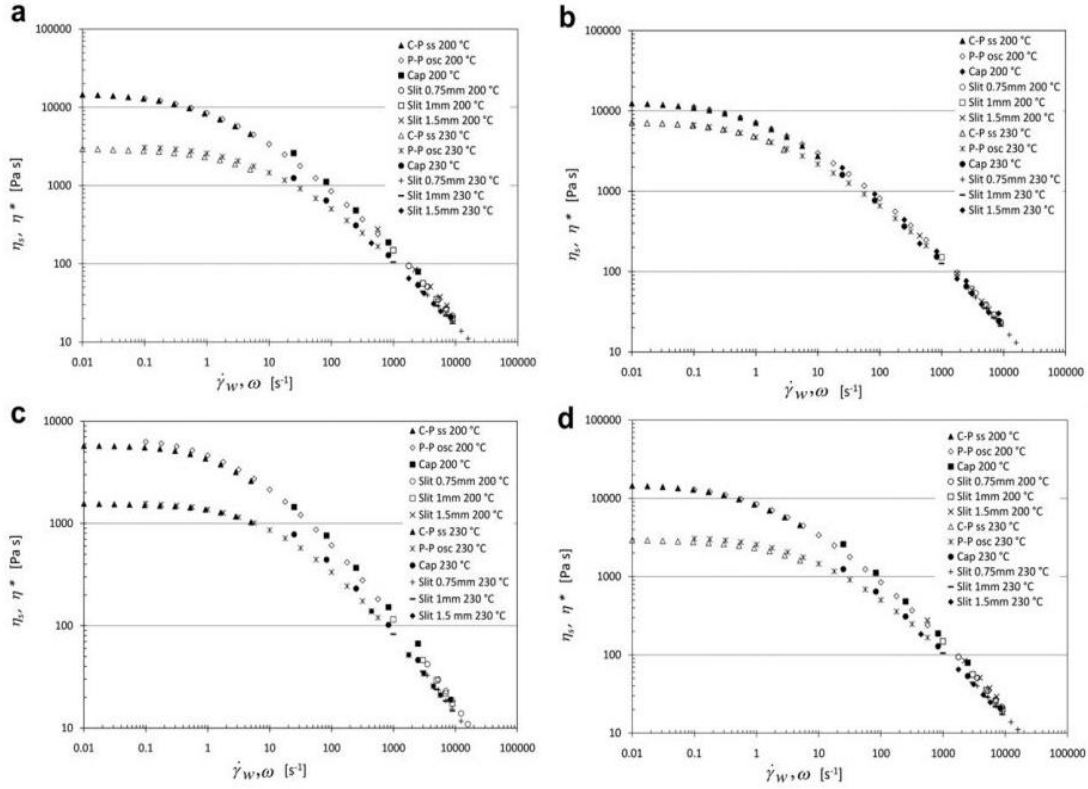
Bu bölümde, literatürde karşılaşılan kapiler ve şerit kalıp uygulamaların enjeksiyon makinelerinde uygulandığını gösterir çalışmalara yer verilmiştir.

Couch ve Binding (2000) yaptıkları çalışma ile 5 polimer eriyiğın farklı 3 sıcaklıkta yüksek yoğunluklu polietilen (HDPE için 150 °C, 170 °C ve 200 °C), düşük yoğunluklu polietilen (LDPE için 170 °C, 200 °C ve 230 °C), polipropilen (PP için 190 °C, 200 °C ve 230 °C), polimetilmetakrilat (PMMA için 220 °C, 230 °C ve 240 °C) ve polistiren (PS için 180 °C, 200 °C ve 230 °C) reolojik özelliklerini kapileri reometre kullanarak incelemiştirlerdir. Tasarlanan kapileri reometre ile kayma hızı ölçüm aralığını 50-2500 s<sup>-1</sup> değerleri arasında elde etmişlerdir [42].

Bariani ve diğerleri (2007) yaptıkları çalışmada, enjeksiyon makinelerin polimer eriyiklerin reolojik özelliklerine plastikleştirme fazının etkisinin değerlendirilebilmesi için bir şerit kalıp tasarlanmıştır. Tasarlanan ve üretilen şerit reometre için elde edilen verileri değerlendirmek amacıyla aynı test koşulları altında CEAST marka kılcal bir ticari reometre kullanılmıştır. Deneylerde PC ve PP malzeme kullanılmıştır. Malzemeler deneyden önce 120 °C'de 4 saat boyunca kurutulmuştur. Deney sıcaklığı 220 °C, 240 °C ve 260 °C'dir. Çalışmada tasarlanan şerit kalıp ile kayma hızı 12000 s<sup>-1</sup> değerine kadar elde edilmiştir [43].

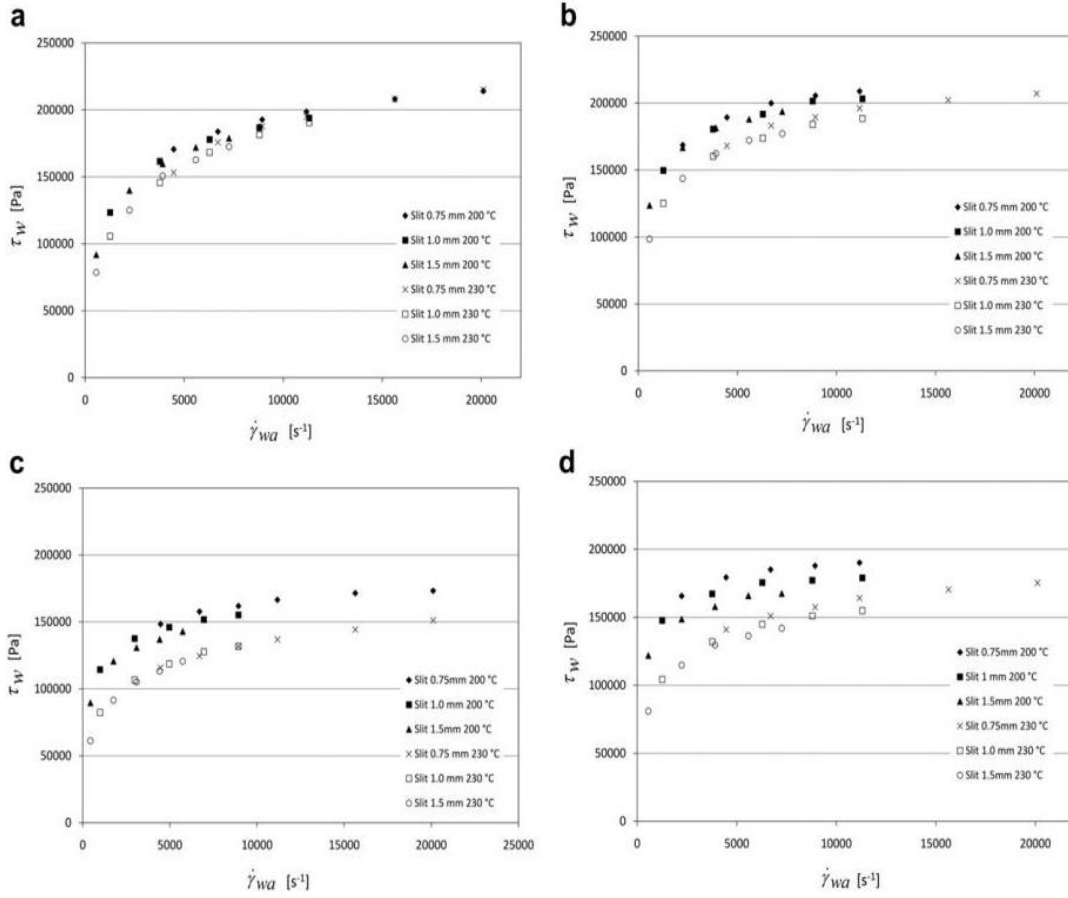
Johanna ve Seppo (2011) yaptıkları çalışmada enjeksiyon makinelerin çıkışına bağlanan ve polimer eriyiklerinin reolojik özelliklerinin tespitine yönelik genişliği sabit (15 mm) olan 3 adet farklı h yüksekliğinde (0.75, 1.0 ve 1.5 mm) şerit kalıp tasarımı yapmışlardır. Bu kalıplardan elde ettikleri reolojik özellikleri ticari reometrelerden elde ettikleri sonuçları ticari kapileri reometre (Göttfert Reograph 6000 model ve L/D=20 ) ve ticari rotasyonel reometreden (Anton Paar MCR301 tipi reometre, plate-plate ve cone-plate tipte) elde ettikleri sonuçlar ile karşılaştırmışlar. Deneyler PP ve PS malzemeler için 200 °C ve 230

°C’de gerçekleştirilmiştir [44]. Şekil 4.1-4.2 incelendiğinde ticari reometreler ile şerit ve kapileri reometrelerden elde edilen sonuçların aynı grafik içerisinde yorumlandığı görülmektedir. Elde edilen akış eğrileri ve viskozite değerlerinin ticari reometreler ve kalıp aparatlarından elde edilen sonuçlar için oldukça uyum içerisinde olduğu görülmektedir.



Şekil 4.1. Viskozite değerleri a) PP b) PP c) PS d) PS

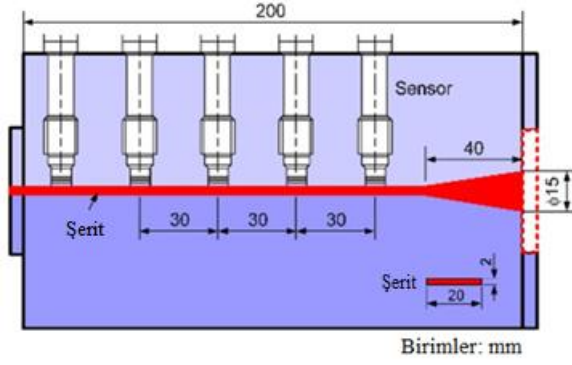
Şekil 4.1’de görülen *Cap*, ticari kapileri reometreyi, *C-P ss* ticari rotasyonel (cone-plate) reometreyi, *P-P Osc*, ticari rotasyonel (plate-plate) reometreyi, slit şerit kalıptan elde edilen sonuçları temsil etmektedir.



Şekil 4.2. 200 °C ve 230 °C Akış eğrileri a) PP b) PP c) PS d) PS

Moon ve Lee (2013) plastik enjeksiyon makinesinin çıkışına reolojik özelliklerin tespit edilmesi amacıyla  $l=160$  mm uzunluğunda,  $h=2$  mm yüksekliğinde ve  $w=20$  mm genişliğinde bir şerit kalıp aparatı tasarlamışlardır (Bkz. Şekil 4.3). Yaptıkları bu çalışma ile %40 cam elyafı içeren polikarbonat (PC) malzemesi için görünür kayma hızı  $300 \text{ s}^{-1}$  ve  $8000 \text{ s}^{-1}$  aralığındaki değerleri elde etmeyi başarmışlardır. Çalışmada, ölçülen değerler için Cross-WLF modeli kullanılarak viskozite değerleri hesaplanmıştır. Deneyler  $290 \text{ °C}$ ,  $305 \text{ °C}$  ve  $320 \text{ °C}$  sıcaklık değerleri için şerit kalıpta gerçekleştirilmiştir ve deneysel sonuçlardan hesaplanan sayısal değerler literatüre oldukça yakın çıkmıştır [45].





Şekil 4.3. Şerit kalıp setinin şematik gösterimi

Fernandez ve diğerleri (2014) yaptıkları çalışmada, viskozite eğrilerini elde etmek ve reolojik olarak malzemeyi karakterize etmek için bir yöntem geliştirmişlerdir. Geliştirilen yöntem, bir malzemenin reolojik davranışını doğrudan etkileyen parametrelere enjeksiyon makinesinin çıkışına bir şerit kalıp bağlanarak müdahale etme prensibine dayanmaktadır. Çalışmada, %10 mineral katkı PP malzeme kullanılmıştır. Deneyle 3 farklı sıcaklık değeri için (200 °C, 220 °C ve 240 °C) 6 farklı vida hızın (3.2 mm/s, 18.6 mm/s, 37.3 mm/s, 80 mm/s, 112 mm/s ve 128 mm/s) için gerçekleştirilmiştir. Çalışma için tasarlanan şerit kalıp boyutları  $l=180$  mm,  $w=20$  mm ve  $h=3$  mm şeklindedir. Tasarlanan kalıp ile kayma hızı  $50-10000$  s<sup>-1</sup> aralığındaki değerler elde edilmiştir. Elde edilen sonuçları ticari bir reometre ile ölçülen değerler ile karşılaştırmıştır. Farklı deneyler için şerit kalıp ve ticari reometre arasındaki fark %10'dan daha az çıkmıştır [46].

#### 4.2. Ekstrüder Makinelerinde Kılcal Kalıp Kullanımı

Bu bölümde, literatürde karşılaşılan kapiler ve şerit kalıp uygulamaların ekstrüder makinelerinde uygulandığını gösterir çalışmalara yer verilmiştir.

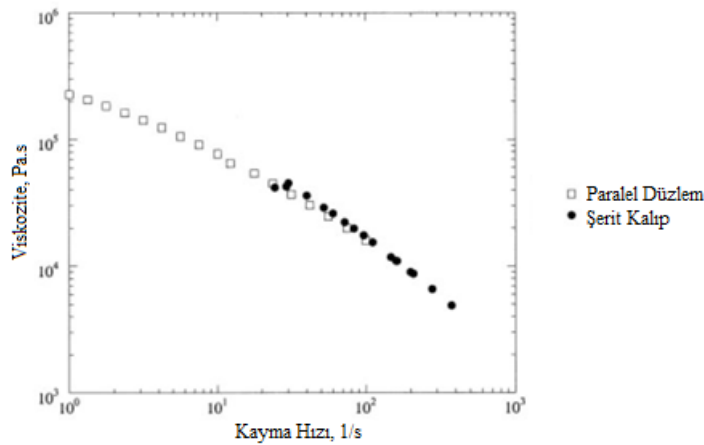
Pilar ve diğerleri (1993) yapmış oldukları çalışma ile ekstrüder makinelerde LCPs (copolyester ve poliesteramid) malzemesi için hem şerit kalıpta hem de kapileri kalıpta ( $L/D=30$ ) viskozite ölçümleri yapmıştır. Sonuçlar literatürdeki LCPs malzemelere ait datalar ile oldukça uyum içerisinde çıkmıştır [47].

Hay ve Mackay (1999) yaptıkları çalışmada ekstrüder makinesinin çıkışı için bir adet şerit kalıp ve bir adette kapileri kalıp reometresi geliştirmişlerdir. Geliştirilen bu şerit ve kapileri kalıp reometreleri için hesaplanan reolojik özelliklerin doğruluğunu karşılaştırmak amacıyla

aynı deneyleri ticari bir paralel düzlem reometresinde de yapmışlardır. Birçok farklı deney için, şerit ve kapileri kalıp yardımıyla hesaplanan reolojik değerler paralel düzlem reometresi ile oldukça yakın çıkmıştır. Sonuçlar arasındaki küçük farkların aşağıdaki faktörlerden kaynaklanabileceğini belirtmişlerdir [48];

- Duvar kayma etkisi,
- Basınca bağlı viskozite etkisi,
- Viskoz sıcaklığının etkisi,
- Isı transferinin etkisi,
- Girişte ve çıkışta meydana gelen etkiler,

Joseph ve diğerleri (2000) yaptıkları çalışmayla ekstrüder CO<sub>2</sub> gazı ile plastikleştirilen PS malzemenin reolojik özelliklerine hem kendi tasarımları olan şerit kalıp reometre hem de ticari bir reometre olan RMS 800 paralel düzlem reometresi ile karşılaştırdılar. Yapılan çalışma için üretilen kalıp ekstrüderin çıkışına monte edilmiştir ve 200 °C eriyik sıcaklığı için değerlerinde deney gerçekleştirilmiştir. Şerit kalıp reometresinden elde edilen sonuçlar ile ticari reometreden elde edilen sonuçlar birbirlerine oldukça yakın çıkmıştır. Ancak şerit kalıptan elde edilen kayma hızı ve viskozite değerleri ölçüm aralığı ticari reometrenin ölçüm aralığından daha dar bir alana sahiptir (Bkz. Şekil 4.4) [49].



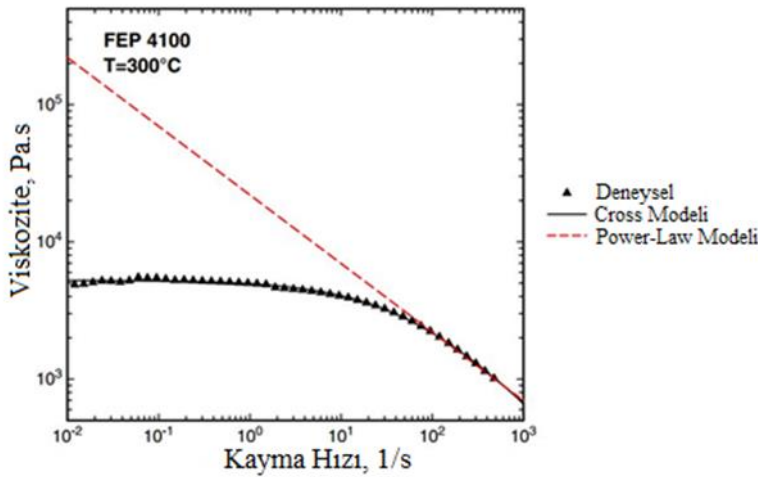
Şekil 4.4. PS malzeme reometre karşılaştırmaları (200°C)

Shiau ve Yeh (2004) yapmış oldukları çalışmada, l=80 mm, w=6 mm ve h=2 mm boyutlarında bir şerit kalıp üretimi gerçekleştirmişlerdir. Üretilen şerit kalıp tek vidalı bir ekstrüder makinenin çıkışına monte edilmiş ve reolojik özelliklerin ölçülmesi

hedeflenmiştir. Şerit kalıp ile kayma hızı değerleri  $10\text{-}500\text{ s}^{-1}$  aralığındaki değerler ölçülebilmştir. Şerit kalıptan elde edilen reolojik değerler RH 7-2 model bir ticari reometreden elde edilen değerlerle karşılaştırılmıştır. Karşılaştırma sonucu ticari reometreden elde edilen sonuçlar ile şerit kalıptan elde edilen sonuçların oldukça yakın olduğu yönündedir [50].

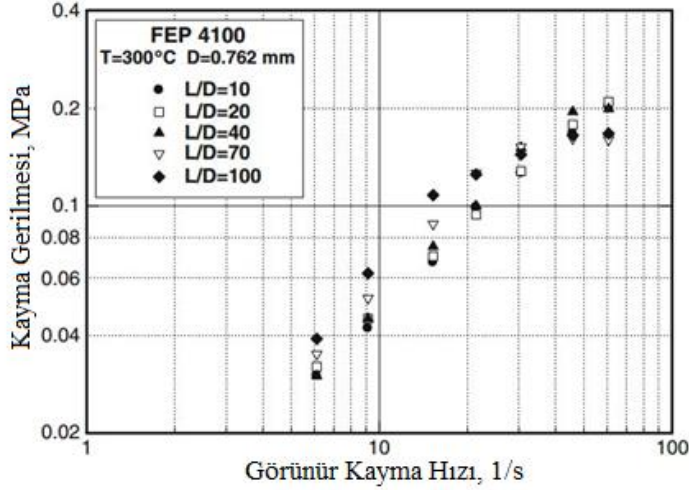
Wang ve diğerleri (2010) yaptıkları çalışma ile reolojik özelliklerin tespiti için  $l=115\text{ mm}$  ve  $D=1.8\text{ mm}$  boyutlarında olan bir kapileri kalıp tasarladılar. Tasarlanan bu kalıp ile kayma hızı  $2.10^5\text{ s}^{-1}$  değerlerine kadar ölçüm yapmayı başardılar. Kapileri kalıptan elde ettikleri reolojik verileri karşılaştırmak için Couette tipi dönel bir reometre cihazı kullandılar. İki yöntemle elde edilen reolojik veriler birbirlerine oldukça yakın çıkmıştır [51].

Mitsoulis ve diğerleri (2011) yaptıkları çalışma da ekstrüder makineleri için farklı L/D oranlarına sahip ( $L/D=10, 20, 40, 70, 100$ ) kapileri kalıp tasarımı yaptılar. Deney malzemesi olarak FEP (Fluorinated ethylene propylene ya da bilinen ticari adıyla Teflon) kullandılar. Deneyleri  $300\text{ }^{\circ}\text{C}$ 'de gerçekleştirdiler. Kapileri kalıptan elde edilen deneysel viskozite değerlerini Cross ve Power-Law viskozite modellerinden hesapladıkları değerler ile karşılaştırdılar. Çalışmada, farklı L/D oranları için elde edilen viskozite değerleri kendi aralarında ve literatürle uyum içerisinde çıkmıştır [52]. Şekil 4.5'ten görüldüğü üzere Cross viskozite modeli deneysel sonuçlar ile oldukça uyumludur. Power-Law viskozite modeli ise kayma hızı değerinin  $10^2\text{ s}^{-1}$  değerinden daha büyük değerler ve viskozite değerinin  $10^4\text{ Pa.s}$  değerinden daha küçük değerleri için deneysel verilere yakın çıkmıştır.



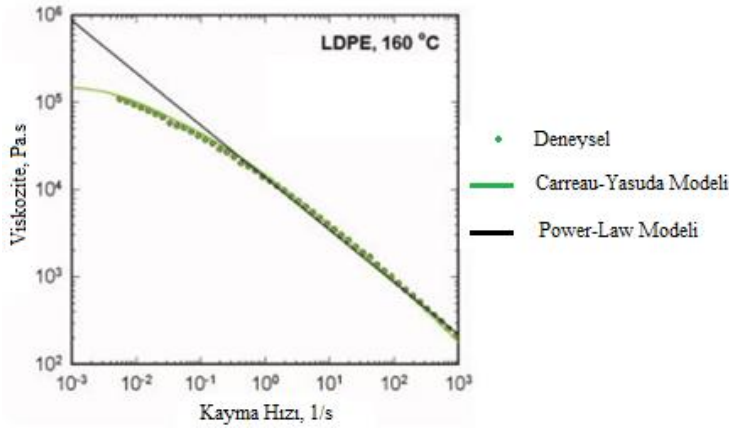
Şekil 4.5. FEP malzemesi için elde edilen verilerin modellerle karşılaştırılması

Mitsoulis ve diğeri yapmış oldukları bu çalışmayla, elde edilen reolojik eşitliklerin farklı L/D (Bkz. Şekil 4.6).



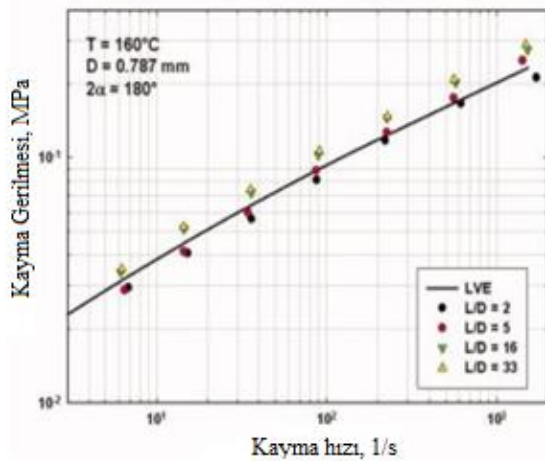
Şekil 4.6. Farklı L/D oranına sahip kalıplardan elde edilen sonuçların kıyaslanması

Ansari ve diğeri (2012) yaptıkları çalışma ile ekstrüder makineleri için hem aynı L/D oranlarında ( $L/D=20$ ) ancak farklı L, uzunluğu ve D çapı ile hem de farklı L/D oranları için ( $L/D=0, 2.5, 5, 16$  ve  $33$ ) birçok kapileri kalıp üretimi yapmışlardır. Deneylerini  $160^{\circ}\text{C}$ 'de LDPE (Alçak yoğunluklu polietilen) malzeme için yapmışlardır. Yapılan çalışmada, kapileri kalıplardan elde edilen reolojik veriler Anton Paar MCR-501 marka ticari reometreden elde edilen veriler ile karşılaştırılmıştır. Elde edilen sonuçlar birbirine oldukça yakın çıkmıştır. Ayrıca, deneysel verilerden elde edilen viskozite değerlerinin literatürde sıklıkla kullanılan viskozite modellerinden hangisine daha çok uyduğu da çalışmada tespit edilmiştir. Deneysel verilere en yakın viskozite modeli Carreau-Yasuda daha sonra da Power-Law modeli çıkmıştır (Bkz. Şekil 4.9) [53].



