



**PLASTİK EKSTRÜZYON TEZGAHINDA POLİMER MALZEME
KARAKTERİZASYON SİSTEMİNİN KURULMASI**

Burcu CİVELEK

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
İMALAT MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI**

**GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

EYLÜL 2019

Burcu CİVELEK tarafından hazırlanan “PLASTİK EKSTRÜZYON TEZGAHINDA POLİMER MALZEME KARAKTERİZASYON SİSTEMİNİN KURULMASI” adlı tez çalışması aşağıdaki jüri tarafından OY BİRLİĞİ ile Gazi Üniversitesi İmalat Mühendisliği Ana Bilim Dalında YÜKSEK LİSANS TEZİ olarak kabul edilmiştir.

Danışman: Doç. Dr. Onuralp ULUER

İmalat Mühendisliği Ana Bilim Dalı, Gazi Üniversitesi

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

.....

Başkan: Prof. Dr. İhsan KORKUT

İmalat Mühendisliği Ana Bilim Dalı, Gazi Üniversitesi

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

.....

Üye: Doç. Dr. İhsan TOKTAŞ

İmalat Mühendisliği Ana Bilim Dalı, Yıldırım Beyazıt Üniversitesi

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

.....

Tez Savunma Tarihi: 11/09/2019

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

.....

Prof. Dr. Sena YAŞYERLİ

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.

Burcu CİVELEK

11/09/2019

PLASTİK EKSTRÜZYON TEZGAHINDA POLİMER MALZEME
KARAKTERİZASYON SİSTEMİNİN KURULMASI

(Yüksek Lisans Tezi)

Burcu CİVELEK

GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

Eylül 2019

ÖZET

Polimerlerin ekstrüzyon yöntemi ile şekillendirilmesinde, bilinmesi gereken en önemli reolojik özellik, polimer malzemenin kayma viskozitesidir. Polimerlerin kayma viskozitesi, genellikle kılcal reometreler kullanılarak belirlenmektedir. Kılcal reometreler, polimer işleme yöntemlerini tam olarak temsil etmeyen, yöntem uyumsuz karakterizasyon cihazlarıdır. Bu tez çalışmasında, polimer ekstrüzyon tezgahı, kılcal kalıplar, basınç ve sıcaklık ölçme donanımları kullanılarak, yöntem uyumlu bir reolojik karakterizasyon sistemi kurulmuştur. Oluşturulan test düzeneğinin performansı, polipropilen (PP) malzeme için testler yapılarak ortaya konulmuştur. Ayrıca, oluşturulan karakterizasyon sisteminde, kalıba giriş açısının PP kayma viskozitesine etkisi, kullanılan farklı giriş açılı kılcal kalıplar ile belirlenmiştir. Çalışmada, PP için elde edilen reolojik bulgular, literatür sonuçları ile karşılaştırılmıştır. Karşılaştırma sonuçları, oluşturulan reolojik karakterizasyon sisteminin, polimer malzeme reolojik karakterizasyonunda kullanılabilir olduğunu göstermiştir.

Bilim Kodu : 91438
Anahtar Kelimeler : Plastik ekstrüzyon, polimer karakterizasyon, kalıp giriş açısı
Sayfa Adedi : 57
Danışman : Doç. Dr. Onuralp ULUER

CREATING OF POLYMER MATERIAL CHARACTERIZATION SETUP WITH PLASTIC EXTRUSION MACHINE

(M. Sc. Thesis)

Burcu CİVELEK

GAZİ UNIVERSITY

GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCES

September 2019

ABSTRACT

The most important rheological property to be known in shaping polymers by extrusion method is the shear viscosity of the polymer material. The shear viscosity of the polymers is generally determined using capillary rheometers. Capillary rheometers are method-incompatible characterization devices that do not fully represent polymer processing methods. In this thesis, a methodological rheological characterization system has been established by using polymer extrusion bench, capillary molds, pressure and temperature measuring equipment. The performance of the test apparatus formed was demonstrated by performing tests for polypropylene (PP) material. In addition, the effect of the inlet angle on the shear viscosity of the mold in the formed characterization system was determined by using different inlet angle capillary molds. In this study, rheological findings for PP were compared with the literature results. The results of the comparison showed that the rheological characterization system created can be used in the rheological characterization of polymer material.

Science Code : 91438
Key Words : Plastic extrusion, polymer characterization, contraction angle
Page Number : 57
Supervisor : Assoc. Prof. Dr. Onuralp ULUER

TEŞEKKÜR

Tezimin her aşamasında yardımcı olan, konum ile alakalı her zaman desteğini ve engin tecrübesini esirgemeyen, elde ettiğim bu güzel sonuç ve kazandığım tecrübelerde büyük katkısı olan değerli danışmanım ve hocam Doç. Dr Onuralp ULUER'e minnet, teşekkür ve saygılarımı sunarım. Çeşitli katkıları nedeni ile Doç. Dr. İbrahim KARAAĞAÇ'a teşekkür ve saygılarımı sunarım.

Gerek deney kalıplarımın yapımında, gerek derslerim ile alakalı hiçbir zaman desteğini esirgemeyen Makine Mühendisi Aytuğ SAKARYA'ya sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Çalışmalarım ve deneylerin yapılması sırasında yardımlarını ve desteklerini esirgemeyen Batuhan Gazi KARAKAYA, Ümit AĞBULUT ve Ali AKKUŞ'a teşekkürlerimi sunarım. Ayrıca, deneyleri yapabilme imkânını, 1003- Öncelikli alanlar Ar-Ge projeleri destekleme programı kapsamında 115M041 numaralı projeye verdiği destek ile sunan TÜBİTAK'a teşekkürlerimi sunarım.

Tüm hayatım boyunca olduğu gibi yüksek lisans projemde de her türlü masrafıma destek olan ve manevi katkılarını her daim hissettiğim kıymetli ailem, babam, annem, ablam, halam, eniştem ve yeğenime şükranlarımı sunarım.