Şekil 4.7. LDPE malzemesi için deneysel sonuçların modellerle karşılaştırılması

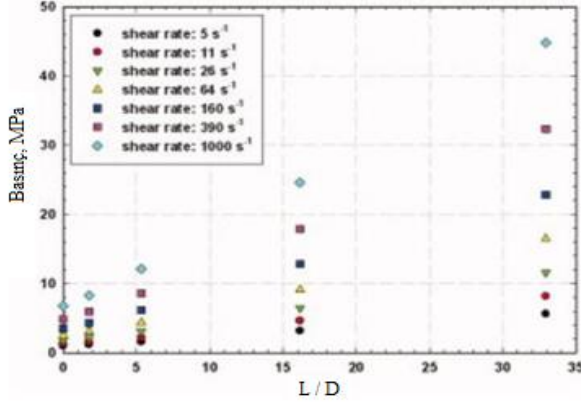
Ansari'nin çalışmasında elde edilen deneysel veriler ile hesaplanan Carreau-Yasuda ve Power-Law viskozite modellerinden elde ettikleri verilerden çizilen grafik Şekil 4.10'da verilmiştir. Verilen grafikten görüldüğü üzere, Carreau-Yasuda viskozite modeli, deneysel verilere oldukça yakın çıkmıştır. Power-Law viskozite modeli ise, deneysel verilere yakın bir eğriye sahip olsa da kayma hızının küçülmesiyle ve viskozite değerinin büyümesiyle deneysel verilerden sapmaktadır. Aşağıda verilen Şekil 4.10 incelendiğinde, aynı sıcaklık değeri ve aynı malzeme için ticari reometreden elde edilen veriler ile L/D oranı farklı olan kapileri kalıptan elde edilen değerler oldukça uyumludur. İlgili çalışmada, ticari reometreden elde edilen değerlere en yakın değerler, L/D oranı LDPE malzeme için 160 °C'de 5'tir. Ancak, diğer L/D oranları da ticari reometreden elde edilen sonuçlara oldukça yakındır.



Şekil 4.8. LDPE malzemesi için kalıplardan ve ticari reometreden elde edilen sonuçlar

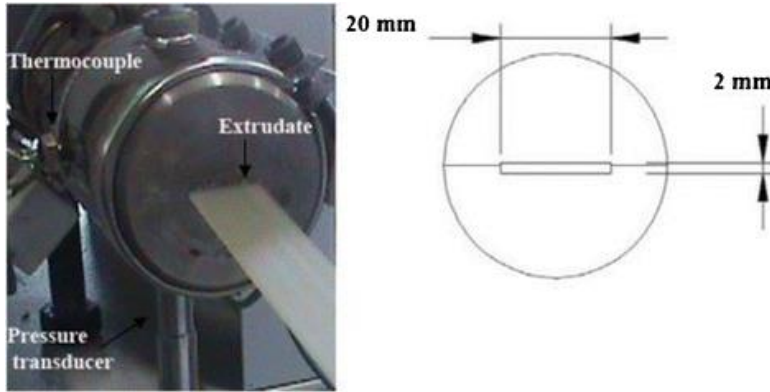
Şekil 4.11'de çizdirilen grafikte ise farklı L/D oranları için (L/D=0, 2.5, 5, 16, 33) elde edilmiş kayma hızı değerlerine ulaşmak için uygulanması gereken basınç büyüklükleri

gösterilmiştir. Kalıp uzunluğunun, kalıp çapına olan oranı arttığı zaman, aynı kayma hızı değerlerinin daha büyük basınçlarla elde edildiği gözükmektedir.



Şekil 4.9. Farklı L/D oranları için elde edilen kayma hızı değerleri

Mosab ve diğerleri (2013) yaptıkları çalışma ile TPS (termoplastik nişasta ve granül) malzemeleri için tek vidalı bir ekstrüder makinenin çıkışına  $w=20$  mm ve  $h=2$ mm boyutlarında bir şerit kalıp tasarımı yapmışlardır (Bkz. Şekil 4.12). Farklı sıcaklıklarda (110, 130 ve 140 °C) ve farklı ekstrüder vida hızlarında (10, 15, 20, 25, 30 ve 35 rpm) reolojik özellikler hesaplanmıştır. Elde edilen reolojik özellikler, literatürdeki benzer çalışmalara uyum içerisinde çıkmıştır [54].



Şekil 4.10. Ekstrüder üzerinde şerit kalıp gösterimi

Teixeira ve diğerleri (2014) mini bir çift vidalı ekstrüderin (ekstrüder çapı 10 mm ve  $L/D=26$ ) ucuna farklı yüksekliklere sahip ( $h_1=0.5$  mm ve  $h_2=1$  mm) 2 adet şerit kalıp tasarlamışlardır. Polistiren (PS) ve polimetil metakrilat (PMMA) malzemelerini farklı hacimsel oranlarda karıştırmış ve 230 °C'de farklı vida dönüş hızları için görünür kayma

hızlarını elde etmişlerdir. Mini ekstrüder makine için 230 °C ve 5 rpm'de görünür kayma hızı değerini  $10 \text{ s}^{-1}$ , 20 rpm'de  $24 \text{ s}^{-1}$ , 50 rpm'de  $63 \text{ s}^{-1}$  ve 100 rpm'de  $130 \text{ s}^{-1}$  olarak hesaplamışlardır. Elde edilen bu sonuçların benzer çalışmalarla uyum içerisinde olduğu vurgulanmıştır. Ayrıca, çalışmada malzemenin morfolojisini, tanecik yapısını ve eriyik malzemenin kalıp içerisindeki hız vektörlerini incelemek amacıyla kalıp üzerine bir gözetleme bölgesi de yapılmıştır [55].

Silva ve diğerleri (2015) polistiren (PS) malzemelerin reolojik özelliklerini belirlemek amacıyla çift vidalı bir ekstrüder makinenin çıkışına bağlanmak üzere 2 adet farklı boyutta şerit kalıp tasarlamışlardır. Bu kalıplar 1:130 mm uzunluğunda, h:1,5 mm yüksekliğinde ve  $w_1:7,5 \text{ mm}$   $w_2:15 \text{ mm}$  genişliğindedir. Çalışmada, şerit kalıplardan hesaplanan sonuçlar, ARES marka ticari rostasyonel (dönel) reometreden (disk çapı 25 mm) elde edilen sonuçlar ile kıyaslamışlardır. Tüm deneyler, 70 rpm ekstrüder vida hızı ile 200 °C, 230 °C ve 260 °C için gerçekleştirilmiştir. Şerit kalıplar üzerine 3'er adet eşit mesafede basınç transdüseri yerleştirmiş ve bu 3 noktada meydana gelen basınçlar ölçülmüştür. Yapılan iki kalıp içinde elde edilen verilerden hesaplanan reolojik özelliklerin sayısal büyüklükleri, ticari reometreden elde edilen deney sonuçlarından maksimum %15 uzaklıkta çıkmıştır [56].

Kopplmayr ve diğerleri (2016) yaptıkları çalışmada, reolojik özelliklerin hesaplanması amacıyla çirif vidalı ekstrüder makinesi için farklı uzunluk ve genişlik değerlerinde şerit yüksekliği  $h_1=0,5 \text{ mm}$  ve  $h_2=2 \text{ mm}$  olan toplamda 6 adet şerit kalıp tasarlanmıştır. Deneylerde, polipropilen (PP) malzeme kullanılmıştır ve deney sıcaklığı 220 °C, 230 °C, 240 °C'dir. Yapılan çalışmayla kayma hızı büyüklükleri  $10 \text{ s}^{-1}$  ve  $1000 \text{ s}^{-1}$  aralığındaki değerler hesaplanabilmiştir. PP malzemeler için hesaplanan sonuçlar ticari bir reometre olan Sentmanat Extensional Rheometer (SER) ile kıyaslanmıştır. Şerit kalıptan elde ettikleri sonuçlar SER ile oldukça yakın çıkmıştır [57].

Literatürde incelendiğinde kapileri ve şerit kalıplar aracılığıyla reolojik özelliklerin tespitine yönelik birçok çalışmanın mevcut olduğu görülmektedir. İncelenen çalışmalarda çoğunlukla kapiler ve şerit kalıplardan hesaplanan reolojik özelliklerin ticari reometrelerden elde edilen reolojik özellikler ile kıyaslandığı görülmüştür. Kılcal kalıplardan hesaplanan reolojik özellikler, farklı ticari reometrelerden elde edilen reolojik özelliklere oldukça yakın değerlerde çıktığı görülmüştür. İncelenen literatür çalışmalarından yola çıkarak kapileri ve şerit kalıplar için;

- Bu kalıplardan elde edilen deneysel verilerin ticari reometrelerden elde edilen değerler ile uyum içerisinde olması,
- Ekonomik ve pratik olması,
- Modüler olarak tasarlanabilir olması,
- Kalıpların makineye takma ve sökme işlemlerinin kolay olması,
- Geometrisinin basit oluşu ve geleneksel imalat yöntemleriyle üretilebilir olması,
- Özellikle kapileri kalıp içerisinde gerçekleşen akış profilinin oldukça basit olması gibi sebeplerden dolayı tercih edilmesinin uygun olduğu görülmektedir.

Literatürde, görülen kayma hızı değerleri aşağıdaki Çizelge 4.1 ile özetlenmiştir. Bu bağlamda çizelge içerisinde yer alan çalışmalar arasında ulaşılan en yüksek kayma hızı değerinin  $25000 \text{ s}^{-1}$  olduğu görülmektedir. Elde edilen kayma hızı değerlerinin sıcaklık, basınç, devir gibi parametrelerden etkilendiği görülmüştür. Bu tez çalışmasında, Petkim firmasının ürettiği yerli Petoplen MH 418 kodlu PP malzemesi reolojik olarak karakterize edilmiştir. Bu malzeme Tübitak 115M041 kodlu projede karbondioksit hücrelerini oluşturan polimer kap malzemesi olarak kullanılması düşünülmektedir. Yerli olarak üretilebilir olmasının yanında, ısı iletim katsayısının düşük olması da bu malzemenin seçilmesinde belirleyici olmuştur.

PP malzemenin reolojik özelliklerini karakterize etmek üzere Tübitak 115M041 nolu proje kapsamında alınan Novoma NTB 30/25D markalı tek bidalı ekstrüder kullanılmıştır. Ekstrüder üzerine bir adet tutucu kafa tasarlanmış ve üretilmiştir. Kalıplar iki farklı çapa ve her çap üç farklı akış uzunluğuna sahiptir. Buradaki amaç çok ince kesitli olması gerektiği hesaplanan karbondioksit hücresinin kap cidar kalınlığı için hem üretilebilirliğini araştırmak hem de üretime yönelik proses parametrelerini belirleyebilmektedir.



Çizelge 4.1. Literatürde elde edilen kayma hızı değerleri

Yazar, Kaynak	Kullanılan Malzeme	Deney Sıcaklığı, °C	Elde Edilen Kayma Hızı değerleri, s <sup>-1</sup>	Kalıp tipi
Gökgöz (2008), [14]	HDPE	190	30-830	Kapileri
Couch ve Binding (2000), [42]	HDPE, LDPE, PP, PS	150-230	50-2500	Kapileri
Bariani vd. (2007), [43]	PC, PP	220-260	Max. 12000	Kapileri
Johanna ve Seppo (2011), [44]	PP, PS	200 ve 230	Max. 20000	Şerit
Moon ve Lee (2013), [45]	PC	290, 305 ve 320	300 - 8000	Şerit
Fernandez vd. (2014), [46]	PP	200, 220 ve 240	50-10000	Şerit
Joseph vd. (2000), [49]	PS	200	Max 600	Şerit
Shiau ve Yeh (2004), [50]	Kompozit	230	10-500	Şerit
Wang vd. (2010), [51]	Kompozit	220	20000	Şerit
Mitsoulis vd. (2011), [52]	FEP	300	Max. 100	Kapileri
Ansari vd. (2012), [53]	LDPE	160	5-1000	Kapileri
Mosab vd. (2013), [54]	TPS	110, 130 ve 140	Max. 8000	Kapileri
Teixeira vd. (2014), [55]	PS, PMMA	230	10-130	Şerit ve Kapileri
Silva vd. (2015), [56]	PS	200, 230 ve 260	100-2000	Şerit
Kopplmayr vd. (2016), [57]	PP	220, 230 ve 240	10-1000	Şerit

## 5. AKIŞ TIPLERİ VE VİSKOZİTE MODELLERİ

Bu bölümde akış tiplerinden ve yaygın olarak kullanılan viskozite modellerinden bahsedilecektir.

### 5.1. Akış Tipleri

Temelde, akışkan malzeler için kayma ve uzama akışı olarak adlandırılan komşu partiküllerin hareketi ile meydana gelen iki tip akma tipi vardır. Birbirlerine komşu olan partiküllerin birbirlerinden uzağa ya da yakına hareket etmesiyle uzama akışını, birbirlerinin yakınından ya da üzerinden geçerek de kayma tipi akışı meydana getirirler.

Hareket halindeki akışkan temas içerisinde olduğu akışkana ya da katıya akma anında enerji kaybederse yavaşlar ve bu tip temastan yani sürtünmeden kaynaklanan enerji kaybının etkisiyle hız azalır. Bu olaya viskozite (akmazlık, ağırlıklık) denilen olay sebep olmaktadır. Doğada bulunan tüm akışkanlar için akışkan tabakanın birbiri üzerinden kaymasına ya da hareket etmesine karşı bir direnç vardır. Akışkan malzemenin akmaya/kaymaya karşı gösterdiği bu dirence viskozite denilmektedir.

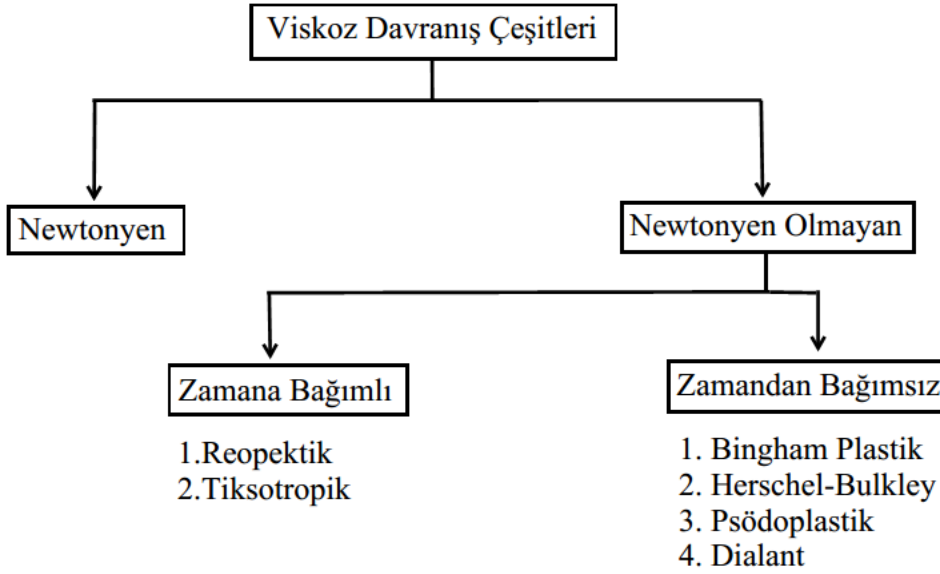
#### 5.1.1. Newtonun viskozite kanunu

Akışkan malzemeler kayma gerilmesine maruzken şekil değiştirerek sürekli akarlar. Akma sonucunda, buldukları kabın ve bölgenin şeklini alma eğilimine girerler. Özetle, akışkanlar kayma gerilimine maruz kaldıkları süreler boyunca akmaya devam ederler. Bu konu; Isaac Newton'un viskozite kanunuyla aşağıda verilen Eş. 5.1 ile temsil edilir.

$$\tau = \mu \frac{\partial v}{\partial y} \quad (5.1)$$

Eşitlik 3.14'te verildiği üzere, kayma gerilmesi büyüklüğü viskozite ve kayma hızı değerlerinin çarpımına eşittir. Kısaca, bir akışkan sabit sıcaklıkta, uygulanan bir kayma gerilmesi büyüklüğüne doğru orantılı bir hızla şekil değiştirmektedir. Uygulanan kayma hızının artırılması sonucu akışkanın sahip olduğu özellikler değişmemektedir. Bu kanuna uyan akışkanlara Newtonun Viskozite Kanununa uyan akışkanlar denir.

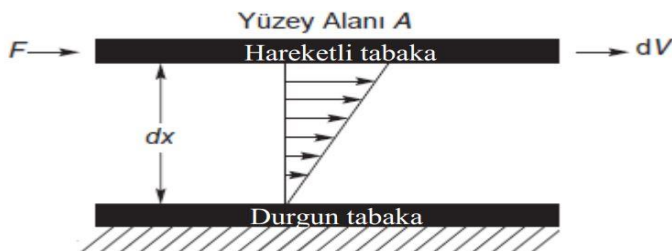
Bu kanunu göz önünde bulundurarak akışkanları 2 gruba ayırmak mümkündür. Birincisi Newtonun viskozite kanuna uyan akışkanlar yani Newtonyen Akışkanlar, ikincisi ise newtonun akışkanlar kanununa uymayana yani Newtonyen olmayan akışkanlardır. Bu iki akışkan grubu da kendi içerisinde özelliklerine göre ayrılmaktadır. Şekil 5.1’de bu akışkanların sınıflandırılmış hali verilmiştir.



Şekil 5.1. Viskoz davranış çeşitleri

### 5.1.2. Newtonyen Akış

Deformasyon hızı ve kayma gerilmesi arasında lineer bir bağıntı bulunduran akışkan tipine Newtonyen akış denir. Bu ifade ilk kez 1687 senesinde Isaac Newton tarafından kullanıldığı için bu ilişkiyi taşıyan tüm akışkanlara Newton tipi akışkanlar ya da Newtonyen akışkanlar denilmektedir. Aşağıda verilen Şekil 5.2’de temsili bir akış tipi gösterilmiştir.



Şekil 5.2. Akış modeli

Şekil 5.2’de görüldüğü üzere üstteki katmana etki eden kuvvet bir kayma gerilmesine (shear stress) sebep olacaktır. Yani ilk hareketi vermek için birim alan başına düşen kuvvet aşağıdaki Eş. 5.2 ile hesaplanmaktadır.

$$\tau = \frac{F}{A} \quad (5.2)$$

Burada;

$\tau$ : Kayma gerilimi, Pa,

F: Kuvvet, N,

A: Alan, m<sup>2</sup>,

temsil etmektedir. Hız ve plakalar arasında bulunan mesafelerin birbirine oranı da kayma hızı (shear rate) olarak tanımlanmaktadır ve aşağıdaki Eş. 5.3 ile hesaplanır.

$$\dot{\gamma} = \frac{\partial V}{\partial x} \quad (5.3)$$

Burada,

$\dot{\gamma}$ : Kayma hızı, 1/s,

$\partial V$ : Hız, m/s,

$\partial x$ : Tabakalar arasındaki mesafe, m,

değerlerini temsil etmektedir. Bu eşitliklerden hesaplanan kayma gerilimi değeri ile kayma hızı değerinin birbirlerine orantılı olarak artışı ise viskozite olarak değerlendirilmektedir. Önceki bölümlerde de bahsettiğimiz gibi viskozite akmaya karşı akışkanın gösterdiği direnç olarak tanımlanır ve viskozite için en yaygın kullanılan ifade aşağıdaki gibidir (Bkz: Eş. 5.4).

$$\eta_a = \frac{\tau}{\dot{\gamma}} \quad (5.4)$$

### 5.1.3. Newtonyen olmayan (Non-Newtonyen) akış

En temel şekliyle, akış özellikleri şayet kayma hızından ya da zamandan etkileniyorsa bu akışkanlara Newtonyen olmayan (Non-Newtonyen) akışkanlar denilmektedir. Başka bir deyişle Newtonyen olmayan akışkanlar yukarıdaki eşitliklerle verilen ve viskoziteyi

oluşturan kayma geriliminin, kayma hızına olan oranının değişiminin sıfır veya doğrusal olmadığı akışkan türlerine ifade etmek için kullanılırlar [58].

Newtonyen olmayan akışkanlar, darbeye katılaşabilen sıvılar, akamaz halden küçük bir kuvvetle akıcı hale geçebilen karışımlardır ve bir anlık kayma gerilmesi değişiminden kaynaklı akış hızı artan malzemelerdir. Özellikle malzeme bilimi için en ilgi çekici konuların başında Newtonyen dışı akışkanlar gelmektedir.

Newtonyen olmayan akışlar için sabit viskozite değerlerinden bahsetmek mümkün değildir. Bu sebeple, Newtonyen dışı akışlar için belirli bir kayma hızı değerindeki görünür viskozite (apparent viscosity) değerlerinden bahsetmek gerekir ve bu görünür viskozite değeri kayma gerilmesinin, kayma hızına oranıyla elde edilmektedir (Bkz: Eş. 5.5).

$$\eta_a = f(\dot{\gamma}) = \frac{\tau}{\dot{\gamma}} \quad (5.5)$$

#### 5.1.4. Zamana bağlı akış davranışı

Zamana bağımlı olarak kayma kalınlaşması ya da kayma incelmesi davranışı gösteren akışkan tipleri mevcuttur.

##### Tiksotropik

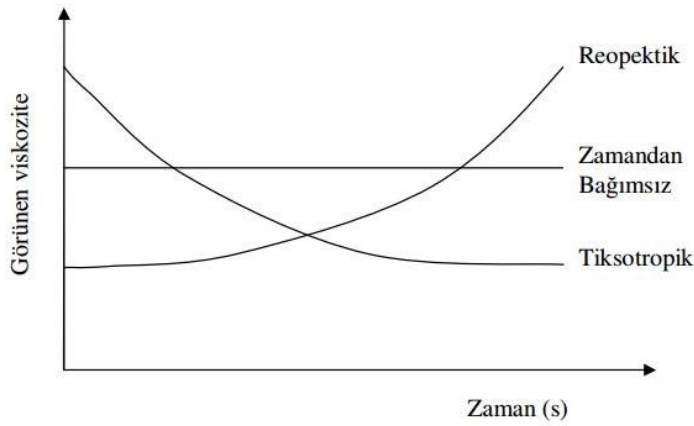
Tiksotropik akış zamana bağlı olarak kayma incelmesi davranışı gösteren akışkanlarda mevcuttur. Tiksotropik akışkan en eski reoloji olaylarından birisi olarak kabul edilmektedir. Tiksotropik akışkan tipinde gerilim ve viskoz özelliklerin geri dönüşümlü bir şekilde azaldığı görülmektedir. Kaldırılan gerilim ile eski haline geri dönüş yaşanmaktadır. Bu davranışa sahip olan akışkanlar dispersiyon faza sahip heterojen yapıdadırlar.

Tiksotropik özelliğe sahip sistemler jel-sol-jel dönüşümlü dispersiyonlardır. Gerilim durursa madde katıdır, gerilim uygulanma anında akış başlar ve jelden sole doğru yönelim olur. Gerilme uygulamasının bitirilmesi ile madde eski haline doğru dönmeye başlar. Boşluk dolgulu ağ yapısına sahip olan flokların meydana gelmesine sebep olan zayıf çekim kuvvetlerine bağlı tanecikler arasında bulunan bağlar, gerilimin uygulanmasıyla akış

boyunca kırılabilme potansiyelindedirler. Gerilme hızı arttığında ise boyutta meydana gelen düşme ile floklarda kırılmalar meydana gelir ve bu da viskozitenin azalarak tiksotropik davranışı meydana getirmeye sebep olmaktadır. Kayma hızının azalması ise flokları büyütür ve durgun hale geçen akış için ağın yeniden oluşmasını sağlayarak eski hale dönüğe imkân sağlar [58].

### Antitiksotropik ve Reopektif

Yukarıda incelen Tiksotropi akışı kayma incelmesi davranışı olarak belirtilmekteydi, antitiksotropik ise kısaca kayma kalınlaşması ifade edilebilir. Antitiksotropik, öncelerde reopektif davranış olarak adlandırılmaktaydı ancak güncel bilim terminolojisinde anti tiksotropi olarak ifade edilmektedir. Reopeksi ve anti tiksotropi terimleri bazı durumlarda birbirleriyle sıklıkla karıştırılabilmektedir, ancak reopekside çalkalama işlemi uygulanırken solden jele doğru geçiş ve kendi halinde seyreden sistemlerde ise jele doğru geçişten daha hızlı meydana gelir [58,59]. Aşağıda bulunan Şekil 5.3'te görünür viskozite-zaman grafiğinde Reopektik, Tiksotropik ve zamandan bağımsız akış tipleri gösterilmiştir.



Şekil 5.3. Reopektik, Tiksotropik ve zamandan bağımsız akış tipleri

## 5.2. Viskozite Modelleri

Viskozite modelleri bu başlık altında 2 gruba ayrılarak açıklanmıştır. Birinci grupta; zamana bağlı viskozite modellerinden ikinci grupta ise zamana bağlı olmayan viskozite modellerinden bahsedilmiştir.

### 5.2.1. Zamana bağılı viskozite modelleri

Bu başlık altında zamana bağılı olan ve sık kullanılan bazı viskozite modellerinden bahsedilmiştir.

#### Weltman Modeli

Weltman Modeli antitiksotropik ve tiksotropik davranışları karakterize etmek amacıyla kullanılan en kullanışlı modeldir (Bkz: Eş. 5.6).

$$\tau = A - B \log t \quad (5.6)$$

Burada;

$\tau$ : Kayma gerilimi, N/m<sup>2</sup>,

A ve B: t=1 saniyede gerilimi ifade eden sabit değerlerdir,

t: süre, s,

Weltman modeli, kayma gerilimine olan zamanın logaritmik değerine karşılık gelen eğridir, -B eğimli, ekstrapolasyonu A olan bu doğruyu vermektedir. Tiksotropik davranışlar için B değeri negatiftir ve antitiksotropik davranışlar için B değeri pozitifdir [59].