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
ÖZET	iv
ABSTRACT.....	v
TEŞEKKÜR.....	vi
İÇİNDEKİLER	vii
ÇİZELGELERİN LİSTESİ.....	ix
ŞEKİLLERİN LİSTESİ	x
SİMGELER VE KISALTMALAR.....	xiii
1. GİRİŞ	1
2. LİTERATÜR	3
2.1. Kalıp Geometrisinin Akış Davranışına Etkisi	3
2.2. Kalıp Geometrisinin Basınç Kaybına Etkisi	8
2.3. Kalıp Geometrisinin Şişme Davranışına Etkisi	11
2.4. Kalıp Geometrisinin Çapaklanma Davranışına Etkisi	14
2.5. Kalıp Geometrisinin Yüzey Kalitesine Etkisi	17
3. POLİMERLER.....	19
3.1. Polimerin Tanımı.....	19
3.2. Plastikler.....	19
4. MATERYAL VE METOD	23
4.1. Polipropilen (PP) Hakkında Genel Bilgiler.....	23
4.2. Plastik Ekstrüzyon Makinesi Hakkında Bilgiler	24
4.3. Metod	34
4.3.1. Bagley düzeltmesi.....	36
4.3.2. Power-Law indeksinin tespiti ve Rabinowitsch düzeltmesi	38
4.3.3. Viskozitenin hesaplanması	39

	Sayfa
5. BULGULAR	41
5.1. L/D Oranı Sabit İken Sıcaklığın Viskoziteye Etkisi	41
5.2. L/D Oranının Viskoziteye Etkisi	43
5.3. Kalıp Giriş Açısının Viskoziteye Etkisi	44
5.4. Kalıp Giriş Açısı Sabit İken Sıcaklığın Viskoziteye Etkisi.....	45
5.5. Kalıp Giriş Açısının Power Law İndeksine Etkisi	48
6. SONUÇLAR VE TARTIŞMA	51
KAYNAKLAR	53
ÖZGEÇMİŞ	57

ÇİZELGELERİN LİSTESİ

Çizelge	Sayfa
Çizelge 4.1. Polipropilenin fiziksel ve kimyasal özellikleri	23
Çizelge 4.2. PETKİM Petoplen MH 418 kodlu PP'in genel özellikleri	24
Çizelge 4.3. Deneylerde kullanılan plastik ekstrüzyon makinesinin vidasının özellikleri	26
Çizelge 4.4. Kılcal kalıp giriş açısı değerleri ve genel boyutlar	29
Çizelge 4.5. Plastik ekstrüzyon makinesi kovan bölge sıcaklık değerleri	34
Çizelge 4.6. Deneysel şartlar	35
Çizelge 5.1. Power Law indeksi değerleri	49

ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Şekil	Sayfa
Şekil 2.1. Eriyik polimerin düzlemsel kalıp girişinde değişim akışının çizimi	5
Şekil 2.2. Düz (a) ve konik (b) test kılcallarının şematik gösterimi	8
Şekil 2.3. Deneylerde ve simülasyonlarda kullanılan kalıp içi akış kanalının geometrisi	9
Şekil 2.4. Eriyik haldeki polimerin kalıp içindeki akışı	10
Şekil 2.5. Deneylerde kullanılan kılcal kalıpların çıkış bölgeleri: (a) düz kılcal kalıp (b) pahlı kılcal kalıp (c) kademeli geçişli kılcal kalıp	15
Şekil 2.6. Deneylerde kullanılan farklı kalıp numunelerinin simülasyonda çözüm oranı uygulanmış halleri: 0,5 mm çıkış çaplı kalıp 4 (a) 0.1 mm dişli yapıda olan kalıp 2 (b) 0.5 mm dişli yapıda olan kalıp 3 (c)	17
Şekil 3.1. Polimerleşme	19
Şekil 4.1. Polipropilen malzemesinin molekül yapısı	24
Şekil 4.2. Plastik Ekstrüzyon Makinesi NOVOMA NTB 30/25D	25
Şekil 4.3. Deneylerde kullanılan plastik ekstrüzyon makinesinin vidası	26
Şekil 4.4. Deneylerde kullanılan delikli plaka	26
Şekil 4.5. Kovan üzerindeki bulunan sıcaklık kontrol sensörleri ve ısıtıcı rezistanlar ...	27
Şekil 4.6. Tahrik motoru ve redüktör sistemi	27
Şekil 4.7. Plastik ekstrüzyon makinesi kontrol paneli	28
Şekil 4.8. Kalıp teknik resmi	29
Şekil 4.9. Deneyler sırasında kullanılan 1 numaralı kalıp	30
Şekil 4.10. Deneyler sırasında kullanılan 2 numaralı kalıp	30
Şekil 4.11. Deneyler sırasında kullanılan 3 numaralı kalıp	30
Şekil 4.12. Deneyler sırasında kullanılan 4 numaralı kalıp	31
Şekil 4.13. Deneyler sırasında kullanılan 5 numaralı kalıp	31
Şekil 4.14. Deneyler sırasında kullanılan 6 numaralı kalıp	32
Şekil 4.15. Deneyler sırasında kullanılan 7 numaralı kalıp	32

Şekil	Sayfa
Şekil 4.16. Deneyler sırasında kullanılan 8 numaralı kalıp	33
Şekil 4.17. Deneyler sırasında kullanılan 9 numaralı kalıp	33
Şekil 4.18. Ölçümler sırasında ağırlık ölçümlerinde kullanılan hassas terazi	35
Şekil 4.19. D=3 mm, 210°C için Bagley eğrisinin tespiti.....	37
Şekil 4.20. D=3 mm, 230°C için Bagley eğrisinin tespiti.....	37
Şekil 4.21. 75°'lik kalıp; 210 °C ve 230°C; L/D=10 için görünür kayma hızı-gerçek kayma gerilmesi grafiği	38
Şekil 4.22. 75°'lik kalıp; 210 °C ve 230°C; L/D=10 için logaritmik ölçekte kayma hızı-gerçek kayma gerilmesi grafiği	39
Şekil 5.1. 75°'lik kalıp; 210 °C ve 230°C; L/D=10 için kayma hızı - viskozite grafiği..	41
Şekil 5.2. 75°'lik kalıp; 210 °C ve 230°C; L/D=15 için kayma hızı - viskozite grafiği..	42
Şekil 5.3. 75°'lik kalıp; 210 °C ve 230°C; L/D=20 için kayma hızı - viskozite grafiği..	42
Şekil 5.4. 75°'lik kalıp; 210 °C ; L/D=10, 15, 20 için kayma hızı - viskozite grafiği	43
Şekil 5.5. 75°'lik kalıp; 230°C; L/D=10, 15, 20 için kayma hızı - viskozite grafiği	43
Şekil 5.6. Kalıp giriş açısı 45, 60, 75, 90, 105, 120° olan kılcal kalıplar ve açısız kılcal kalıp için 210°C; L/D=10 iken kayma hızı - viskozite grafiği	44
Şekil 5.7. Kalıp giriş açısı 45, 60, 75, 90, 105, 120° olan kılcal kalıplar ve açısız kılcal kalıp için 230°C; L/D=10 iken kayma hızı – viskozite grafiği	44
Şekil 5.8. 45°'lik kalıp için, 210° ve 230°C'de ; L/D=10 iken kayma hızı - viskozite grafiği.....	45
Şekil 5.9. 60°'lik kalıp için, 210° ve 230°C'de ; L/D=10 iken kayma hızı - viskozite grafiği.....	45
Şekil 5.10. 75°'lik kalıp için, 210° ve 230°C'de ; L/D=10 iken kayma hızı - viskozite grafiği	46
Şekil 5.11. 90°'lik kalıp için, 210° ve 230°C'de ; L/D=10 iken kayma hızı - viskozite grafiği	46
Şekil 5.12. 105°'lik kalıp için, 210° ve 230°C'de ; L/D=10 iken kayma hızı - viskozite grafiği	47
Şekil 5.13. 120°'lik kalıp için, 210° ve 230°C'de ; L/D=10 iken kayma hızı - viskozite grafiği	47

Şekil**Sayfa**

Şekil 5.14. Açısız kalıp için, 210° ve 230°C’de ; L/D=10 iken kayma hızı - viskozite grafiği	48
---	----

SİMGELER VE KISALTMALAR

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

Simgeler	Açıklamalar
α_0	Doğal değişim açısı yarı değeri
$^{\circ}$	Selsius
e	Elastik deformasyon enerjisi
kPa	Kilopaskal
L_E	Değişim bölgesi uzunluğu
mm	Milimetre
MPa	Megapaskal
s^{-1}	1/saniye
V	Piston düşme hızının mm/dak biriminde gösterimi
V_0	Eksen akış hızı
$2\alpha_0$	Doğal değişim açısı
2α	Kalıp giriş açısı
α	Kalıp giriş değişim yarı açısı
ΔP_{en}	Kalıp girişi basınç düşüşü
η	Viskozite
τ_{α}	Görünür kayma gerilmesi
τ_w	Gerçek kayma gerilmesi
$\dot{\gamma}_w$	Gerçek kayma hızı
$\dot{\gamma}_{\alpha}$	Görünür kayma hızı
L/D	Kılcal kalıp boy/çap oranı

Kısaltmalar	Açıklamalar
ABS	Akrionitril bütadien stiren
B	Ekstrüdat çapının kalıp çapına oranı
BR	Kalıptaki sıvanma oranı

Kısaltmalar	Açıklamalar
CR	Polikloropiren
D	Çap
D_{c_1}	Kalıp dış çapı
EPDM	Etilen propilen dien monomer
FEM	Sonlu elemanlar metodu
HDPE	Yüksek yoğunluklu polietilen
KSKG	Kalıp sonrası kesit genişlemesi
L	Uzunluk
L_{c_1}	Kalıp uzunluğu
LLDPE	Lineer düşük yoğunluklu polietilen
L/D	Kalıp uzunluğu ve kalıp çapı arasındaki oran
MAD	Molekül ağırlığı dağılımı
NR	Doğal kauçuk
PMMA	Polimetil metakrilat
PI	Polidispersite indeksi
PP	Polipropilen
PS	Polisitiren
SBR	Stiren bütadien kauçuk
TEK	Toz enjeksiyon kalıplama
ΔP	Toplam basınç değişimi
ΔP_c	Kalıptaki basınç değişimi
ΔP_{c_1}	Kalıp çıkışındaki basınç değişimi
P_g	Giriş basıncı
$P_{\bar{c}}$	Ölçülen basınç

1. GİRİŞ

Günümüzde polimer malzemeler gittikçe artan bir oranda kullanım alanı bulmaya başlamıştır. Metalik malzemelere oranla fiyat, kolay işlenebilirlik, hafiflik ve korozyon direnci gibi özelliklere sahip olmaları polimerlerin üretimde kullanılma sıklığını gün geçtikçe arttırmaktadır. Ayrıca polimerler iyi derecede mekanik özelliklere ve yüksek ısı ve elektriksel özelliklere de sahiptirler. Polipropilen, polietilen, polivinilklorür gibi polimerler bu sebeplerden dolayı sanayide tercih edilmektedir.

Bir termoplastik olan polipropilen PP günümüzde sık tercih edilen polimer çeşitlerinden biridir. Termoplastik özelliğe sahip olan polimerler, reolojik özelliklerinden ciddi seviyede bir ödün verme olmaksızın ısıtılıp yeniden şekillendirilebilirler. PP günümüzde geri dönüşüme müsait olması ve hafif yapıya sahip olması sayesinde otomotiv sanayisinde sık tercih edilir. Ayrıca şeffaf ambalajlarda, elektrikli aletlerde, valizlerde, termoslarda ve daha birçok farklı sektörde; kimyasal mukavemet, elektriksel mukavemet ve fiyat performans oranı avantajlarından dolayı hammadde olarak kullanılmaktadırlar.

Polimerlerin işlenmesi sırasında, polimerlerin gösterdiği farklı reolojik özellikler, nihai ürünün kalitesini etkilemektedir. Polimerlerin gösterdiği reolojik özelliklere, basınç, sıcaklık, polimerlerin moleküler yapısı ve kalıp tasarımı gibi birçok etken etki etmektedir. Yanlış kalıp tasarımı eriyiğin kalitesinin düşmesine ve ürünün kalitesizleşmesine yol açmaktadır. Sanayide malzemenin göstereceği reolojik özelliklerin öngörülebilmesi nihai ürünün kalitesine doğrudan etki etmektedir.

Bu çalışmada, PP malzemesi plastik ekstrüzyon makinesi üzerine kurulan test düzeneği ile reolojik olarak karakterize edilmiştir. Kurulan test düzeneğinin başarısını gözlemlemek açısından PP seçilmiş olup, literatürde bu malzemeye ait karakterizasyon verileri hali hazırda bulunmaktadır.

Plastik ekstrüzyon makineleri, boru, hortum, kablo, profil ve benzeri sabit kesitli ürünlerin şekillendirilmesinde kullanılan işleme makineleridir. Eriyik haldeki polimer, ekstrüzyon makinesi üzerindeki kalıp boyunca şekil alır. Burada kalıbın şekli ürünün şeklini belirler ve düzgün tasarlanmış bir kalıp zaman kaybına ve maddi zarara engel olur. Bu çalışmada

tasarlanan kalıp, bilgisayar ortamında çeşitli analizlerden geçirildikten sonra plastik ekstrüzyon makinesi ile üretimde kullanılmıştır.