#### Tiu ve Boger Modeli

Tiu ve Boger, kritik kayma gerilimine sahip olan tiksotropik davranışları incelemek amacıyla daha kapsamlı bir model geliştirmişlerdir [59]. Aşağıda verilen Eş. 5.7'deki şekilde tanımlanmaktadır;

$$\tau = \lambda[\tau_0 + K \cdot (\dot{\gamma})^n] \quad (5.7)$$

$\tau_0$ : Kritik kayma gerilimi (başlangıç gerilimi),

K: kıvamlılık parametresi (büyükse daha viskoz),

n: akış davranış sabiti,

$\dot{\gamma}$ : Kayma hızı, 1/s,

$\lambda$  : Zamana bağılı bir parametredir.

### 5.2.2. Zamandan bağımsız akış davranışı

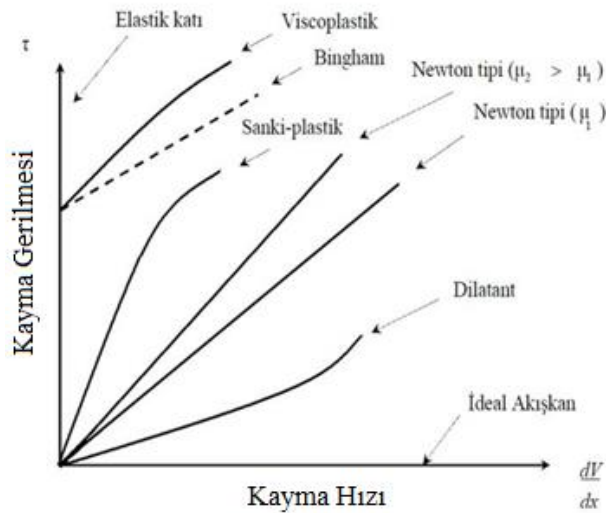
Zamandan bağımsız akış davranışı özelliğine sahip olan malzemelerin akış davranışları küçük bir kayma kuvveti uygulandığında aşağıda verilen Eş. 5.8'deki ifadeyle temsil edilmektedir;

$$\dot{\gamma} = f(\tau) \text{ ya da tersi olarak } \tau = g(\dot{\gamma}) \quad (5.8)$$

Yukardaki Eş. 3.21 incelendiğinde belirli bir noktadaki kayma hızı değeri  $\dot{\gamma}$  yine aynı noktadaki  $\tau$  yani kayma geriliminin bir fonksiyonudur. Bu tanımlamaya uyan akışkanlarda kendi arasında üç gruba ayrılabilirler [58]:

- Kayma İncelmesi (Sanki-Plastik)
- Kayma Kalınlaşması (Dilatant)
- Viskoplastik Akışkan (Viscoplastik Fluid)

Bu akışkanları temsil eden kayma gerilimi-kayma hızı grafiği de aşağıda bulunan Şekil 5.4'te verilmiştir.

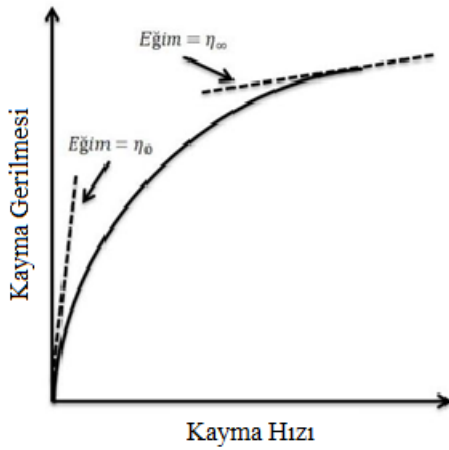


Şekil 5.4. Zamandan bağımsız akışkanlar

#### Kayma incelmesi (Sanki-Plastik)



En yaygın olarak bilinen zamandan bağımsız Newtonyen dışı akışkan yalancı plastik ya da anti-plastik (pseudoplastik) olarak isimlendirilen kayma incelmesi olarak da bilinen davranış türüdür. Kayma gerilimin artması ve viskozitenin azalmasıyla da ifade edilebilmektedir. Kayma incelmesi davranışı gösteren birçok polimer ve eriyik malzeme yüksek oranlarda kayma hızına maruzken Newtonyen tipi davranış sergilerler. Kayma incelmesi davranışı gösteren akışkan malzemenin viskozite değeri artan kayma hızıyla birlikte azalmaktadır. Bu olaya, doğal ve sentetik zamlar örnektir. Ayrıca, kayma tipi akışkan davranışları için kritik bir kayma değeri de vardır ve bu yüzden viskoplastik olarak adlandırılmışlardır. Kayma incelmesi gösteren malzemelere bu kritik kayma değerinden daha düşük bir gerilim değeri uygulandığında malzeme katı, büyük bir gerilim değeri uygulandığında ise malzeme de akış görülmektedir [58]. Aşağıda Şekil 5.5'te kayma incelmesi davranışı gösterilmiştir.



Şekil 5.5. Kayma İncelmesi Davranışı

#### Kayma kalınlaşması (Dilatant Davranış)

Kayma kalınlaşması akış tipi davranışında sanki-plastik davranışın tersi görülmektedir. Kayma geriliminin artmasıyla viskozite değeri de artmaktadır. Kayma kalınlaşması davranışında akışın, akmaya karşı sergilemiş olduğu direnç karıştırıldıkça artmaktadır. Örnek olarak, yağlı boyalar ve süspansiyonlar verilebilir. Kayma kalınlaşması akış tipinde akış elemanları arasında sıkı bir yerleşme mevcuttur. Partiküller arasında bulunan boşluklar kayma hızının artmasıyla doğru orantılı olarak artmaktadır. Kayma kalınlaşması akış tipinin grafiği incelendiğinde kayma gerilimi ve kayma hızı çizgilerinin içbükey şekilde olduğu görülmektedir. Kayma kalınlaşması davranışı temelde uygulanan bir kayma büyüklüğünden

kaynaklı olarak oluşan bir sonuçtur. Yani kaymanın uygulanması ile yapıda bulunan birimlerin büyüklüklerindeki artıştan kaynaklanmaktadır. Bu yüzden, dilatant tipi davranışların farklı olarak hacimdeki artışı da kapsamamasından ötürü kayma kalınlaşması davranışı ile tanımlanmak doğru değildir [60].

### Plastik davranışlar

Plastik akışkanlar, Bingham plastik akış davranışı ve Bingham olmayan plastik akış davranışı olarak ikiye ayrılabilirler. Bingham olmayan plastik akış davranışları; Herschel-Bulkley modeli ve Casson modeline uygun davranış gösteren plastik akışları kapsamaktadır.

#### *Bingham plastik davranışı*

Özellikle diş macunu gibi maddeler sonlu büyüklüğe sahip olan bir kayma gerilmesi uygulandığında bu gerilmeye karşı koyabilirler. Dolayısıyla da katı bir madde gibi davranabilirler. Ancak uygulanan bu kayma gerilmesi değerinin, maddenin akma gerilmesi değerini aştığı durumlarda sürekli olarak şekil değiştirebilir ve bir akışkan malzeme gibi davranabilirler. Başka bir deyişle, bingham plastikler malzeme akmaya/şekil değiştirmeye başlamadan önce gerekli belirli bir başlangıç gerilimine sahip olan akışkan davranışlarını tanımlamak için kullanılır.

#### *Bingham plastik modeli*

Bingham plastik davranışı sergileyen akışkanlar için kullanılan model aşağıdaki Eş. 5.9 ve Eş. 5.10'da verilmiştir.

$$\tau = \tau_0 + \eta_p \dot{\gamma} \quad (\tau > \tau_0 \text{ için}) \quad (5.9)$$

$$\dot{\gamma} = 0 \quad (\tau < \tau_0 \text{ için}) \quad (5.10)$$

Burada;

$\tau_0$ : Kritik kayma gerilmesi,

$\eta_p$ : Bingham plastik viskozitesi değeri,

$\dot{\gamma}$ : Kayma hızı, 1/s,

değerlerini temsil etmektedir. Akma gerilmesi, malzeme de akma ya da kalıcı şekil değiştirme olayının başlaması için gereken minimum gerilme davranışı temsil etmektedir. Uygulanan gerilim değeri, malzemenin akma gerilmesi değerinden küçük olduğu durumlarda bingham plastik davranışına sahip malzemeler bir katı gibi davranmaktadırlar.

### *Herschel-Bulkley davranış*

Herschel-Bulkley davranışı temelde psödoplastik davranışın akma gerilmesi içeren halidir. Belirli bir gerilme düzeyine kadar akmayan malzeme, malzemenin akma gerilmesi değeri aşıldıktan sonra psödoplastik davranmaktadır.

### *Herschel-Bulkley modeli*

Herschel-Bulkley Modeli Newtonyen, Bingham Plastik ve Power-law akış davranışlarını tanımlayan üç parametreye sahip bir modeldir. Modele ait eşitlik Eş. 5.11'de verilmiştir.

$$\tau = \tau_0 + K\dot{\gamma} \quad (n=1, \tau_0 > 0) \quad (5.11)$$

Burada;

$\tau_0$ : Kritik kayma gerilmesi (başlangıç gerilmesi),

K: Kıvamlılık parametresi (büyükse daha viskoz),  $N/m^2 \cdot s^n$ ,

n: Akış davranış sabiti,

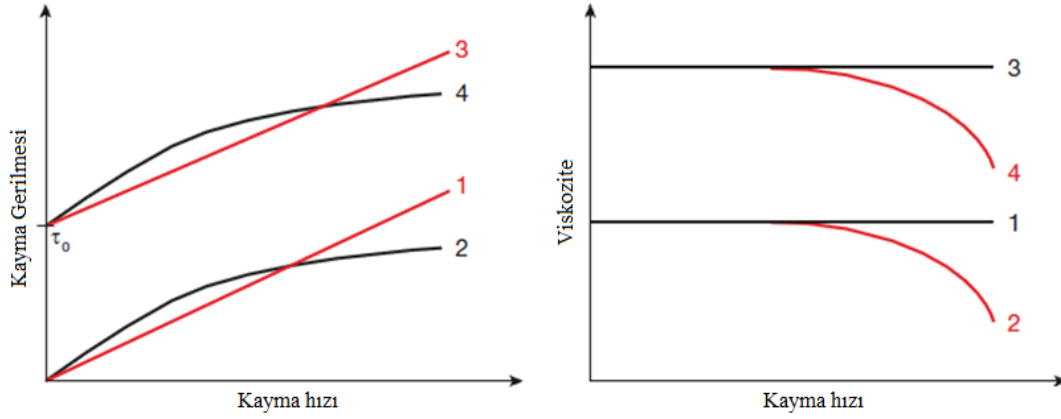
$\dot{\gamma}$ : Kayma hızı,  $1/s$

temsil etmektedir.

### **5.3. Viskozite Modelleri**

Literatürde, Genelleştirilmiş Newtonyen akış varsayımlarına uygun birçok model önerilmiştir. Bu modellerin akışkan ve özelliklerini iyi derecede temsil edebilmesi akış formlarına ve deneysel sonuçlara etki eden parametrelerin sayısına ve türüne göre değişmektedir. Bu modellerin temelde iki genel amacı vardır. Birincisi, polimer işlemede karşılaşılan farklı akış senaryoları için analitik çözümler elde etmek ikincisi ise ölçülen

verilerin minimum sayıda parametreyle anlamlandırılmasına imkân sağlamaktır [61]. Farklı malzemelerin akış davranışı farklı modellerin kullanılmasını gerektirebilir. Şöyle ki, bazı sıvılar kayma incelmesi davranışı gösterebilirken, bazıları akmaya maruz kalabilir ya da her iki davranışı da sergileyebilirler [11]. Şekil 5.6'da bazı akış davranışlarını gösteren kayma gerilmesi-kayma hızı ve viskozite-kayma hızı grafikleri gösterilmektedir.



Şekil 5.6. Farklı akış tipleri için akış eğrileri

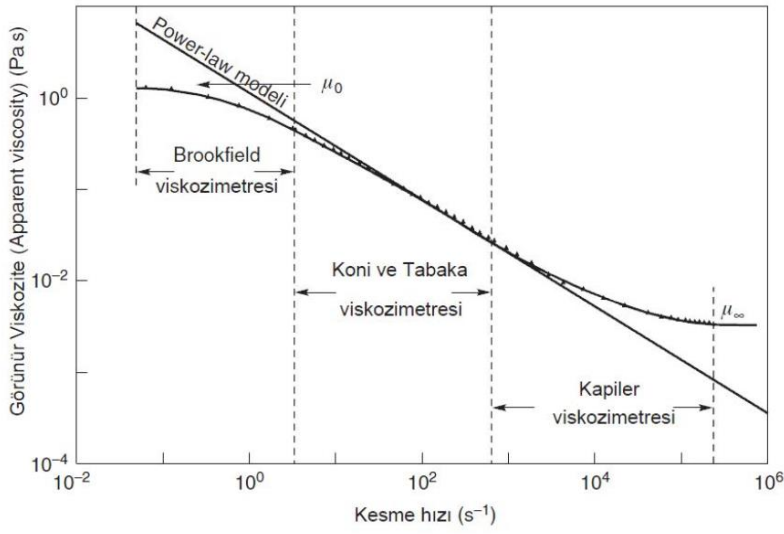
Şekil 5.6'da gösterilen eğriler sırasıyla,

- (1) Newtonyen akış,
- (2) Kayma incelmesi davranışı gösteren akış,
- (3)  $\tau_0$  akma gerilmeli Newtonyen akış,
- (4)  $\tau_0$  akma gerilmeli kayma incelmesi gösteren akış,

temsil etmektedir. Viskozite modelleri, sonuçların ve sayısal çözümlerinin doğruluğunu artırmaktadır. İyi bir reoloğun görevi, akış davranışını ve ölçülen viskozite verilerini en iyi temsil eden modeli bulmaktır. Endüstriyel polimerlerin viskozitelerini hesaplamak amacıyla sıklıkla tercih edilen viskozite modellerinden bazıları aşağıdaki bölümlerde verilecektir.

### 5.3.1. Power Law (Güç Yasası) modeli

Güç kanunu, Ostwald [62] ve Waele [63] tarafından türetilen bir viskozite modelidir. Bu model, en basit haliyle kayma hızının ve kayma gerilmesinin logaritmik ifadeleri arasındaki doğrusallık olarak tanımlanmaktadır. Güç kanunu, kayma incelmesi davranışını tanımlayan en basit model olarak kabul edilmekte ve sıkça kullanılmaktadır (Bkz. Şekil 5.7).



Şekil 5.7. Power-Law Modeli

Güç kanunu modeli, akışkanın karakterize edilebilmesi için temelde 2 farklı parametreye ihtiyaç duymaktadır. Bu parametreler aşağıda bulunan Eş. 5.12’de verilmiştir.

$$\eta = k\dot{\gamma}^{n-1} \quad (5.12)$$

K: kıvamlilik parametresi (bu değer büyüdükçe viskozite artmaktadır),  $N/m^2 \cdot s^2$ ,

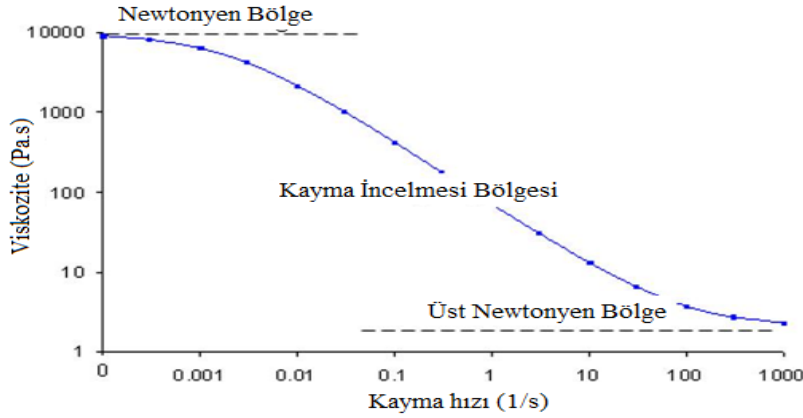
n: güç kanunu sabiti,

Bu denklemin logaritmik formu aşağıda bulunan Eş. 5.13’de gösterildiği gibi ifade edilmektedir:

$$\log \eta = \log k + (n - 1) \log \dot{\gamma} \quad (5.13)$$

Yukarıdaki eşitliklerde yer alan n güç kanunu üsseli sabit bir newtonyen akışkanda meydana gelen sapmaya bağlı olarak değişmektedir. Newtonyen akışlar için bu değer 1 iken, sanki plastikmiş gibi davranan malzemeler için 0 ile 1 arasında bir değere sahiptir. Kayma kalınlaşması gösteren malzemeler için 1’den büyük bir değer olmaktadır. Kayma incelmesi gösteren akışkanlar için basit bir model olan, güç kanunu modeli sadece belirli bir aralıktaki kayma hızı büyüklükleri için kullanılmaktadır. Şekil 5.8’de tipik bir kayma incelmesi eğrisi gösterilmiştir.

Sıfır veya sonsuz büyüklükte bir değere sahip kayma hızları için hesaplanan viskoziteler için kullanılmazlar [58].



Şekil 5.8. Kayma incelmesi bölgesi

Şekil 5.8'ten görüldüğü üzere:

İlk bölge, düşük kayma hızlarına sahip olan malzemeler içindir ve bu bölgede viskozite sıfır kayma hızı viskozitesi olarak adlandırılmaktadır.

İkinci bölge, ortalama bir kayma hızı viskozitesi olarak adlandırılır ve güç kanunu modeli geçerlidir. Bu bölgede, viskozite ve kayma hızının logaritmik ifadeleri alındığında, doğrusal bir çizgi ortaya çıkar.

Eğrinin son kısmı ise yüksek kayma hızına sahip malzemeleri temsil etmektedir ve üst (upper) newtonyen bölge olarak adlandırılır, sonsuz büyüklükte sabit bir kayma hızı viskozitesi ile karakterize edilir.

Güç kanunu, son 20-30 yıldır polimerik malzemelerin viskoz davranışlarını ve kayma hızlarını tanımlamak ve karakterize etmek amacıyla yaygın olarak kullanılmaktadır. Düşük kayma hızındaki davranışlar karakterize edilmek isteniyorsa, Güç kanunu modeli yerine, Bird-Carreau veya Cross-Law kanunu tercih edilmelidir [64].

### 5.3.2. Bird-Carreau-Yasuda modeli

Bir önceki başlıkta güç kanunu modelinin sadece dar bir kayma hızı değeri aralığında polimer eriyiklerin akış davranışlarını temsil ettiğinden bahsedilmişti. Bird-Carreau modeli ise, Bird, Carreau [65] ve Yasuda [66] tarafından güç kanunu modeline göre daha geniş bir kayma hızı aralığında polimerik malzemelerin akış davranışlarını belirlemede kullanılmak

için geliştirilen bir modeldir. Bird-carreau-yasuda modeli, düşük kayma hızlarındaki polimer eriyiklerin viskozitelerini aşağıda verilen Eş. 5.14 ile hesaplamaktadır.

$$\eta = \eta_{\infty} + (\eta_0 - \eta_{\infty})(1 + \lambda^2 \dot{\gamma}^2)^{\frac{n-1}{2}} \quad (5.14)$$

$\eta_0$ : Kayma hızı 0 iken limit viskozite

$\eta_{\infty}$ : Kayma hızı sonsuza giderken limit viskozite

$\lambda$ : doğal zaman olarak bilinir ve viskozitenin azalmaya başladığı bölgede kayma şekil değiştirme hızı değerinin tersini ifade eder (-1)

n: kuvvet yasası indeksidir, Newton tipi davranıştan sapmanın bir göstergesidir.

Ayrıca yukarıda verilen Eş. 3.27’de viskozite bölgesi ve kuvvet yasası bölgesi arası geçişi ifade eden a parametresini kullanan Carreau-Yasuda modelinin özel hali olarak düşünülebilir. Geçiş bölgesi  $a < 1$  iken uzar,  $a > 1$  iken kısalmır [67].

### 5.3.3. Cross modeli

Bird-Carreau-Yasuda modelinde olduğu gibi Cross modeli de düşük kayma hızı viskozitesi davranışı sergileyen malzemeler için oldukça sık kullanılmaktadır. Viskozite için Cross modeli aşağıdaki Eş. 5.15’deki ifadeyle hesaplanmaktadır.

$$\eta = \frac{\eta_0}{1 + (\lambda \dot{\gamma})^m} \quad (5.15)$$

$\eta_0$ : sıfır kayma hızı viskozitesi,

$\lambda$ : doğal zaman

m: cross kanun indeksidir ve 1-n’e eşittir.

### 5.3.4. Cross-WLF modeli

Cross-WLF, toplamda 6 parametreye sahip, viskozite üzerinde kayma hızı ve sıcaklığın etkilerini ortaya koyan bir viskozite modelidir. Bird-Carreau modeline benzer şekilde, bu model de hem Newtonyen hem de kayma incelmeleri davranışları için kullanılabilir.

Cross-WLF modeli, Bird-Carreau-Yasuda modeline alternatif olarak geliştirilmiştir [11] ve aşağıdaki Eş. 5.16 ile ifade edilmektedir.

$$\frac{\eta_{\dot{\gamma}} - \eta_{\infty}}{\eta_0 - \eta_{\infty}} = \frac{1}{1 + (K\dot{\gamma})^{1-n}} \quad (5.16)$$

$\eta_0$ : sıfır kayma hızı viskozitesi,

$\eta_{\infty}$ : sonsuz kayma hızı viskozitesi,

K: zaman sabiti,

n: kuvvet yasası indeksidir, Newton tipi davranıştan sapmanın bir göstergesidir,

Cross WLF modeli, güç kanunu modeline indirgenebilir ve eğer sonsuz kayma hızı viskozitesi önemsizse ya da ihmal edilebilecekse Cross WLF modeli yeniden aşağıdaki Eş. 5.17'deki şekilde yazılabilir.

$$\eta(\dot{\gamma}) = \frac{\eta_0}{1 + \left(\frac{\eta_0 \dot{\gamma}}{\tau^*}\right)^{1-n}} \quad (5.17)$$

$\tau^*$ : Newtonyen bölgeden geçişte meydana gelen kritik kayma gerilmesi

Modele ait formülde veriler yerine konulmadan önce Weissenberg-Rabinowitsch düzeltmesi yapılarak görünür kayma hızı değerleri elde edilebilmesi için aşağıdaki Eş. 5.18 uygulanmalıdır [39].

$$\tau^* = \left(\frac{4n}{3n+1}\right)^{\frac{n}{1-n}} \quad (5.18)$$

Bu düzeltmenin uygulanması ile geri kalan diğer model parametreleri değiştirilmeden uygulanabilir. Sıfır kayma hızı viskozitesi WLF denkleminde modellenmiştir ve aşağıdaki Eş. 5.19 ile ifade edilir.

$$\eta_0(T) = D_1 \cdot \exp\left[\frac{A_1(T-D_2)}{A_2+T-D_2}\right] \quad (5.19)$$

T: referans sıcaklık değeri

$D_1$  ve  $D_2$ : referans sıcaklıktaki viskozite değeri

$A_1$  ve  $A_2$ : sıcaklık eğilimi



Cross WLF modeli, enjeksiyon kalıp simülasyon programlarında, programın arka planda kullandığı en yaygın modeldir çünkü en uygun viskozite verilerini kullanıcılara sunmaktadır [68].

### 5.3.5. Ellis modeli

Ellis modeli, güç kanunu modelinden özellikle düşük kayma hızlarında büyük ölçüde fark edilmektedir. Bu nedenle Ellis modelinin tercih edilmesi güç yasası modelinin yetersiz kaldığı düşük kayma hızı uygulamalarında daha iyi sonuçlar vermektedir [67]. Bu model, aşağıda verilen Eş. 5.20 ile ifade edilmektedir.

$$\eta = \frac{\eta_0}{1+k\left(\frac{\dot{\epsilon}}{\dot{\epsilon}_{1/2}}\right)} \quad (5.20)$$

### 5.3.6. Arrhenius modeli

Arrhenius modeli, viskozitenin sıcaklığa bağımlı olarak değiştiğini vurgulamaktadır. Akışkanlar için, sıcaklık viskoziteyi azaltmaktadır. Arrhenius modelinin uygulanabilmesi için ölçülen viskozite değerinin ölçüldüğü sıcaklık değerinin bilinmesi önemlidir (Bkz. Eş. 5.21).

$$\eta = A \exp\left(\frac{-E_A}{RT}\right) \quad (5.21)$$

Burada;

$E_A$ : aktivasyon enerjisi,

A: ısıl olmayan (non-thermal) sabit değer,

T: ölçülen viskozite sıcaklığı,

R: Reaksiyon hızını temsil etmektedir.