Bu çalışma plastik ekstrüzyon makinesinin kullanıldığı sektörlerde malzemenin üretim sonrası gösterebileceği iyi veya kötü reolojik özellikleri öngörebilmek amacıyla yapılmıştır. Kalıp tasarımının PP'nin reolojik özelliklerine etkisi deneysel olarak araştırılmıştır. Kalıp tasarımı konusunda kılcal kalıp giriş açısı ve kılcal kalıbın uzunluğu ile çapı arasındaki oran (L/D) ele alınmıştır. Değişimin PP'nin reolojisine etkisi gözlemlenmiştir. Polipropilen malzemesi için farklı sıcaklık ve basınç koşulları altında farklı giriş açıları değerlendirmeye alınmış ve polipropilenin kılcal bir kalıpta ekstrüzyonu için gereken optimum koşullar belirlenmiştir.

Doğru kalıbın öngörülerek seçilmesi hatalı üretimin önüne geçerek, bir işletmenin hem fazladan hammadde tüketmesine engel olup maddi kazanç sağlar hem de makine ve işçi çalışma süresi açısından bir tasarrufa olanak verir. Günümüzde bu öngörüler bilgisayar programları sayesinde yapılmaktadır.

Bu tez çalışmasında ise deney için çalışmalara başlanmadan önce bilgisayar programları kullanılarak optimum değerler belirlenmiştir. Daha sonra belirlenen bu optimum değerler deneyler ile desteklenip sonuçlara ulaşılmıştır. Böylece kalıp tasarımının geometrisinin önemi belirlenmiştir ve kalıp tasarımının malzemenin reolojik özelliklerine etkileri araştırılmıştır.

2. LİTERATÜR

Plastik ekstrüzyonda elde edilecek ürünün nihai şekline, reolojik özelliklerine, malzeme kalitesine, ürünün yüzey kalitesine vb. özelliklerine, plastik ekstrüzyon sırasında birçok etken etki eder. Bu tez kapsamında araştırılan kalıp giriş açısının, plastik ekstrüzyonda malzemenin reolojik özelliklerine etkisi de kayda değer bir etkidir. Literatürde plastik ekstrüzyon, kalıp giriş açısı ve kalıp geometrisi ile ilgili bazı deneysel ve sayısal araştırmalar yapıp yayınlanmıştır. Aşağıda bu tez çalışması sırasında değerlendirilen çalışmalardan bazıları derlenmiştir.

2.1. Kalıp Geometrisinin Akış Davranışına Etkisi

Liang çalışmasında silindir çapı 9,5 mm olan kılcal kalıp kullanmıştır ve ekstrüzyon sırasındaki toplam basıncı belirlemek için basınç sensörünü pistonun üzerine yerleştirmiştir. Ekstrüzyon sırasındaki basınç kaybını belirleyebilmek için, çapı 1 mm ve L/D oranı 10, 20, 30, 40 olan kılcal kalıplar kullanmıştır. Bu kalıplar için giriş açısını 180° olarak belirlemiştir. Test sıcaklığının 180°C ile 240°C arasında değiştiğini söylemiştir. Liang akış sırasında girişte oluşan akış tipinin, akış parametrelerinin sabitlenmesi durumunda eriyik haldeki polimer malzemenin moleküler yapısıyla alakalı olarak viskoelastik özelliklerine bağlı olduğunu belirtmiştir. Giriş değişim yarı açısı ve değişim bölgesi uzunluğunu belirlemiştir. Giriş akış tipinin şekillenmesinde, doğal değişim açısının yarı değeri (a_0) ile değişim bölgesi uzunluğunun (Le) etkisi olduğunu söylemiştir. Le ve a_0 'nın elastik deformasyon enerjisinin (e)'nin bir fonksiyonu olduğunu belirtmiştir. Sonuç olarak a_0 'ın lineer olmayarak azalmasının sebebinin, Le 'nin lineer olarak artması ve e 'nin de etkisinin eklenmesi olduğunu söylemiştir. Son olarak $2a_0$ değerinin tahminlerinde, LDPE ve HDPE ile yapılan deneylerin sonuçları ile referanslardaki bilgiler benzer sonuçlar göstermiştir [1].

Cogswell 1970'lerde çalışmalarında, ekstrüzyon süreçlerindeki değişim akışını analiz ederek uzama gerilmesini ve eriyik haldeki polimerin viskozitesini öngeren bir model önermiştir. Liang ise, en küçük enerji teorisine dayanan giriş değişim akış sınır akış çizgileri ve bir kanaldaki viskoelastik akışkanların giriş bölgesi uzunluğunu belirlemek için bir model türemiştir. Bu çalışmalarında Zhong, Xu, Liang ve Liao; Cogswell ve Liang modellerini karşılaştırmışlardır. Zhong ve diğerleri, iki modelin de eriyik polimerin giriş

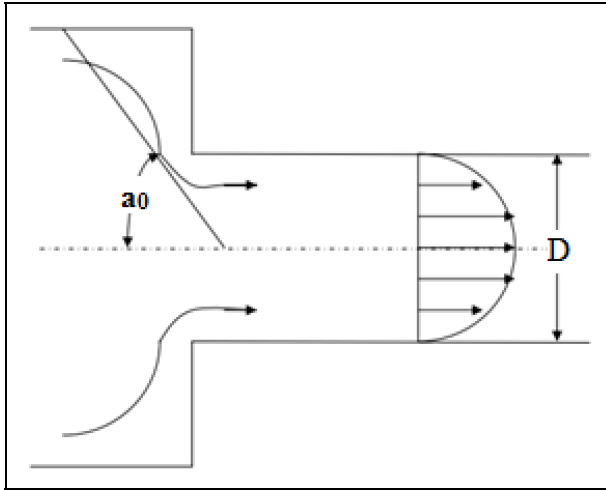
akış koşullarının belirlenmesinde yeterli olduğunu söylemişlerdir. Ancak, Liang modelinin sınır akış çizgilerindeki daralma oranını (contraction ration) daha kesin bir şekilde açıklayabildiği sonucuna varmışlardır. Liang modelinde, Cogswell modelinden farklı olarak Bagley düzeltmesi faktörü ve kayma faktörü ile bölge uzunluğunun tanımlandığını belirtmişlerdir. Bu yüzden de Liang modelinin daha hatasız ve kesin sonuçlar verdiğini söylemişlerdir [2].

Liang bu çalışmasında siyah karbon katkılı doğal kauçuk/stiren bütadien kullanarak kılcal kalıp reometresinde ekstrüzyon akışı sırasındaki kalıp girişindeki akış davranışlarını incelemiştir. Bir grup kılcal kalıp içeren kılcal kalıp reometresi kullanmıştır. Bu kalıpların çapı 1 mm ve kalıp açısı 180° 'dir. Girişteki basınç kaybını belirlemek için Bagley düzeltmesi metodunu kullanmıştır. Newtonsal olmayan akışkanların viskoelastik özellikleri için girişte oluşan değişim akış modeli önemli bir karakteristiktir. Girişte oluşan değişim açısı ise, girişte oluşan değişim akış modelinin açıklanabilmesinde önemlidir. Bununla birlikte sıcaklık ve akış hızı, girişteki değişim açısı gibi kanal geometrisi ve test koşulları genel olarak akışkanların viskoelastik özelliklerine dayanır. Belirtilen deney koşullarında girişteki basınç kaybı ve girişteki elastik deformasyon enerjisi kayma hızının artmasıyla lineer olmaksızın artarken, sıcaklığın artmasıyla azaldığını söylemiştir. Doğal değişim yarı açısının kayma hızının etkisiyle lineer olmaksızın azaldığını ve sıcaklığın artması ile ise arttığını belirtmiştir. Bulduğu sonuçların önceki çalışmaları ile uyum sağladığını söylemiştir [3].

Giriş değişim akışı, kayma akışı ve uzama akışından kaynaklanır. Düşük yoğunluklu polietilen (LDPE), HDPE'ye göre çok farklı bir giriş akış tipi gösterir. LDPE' de akış çizgileri şarap kadehi şeklini alır ve kalıp girişinde yüksek basınç düşüşü gözlemlenir. Liang bu çalışmasında LDPE reçinesinin kılcal kalıptaki ekstrüzyonu sırasında göstereceği akış davranışlarına, ekstrüzyon oranlarının, sıcaklığın ve kılcal kalıbın çapının etkisini araştırmıştır. Testlerde 2 içi boş kesitte (bores) kılcal reometre kullanmıştır ve hazne çapı 15 mm'dir. Kısa olan kalıbın L/D oranı 0 iken 1 mm çapında ve 180° 'dir. Uzun olan kalıp setinin ise L/D oranı 16'dır giriş açısı 180° 'dir ve çap 0,5 1,0 ve 2,0 mm'dir. Toplam basınç düşmesini ölçebilmek için, otomatik olarak giriş doğrulaması yapmak yerine, 2 pistonun üzerine 2 adet basınç güç çeviricisi yerleştirmiştir. Liang bu çalışmasında Bagley giriş doğrulama metodunu kullanmıştır.

Testlerin sonucunda, girişteki basınç düşüşünün (ΔP_{en}), V' 'nin armasıyla arttığını ve duvar kayma geriliminin kayma hızının artmasıyla lineer olarak arttığını belirtmiştir. Liang, girişteki basınç düşüşünün kalıp çapının ilavesiyle azaldığını ve bunun piston hızının ikinci dereceden bir fonksiyonu olduğunu söylemiştir. Eriyik kayma viskozitesi ve sıcaklık arasındaki bağıntının Arrhenius ifadesi ile tutarlı olduğunu söylemiştir [4].

Liang çalışmasında, farklı başlangıç hızlarının etkisi altındaki hız dağılımını, uzama oranları farklılıklarını ve yarım doğal değişim açısını (α_0) incelemiştir. Değişim akışının kalıp girişinde eriyik haldeki polimerin hazneden daha küçük kesitteki bir kanala girdiğinde ortaya çıktığını belirtmiştir. Şekil 2.1'de eriyik polimerin düzlemsel kalıp girişinde değişim akışının çizimi verilmiştir. Kalıp girişindeki basıncı 20MPa, malzemenin sıcaklığını 90°C ve sınırdaki radyal ve eksenel doğrultudaki hızlarını 0, girişteki başlangıç hızını (V_0) 2, 5 ve 10 mm/s, eriyik haldeki polimerin viskozitesini 15, 10 ve 7 kPa.s olarak ayarlamıştır. Sonuç olarak eksen akışının hızının V_0 'ın artmasıyla lineer olmayarak arttığını ve kanalın içinde ve merkezdeyken en yüksek değerine ulaştığını belirlemiştir. Ayrıca kayma hızının, hem V_0 'ın artmasıyla hem de akış kanalının merkez eksenine olan uzaklığının çapının artmasıyla, lineer olmayarak arttığını ve kayma hızının girişte en yüksek değerine ulaştığını belirtmiştir. V_0 'ın artmasıyla α_0 lineer olmayarak azaldığını tespit etmiştir [5].



Şekil 2.1. Eriyik polimerin düzlemsel kalıp girişinde değişim akışının çizimi [5]

Liang ve Ness çalışmalarında polietilen ve polipropilenin belirli oranlardaki karışımının eriyik haldeki akışını incelemişleridir. Malzeme olarak HDPE, LDPE ve PP kullanmışlardır. Deneyleri sırasında kılcal kalıp reometresi kullanmışlardır. Kalıp giriş

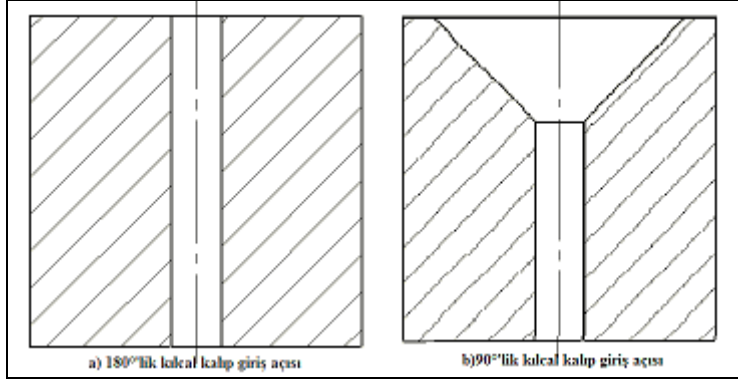
açısının 180° olduğunu söylemişlerdir. Ekstrüzyon deneyleri sırasında sıcaklığın 180° ile 250° arasında olduğunu ve görünür kayma hızının $25\ S^{-1}$ ile $500\ S^{-1}$ arasında olduğunu eklemişlerdir. Sonuç olarak PP eriyiğinin akış davranışlarının %10 oranında HDPE ve LDPE ile karıştırıldığında iyileştiğini buna rağmen PE eriyiğinin viskozitesinin PP ile yakın olduğunu belirtmişlerdir. Yüzde ağırlık cinsinden PP'nin katılımı ile PP/HDPE eriyiğinin bitiş basınç kaybının arttığını ve PP'nin oranının %80'lere çıkması ile bitişteki basınç kaybının zirve yaptığını belirtmişlerdir. PP/LDPE karışımı için ise yüksek görünür kayma hızında, PP'nin ağırlıkça katılım oranının %80'den düşük olması durumunda bitiş durumundaki basınç kaybının azaldığını; katılım oranının %50 olmasıyla bitiş durumundaki basınç kaybının en düşük halinde olduğunu; katılım oranının %80 olmasıyla bitişteki basınç kaybının hem PP hem LDPE'den daha yüksek görünür kayma hızlarında aniden arttığını eklemişlerdir [6].