## 6. EKSTRÜZYON YÖNTEMİ

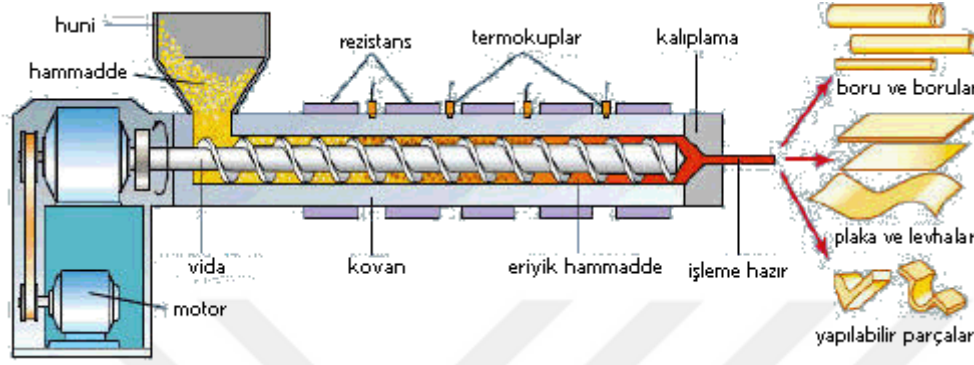
Polimer malzemelerin işlenmesinde en sık kullanılan 3 yöntemin ekstrüzyon, enjeksiyonla kalıplama ve şişirme olduğundan önceki bölümlerde bahsedilmişti. Bu bölümde ise, tez çalışmasında kullanılan ekstrüzyon yöntemi ile işleme ve ekstrüzyon yöntemin yapıldığı ekstrüzyon makinesinden (ekstrüder) bahsedilecektir.

Öncelikle ekstrüde, "ex" (dışarı) ve "trude" (itmek) kelimelerinin bir araya gelmesiyle oluşan birleşik kökenli latin bir kelimedir. Ekstrude etmek ise kendisini oluşturan kelimelerden de anlaşıldığı üzere bir malzemeyi güç kullanarak dışarı sevk etmek anlamına gelmektedir. Ekstruder ise katı haldeki polimeri etkin ve sürekli olarak eriyik haline dönüştüren ve yüksek viskozitedeki bu eriyiği basınçlı bir şekilde çıkışa gönderen makinedir. Ekstrüzyon prosesi polimerin kimyasal özelliklerinde önemli bir değişikliğe sebep olmaması büyük bir avantajdır [68].

1940-1950 yılları arasında sentetik esaslı polimerlerin önemli bir şekilde gelişimi ve üretimi, bu malzemelerin işlenmesi için yeni bir sektörün ortaya çıkmasını zorunlu hale getirmiştir. Polimerlerin üretilmesinin ve şekillendirilebilmesinin, birbirleriyle ilişkili olması sebebiyle polimer şekillendirme endüstrisinin gelişimi de önemli bir ivme kazanmıştır. Polimer şekillendirme sektörü, kimyasal işlemlerle elde edilmiş olan polimerin mekanik ve ısı işlemlere tabi tutulmasıyla arzu edilen nihai ürünü meydana getiren bir alandır. Polimer şekillendirme endüstrisinin hızla gelişmesinde ekstrüzyon prosesinin önemli bir rolü olmuştur. Ekstrüzyon işleminin en belirgin özelliği silindirik geometriye sahip bir kovan ve bu kovan içerisinde dönen sonsuz vidadır. Bu proses günümüzde en yaygın kullanılan polimer şekillendirme tekniğidir. Polimerlerin yaklaşık olarak %60'ı ekstrüzyon yöntemi kullanılarak işlenmekte ve nihai şeklini almaktadır [68].

Ekstrüzyon prosesinde, enjeksiyon prosesinde de gerçekleştiği gibi granül ya da toz halindeki bir reçine, bir besleme hunisinden devamlı olarak bir ısıtma silindirine (kovan) gönderilmektedir. Silindir içerisinde bulunan ve redüktörlü motor sistemi ile tahrik edilen taşıma ve sıkıştırma özelliğine sahip sonsuz vidanın kanatları arasında ileri doğru itilen polimerik malzemenin, silindirin ısıtılmasıyla ve polimerin silindir içerisinde sıkışarak kayma etkisiyle oluşturduğu sürtünme ile birlikte ergime olayının başlamasıdır. Sonsuz vidanın geometrisine bağlı olarak granül ya da toz halindeki polimerik malzeme sonsuz vidayı oluşturan tüm bölgelerden arzu edilen sıcaklık değerlerinde genellikle tam ergimiş

durumda, yüksek basınca sahip bir şekilde kovan çıkışına ulaşır ve buradan da kalıp boşluğuna girer. Kalıp boşluğuna giren numune, soğuduktan sonra kalıp boşluğunun şeklini alır ve nihai ürün bu şekilde elde edilmiş olur. Tek vidalı bir ekstrüder makinenin şematik gösterimi aşağıda bulunan Şekil 6.1’de verilmiştir.



Şekil 6.1. Tek vidalı bir ekstrüderin şematik gösterimi

İmalat hızının sınırını belirleyen en önemli faktör polimerik malzemenin kaliteli bir şekilde işlenebilir olma durumudur. Arzu edilen sıcaklık ve basınç değerlerinin ekstrüder çıkışında da elde edilebiliyor olması ve polimerik malzemenin ısıl homojenliğe sahip olması, polimerik malzemenin kaliteli işlendiğinin bir göstergesi olarak kabul görmektedir. Yüksek vida devri hızlarında çalışan ekstrüder makineleri için veya büyük vida çapına sahip ekstrüderlerde polimerin kovan içerisinde tam anlamıyla eritilebilmesi ve homojen bir yapının elde edilmesi oldukça zor olmaktadır. Büyük vida çaplı ekstrüder makinelerde, eritme yapılan hacmin büyük olmasından kaynaklı yeterli eritmenin mümkün olabilmesi için daha yavaş bir çalışma hızı ve daha uzun bir vida gerekmektedir. Hızlı çalıştırılan ekstrüderler makineleri için yeterli eritmenin sağlanabilmesi için daha uzun bir vida gerekmektedir. Yapılan deneylerde 1000-2000 dev/dk hızda çalıştırılan ekstrüder makinelerde üretilen polimerlerik malzemeler düşük hızlarda çalıştırılan makinelerden elde edilen malzemelere göre kalitesinin daha düşük olduğunu gösterir birçok çalışma mevcuttur [69]. Ayrıca, ekstrüzyon işleminde temel değişkenler; vida hızı ve sıcaklık değişimidir. Dolayısıyla, temel imalat parametreleri de vida uzunluğu (L) ve vida çapı (D) olarak kabul edilmektedir. Bu iki parametrenin birbirine oranı (L/D) ekstrüder makine karakteristiğini göstermektedir. L/D oranı da büyük ölçüde ekstrüder makineden polimerik malzemenin çıkışı, polimerik malzemenin çıkış süresi ve polimere olan ısı transferi için uygun silindir yüzeyini belirlemektedir. Bu sebeple, ekstrüder makine tasarımları yapılırken en önemli parçalardan biriside vida tasarımı ve vida tasarımıyla birlikte L/D oranının tayinidir [69].

## 6.1. Ekstrüzyon Makinesinin Kısımları

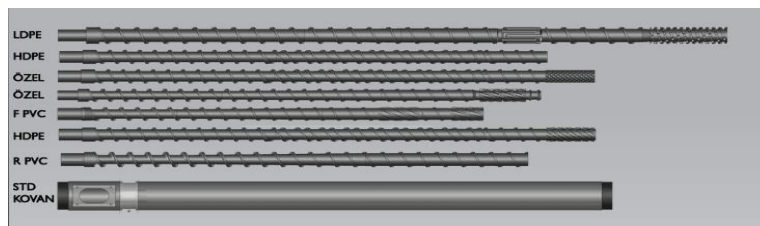
Bir ekstrüzyon makinesi, temelde huni, vida, silindir, soğutma ve vakumlama ünitesi ile çekici kısımlarından oluşmaktadır. Ekstrüder makinesini oluşturan bu kısımlar aşağıda kısaca açıklanmıştır.

### 6.1.1. Huni

Huni, işlenecek olan malzemenin işlenmeden önce bekletildiği ekstrüder vida üzerinde harici bir yerdir. Bazı ham malzemeler geometrilerine bağlı olarak sadece yerçekimi kuvvetinin etkisiyle akma eğilimine giremezler, bu nedenle bazı hunilere malzemenin akışını kolaylaştırmak amacıyla konveyör ve karıştırıcı gibi tahrik elemanları eklenmesi de yaygındır.

### 6.1.2. Vida (Burgu veya helezon)

Ekstrüder vidası, polimerik ham malzemenin aktarılması, eriyik hale dönüştürülmesi ve homojen bir karışım elde edilmesi gibi birçok işlevin gerçekleşmesinde önemli rol oynayan, ekstrüder makinesinin en önemli parçasıdır [68]. Ekstrüder makinenin performansı önemli ölçüde vida tasarımı ve çalışma koşullarına bağlıdır. Ekstrüder vidasının temel geometrik değişkenleri; vida geometrisi ve sayısı, kanalın derinliği ve ekstruder boyunca meydana gelen derinlik değişimi, vida ile kovan arasındaki radyal açıklık olarak nitelendirilebilir. Vidanın ve kovanın malzemeleri çeliktir ve aşınmaya karşı çeşitli proseslerle sertleştirilebilir [70,71]. Kullanılış amacına göre geliştirilen birçok değişik vida tipi mevcuttur. Bu tipler arasında en yaygın olarak kullanılan vida çeşidi *Üç Bölge Vida*'dır. Üç bölge vidadaki mevcut bölgeler; besleme, sıkıştırma ve ölçmedir [68]. Farklı malzemeler için üretici firmaları tarafından önerilen farklı vida tasarımları Şekil 6.2'de gösterilmiştir [72].



Şekil 6.2. : Farklı tasarımlara sahip ekstruder vidaları

### 6.1.3. Silindir (Kovan-Ocak)

Silindir; vidanın, içerisinde yatakladığı, ısıtıcıları üzerinde taşıyan, eriyik malzemenin içerisinde aktığı alt montaj elemanıdır. Silindir, bazı kaynaklarda ocak veya kovan olarak da geçmektedir.

Tek-vidalı ekstrüder

- Geleneksel tek-vidalı ekstrüder,
- Yivli tek-vidalı ekstrüder,

Çift-vidalı ekstrüder

- Birlikte dönen (içe doğru dönen) çift-vidalı ekstrüder,
- Tersine dönen (dışa doğru dönen) çift vidalı ekstrüder,

Çift vidalı ekstrüderin en önemli kullanılış amacı daha homojen bir malzeme karışımı hazırlanmasına imkân sağlamasıdır. Ayrıca, çift-vidalı ekstrüderler dönerken birbirlerini temizleyecek şekilde tasarlanmaktadır.

### 6.1.4. Soğutma ve vakumlama ünitesi

Soğutma ve vakumlama ünitesi, vakum ve soğutma pompası kullanılarak ürüne uygulanan soğutma ve vakumlama işlemidir.

### 6.1.5. Çekici

Ekstrüder makinesinde işlendikten sonra kalıptan ve kalibreden çıkan ürünü genellikle bir palet sistemi yardımıyla çekip kesim için hazırlayan yardımcı bir elemandır.

## 7. MATERYAL VE METOT

Bu bölüm materyal ve metot olmak üzere iki alt bölüme ayrılmıştır. Materyal bölümünde tez çalışmasında kullanılan cihazlardan, sensörlerden, malzemelerden ve diğer ekipmanlardan

bahsedilmiştir. Metot bölümünde ise elde edilen verilerin elde edilmiş yöntemlerinden bahsedilmiştir.

## 7.1. Materyal

Tez çalışmasında kullanılan ekipmanlar bu başlık altında açıklanmıştır.

### 7.1.1. Ekstrüder makinesi (NOVOMA NTB 30/25D)

Tez çalışmasında kullanılan ekstrüzyon makinesi tek vidalı olup teknik özellikleri Çizelge 7.1'de verilmiştir.

Çizelge 7.1. Ekstrüder makinenin teknik özellikleri

Vida çapı	30 mm
Vida işleme boyu (L/D)	25 D net.
Maksimum vida devri	124 rpm
Teorik kapasite	≈14 kg/saat

Kullanılan ekstrüder makine, Tübitak 1003 projesi desteğiyle (Proje No:115M041) Novoma firmasından satın alınmıştır (Bkz. Şekil 7.2).



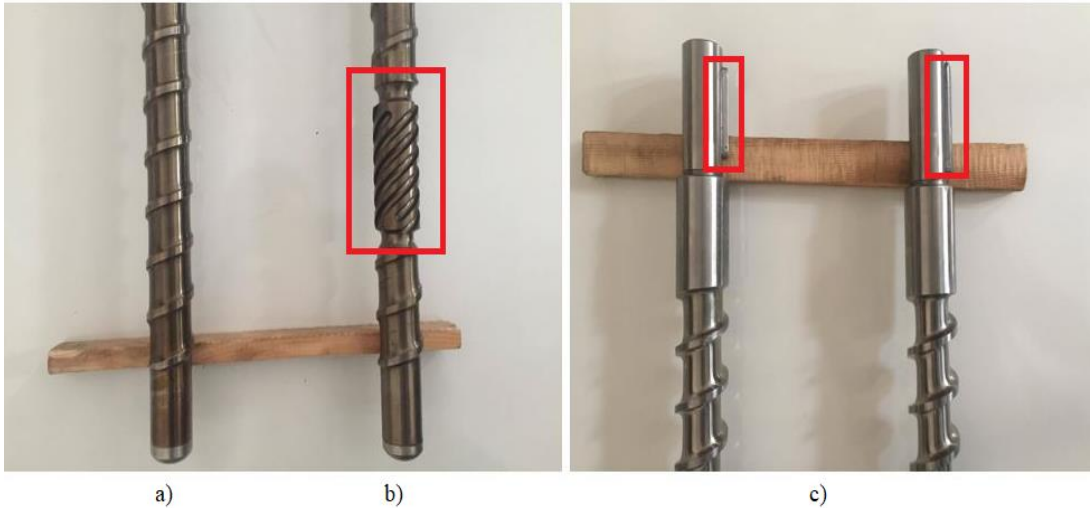
Şekil 7.1. Ekstrüder makine (Novoma NTB 30/25D)

Vida ve Kovan, TÜV sertifikalı Enformak PT A.Ş. tarafından üretilmiştir (Bkz. Şekil 7.2). Kovan ve vida, nitrasyon çeliğinden 1,8550 ( DIN1.2891, 34CrAl Ni7 ) imal ettirilmiştir ve uzun süreli derin gaz nitrasyonu ile sertleştirilmiştir (0,6-0,7 mm derinlikte 66-70 HRC sertlik).



Şekil 7.2. Kullanılan ekstrüder vidalar

Zorlanmalara karşı vidanın kovan içerisinde sıyrılmaması için proje de kullanılan her iki vidaya da kovan içerisinde bulunan kama yuvasına girecek kamalar eklenmiştir. Ayrıca, daha yüksek eriyik kalitesi elde etmek amacıyla üniversal olmayan vida da karıştırıcı da bulunmaktadır (Bkz. Şekil 7.3).



Şekil 7.3. Kullanılan ekstrüder vidalar

Şekil 7.3'te;

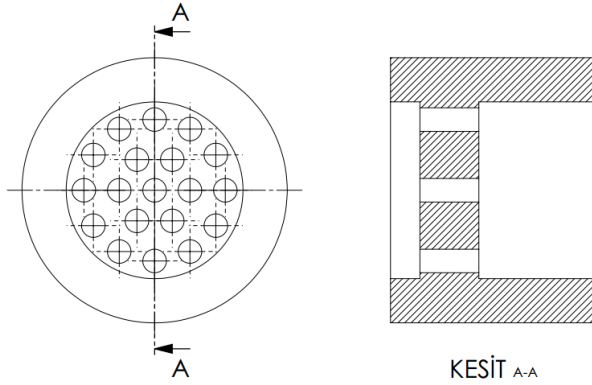
a) Üniversal vida,

b) Kendinden karıştırıcılı vida,

c) Vidalar üzerindeki kamalar, göstermektedir. Eriyik malzemenin, vidanın dönme hareketinden kaynaklı olarak dairesel bir hareketle kovandan çıkması muhtemeldir. Dairesel hareketi doğrusal harekete dönüştürmek ve homojen eriyik kalitesi elde edebilmek için ekstrüzyon çıkışına sertifikalı Enformak PT A.Ş. firmasına bir adet breaker plate yaptırılmıştır. Breaker plate 1.2344 sıcak iş takım çeliğinden yaptırılmıştır ve aşağıda gerçek görüntüsü Şekil 7.4 ile teknik resmi ise Şekil 7.5 ile verilmiştir.



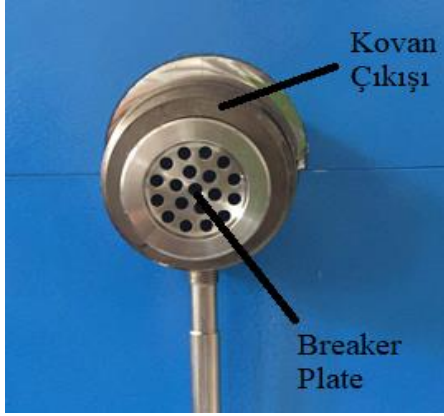
Şekil 7.4. Breaker plate görünümü



Şekil 7.5. Breaker plate teknik resmi

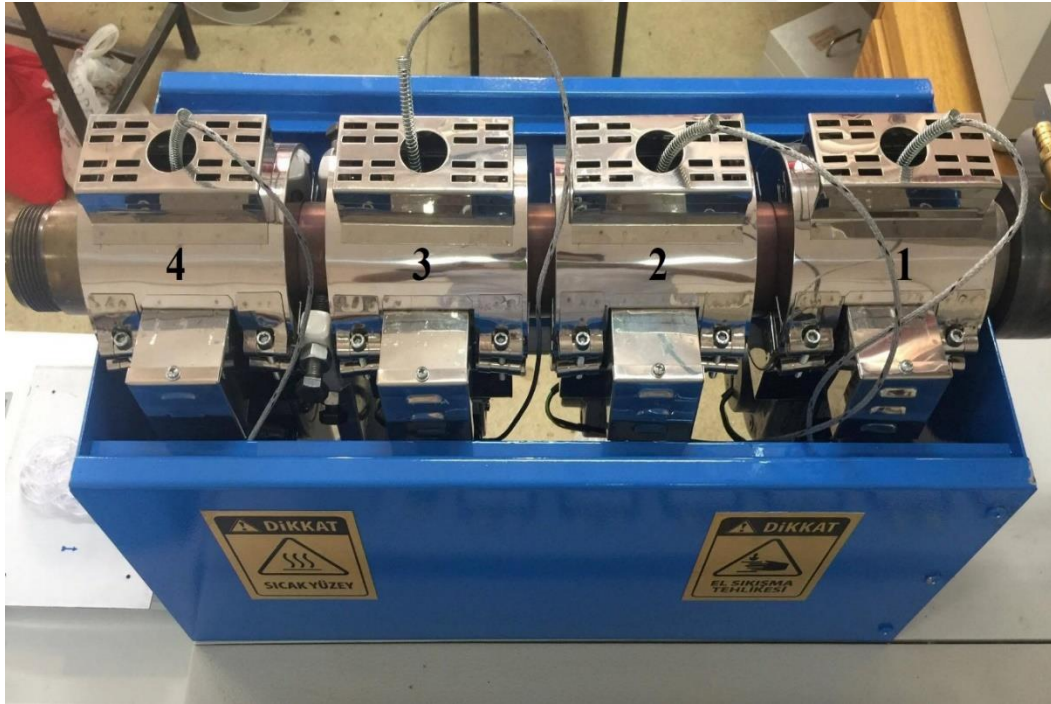
Breaker plate, ekstrüzyon çıkışına direk bağlanmıştır ve kalıp içerisine akan eriyik malzeme önce breaker plate'den geçer sonra kalıp boşluğuna girer. Breaker plate'in makineye montaj hali aşağıdaki Şekil 7.6'da verilmiştir.





Şekil 7.6. Ekstrüzyon çıkışı üzerinde breaker plate

Vida ve Kovan malzeme, ISO 9001:2008, ISO 50001: 2011, ISO 14001: 2004 sertifikalı Alman firması olan Bgh Edelsehl ürettirilmiştir. Kovan üzerinde 4 adet PID kontrollü sıcaklık kontrol bölgesi bulunmaktadır (Bkz. Şekil 7.7 ve 7.8). Sıcaklık 400 °C'ye kadar  $\pm 0.1$  °C hassasiyetle kontrol edilebilmektedir.



Şekil 7.7. Kovan üzerinde bulunan rezistanlar ve sıcaklık kontrol sensörleri (4 adet)



Şekil 7.8. Sıcaklık kontrol paneli

Isıtma rezistansları CE ve ISO 9001:2008 sertifikalı Engin Rezistans marka seramik yalıtımlı ve paslanmaz hava gömleklili ısıtma elemanlarından oluşmaktadır. Ekstrüder üzerinde ayrıca soğutma fanları da mevcuttur ve bu fanlar TÜV sertifikalı Alman EBMpapst firmasından alınıp sistem üzerinde monte ettirilmiştir (Bkz. Şekil 7.9).



Şekil 7.9. Cebri soğutma fanları

Ekstüder, TÜV sertifikalı, DRE 373 serisi Yılmaz marka redüktör ve 5.5 kW AC motor ile tahrik edilmektedir (Bkz. Şekil 7.10). Daha yüksek performanslar elde edilmesi amacıyla motorun soğutulması için EBMpapst firmasının cebri soğutma fanı kullanılmıştır.

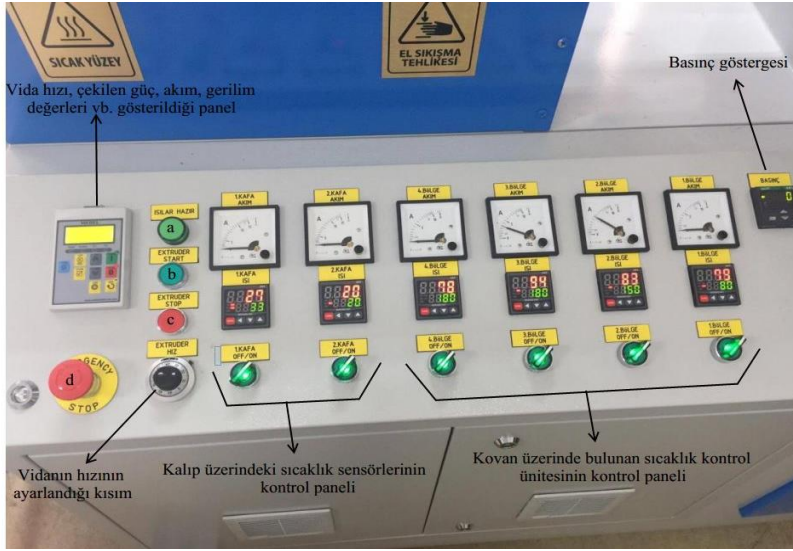


Şekil 7.10. Ekstrüder tahrik elemanı 5.5 kW AC motor ve redüktör

Ekstrüder şasesi çelik konstrüksiyon ve huni paslanmaz malzemeden imal ettirilmiştir. Ekstrüder üzerinde CE ve ISO 9001:2008 sertifikalı Amerikan ürünü olan Gefran marka basınç sensörü kullanılmıştır. Sistem üzerine, ISO 9001:2008 sertifikalı İtalyan ürünü ASCON dijital proses kontrolörü de entegre edilmiştir.

### 7.1.2. Ekstrüderin elektrik kontrol kabini

Tez çalışmasında kullanılan ekstrüder makinenin, elektrik kontrol kabini ISO 9001:2008 belgeli Medel Elektronik tarafından yapılmıştır. Ekstrüder vida hızı 5.5 kW Medel marka AC vektörel tip hız kontrol cihazı ile sonsuz ayar edilebilir şekildedir. Motor sürücü çeşitli çalışma koşulları için ayar edilebilirdir. Sürücüde, olası vida sıkışması gibi istenmeyen durumlar için vidanın zorlanması sonucu oluşabilecek yüksek amperajlara karşı akım koruması mevcuttur. Bu gibi durumlarda sürücü, ana motor akımı set edilen değeri geçince akım kesilmektedir. Ekstrüder ünitesinde toplam 6 bölge termostat kontrolü vardır. Bu 6 bölgeden, 4 bölgesi kovan üzerindeki sıcaklığı, 2 bölgesi ise kalıp sıcaklığını kontrol etmektedir. Sıcaklık kontrolleri SSR (Solid State Relay) ile PID olarak hassas bir şekilde yapılmaktadır. Makinenin, set edilen değerlerin çok altındaki sıcaklıklarda çalışarak vidaya herhangi bir zarar vermemesi için alçak sıcaklıklarda vidayı başlatmaya karşı veya yüksek sıcaklıklarda çalışmayı önlemeye karşı, sıcaklık korumaları da vardır. Kullanılan tüm elektrik malzemeleri CE güvenlik normlarına uygundur. Ekstrüder kontrol paneli Şekil 7.11 ile gösterilmiştir. Şekil 7.11’de resim üzerinde bulunan harflerden a; kovan üzerinde bulunan sıcaklık kontrol ünitesinin set edilen değerlere geldiği haber veren ışık, b; sıcaklık değeri set edilen değerlere ulaştığında aktif olan ekstrüderi çalıştırma butonu, c; ekstrüderi durdurma butonu, d; acil durdurma butonu, anlamını taşımaktadır.



Şekil 7.11. Ekstrüder kontrol paneli

## 7.2. Kalıp Tasarımı

Bu çalışmada üretilen kapileri kalıbın tasarımı ASTM D5422-09 [73], ASTM D3835-16 [74] ile literatürde yer alan kapileri kalıp yaklaşımları ve bilgileri [75] dikkate alınmıştır. Ek olarak ticari firmaların kullandıkları yaklaşımlar ve tasarımlar da dikkate alınmıştır [76-79]. Bu bağlamda, kalıp için en önemli parametre olduğu düşünülen L/D oranının belirlenmesinde alanda öncü olan Haake, Malvern, Goettfert ve Celsum firmalarının ürettikleri kapileri kalıp tasarımları detaylıca incelenmiştir. Ticari firmaların üretimini yaptıkları kapileri reometreler için kullanılan kalıp çapı çoğunlukla 0.5 mm ile 3 mm aralığında kaldığı görülmüştür (Bkz. Çizelge 7.2).

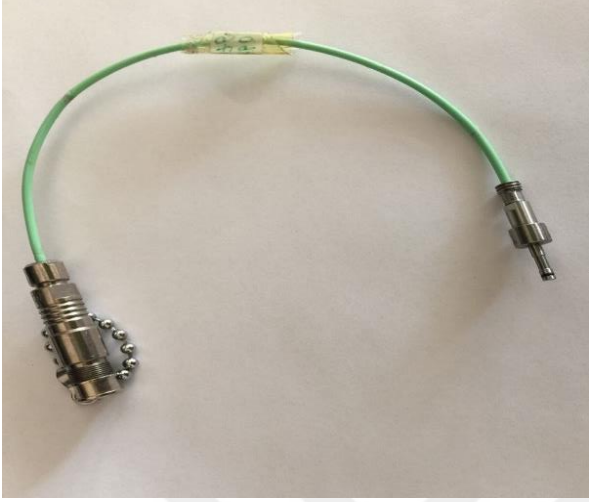
Çizelge 7.2. Bazı ticari firmaların ürettikleri kapiler kalıp çapları

Üretici Firma	Model	Çap, mm
Haake	RheoCap S20 [76]	0.5, 1 ve 2
Malvern	RH7-D&RH10-D [77]	0.5-3
Goettfert	Rheo-Tester 1000 [78]	1
Celsum	Eta 2100 [79]	1

Kalıp geniş literatür incelemesi ve literatürde bahsedilen problemler ile tasarımlar da dikkate alınarak titizlikle yapılmıştır. Kalıp üzerine 1 adet Kistler marka 6159A tipinde basınç



sensörü (Bkz. Şekil 7.12) ve 1 adet Kistler marka 6159A 0,4 tip sıcaklık sensörü (Bkz. Şekil 7.13) bağlanmıştır. Bu sensörlerin teknik özellikleri Çizelge 7.3 ve Çizelge 7.4'te verilmiştir.

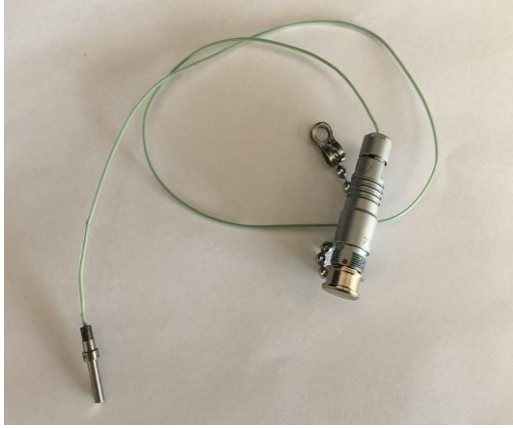


Şekil 7.12. 6159A Basınç sensörü

Çizelge 7.3. 6159A basınç sensörü teknik özellikleri

Ölçüm aralığı		bar	0-2000
Aşırı yükleme durumunda		bar	2500
Hassasiyet		pC/bar	≈-2,5
Çalışma sıcaklığı aralığı	Kalıp (sensör, kablo, birleştirme elemanları)	°C	0-200*
	Eriyik (sensör teması)		
Yalıtım direnci	20 °C	TΩ	≥100
	200 °C		≥1

\*Makine kapalıyken, kalıp sıcaklığı sensöre zarar vermeden 240 °C'ye kadar yükselebilir. Ancak, bununla birlikte, ölçüm hataları oluşabilir.



Şekil 7.13. 6159A0,4 Sıcaklık sensörü

Çizelge 7.4. 6159A0,4 sıcaklık sensörü teknik özellikleri

Ölçüm aralığı		°C	0-450
Termokupl tipi		-	K
Çalışma sıcaklığı	Kalıp (sensör, kablo)	°C	0-450
	Birleştirme elemanları	°C	0-200

Kalıp içerisinde eriyik akış boyunca meydana gelen basınç değişim değerleri ile sıcaklık değerlerini anlamlandırmak için yine kistler marka 2859 tip sinyal şartlandırıcı (Bkz. Şekil 7.14) kullanılmıştır.



Şekil 7.14. Kistler 2859 sinyal şartlandırıcı

Şekil 7.14'te,

a) Sensör ve güç giriş pinlerinin gösterimi,

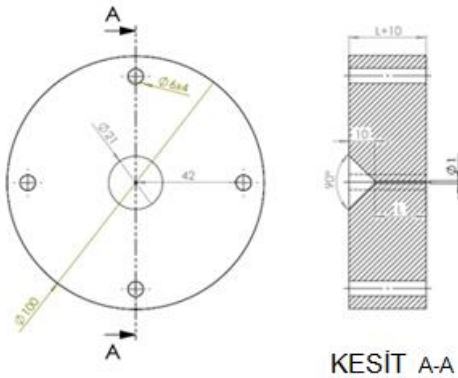
b) Genel kutu görünümü,

gösterilmiştir. Kalıp, Düzce Her Makine Kalıp firmasına ürettirilmiştir ve kalıbın malzemesi 1.2344 sıcak iş takım çeliğinden ürettirilmiştir. Kalıp ölçüleri ASTM D5422-09 standardına uygun olarak ilgili standardda yer alan bütün ölçülere uygun olarak 6 farklı L/D oranında üretimi gerçekleştirilmiştir. Ürettirilen L/D oranları aşağıda bulunan Çizelge 7.5'te verilmiştir.

Çizelge 7.5. Üretilen kalıp boyutları

Kalıp No	Koniklik Açısı	L (mm)	D (mm)	L/D
1	90°	15	1	15
2		20		20
3		30		30
4		20	2	10
5		30		15
6		40		20

Aşağıda bulunan teknik resimde çapı 1 mm olan orifisler görülmektedir (Bkz. Şekil 7.15). Resim üzerinde tüm ölçüler sabit kalmak şartıyla 3 adet farklı L uzunluklarında (L=15, 20 ve 30 mm) kalıp ürettirilmiştir (Bkz. Şekil 7.16).

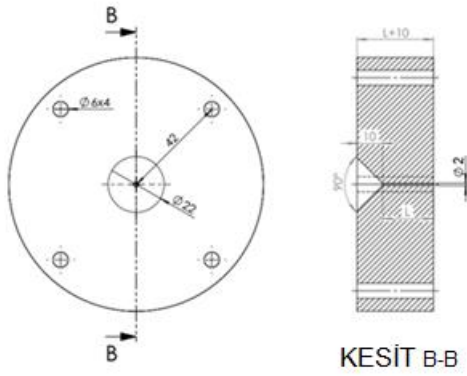


Şekil 7.15. 1 mm çaplı kalıp teknik resmi



Şekil 7.16. Üretilen 1 mm çaplı kalıp (3 adet)

Benzer şekilde aşağıda bulunan teknik resimde ise çapı 2 mm olan orifisler görülmektedir (Bkz. Şekil 7.17). Resim üzerinde tüm ölçüler sabit kalmak şartıyla 3 adet farklı L uzunluklarında (L=20, 30 ve 40 mm) kalıp ürettirilmişdir (Bkz. Şekil 7.18).



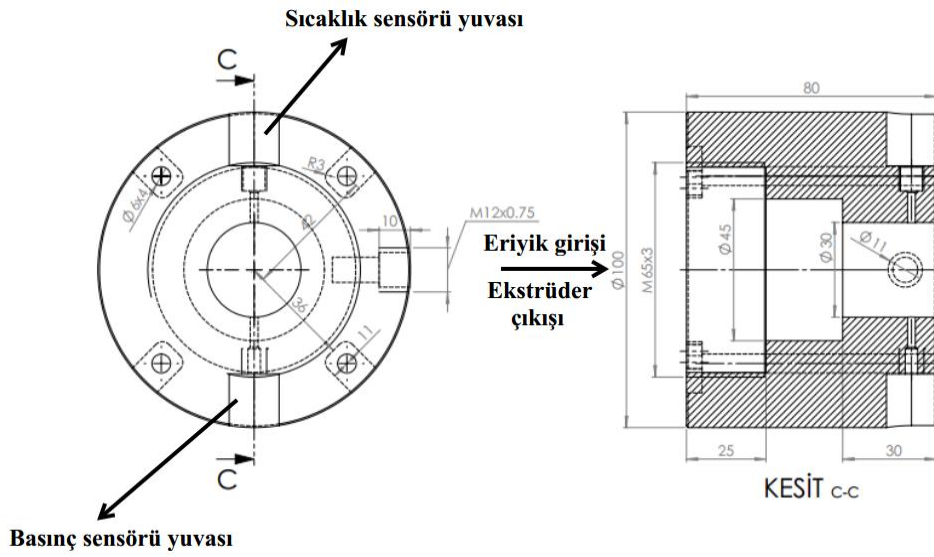
Şekil 7.17. 2 mm çaplı kalıp teknik resmi



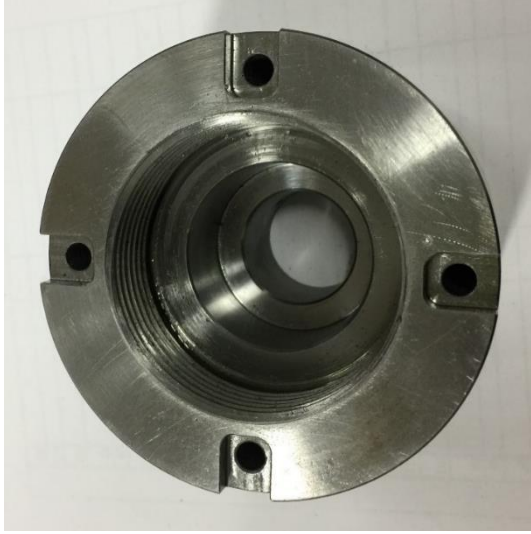


Şekil 7.18. Üretilen 2 mm çaplı kalıp (3 adet)

Yukarıda verilen Şekil 7.4 ve 7.5'te verilen orifislerin ekstrüder makinesiyle bağlanmasını sağlayacak bir adet tutucu kafa tasarımı yapılmış (Bkz. Şekil 7.19-20) ve üretimi gerçekleştirilmiştir.



Şekil 7.19. Tutucu kafa teknik resmi



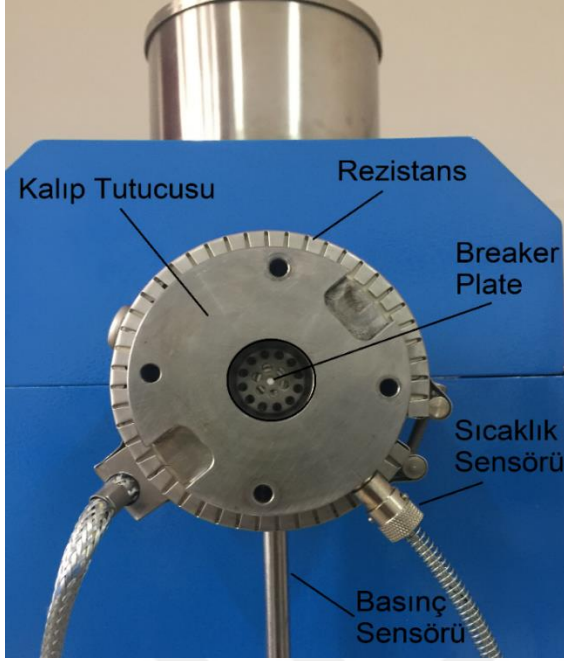
Şekil 7.20. Ürettirilen tutucu kafa

Ekstrüderle şekillendirme işleminde malzemenin kalıp içerisinden düzgün bir şekilde akması için kalıbında istenilen sıcaklıklarda tutulması gerekmektedir. Bu amaçla Akçay Rezistandan alınan sıcaklığı 400 °C'ye çıkabilen, 1200 Watt gücünde ve 220 Volt çalışma gerilimine sahip seramik tipi bir meme rezistans kullanılmıştır. Kullanılan rezistans 100 mm çapına ve 50 mm genişliğe sahiptir (Bkz. Şekil 7.21).



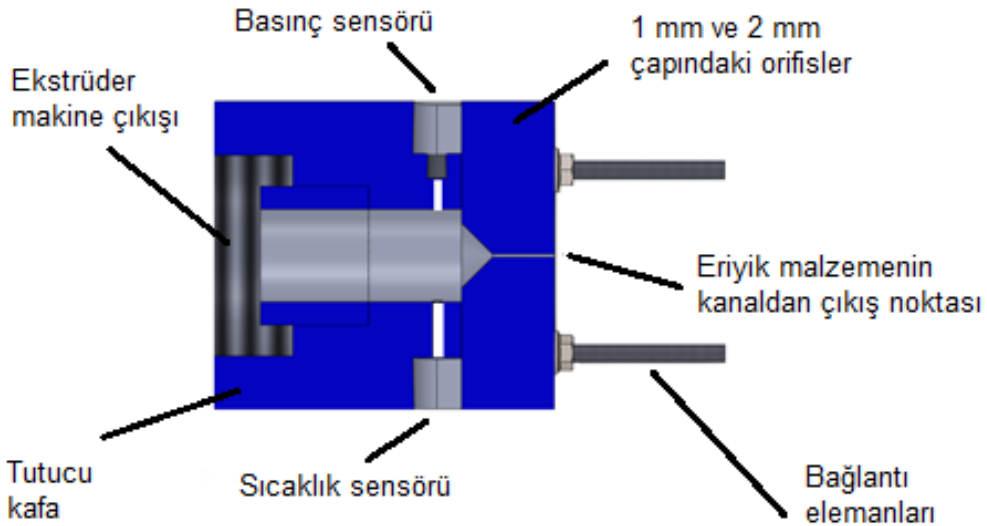
Şekil 7.21. Seramik tipi meme rezistans

Bu rezistansın kalıp üzerine monte edilmiş resmi aşağıda bulunan Şekil 7.22'de gösterilmiştir.

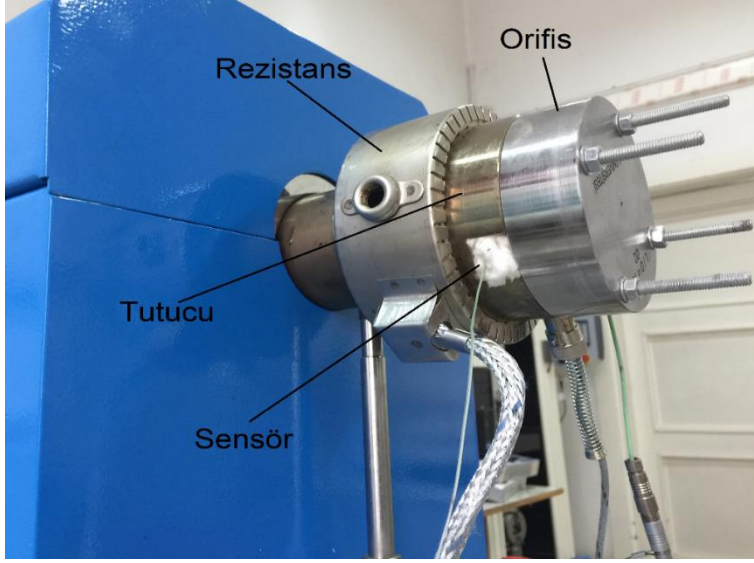


Şekil 7.22. Rezistansın kalıp üzerine bağlanması

Bu tez çalışmasında, tasarlanan ve üretilen kapileri kalıp toplam 2 alt ana montaj elemanından oluşmaktadır. Bunlar Şekil 7.23’de de gösterildiği gibi tutucu ve orifislerdir. Kalıbın monte edilmiş şematik hali Şekil 7.23’de ve ürettirilen parçaların ekstrüder makine üzerine bağlanmış hali ise Şekil 7.24’te gösterilmiştir.

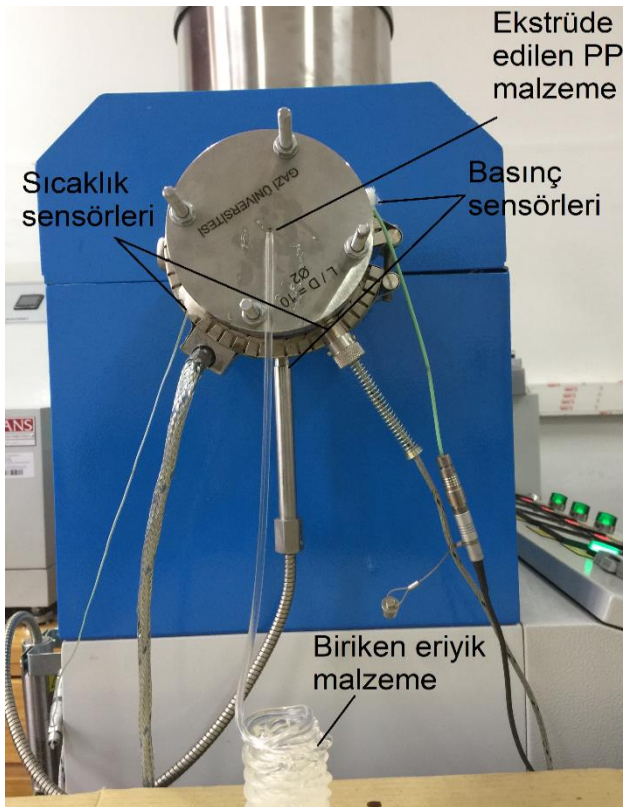


Şekil 7.23. Kapileri kalıp montajı



Şekil 7.24. Kapileri kalıp montajı

Bu çalışmada basınç ve sıcaklık değerlerinin elde edilebilmesi için yukarıda bahsedilen sensörler kullanılmıştır. Eriyik malzeme kalıba girmeden hemen önce sıcaklık ve basınç değerleri ölçülmüştür. Malzemenin kalıptan aktığını ve ekstrüde olan malzeme aşağıda bulunan Şekil 7.25'te gösterilmiştir.



Şekil 7.25 Eriyik malzemenin kalıptan çıkışı

Reolojik özelliklerin hesaplanabilmesi için basınç ve sıcaklık değerlerinin yanısıra hacimsel ve kütleli debisinde bilinmesi gerekmektedir. Çalışma boyunca yapılan ölçümlerde, kütleli debinin elde edilmesinin daha kolay olması sebebiyle kütleli debi değerleri elde edilip gerekli dönüşümler yapılarak hacimsel debi değerleri elde edilmiştir. Kütleli debi değerleri 2 dakika boyunca ekstrüderden akıtılan malzemenin ağırlığının 0.01 gram hassasiyetindeki Radwag PS 510 R.1 hassas terazi (Bkz. Şekil 7.26 ve Çizelge 7.6) ile ölçülmesi sonucu ASTM D5422-09 [73] standardına bağlı olarak elde edilmiştir.



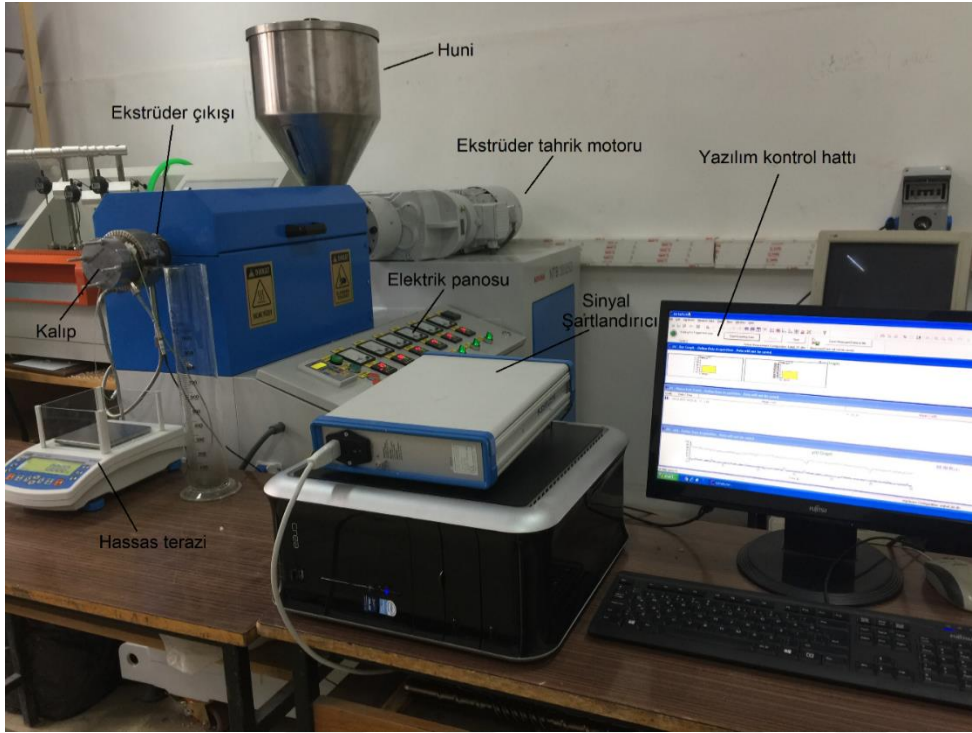
Şekil 7.26. Hassas terazi

Çizelge 7.6. Radwag PS 510 R.1 hassas terazi teknik özellikleri

Maksimum Kapasite	510 g
Minimum Yük	20 mg
Okunabilirlik	1 mg
Dara Ağırlığı	-510 g
Tekrarlanabilirlik	1 mg
Lineerlik	$\pm 2$ mg
Stabilizasyon Süresi	2 sn
Hassasiyet Sapması	2 ppm/°C sıcaklık +10° ±40°C
Çalışma sıcaklığı	+10° ± 40° C **
Hassasiyet Sapması	2 ppm/°C sıcaklık +10° ±40°C

Tez çalışmasında kullanılan deneysel düzenek aşağıda verilen Şekil 7.27’de gösterilmiştir.

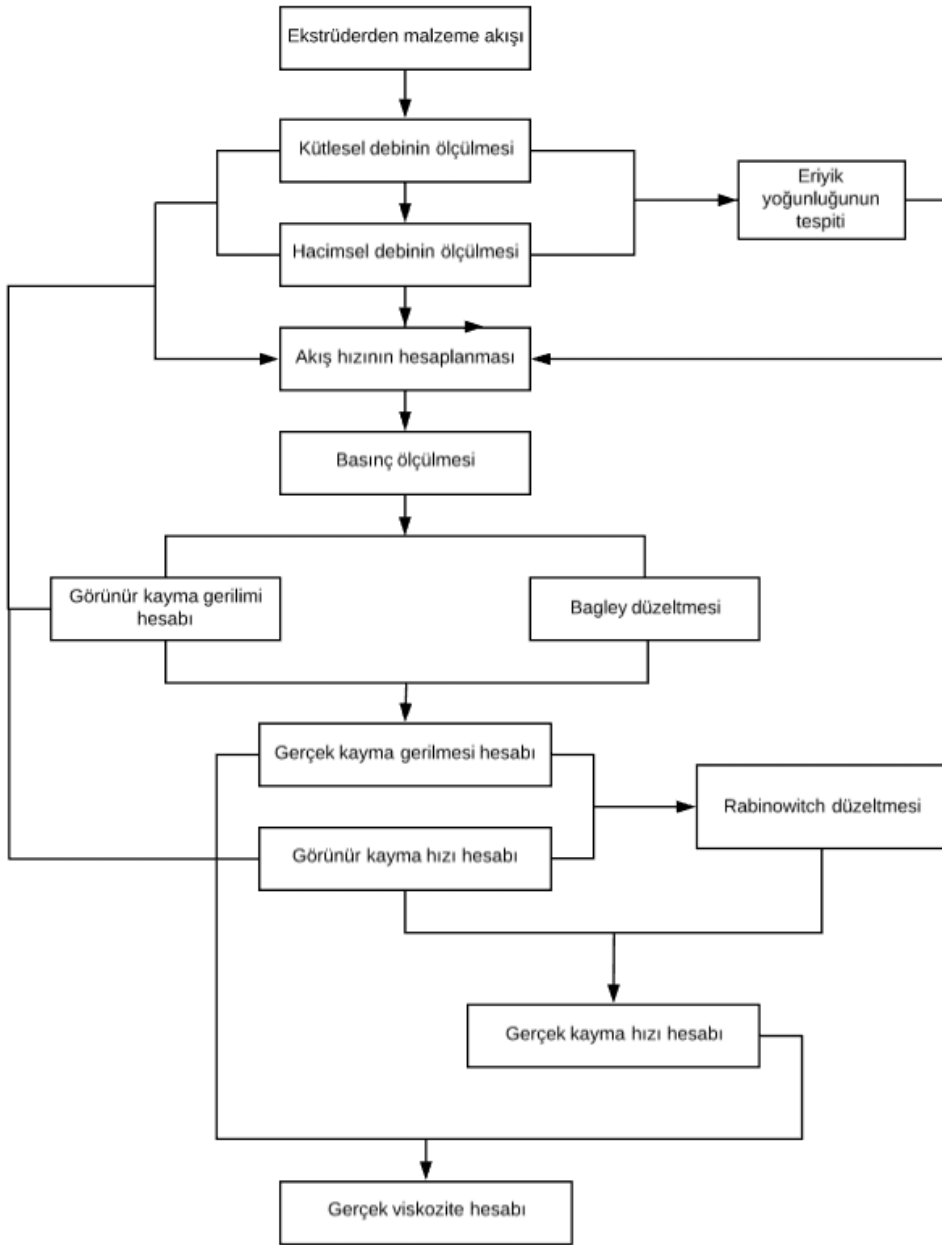




Şekil 7.27. Deney düzeneği

### 7.3. Metot

Bu bölüm altında, deneysel çalışmalar sonucunda elde edilen verilerin elde edilmiş yöntemlerinden ve sırasından bahsedilmiştir. Aşağıda verilen Şekil 7.28 ile reolojik özelliklerin elde edilme aşamaları bir akış şeması yardımıyla gösterilmiştir.