Liang çalışmasında Rosand kılcal kalıp reamotresi kullanarak sıcaklık ve akış hızının akrilonitril bütadien stiren (ABS) terpolimer eriyiği üzerindeki reolojik davranışlarını incelemiştir. Delik çapı küçülme oranı 15:1 ve kalıp giriş açısı 180° 'dir. Bir kalıbın 1 mm çapta ve 16 mm uzunluğunda olduğunu, diğer kalıbın ise aynı çapta fakat sıfır uzunlukta olduğunu belirtmiştir. Numunenin eriyik haldeki akış davranışının düşük kayma hızlarındaki durumu ile yüksek kayma hızlarındaki durumunun farklı olma sebebi ile sıcaklık sabit tutulduğunda ABS eriyiğinin akış eğrilerinin eğiminin, kayma hızının $10^3\ S^{-1}$ değerine geldiği sırada aniden değiştiğini belirtmiştir. Benzer olarak kayma viskozitesinin de, kayma gerilmesinin 200 kPa değerine ulaşmasıyla hızla düştüğünü eklemiştir. Duvardaki kayma gerilmesinin artması ile girişteki basınç kaybının ve uzama gerilmesinin lineer olmaksızın arttığını belirtmiştir. Duvardaki kayma hızı sabit tutulduğunda ise sıcaklığın artması ile girişteki basınç kaybının ve uzama gerilmesinin lineer olarak azaldığını söylemiştir. Duvardaki kayma hızının sabit tutulması ile kayma ve uzama viskozitelerinin, sıcaklığın artmasıyla azaldığını eklemiştir. Ekstrüzyon sırasındaki koşulların eriyik haldeki numunenin reolojik davranışları üzerine etkisinin önemli olduğunu söylemiştir [7].

Kelly ve diğerleri enjeksiyon kalıplama presi kullanarak farklı uzama oranlarındaki PE, PP, PS ve polimetil metakrilat (PMMA) polimerlerini reolojik karakterize etmişlerdir. Kayma incelmesindeki sapma davranışını yüksek oranlarda gözlemlediklerini ve bazı polimerler için önceden rapor edilmemiş kayma kalınlaşması davranışı tespit ettiklerini

söylemişlerdir. Ölçülen basınç ve hacimsel debi verileri, duvar kayma hızı $10^7 S^{-1}$ civarında iken kayma ve uzama viskozitelerinin ölçülmesinde kullanmışlardır. Paralel tabaka reometresini ve çift hazneli kılcal reometreyi düşük ve orta kayma uzama oranlarında karşılaştırmalı reolojik veriler elde edebilmek için kullanmışlardır. Bulunan kayma viskozitesinin düşük oranlarda Newtonyen davranış sergilediğini ve orta seviyedeki uzama oranlarında ise kayma incilmesi Power-Law tipi davranış gösterdiğini belirtmişlerdir. Kayma uzamasının $10^6 S^{-1}$ veya üstünde olduğu oranlarda, kayma viskozitesinin orandan bağımsız bir durağan (rate-independent plateau) duruma ulaştığını ve bazı durumlarda da kayma uzamasındaki artış sonucunda kayma kalınlaşması meydana geldiğini belirtmişlerdir [8].

Sanetnik, Hausnerova, Filip ve Hnatkova çalışmalarında malzeme olarak 316L ve 17-4PH paslanmaz çelik tozu kullanmışlardır. P ve C olmak üzere 2 farklı bağlayıcı çeşidi kullanmışlardır. P bağlayıcı maddesi için sinterlenmiş yoğunlukları $7,75 g/cm^3$ ve $7,65 g/cm^3$ olan 316L ve 17-4PH hammaddelerine sırasıyla P 316L ve P 17-4PH ismini vermişlerdir. C bağlayıcı maddesi için ise sinterlenmiş yoğunlukları $7,96 g/cm^3$ ve $7,67 g/cm^3$ olan 316 L ve 17-4PH hammaddelerine sırasıyla C316L ve C17-4PH ismini vermişlerdir. Metod olarak Money metodunu kullanmışlardır. Bu metod kalıbın yüzeyinden hacmine olan değişiminin oranıyla ilgilidir. 180° düz girişe sahip olan kalıp için, C ve P bağlayıcı maddeleri ilaveleriyle 316L ve 17-4PH paslanmaz çelik tozu hammaddelerinin varyasyonlarının psödoplastik özellik gösterdiğini keşfetmişlerdir. C bağlayıcı maddesi ile kurulan sistemdeki viskozite eğrilerinde, P bağlayıcı maddesi ile kurulan sistemin viskozite eğrilerine göre daha küçük oranda görünür kayma hızı keşfedilmiştir. Keskin köşelerin kayma hızında hızlı değişimlere yol açmasından dolayı metal tozu ve bağlayıcının birbirinden ayrıştığını eklemişlerdir. Bu durumun da duvardaki kayma hızını arttırdığını söylemişlerdir. Sonuç olarak, konik kalıp girişine sahip kalıpların (90°) duvardaki kayma hızı ve kayma gerilmesi arasındaki bağıntının lineer orantıda olması açısından daha avantajlı olduğunu belirtmişlerdir. Şekil 2.2.'de düz ve konik test kılcalları şematik olarak gösterilmiştir [9].



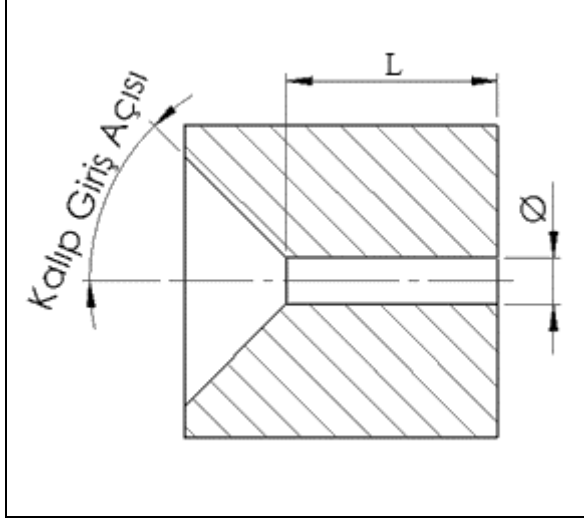
Şekil 2.2. Düz (a) ve konik (b) test kılcallarının şematik gösterimi [9]

Song, White ve Min natural rubber (NR), stiren bütadien kauçuk (SBR), etilen propilen terpolimer (EPDM), and polikloropiren (CR) ve onların siyah karbon bileşimlerini kullanarak reolojik karakterizyon, ekstrüdat şişmesi ve flow marker extrusion hakkında çalışmalar yapmışlardır. Kayma viskozitesini sandviç reometre, shearing disc viskometre ve kılcal kalıp reometresi ile ölçmüşlerdir. Siyah karbon oranının artmasıyla şişmenin azaldığını söylemişlerdir. Bütün sonuçların kabaca kalıp içinde radyal iç akışın meydana geldiğini doğruladığını belirtmişlerdir. Bu sonucun da 60°'lik kalıp girişindeki değişim akışı için kanıt olduğunu belirtmişlerdir [10].