Şekil 7.28. Reolojik özelliklerin hesaplanması için uygulanan akış şeması

Yukarıda verilen akış şemasına bağlı olarak eriyik PP malzemenin reolojik özellikleri tespit edilmiştir. Deneylerde kullanılan ham malzeme (Petkim Petoplen MH 418) PP'nin özellikleri [80] aşağıda bulunan Çizelge 7.7'de verilmiştir.

Çizelge 7.7. PP malzemenin özellikleri

Özellikler	Birim	Değer
Ergime Akış İndeksi	g/10 dak	4.0-6.0

Yoğunluk (23°C)	g/cm <sup>3</sup>	0.905
Akmada Çekme Dayanımı	MPa	34
Elastiklik Modülü (E)	MPa	1300
Poisson Oranı ( $\nu$ )	-	0.35

PP malzeme ekstrüderin hunisine boşaltılmadan önce 2 saat boyunca 80 °C’de Etüv fırında bekletilerek nem alma işlemi gerçekleştirilmektedir (Şekil 7.29). PP malzeme nem alma işleminden sonra ekstrüderin hunisine boşaltılarak kovan içerisine kontrollü olarak gönderilmektedir.



Şekil 7.29. Etüv fırında PP malzemenin nem alma işlemi

Deneysel sonuçlar, ekstrüder makinesinin 190, 200, 210, 220 ve 230 °C’ye ulaştığında gerçekleştirilmiştir. Ekstrüder makinesinin kovan üzerinde bulunan 4 sıcaklık bölgesi ve kalıp üzerinde bulunan sıcaklık değerleri aşağıda verilen Çizelge 7.8’de gösterildiği şekilde ayarlanmıştır.

Çizelge 7.8. Ekstrüder makine bölgelerinin sıcaklık değerleri

1. Bölge, °C (Ekstrüder)	2. Bölge, °C (Ekstrüder)	3. Bölge, °C (Ekstrüder)	4. Bölge, °C (Ekstrüder)	Kalıp Sıcaklığı, °C
160	160	190	190	190



160	170	200	200	200
160	180	210	210	210
160	190	210	220	220
160	190	220	230	230

Ekstrüder makine, arzu edilen sıcaklık değerlerine ulaştığında daha önce fırında nemi alınmış olan PP malzeme kovan içerisinde vidanın dönüş hızına bağlı olarak kovan içerisine alınır. Huniden kovan içerisine giren PP malzemenin belirli bir süre sonra kalıp çıkışından akması beklenir (Bkz: Şekil 7.30). Deneylerde PP eriyiği kalıp kanalından çıkmaya başladıktan 5 dakika sonra ölçümler alınmıştır.



Şekil 7.30. Eriyik PP malzemesinin kalıptan çıkışı

### 7.3.1. Eriyik PP malzemenin yoğunluk değişimin tespiti

Ekstrüder makine, tüm kalıplar için set edilen sıcaklık ve devir değerlerine ulaştığında 30 saniyelik periyodlarla ekstrüde edilen eriyik PP malzemeler toplanmış ve ağırlığı hassas bir

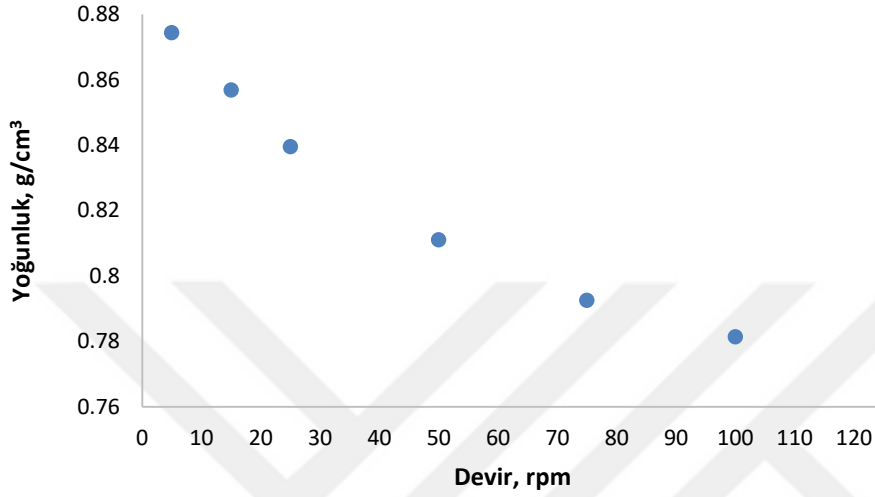
terazi yardımıyla ölçülmüştür (Bkz: Şekil 7.31). Aynı işlem 5 kez tekrarlanmış (150 sn) ve elde edilen 5 numunenin kütlelerinin aritmetik ortalaması alınmıştır.



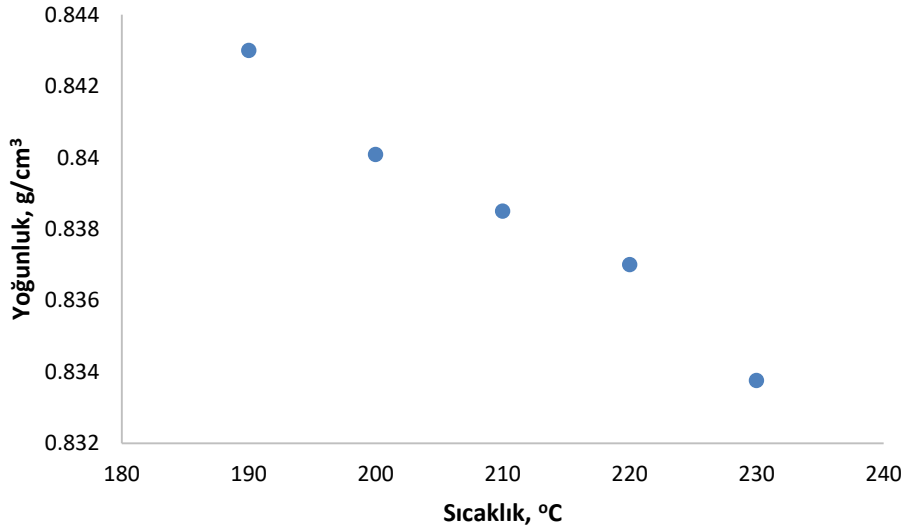
Şekil 7.31 Ekstrüde edilen PP malzemenin ağırlığının ölçülmesi

Daha sonra birim g/s'ye çevrilmiş ve kütleli debiler elde edilmiştir. Ağırlığı bilinen bu numuneler laboratuvar koşullarında 24 saat bekletilmiş ve sonrasında içerisi belirli bir seviyeye kadar saf su ile doldurulmuş olan ölçüm kabının içerisine daldırılmıştır. Kap içerisine daldırılan numunenin kap ölçüğünde meydana getirdiği hacimsel değişim not alınmıştır. Bu işlem kütlesi ölçülen 5 numune içinde tekrarlanmış ve bu kütlesi bilinen 5 numune için 5 hacim değeri elde edilmiştir. Elde edilen 5 numunenin hacimlerinin aritmetik ortalaması alınmıştır. Daha sonra birim  $\text{cm}^3/\text{s}$ 'ye çevrilmiş ve hacimsel debiler elde edilmiştir. Kütleli debinin hacimsel debiye oranı ile yine bu 5 numuneye ait 5 adet yoğunluk değeri elde edilmiştir. Elde edilen hacim değerleri PP malzemenin %2 hacimsel küçülme değeri kadar büyütülerek hesaplamalara dâhil edilmiştir. Elde edilen 5 numunenin yoğunluk değerlerinin aritmetik ortalaması alınarak birimi  $\text{g}/\text{cm}^3$  olan ortalama yoğunluk değeri farklı sıcaklık ve devirler için elde edilmiştir. Bu işlem, ölçümlerden kaynaklanabilecek olası hata oranını minimize etmek amacıyla tüm kalıplar için, tüm sıcaklıklarda ve tüm devirlerde ayrı ayrı yapılmıştır. Çünkü yoğunluk bilindiği üzere sıcaklık ve devirden etkilenmektedir. Aşağıda verilen Şekil 7.32-7.33'de farklı L/D oranlarına ait yoğunluk – devir ve yoğunluk – sıcaklık grafikleri verilmiştir. Yüksek devirlerde

sürtünmeden kaynaklı açığa çıkan ekstra ısı ve sıcaklık artışıyla birlikte kütlesi sabit olan eriyiğin hacminde bir miktar artış meydana gelmiştir. Bilindiği üzere, kütleinin sabit tutulması ve hacmin artmasıyla birlikte yoğunluk değeri aşağıda verilen grafiklerde de görüldüğü üzere azalmıştır.



Şekil 7.32. Yoğunluk-Devir ilişkisi (L/D:15, çap:1 mm, 190 °C)



Şekil 7.33. Yoğunluk-Sıcaklık ilişkisi (L/D:20, 75 rpm, çap:2 mm)

Elde edilen kütleisel debi, hacimsel debi ve yoğunluk değerleri kayma hızı, kayma gerilmesi ve viskozite değerlerinin hesaplanmasında kullanılacaktır. Hacimsel debinin ölçülmesiyle birlikte kalıp boşluğundan çıkan eriyik malzemenin akış hızının tespiti bir sonraki bölümde verilmiştir.

### 7.3.2. Malzemenin akış hızının tespiti

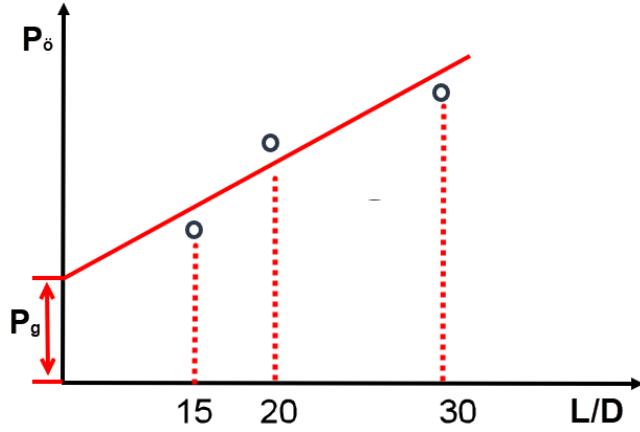
Kalıp üzerinde eriyik malzemenin ekstrüde olduğu kanal çapı 1 mm ve 2 mm'dir ve sabittir. Yapılan çalışmada, elde edilen hacimsel debiler eriyik malzemenin aktığı kesit alanına bölünerek hız değerleri elde edilmiştir. Hızın bulunması için kullanılan eşitlik (Bkz: Eş. 7.1) aşağıda verilmiştir.

$$V = \frac{\dot{Q}}{A} \quad (7.1)$$

Burada  $V$ , ekstrüde olan eriyik malzemenin kanaldan çıkış hızı (mm/s),  $\dot{Q}$ , hacimsel debi (mm<sup>3</sup>/s) ve  $A$ , akış kanalının kesit alanıdır (mm<sup>2</sup>).

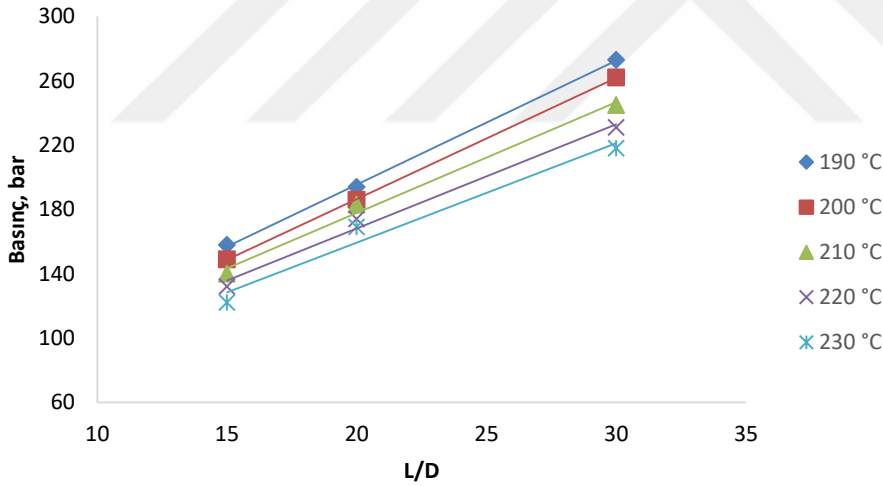
### 7.3.3. Bagley düzeltmesinin uygulanması

Deneyley boyunca farklı kalıp, aynı sıcaklık ve aynı devirlerde meydana gelen basınç değerleri not alınarak görünür kayma gerilmesi değerleri elde edilmiştir. Ancak, gerçek kayma gerilmesi değerlerinin elde edilmesi için kapiler kalıp boyunca meydana gelen basınç düşüşlerinin bilinmesi gerekmektedir. Basınç düşüşlerinin tespit edilmesi amacıyla farklı kalıplara ait aynı sıcaklıklarda, aynı devirlerde elde edilen basınç değerleri eğrileri çizilmiş ve giriş basınç değerleri ( $P_g$ ) elde edilmiştir. Elde edilen giriş basınç değerlerinin, sensörden okunan basınç değerlerinden ( $P_\delta$ ) çıkarılması ile düzeltilmiş basınç değerleri ( $\Delta P$ ) elde edilmiştir. Düzeltilmiş basınç değerleri kullanılarak ise gerçek kayma gerilmesi değerleri elde edilmiştir. Aşağıda verilen Şekil 7.34'te de görüldüğü üzere bagley eğrisinin çizilmesi için en az 3 adet farklı L/D oranlarına sahip kalıp gerekmektedir. Çizilen grafikte, eğrinin y eksenini kestiği nokta giriş basınç değerini temsil etmektedir. Giriş basıncının sensörden okunan basınçtan çıkarılması ile gerçek basınç değeri elde edilmektedir.



Şekil 7.34. Bagley eğrisinin temsili gösterimi (çap 1mm için)

Aşağıda çapı 1 mm olan farklı kalıplar için (L/D:15, 20 ve 30) aynı sıcaklıklarda ve aynı devirlerde okunan basınç değerleri (3 kalıptan okunan 3 farklı basınç değeri) ile elde edilmiş grafiklerden birtanesi örnek olarak aşağıdaki Şekil 7.35'te gösterilmiştir.



Şekil 7.35. Basınç düşüşünün tespiti (Bagley eğrisi) (D:1 mm, 50 rpm)

Eğriler çizildikten sonra,  $P_g$  (giriş basınç değeri) tespit edilmiş ve  $P_o$  (ölçülen basınç değeri) basıncından çıkartılarak (Bkz: Eş. 7.2) gerçek basınç değeri olan ve gerçek kayma gerilmesi hesabında kullanılan  $\Delta P$  elde edilmiştir.

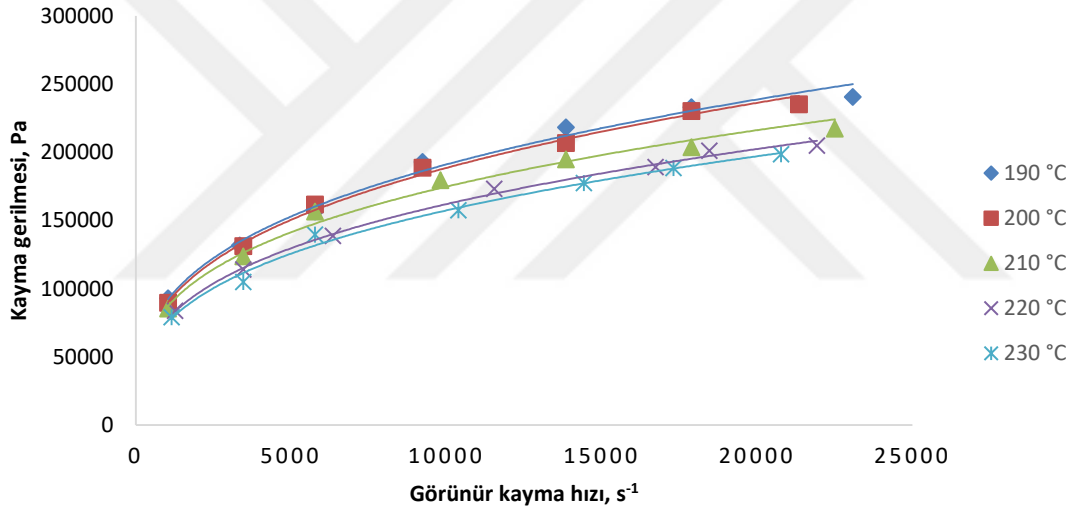
$$\Delta P = P_o - P_g \quad (7.2)$$

Elde edilen  $\Delta P$  ile gerçek kayma gerilmesi değeri aşağıda verilen Eş. 7.3'te verilen eşitlik ile hesaplanmıştır.

$$\tau_a = \frac{\Delta P}{4.(L/D)} \quad (7.3)$$

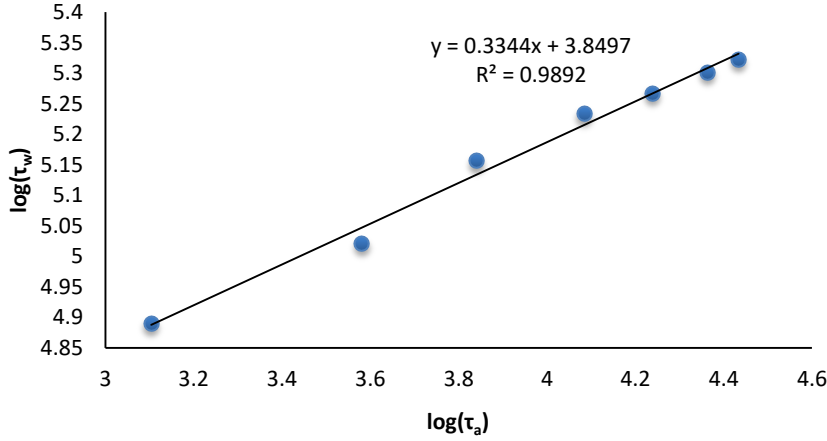
#### 7.3.4. Güç kanunu indexinin tespiti ve Rabinowitsch düzeltmesi

Gerçek kayma hızı değerlerinin hesaplanması için öncelikle üretimi gerçekleştirilen kalıplarda elde edilen tüm sıcaklık ve devirlere ait kayma gerilmesi – görünür kayma hızı (akış eğrisi) grafiği çizilir (Bkz: Şekil 7.36).



Şekil 7.36. Kayma gerilmesi-Görünür kayma hızı grafiği (L/D:30, çap:1 mm)

Daha sonra her bir sıcaklık değerine ait akış eğrisi logaritmik ölçekte çizilerek grafiğin eğiminden güç kanunu indeksi elde edilir (Bkz: Şekil 7.37).

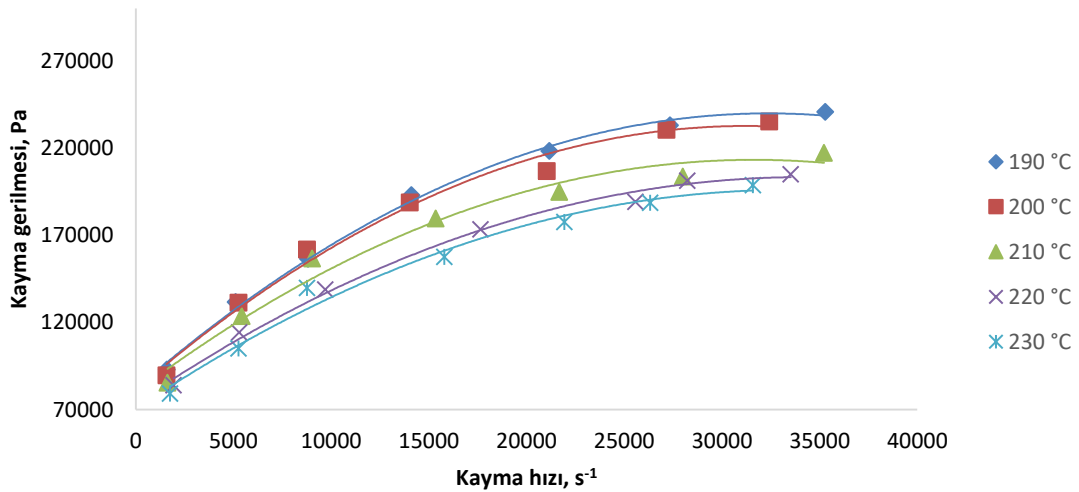


Şekil 7.37.  $\log(\tau_w)$ -  $\log(\tau_a)$  eğrisi (L/D:20, çap:1 mm ve 230 °C)

Güç kanunu indeksi (n), logaritmik ölçekte çizilen akış eğrisinin eğimine eşittir. Bu değer Şekil 7.37 için 0.3344'tür. Güç kanunu indeksinin belirlenmesiyle birlikte görünür kayma hızının gerçek kayma hızına dönüştürülmesi için Eş. 7.4'te verilen Rabinowitsch düzeltmesi uygulanır.

$$\dot{\gamma}_w = \left[ \frac{3n+1}{4n} \right] \cdot \dot{\gamma}_a \quad (7.4)$$

Rabinowitsch düzeltmesi uygulanması sonucu gerçek kayma hızı değerlerinin belirlenmesiyle birlikte Şekil 7.36'da verilen kayma gerilmesi – görünür kayma hızı grafiği, kayma gerilmesi – gerçek kayma hızı olarak güncellenir (Bkz: Şekil 7.38).



Şekil 7.38. Kayma gerilmesi-Gerçek kayma hızı grafiği (L/D:30, çap:1 mm)

Şekil 7.36 ve Şekil 7.38 incelendiğinde ve güç kanunu indeksinin 0-1 aralığında bir değer olması sebebiyle gerçek kayma hızı değeri, görünür kayma hızı değerinden daha yüksek elde edilmiştir.

### 7.3.5. Viskozitenin tespiti

Düzeltilen kayma gerilmesi ve düzeltilen kayma hızı verileri kullanılarak farklı sıcaklık ve bacinçlar için PP malzemenin viskozite değerleri Eş. 7.5 ile hesaplanmıştır.

$$\eta_a = \frac{\tau_a}{\dot{\gamma}_a} = \frac{\pi \cdot \Delta P \cdot R^4}{8 \cdot Q \cdot L^2} \quad (7.5)$$

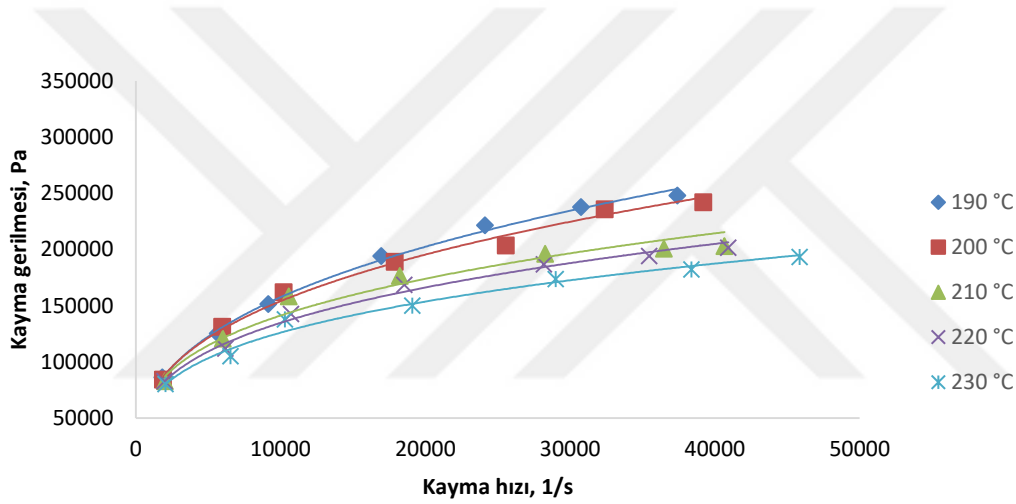




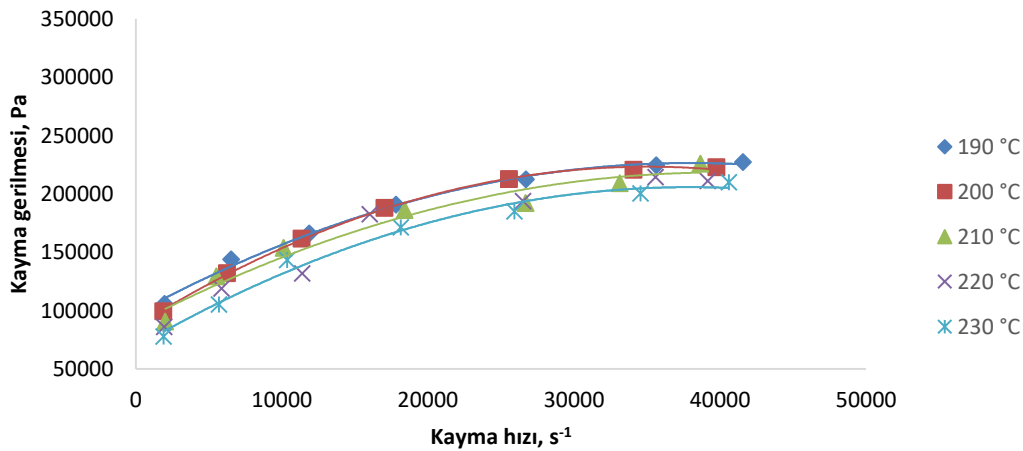
## 8. SONUÇLAR VE TARTIŞMA

Yapılan tez çalışmasında, PP malzemenin reolojik özelliklerinin belirlenmesi amacıyla 6 adet farklı L/D oranına sahip kapileri reometre üretimi gerçekleştirilmiştir. PP malzemesinin reolojik özelliklerinin tespiti için her bir kalıpta farklı 5 sıcaklık değerinde ve farklı 7 devirde kayma hızı, kayma gerilmesi ve viskozite değerleri belirlenmiştir.

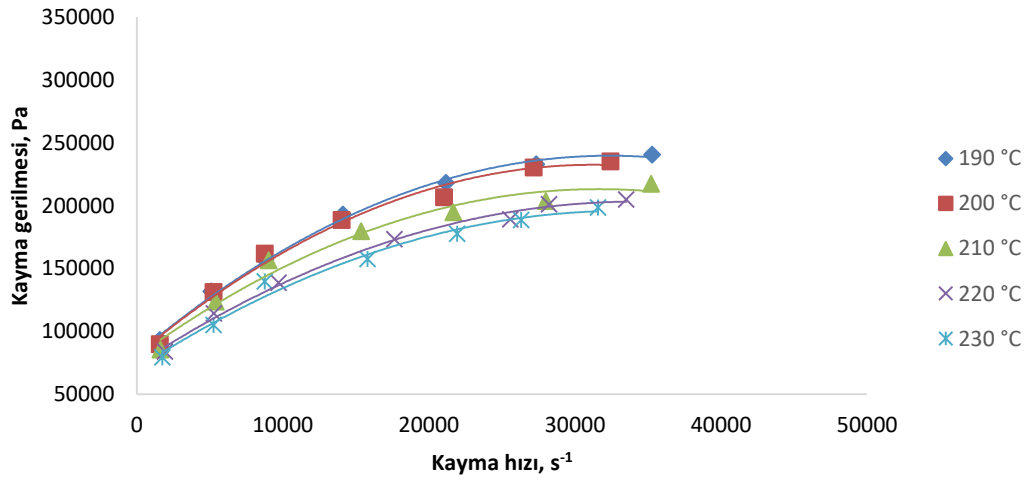
Yapılan deneysel çalışma verilerinden oluşturulan kayma gerilmesi – kayma hızı grafikleri Şekil 8.1-8.3'te çap 1 mm olan kalıplar için ve Şekil 8.4-8.6'da çap 2 mm olan kalıplar için verilmiştir.



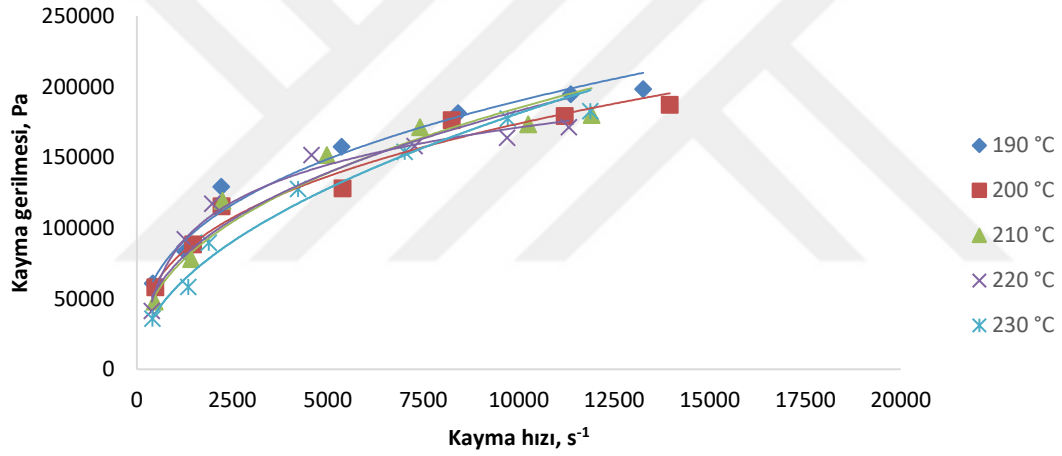
Şekil 8.1. L/D:15 (çap 1 mm) kayma gerilmesi-kayma hızı grafiği



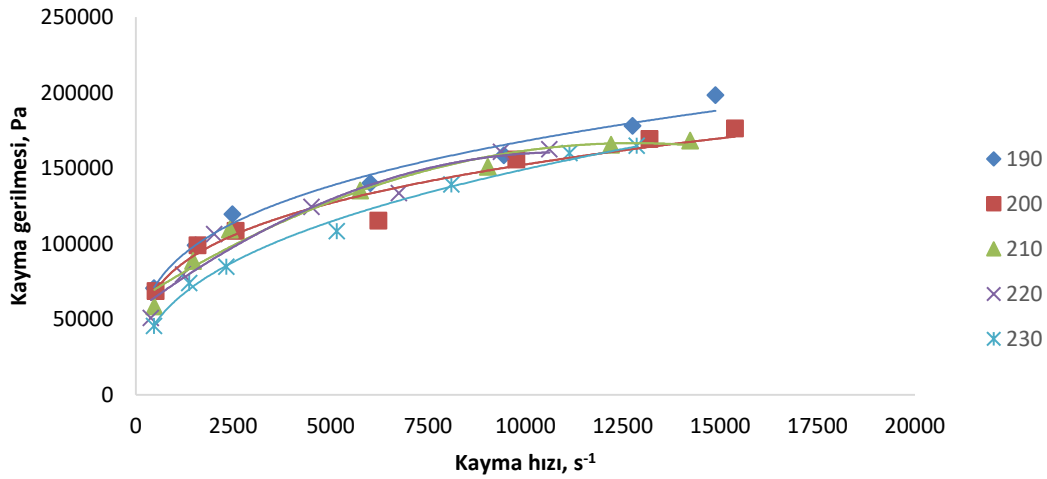
Şekil 8.2. (L/D:20 çap 1 mm) Kayma gerilmesi – Kayma hızı grafiği



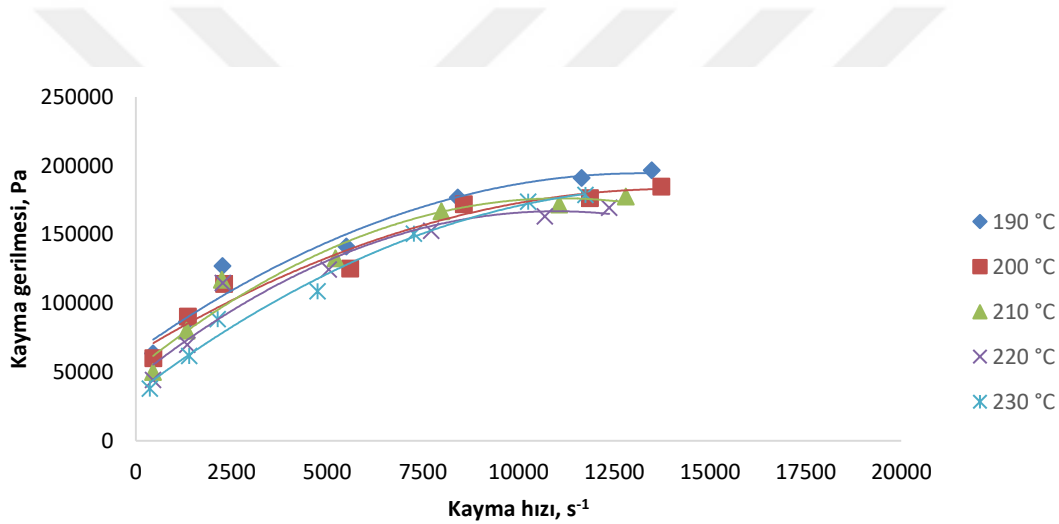
Şekil 8.3. (L/D:30 çap 1 mm) Kayma gerilmesi – Kayma hızı grafiği



Şekil 8.4. (L/D:10 çap 2 mm) Kayma gerilmesi – Kayma hızı grafiği



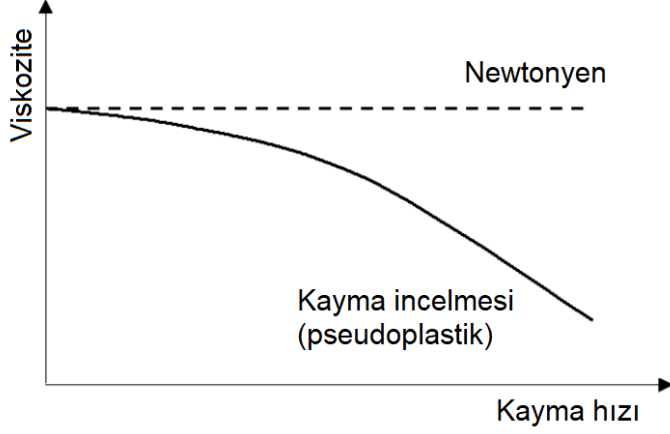
Şekil 8.5. (L/D:15 çap 2 mm) Kayma gerilmesi – Kayma hızı grafiği



Şekil 8.6. (L/D:20 çap 2 mm) Kayma gerilmesi – Kayma hızı grafiği

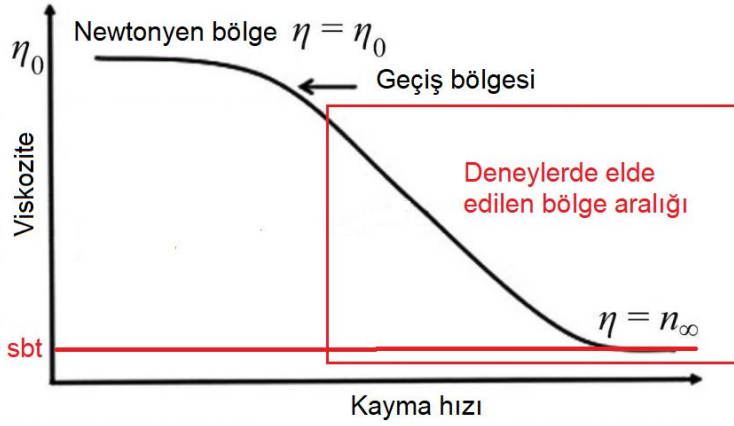
L/D oranları aynı olan kalıplarda aynı akış hızında sıcaklık arttıkça viskozite değerleri azalmaktadır. L/D oranı aynı, sabit sıcaklıkta vida dönüş hızı farklı olan denemelerde ise vida dönüş hızının artmasıyla proseslerde viskozite değeri daha düşük çıkmaktadır. Bunun sebebi, vidanın hızlı dönüşü ile sürtünmeden kaynaklı açığa çıkan ısının daha fazla oluşudur. Aynı çapa sahip kalıplarda L uzunluğu arttıkça daha yüksek kayma gerilmesi değerleri elde edilmiştir. Çünkü, eriyik malzeme kanal içerisinde daha uzun mesafe boyunca itildiğinden meydana gelen basınç da daha fazladır. Eriyik PP'e uygulanan basınç değeri arttıkça PP yapısında bulunan moleküller arasındaki boş hacimlerde azalacaktır. Basıncın artmasına bağlı olarak kayma gerilmesi, kayma gerilmesinin artmasına bağlı olarak viskozite değerleri yükselmektedir. Bilindiği üzere, PP malzeme eriyik forma geçtiğinde, diğer pek

çok polimerik malzeme gibi ideal Newtonyen davranıştan sapmakta ve kayma incelmesi davranışı sergilemektedir. Şekil 8.7’de newtonyen bölgeden sapma grafiği verilmiştir.



Şekil 8.7. Newtonyen akıştan sapma (kayma incelmesi)

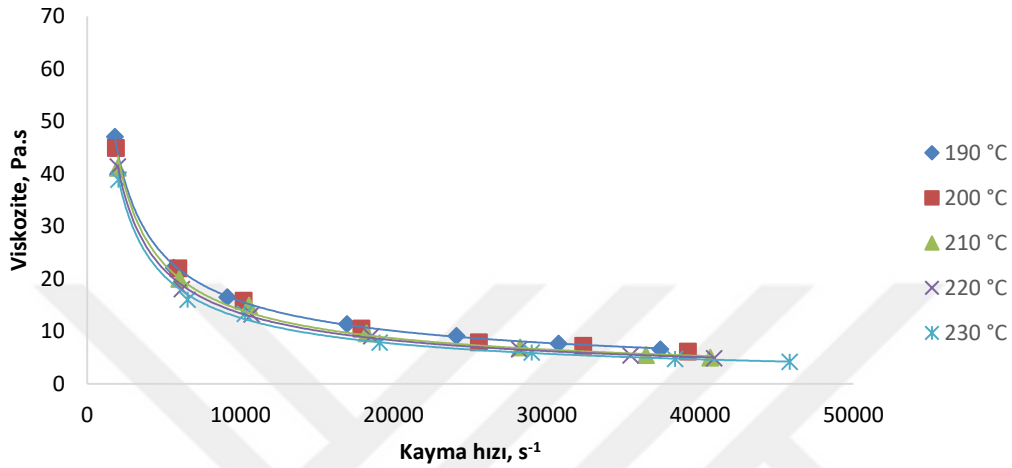
Şekil 8.8’de yapılan deneylerden elde edilen viskozite–kayma hızı grafiği aralığı verilmiştir. Bu aralık birçok ticari reometre (MFI ve kapileri reometreler vb.) ve bilimsel çalışmalardan elde edilen ölçüm aralığından daha geniş bir bölgeye sahiptir.



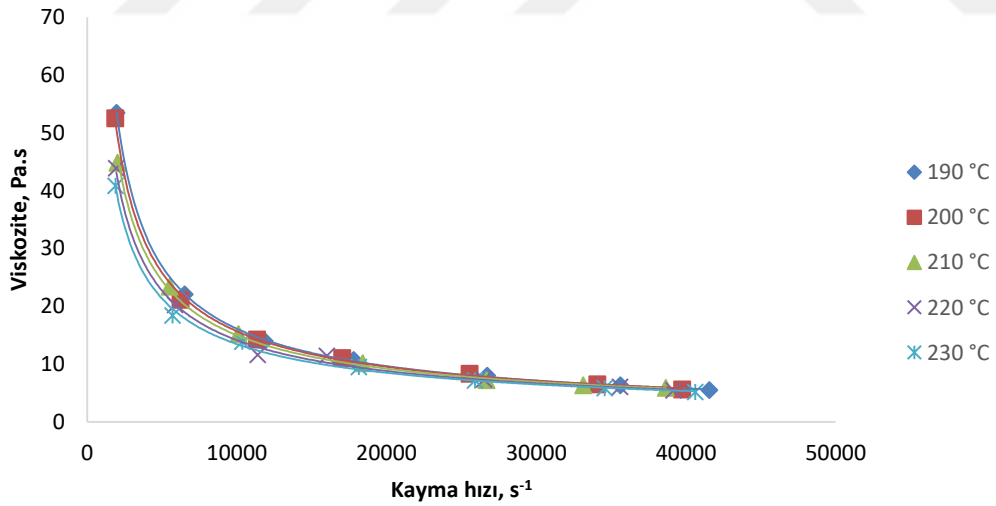
Şekil 8.8. Newtonyen bölgeden sapma (viskozite-kayma hızı eğrisi)

Şekil 8.9-8.11’de kanal çapı 1 mm olan kalıplar için elde edilen viskozite – kayma hızı eğrileri paylaşılmıştır. Grafikler incelendiğinde, PP malzemesinin newtonyen bölgeden saparak kayma incelmesi davranışı sergilediğini görülmektedir. 1 mm çaplı kalıplarda kayma hızı değeri  $25.000 \text{ s}^{-1}$  değerinden sonra viskozite değerindeki değişim oldukça küçüktür. Bu durum, sabit bir değer olarak düşünülebilir. Bu noktadan sonra eriyik malzemenin viskozitesindeki değişim çok azdır. PP malzeme tipik bir kayma incelmesi

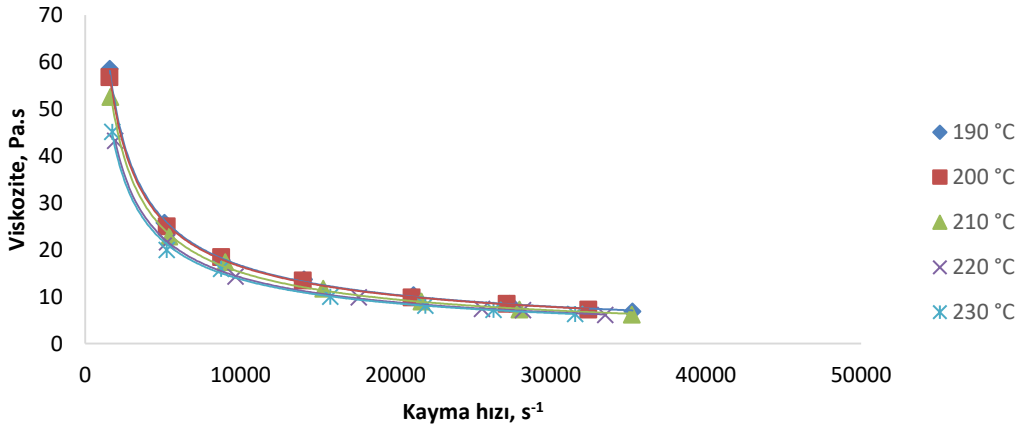
davranışı sergilemektedir (Bkz: Şekil 8.9-8.14). Beş farklı sıcaklık değeri için yapılan deneylerde sıcaklığın etkisinin, kayma hızının etkisinden az olduğu görülmektedir. Benzer durum Şekil 8.9-8.14'te de aynı özelliكتedir. Ayrıca L/D oranındaki artışta kayma hızında ciddi değişimler yaratmıştır.



Şekil 8.9. L/D:15 (çap 1 mm) Viskozite-Kayma hızı grafiği



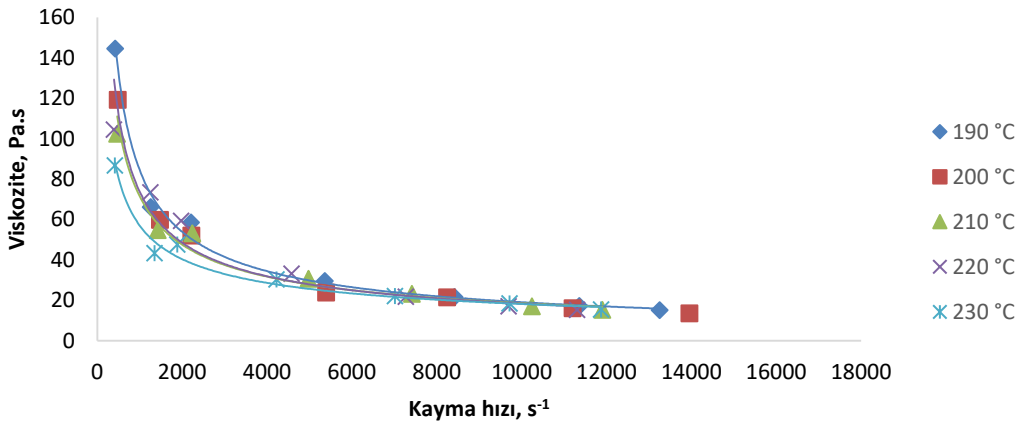
Şekil 8.10. (L/D: 20 çap 1 mm) Viskozite – Kayma gerilmesi grafiği



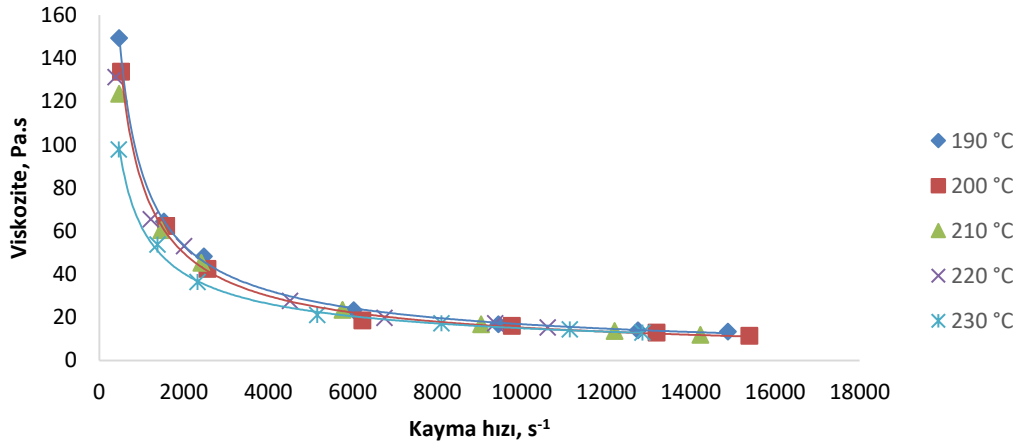
Şekil 8.11. (L/D:30 çap 1 mm) Viskozite – Kayma Gerilmesi grafiği

Şekil 8.12-8.14'te kanal çapı 2 mm olan kalıplardan elde edilen viskozite – kayma hızı eğrileri verilmiştir. Yukarıda verilen Şekil 8.2-8.5 ile aşağıda verilen Şekil 8.9-8.11 kıyaslandığında kalıp çapının artmasıyla birlikte daha yüksek viskozite değerlerine ulaşıldığı görülmektedir.

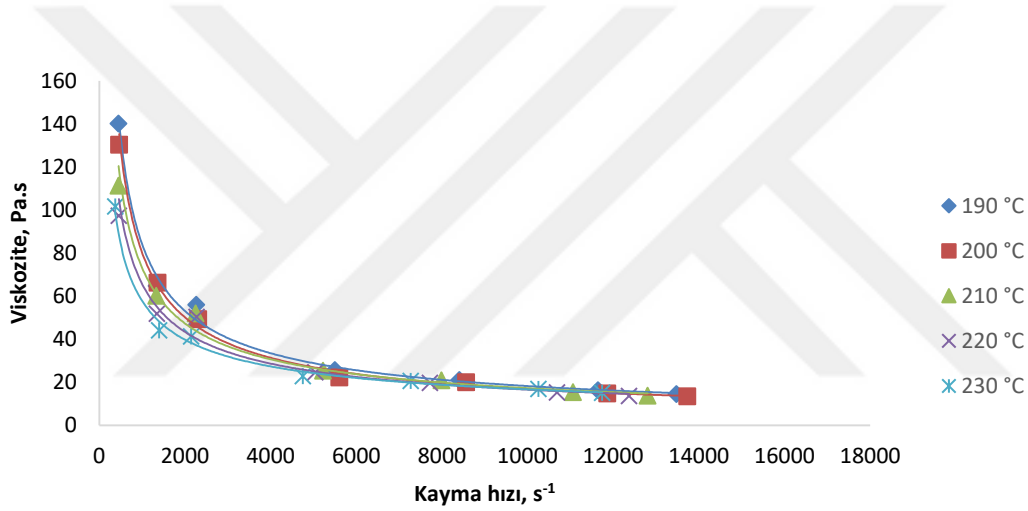
Yapılan deneyler sonucunda kayma hızı değerleri  $350-46,000 s^{-1}$  aralığında elde edilmiştir. En düşük kayma hızı değerine L/D:20 (çap 2 mm) olan kalıpta rastlanmıştır ( $350 s^{-1}$ ). En yüksek kayma hızı değerine ise L/D:15 (çap 1 mm) olan kalıpta ulaşılmıştır ( $46,000 s^{-1}$ ). Sonuçlar değerlendirildiğinde, kapileri kalıplar için çap büyüdükçe daha düşük kayma hızı değerleri elde edildiği görülmüştür. Çapın küçülmesiyle birlikte kanal girişinde meydana gelen basınç artışına bağlı olarak daha yüksek kayma hızı değerlerinin elde edilmesi mümkündür.