2.2. Kalıp Geometrisinin Basınç Kaybına Etkisi

Ahmed, Mohammed ve Ahmed basınç kaybının konik kalıplardaki silindirik kısım ile açılı kısmın bulunduğu bölgelerdeki değişimini tespit etmek için teorik ve deneysel çalışmalar yürütmüşler ve simülasyonlar gerçekleştirmişlerdir. Polipropilen için giriş basıncının ilk olarak 10°'den 150°'ye olan açı değişiminin sonucunu kararlaştırmışlardır. 10°'den 45°'ye doğru artan açı değeriyle birlikte basınç kaybının azaldığını ve 45°'den 150°'ye doğru açının yükselmesiyle ise basınç kaybının da nispeten arttığını belirtmişlerdir. Polietilenin test edilen bütün çeşitlerinde 15°'den 90°'ye kadar yapılan araştırmalarında 30°'nin minimum basınç kaybını sağladığını belirtmişlerdir. 10°'den 80°'ye kadar inceledikleri açılar arasında 45°'nin minimum basınç değişimini verdiğini ve Polyflow yazılımı ile yaptıkları değerlendirmelerde ise minimum basınç değişiminin 45° ile 50° arasında değiştiğini belirtmişlerdir. Dairesel ve konik kesitten meydana gelen kalıplar için en iyi koniklik açısının 45° olduğu sonucuna varmışlardır. En yüksek kayma hızını, en yüksek basınç düşüşünü de saptadıkları dairesel ve konik kesit arasındaki arayüzde tespit etmişlerdir.

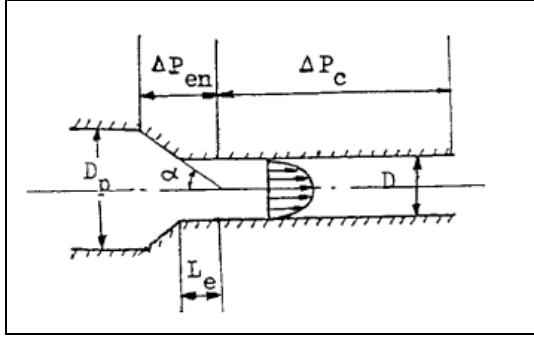
Şekil 2.3’de deneylerde ve simülasyonlarda kullandıkları kalıbın kesit görünüşü verilmiştir [11].



Şekil 2.3. Deneylerde ve simülasyonlarda kullanılan kalıp içi akış kanalının geometrisi [11]

Liang çalışmasında, sertleştirilmemiş kauçuk bileşen numunelerinin reolojik özelliklerini test edebilmek için Monsanto işlenebilirlik test cihazını kullanmıştır. 35°, 45°, 60°, 75° ve 90°'lik kalıp giriş açısına sahip kılcal kalıp reometrelerini kullanarak kauçuk bileşenin ekstrüzyonu sırasındaki kalıp giriş açısının basınç değişimine ve reolojik özelliklere etkisini araştırmıştır. L/D, 1.2/16 ve test sırasında ortam sıcaklığı 90, 100, 110 ve 120°C'dir. Kayma hızları ise 10 ile $10^3 S^{-1}$ arasındadır. Toplam basınç değişimi (ΔP), kalıp girişindeki basınç değişimi (ΔP_{en}) kalıptaki basınç değişimi (ΔP_c) ve kalıp çıkışındaki basınç değişiminden (ΔP_{ex}) meydana gelir. Eriyik haldeki polimerlerin kalıp akışı Şekil 2.4’de verilmiştir [12].

$$\Delta P = \Delta P_{en} + \Delta P_c + \Delta P_{ex} \quad (2.1)$$



Şekil 2.4. Eriyik haldeki polimerin kalıp içindeki akışı [12]

Liang, 2^α 75° civarında iken ΔP 'nin minimum değerde olduğunu söylemiştir. Minimum enerji yasasına göre akışkan daima düşük basınç boyunca akar. Enerji kaybı ise bu yüzden kalıp giriş açısı doğal değişim açısına eşit ya da yakın iken minimumdur. Bu çalışmada doğal değişim açısı 75° civarındadır. Sıcaklığın artmasıyla ΔP 'nin düştüğünü ve ΔP 'nin düşüşünün 2^α 'nın artmasıyla azaldığını çalışmalarının sonuçları arasında paylaşmıştır. Liang kalıp giriş açısının artmasıyla, kayma hızının basınç değişimine olan etkisinin azaldığını belirlemiştir. 2^α , 75° 'den küçük olduğunda, 2^α 'nın artmasıyla ΔP 'nin hızla düştüğünü ve 2^α , 75° 'den büyük olduğunda, 2^α 'nın artmasıyla ΔP 'nin arttığını belirtmiştir [13].

Bu çalışmada Liang, Chan ve Wong polistiren (PS) malzemesini kullanmışlardır. Eriyik haldeki polimerin akışı sırasında, kalıp açısının basınç kaybına olan etkisini belirleyebilmek için çapı 1 mm olan, L/D oranı 1 olan ve kalıp açısı 30° , 45° , 60° , 75° , 90° , 120° , ve 180° olarak belirlenmiş bir takım kalıp tasarlamışlardır. Bitişteki basınç kaybını belirlemek için Bagley metodunu kullanmışlardır. Sonuç olarak, bitişteki basınç kaybının piston hızının yükselmesiyle lineer olmaksızın arttığını, toplam basınç kaybının kısa olan kalıp ile ekstrüzyonunda piston hızının artmasıyla yine lineer olmaksızın arttığını ve sıcaklığın artmasıyla ise azaldığını belirtmişlerdir. Toplam basınç kaybının kalıp açısının artmasıyla azaldığını ve kalıp açısı 75° olduğunda bölgesel olarak minimum değerini gösterdiğini söylemişlerdir. Bu deney koşullarında belirtilen malzeme için belirlenen test koşullarında doğal değişim açısının 75° olduğunu belirtmişlerdir [14].