Şekil 8.12. (L/D:10 çap 2 mm) Viskozite – Kayma hızı grafiği



Şekil 8.13. (L/D:15 çap 2 mm) Viskozite – Kayma gerilmesi grafiği



Şekil 8.14. (L/D:20 çap 2 mm) Viskozite – Kayma gerilmesi grafiği

Ek olarak, eriyik malzemeler kalıp dışına her zaman düzgün bir formda çıkmayabilirler. Eriyik malzemenin kalıp dışına düzgün çıkmaması ya da kırılarak çıkması (melt fracture) polimerin visko-elastik davranışına, kalıp yüzeyinin pürüzlülüğüne, eriyik malzeme sıcaklığına ve eriyik malzemenin akış hızına bağlıdır. Eriyik malzemenin düzgün şekilde aktığı form Şekil 7.28'de gösterilmişti, eriyiğin kırılarak kalıp dışına çıkışı Şekil 8.15 ile gösterilmiştir.





Şekil 8.15. Eriyik malzemenin kırılarak çıkması (melt fracture)

Deneyleerde karşılaşılan eriyik kırılmasının başladığı devirler Çizelge 8.1 ve Çizelge 8.2’te gösterilmiştir. Çizelgeler incelendiğinde, aynı L/D oranına sahip kalıplar için eriyik kırığı davranışının daha yüksek devirlerde başladığı görülmektedir. Farklı L/D’ler kıyaslandığında ise kalıp uzunluğunun (L) artması ile eriyik kırığını daha yüksek devirlerde başlamıştır. Yine, kalıp uzunluğuyla birlikte artan kalıp çapı da eriyik kırığının artmasına sebep olmuştur. Uzunluğu 15 mm ve çapı 1 mm olan kalıp için eriyik kırığı 190 °C sıcaklık için 5 rpm’de başlarken 230 °C’de uzunluğu 40 mm ve çapı 2 mm olan kalıpta eriyik kırılması 5-125 rpm arasında görülmemiştir. Bu sonuçlara göre çapı 1 mm olan ve L/D:15 olan kalıpta kritik kayma hızının 5 rpm’de başladığı, çapı 2 mm ve L/D:20 olan kalıpta ise kritik kayma hızına ulaşamadığı anlaşılmaktadır. Deney sonuçları, eriyikte meydana gelen kırıkların geciktirilmesi için sıcaklığın ya da kalıp uzunluğunun artırılması gerektiğini göstermektedir. Eriyiğin kırılmadan akabilmesi nihai ürünün kalitesini artıracığından, kalıp tasarımı yapılırken eriyik kırılma olayı göz önünde bulundurulmalıdır.

Çizelge 8.1. Eriyik kırılmalarının başlangıç devirleri (Çap:1 mm)

Sıcaklık, °C	Devir, rpm		
	L/D:15	L/D:20	L/D:30
190	5	11	14
200	9	14	16
210	13	17	19
220	17	21	22
230	22	26	28

Çizelge 8.2. Eriyik kırılmalarının başlangıç devirleri (Çap:2 mm)

Sıcaklık, °C	Devir, rpm		
	L/D:15	L/D:20	L/D:30
190	32	54	60
200	39	62	72
210	47	71	89
220	56	94	112
230	72	108	-



## 9. ÇIKARIM VE ÖNERİLER

Bu tez çalışmasında, 115M041 numaralı ve “Yüksek ısı dirençli, geliştirilmiş perlit esaslı ve karbondioksit hücreli ısı yalıtım levhasının geliştirilmesi” başlıklı proje kapsamında bir iş paketi tamamlanmıştır. Yapay gözenek oluşturmak üzere ısı yalıtım panelinin içerisine katılacak olan ve içleri CO<sub>2</sub> gazı doldurulacak polimer esaslı hücrelerin PP malzemeden üretilebilirliği araştırılmıştır. Bu kapsamda Petkim Petoplen MH 418 kodlu PP malzeme, 190-230 °C sıcaklık aralığında ve 5-125 rpm vida devirlerinde, kurulan vida tipi kapileri reometre düzeneğinde karakterize edilmiştir. Yapılan deneylerden elde edilen çıkarımlar şu şekildedir:

- PP malzeme, ısı iletim katsayısı düşük olması ( $\lambda_{pp}=0.15$  W/m.K) gaz geçirgenliğinin kabul edilebilir düzeyde olması ve yerli üretilebilir olması nedeniyle tercih edilmiştir. Düşük ısı iletimine rağmen yalıtım malzemesinin ısı iletim katsayısını yükseltme etkisi nedeniyle karbondioksit hücresinin cidar kalınlığının oldukça ince olması gerekmektedir. İhtiyaç duyulan incelikte malzeme üretilebilmesi viskozite değerinin düşürülmesiyle mümkündür. Bu çalışmada PP viskozitesinin 10 Pa.s değerine kadar düşürülebileceği görülmüştür. Bu da, ince cidarlı maleme üretimini mümkün kılmaktadır.
- Vida tipi kapileri reometre düzeneği kurulması oldukça kolaydır. Ölçüm süresi MFI cihazlarına göre çok daha kısadır.
- Çok farklı çap ve L/D oranlarında kalıplar kullanılarak  $\eta_0 - \eta_\infty$  aralığında malzemelerin karakterize edilmesinin mümkün olduğu görülmüştür. Bu bağlamda ince cidarlı PP üretimi için çıkış kesiti çok ince, yüksek devir, 190 °C sıcaklık ve kalıp uzunluğu fazla olmalıdır.
- Benzer düzeneğin, üretim hatlarında da daha üretime başlamadan, kullanılacak malzemenin karakterize edilmesinde kullanılabileceği düşünülmektedir. Böylece gerçek üretim şartlarında hem malzeme kalitesi hem de proses şartlarının belirlenmesine yönelik çalışmalar yapılabilecektir.
- Laboratuvar tipi cihazlarda cihaz kapasitesi dahilinde çok küçük çaplı kalıp kullanımı, özellikle düşük sıcaklıkta gerçekleştirilen deneylerde aşırı akım çekilmesine sebep

olacağından, sistemin sağlıklı çalışması için uygun bir koruyucu alınmasına gerek duyulmaktadır.

- Ticari reometrelere kıyasla kurulan deney düzeneğinin maliyeti oldukça düşüktür. Buna karşılık verim ve performansı yüksek ve elde edilen sonuçlar oldukça güvenlidir.
- Yapılan deneylerde viskozitenin sıcaklık artışından ziyade kayma hızı artışından daha fazla etkilendiği ve azaldığı görülmüştür. Bu durum, enerji verimliliği açısından değerlendirek optimizasyon yapılabilir.
- Yapılan deneylerde kritik kayma hızı değerlerinin tespiti de mümkündür. Eriyik kırığı olayının başlama ve bitiş safhaları ve şartları kurulan düzenek ile tespit edilebilmektedir.
- Kurulan düzenekte, lazer mikrometre kullanımı ile birlikte ekstrüzyon yöntemiyle şekillendirmede karşılaşılan şişme (die-swell) olayı da tespit edilebilir ve karakterize edilebilir. Bu durum özellikle ince kesitli malzeme üretiminde önemlidir. İstenen cidar kalınlığının artışının kontrolünde önemlidir.

## KAYNAKLAR

1. Palabıyık, M. (2009). *Polimer Kompozit Malzemeler ile Konstrüksiyon ve İmalat*, İstanbul: İstanbul Teknik Üniversitesi Makine Fakültesi
2. Crawford, R. (1998). *Plastics Engineering* (Third Edition). USA: Pergamon publisher.
3. Kurt, B. (2012). *Plastik Ürün İmalati Yapan Kobi'lerde İsg Uygulamaları Ve Plastik Enjeksiyon Makinelerinde Oluşan Tehlikelerin Tanımlanması ve Önlenmesi*. Uzmanlık Tezi, Çalışma ve Sosyal Güvenlik Bakanlığı, Ankara.
4. Bourne, M. (2002). *Physics and Texture*. In: *Food Texture and Viscosity: Concept and Measurement*. (2nd Edition). New York: Academic Press, 59-106.
5. Björn, A., Segura de La Monja, P., Karlsson, A., & Ejlertsson, J. (2012). *Rheological Characterization* (Chapter 3). London, UK: InTech.
6. Beris, A. N., Giacomin, A. J. (2013). "Πάντα ρεῖ": *Everything Flows*. Rheology Research Center Report 207, University of Wisconsin-Madison.
7. Dinkgreve, M., Morton M. D., and Daniel, B. (2017). "Everything flows?": Elastic Effects on Startup Flows of Yield-Stress Fluids. *Journal of Rheologica Acta*, 56(3), 189-194.
8. Peters, F. E. (1967). *Greek Philosophical Terms, A Historical Lexicon*, New York: New York University Press.
9. Barnes, J. (1979). *The Presocratic Philosophers*, Vol. 1. London: Routledge and Kegan Paul Publishers.
10. Saramito P (2007) A new constitutive equation for elastoviscoplastic fluid flows. *Journal of Non-Newtonian Fluid Mech*, 145,1–14.
11. Tim O., and Natalie R. (2014). *Polymer Rheology Fundamentals and Applications*. London: Carl Hanser Verlag Press.
12. Peker, S. ve Helvacı, Ş. (2003). *Akışkanlar Mekaniği: Kavramlar, Problemler, Uygulamalar*. İzmir: Literatür Yayıncılık.
13. Lewis, M.J. (1987). *Physical Properties Of Foods And Food Processing Systems*. England: Ellis Horwood Ltd.
14. Gökgöz, İ. (2008). *Design And The Application Of A Capillary Rheometer To The Determination of The Flow Characteristics of Hdpe*, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
15. Mandis, S.L. (2004). Rheometers: Which type is right for you?. *Plastic Technology*, 50, 64-73.
16. Michaeli, W. (2003). *Extrusion dies for plastics and rubber: design and engineering computations*. München: Carl Hanser Verlag.

17. Lenk, R. S. (1981). The analysis of shear-viscous flow in typical elliptical dies. *Journal of Applied Polymer Science*, 26,3171-3173.
18. Lenk, R. S. and Frenkel, R. A. (1981). Pressure drop through tapered wide-slit dies - A revised version. *Journal of Applied Polymer Science*, 26, 2801-2804.
19. Vlachopoulos, J. ve Scott, P. S. (1985). Pressure drop for molten polymer flow through tapered dies. *Advances in Polymer Technology*, 5, 81- 86.
20. Bourne, M. (2002). *Physics and Texture. In: Food Texture and Viscosity: Concept and Measurement*. (2nd Edition). New York: Academic Press, 59-106.
21. Rides, M. ve Allen, C.R.G. (1996). *Capillary extrusion rheometry intercomparison using polyethylene and glass-fibre filled polypropylene melts: measurement of shear viscosity and entrance pressure drop*, National Physical Laboratory Report CMMT.
22. Björn, A., Monja S.P., Karlsson, A. and Ejlerstson, J. (2015). *Rheological Characterization*. London, UK: InTech.
23. Önder, A.E. (2008). *Kılcal Reometrenin Otomatik Kontrol Sisteminin Tasarlanması ve Hesaplama Programının Yazılması*, Yüksek Lisans Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
24. Han, C.D. (1971). Measurement of the rheological properties of polymer melts with slit rheometer. *Journal of Applied Polymer Science*, 15, 2579–2589.
25. Ueda, M., Iwamura, M. and Tomiyama, H. (2015). An Improved Flow Channel Design for Film and Sheet Extrusion Dies. *Extrusion Division*. 9, 265-272.
26. Macosko, C. W. (1994). *Rheology - principles, measurements, and applications*. New York: VCH Publishers.
27. Rahim, N. A. A. (2010). *Flow Behaviour And Viscoelastic Properties Of Polypropylene-Kaolin Composites*, Master Thesis, Universiti Sains Malaysia.
28. Rahim, N. A. A., Ariff, Z. M., Ariffin, A. and Jikan, S. S. (2011). A study on the effect of filler loading on flow and viscoelastic behavior of polypropylene/kaolin composites. *Journal of Applied Polymer Science*, 119, 73-83.
29. Rahim, N. A. A., Ariff, Z. M., Ariffin, A. (2011). Flow behaviour and viscoelasticity of polypropylene-kaolin extruded composites at different temperatures. *Pertanika Journal of Science & Technology*, 19, 383-388.
30. Liang, J. Z. and Ness, J. N. (1998). The melt die-swell behaviour during capillary extrusion of LDPE/PP blends. *Polymer Testing*, 17, 179-189.
31. Muksing, N., Nithitanakul, M., Grady, B. P. and Magaraphan, R. (2008). Melt rheology and extrudate swell of organobentonite-filled polypropylene nanocomposites. *Polymer Testing*, 27, 470-479.
32. Gupta, R.K. (2000). *Polymer and Composite Rheology*. New York: Marcel Dekker Inc.

33. Michaeli, W. (1984). *Extrusion Dies: Design and Engineering Computations*. New York: Hanser Publishers, 173-210.
34. Han, C.D. (1974). Rheological Properties of Calcium Carbonate-Filled Polypropylene Melts. *Journal of Applied Polymer Science*, vol. 18, 821-829.
35. Han, C.D. (1974). On slit- and capillary-die rheometry. *Transactions of the Society of Rheology*, vol. 18.1, 163-190.
36. Han, C.D. (1976). *Rheology in Polymer Processing*. New York: Academic Press.
37. Kısasöz, E. (2010). *Kalsit Katkılı Polipropilen Rastgele Kopolimer Kompozitlerin Reolojik Özellikleri*, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
38. Maruyama, K., Sakashita, T., Hagura, Y. and Suzuki, K. (2007). Relationship Between Rheology, Particle Size and Texture of Mayonnaise. *Food Science and Technology Research*. 13(1), 1-6.
39. Rabinowitsch, R. (1929). Über die Viskosität und Elastizität von Solen. *Zeitschrift für Physikalische Chemie*, 145, 1-26.
40. Vlachopoulos, J. and Wagner, J.R. (2001). *The SPE Guide on Extrusion Technology and Troubleshooting*. Brookfield: Society of Plastics Engineers Incorporated.
41. Hertel, D., Valette, R., and Munstedt, H. (2008). Three-dimensional entrance flow of a low-density polyethylene (LDPE) and a linear low-density polyethylene (LLDPE) into a slit die. *Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics*, 153, 82–94.
42. Couch, M.A. and Binding, D.M. (2000). High pressure capillary rheometry of polymeric fluids. *Polymer* 41. 6323–6334.
43. Bariani, P.F., Salvador, M. and Lucchetta, G. (2007). Development of a test method for the rheological characterization of polymers under the injection molding process conditions. *Journal of Materials Processing Technology*, 191, 119–122.
44. Aho, J. and Syrjälä, S. (2011). Shear viscosity measurements of polymer melts using injection molding machine with adjustable slit die. *Polymer Testing*. 30(6), 595-601.
45. Moon, J. and Lee, J. (2013). Shear viscosity measurement of highly filled polycarbonate melts using a slit-die rheometer. *Korea-Australia Rheology Journal*, 25 (3), 129–135.
46. Fernandez, A., Muniesa, M. and Javierre, C. (2014). In-line rheological testing of thermoplastics and a monitored device for an injection moulding machine: Application to raw and recycled polypropylene. *Polymer Testing*. 33, 107–115.
47. Izu, P., Muñoz, M.E., Peña, J.J. and Santamaría, A. (1993). Capillary and slit-die flow of two liquid-crystalline polymers. The effect of pressure on viscosity. *Journal of Polymer Science Part B: Polymer Physics*. 13(3), 347–356.
48. Hay, G. and Mackay, M.E. (1999). Pressure and temperature effects in slit rheometry. *Journal of Rheology*. 43, 1099–1116.



49. Royer, J.R., Gay, Y.J., Desimone, J.M. and Saad, A. K. (2000). High-pressure rheology of polystyrene melts plasticized with CO<sub>2</sub>: Experimental measurement and predictive scaling relationship. *Journal of Polymer Science, Part B*. 38(23), 3168–3180.
50. Shiau, S.Y. and Yeh, A. (2004). On-line measurement of rheological properties of wheat flour extrudates with added oxido-reductants, acid and alkali. *Journal of Food Engineering* 62, 193–202.
51. Wang, X., Carr, W.W., Bucknall, D.G. and Morris, J.F. (2010). High-shear-rate capillary viscometer for inkjet inks. *Review of Scientific Instruments*, 81(6), 065106.
52. Mitsoulis, E. and Hatzikiriakos, S.G. (2011). Capillary Extrusion Flow of a Fluoropolymer Melt. *International Journal of Material Forming*. 6, 29-40.
53. Ansari, M., Zisis, T., Hatzikiriakos, S.G. and Mitsoulis, E. (2012). Capillary flow of low-density polyethylene. *Journal of Polymer Engineering and Science*. 52(3), 649–662.
54. Kaseem, M., Hamad, K. and Deri, F. (2013). Slit die rheology of thermoplastic starch during extrusion process. *International Journal of Plastic Technology*. 17(1), 51–60.
55. Teixeira, P.F., Maia, J.M., Covas, J.A. and Hilliou, L. (2014). In-line particle size assessment of polymer suspensions during processing. *Polymer Testing*. 37, 68-77.
56. Silva, J., Santos, A.C. and Canevarolo, S.V. (2015). In-line monitoring flow in an extruder die by rheo-optics. *Polymer Testing*, 41, 63-72.
57. Kopplmayr, T., Luger, H., Burzic, I., Battisti, M. G., Perko, L., Friesenbichler, W. and Miethlinger, J. (2016). A novel online rheometer for elongational viscosity measurement of polymer melts. *Polymer Testing*, 50, 208-215.
58. Chhabra, R.P. and Richardson, J.F. (2008). Non-Newtonian Flow and Applied Rheology: Engineering Applications. *International of Chemical Engineering*, 13(6), 1–23.
59. Rao, M. A. (1999). *Rheology of Fluid and Semisolid Foods, An Aspen Publication*. Gaithersburg: Aspen Publishers, Inc.
60. Barnes, H. A. (2001). *A Handbook of Elementary Rheology, Institute of Non Newtonian Fluid Mechanics*. Wales: Cambrian Printers.
61. Internet: Rheology School. URL: <http://www.webcitation.org/query?url=http%3A%2F%2Fwww.rheologyschool.com%2Fid46.html&date=2018-01-31>. Son Erişim Tarihi: 22.12.2016.
62. Ostwald, W. (1925). *Über die Geschwindigkeitsfunktion der Viscosität disperser Systeme*. Germany: Kolloid Z.
63. De Waele, A. (1923). Viscometry and plastometry. *Journal of the Oil & Colour Chemists' Association*, 6-33.

64. Garakani, A. H. K., Mostoufi, N., Sadeghi, F., Hosseinzadeh, M., Fatourechi, M., Sarrafzadeh H. and M. R. Mehrnia (2011). Comparison Between Different Models For Rheological Characterization of Activated Sludge. *Journal of Environmental Health Science and Engineering*, 8(3), 255-264.
65. Carreau, P. J. and Kee D.D. (1968). Review of some useful rheological equations. *Journal of Canadian Society for Chemical Engineering*, 57(1), 3-15.
66. Yasuda, K., Armstrong, R.C. and Cohen, R.E. (1981). *Rheologica Acta*. Germany: Steinkopff-Verlag, 20(2), 163-178.
67. Sedlacek, T., Zatloukal, M., Filip, P., Boldizar, A. and Saha, P. (2004). On the Effect of Pressure on the Shear and Elongational Viscosities of Polymer Melts. *Polymer Engineering and Science*, 44, 1328-1337.
68. Hieber, C. A., Chiang, H.H. (1992). Shear-rate-dependence modeling of polymer melt viscosity. *Polymer Engineering & Science*, 32, 931-945.
69. Bodur, M.S. (2010). *Geri Dönüşüm İşleminin Tekstil Atığı Takviyeli Polimer Matrisli Karma Malzemelerin Mekanik Özellikleri Üzerine Etkisi*, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
70. Akkurt, S. (2007). *Plastik Malzeme Bilimi, Teknolojisi ve Kalıp Tasarımı*. İstanbul: Birsen Yayınevi.
71. Demiryürek, O. (2004). *Sentetik Lif Üretiminde Kullanılan Ekstrüderler Ve Ekstrüder-Pompa Sisteminin Tasarım Esasları*, Yüksek Lisans Tezi, Çukurova Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Adana.
72. İnternet: Ekstrüder, Vida ve Kovan Sistemleri Rasarımları. URL: [http://www.webcitation.org/query?url=http%3A%2F%2Fwww.dizaynvida.com%2Ftr%2Furun.aspx%3Furun\\_ID%3D2&date=2018-01-31](http://www.webcitation.org/query?url=http%3A%2F%2Fwww.dizaynvida.com%2Ftr%2Furun.aspx%3Furun_ID%3D2&date=2018-01-31). Son Erişim Tarihi: 17.11.2017.
73. ASTM D5422-09 (2009). *Standard Test Method for Measurement of Properties of Thermoplastic Materials by Screw-Extrusion Capillary Rheometer*. West Conshohocken, PA: ASTM International.
74. ASTM D3835-16. (2016). *Standard Test Method for Determination of Properties of Polymeric Materials by Means of a Capillary Rheometer*. West Conshohocken, PA: ASTM International.
75. Ağbulut, Ü., Uluer, O., ve Sarıdemir, S. (2017, 16-18 Kasım). Şerit ve Kapileri Kalıp Kullanılarak Reolojik Özelliklerin Belirlenmesine Genel Bir Bakış, *Uluslararası İleri Araştırmalar ve Mühendislik Kongresinde sunuldu, Osmaniye*.
76. İnternet: Rheological Solutions and Designs. URL: [http://www.webcitation.org/query?url=http%3A%2F%2Fwww.rheologysolutions.com%2Frheocaps\\_techs.html&date=2018-01-31](http://www.webcitation.org/query?url=http%3A%2F%2Fwww.rheologysolutions.com%2Frheocaps_techs.html&date=2018-01-31). Son Erişim Tarihi: 22.12.2016.
77. İnternet: Capillary Rheometer Design of Malvern. URL: <http://www.webcitation.org/query?url=http%3A%2F%2Fwww.malvern.co.uk%2Frosand&date=2018-01-31>. Son Erişim Tarihi: 22.12.2016.

78. İnternet: Capillary Rheometer Design of Goettfert. URL: <http://www.webcitation.org/query?url=http%3A%2F%2Fwww.goettfert.com&date=2018-01-31>. Son Erişim Tarihi: 22.12.2016.
79. İnternet: Capillary Rheometer Design of Eta 2100. URL: <http://www.webcitation.org/query?url=http%3A%2F%2Fwww.celsum.com%2Feta2100.htm&date=2018-01-31>. Son Erişim Tarihi: 22.12.2016.
80. İnternet: PETOPLN MH418 Polipropilen (PP) Teknik Özellikleri. URL: [https://webcitation.org/query?url=https%3A%2F%2Fapp.petkim.com.tr%2Fweb%2Ffiles%2Furunler%2Ftr%2FUR.17-BF-U1762\\_1.pdf&date=2018-01-31](https://webcitation.org/query?url=https%3A%2F%2Fapp.petkim.com.tr%2Fweb%2Ffiles%2Furunler%2Ftr%2FUR.17-BF-U1762_1.pdf&date=2018-01-31). Son Erişim Tarihi: 24.05.2017.



## ÖZGEÇMİŞ

### Kişisel Bilgiler

Soyadı, adı : Ağbulut, Ümit  
 Uyruğu : T.C.  
 Doğum tarihi ve yeri : 20/12/1991, Kadıköy  
 Medeni hali : Bekar  
 Telefon : 03805421133-2313  
 Faks : 03805421134  
 E-posta : umitagbulut58@gmail.com



Eğitim Derecesi	Okul/Program	Mezuniyet yılı
Yüksek Lisans	Gazi Üniversitesi, Ankara/İmalat Mühendisliği	2018
Lisans	Selçuk Üniversitesi, Konya/Makine Mühendisliği	2015
Lise	Şevket Sabancı Lisesi, İstanbul/Fen Bilimleri	2009

### İş Deneyimi

Yıl	Çalıştığı Yer	Görev
2017-halen	Düzce Üniversitesi, Makine ve İmalat Müh.	Arş. Gör.
2016-2018	Tübitak	Proje Asist.

### Yabancı Dili

İngilizce

### Yayınlar

Ağbulut, Ü., Uluer, O., ve Sarıdemir, S. (2017, 16-18 Kasım). *Şerit ve Kapileri Kalıp Kullanılarak Reolojik Özelliklerin Belirlenmesine Genel Bir Bakış*, Uluslararası İleri Araştırmalar ve Mühendislik Kongresinde sunuldu, Osmaniye.

### Hobiler

Yüzmek, futbol oynamak



*GAZİ GELECEKTİR..*