Han çalışmasında, kalıp giriş açısının eriyik haldeki viskoelastik polimerik malzemenin akışına girişteki basınç kaybı, geri kazanılabilir elastik enerji ve akıştaki eriyik malzemenin ilk çatlağının oluşması açısından etkilerini araştırmıştır. Deneyleri sırasında

kalıp giriş açıları 15° , 30° , 60° , 90° , 120° ve 180° olan düz girişe sahip altı adet kılcal kalıp kullanmıştır. Bütün kalıplar için kılcalın çapı 0,125 in'dir ve L/D oranı doğrusal kılcal kesiti için 4 civarındadır. Deneyler sırasında numune malzemesi olarak uzun zincir dallanması gösteren düşük yoğunluklu polietilen ve yüksek yoğunluklu polietilen kullanmıştır. Ekstrüzyon deneyleri 154°C 'de yürütülmüştür. Sonuç olarak, yüksek yoğunluklu polietilen için 154°C 'de giriş açısı sabitlendiğinde kayma hızı ile birlikte girişteki basınç kaybının yükseldiğini, giriş açısının 15° 'den 60° 'ye yükselmesi ile girişteki basınç kaybının önce düştüğünü daha sonra giriş açısının daha da yükselmesi ile sabitlendiğini söylemiştir. Bu sonuçların düşük yoğunluklu polietilen içinde sağlandığını belirtmiştir. Girişteki basınç kaybının daha küçük giriş açılarında, daha büyük giriş açılarına göre daha yüksek olduğunu gözlemlediğini söylemiştir. Bunun nedeni olarak küçük açılı kalıpların konik kısmının daha uzun olduğunu göstermiştir. Ancak genellikle çatlamaların başladığı kayma hızının daha yüksek olması sebebiyle ticari olarak küçük açılı kalıpların tercih edildiğini de eklemiştir [15].

2.3. Kalıp Geometrisinin Şişme Davranışına Etkisi

Liang çalışmasında, Monsanto işlenebilirlik cihazını kullanarak eriyik haldeki kauçuk bileşiğinin 90°C , 100°C , 110°C ve 120°C ortam sıcaklığında ve 35°C , 45°C , 60°C , 75°C ve 90°C kalıp giriş açısına sahip kalıplarda, kalıp uzunluğu ve çapı arasındaki oran (L/D) 1,2, 16 mm iken, ekstrudat çapının kalıp çapına oranını (B) test etmiştir. Çalışma sonucunda eriyik polimerin verilen şartlarda incelenmesiyle, kalıp giriş açısının kalıp sonrası kesit genişlemesi davranışına ve girişteki basınç düşüşüne etkisi olduğu kanıtlamıştır. Kalıbın uzunluğu ve çapı arasındaki oran küçüldükçe, bu etki daha belirgin olmuştur. Liang B değerinin sıcaklıktaki artışla azaldığını ve duvardaki kayma hızının artışıyla ise arttığını bulmuştur. Her iki bağıntıda da aradaki ilişkilerin lineer olmadığını ve $1000\text{ }S^{-1}$ gibi yüksek kayma hızı oranlarında, $100\text{ }S^{-1}$ gibi düşük kayma hızı oranlarına göre sıcaklığın B üzerine etkisinin daha belirgin olduğunu saptamıştır. İkinci kısımda, Liang kalıp giriş açısının 40° 'den 75° 'ye yükselirken B değerinin yaklaşık olarak 1,27 değerinden 1,22 değerine doğru düştüğünü belirtmiştir. 2α , 75° 'den 100° 'ye yükseldiğinde ise, B değerinin 2α değerindeki artışla yaklaşık olarak 1,22 değerinden 1,23 değerine doğru arttığını bulmuştur. Liang, 2α değerinin, açının yükselmesiyle düşüşünden sonra yükselişinin başladığı ilk noktaya karşılık gelen aç değeri olan doğal geçiş açısının ($2^{\alpha 0}$) 75° civarında olduğunu belirlemiştir [16].

Sombatsompop ve diğerleri NR malzemesini kullanarak farklı kalıp tasarımları için eriyik haldeki polimerin kılcal reometredeki akışını görüntüleyerek şişme davranışlarını incelemişlerdir. Sonuç olarak, renkli kopyalama tekniğini kullanarak NR bileşiminin akış modelini görüntülemişleridir. Üst silindirdeki akışı, pistonun yer değiştirmesi sonucu saptamışlardır ve aşağı silindir için akışın piston yer değiştirmesi ve kalıp dizaynına bağlı olduğu durumlarda karmaşık akışın ortaya çıkmasıyla bütün kalıplar için akışın benzer olduğunu söylemişlerdir. Akışın karmaşıklık derecesinin malzeme hafızası etkisinden (material memory effect) kaynaklandığını belirtmişlerdir. Şişmenin ise silindir içerisinde gerçekleşen akıştan etkilendiğini ve akışın da kalıp tasarımından etkilendiğini belirtmişlerdir [17].

Huang ve White kısa kılcal kalıp ve slit die (dikdörtgen kesitli kanal) da ekstrüzyon sırasında oluşan şişmenin araştırılması için çeşitli sayısal ve deneysel çalışmalar yapmışlardır. Malzeme olarak polistiren (PS) ve PP kullanmışlardır. Ekstrüdat şişme davranışı Instron kılcal reometresinde ve 180 C’de yapıldığını belirtmişlerdir. Slit die da şişme oranının diğer kılcal kalıplara göre daha yüksek olduğunu ve kılcal kalıplarda kalıp giriş açısının azaltılması ile birlikte şişme oranının da azaldığını belirtmişlerdir. Giriş açısının azalması ile ekstrudatdaki şişme oranının azaldığını eklemişlerdir. Bu durumun kalıp uzunluğu kısa olan kalıplarda daha çok görüldüğünü belirtmişlerdir. Çalışmalarda kullanılan PS ve PP için sonuçlar benzerlik göstermiştir [18].

Intawong, Wiratket ve Meechue çalışmalarında, doğal kauçuk bileşeni için kılcal reometre ile akış modeli ve ekstrüzyonda şişme üzerine araştırmalar yapmışlardır. Deneyler sırasında ıraksak ve yakınsak olmak üzere iki çeşit dairesel kalıp kullanmışlardır. Bu iki farklı kalıpta, özellikle silindir (hazne) duvarındaki ve kalıp girişindeki vorteks akışında farklılığın belirgin olduğunu söylemişlerdir. Akış modelindeki farklılığın sebebinin doğal kauçuk bileşeninin çap şişmesi ve kalınlık şişmesinde oluştuğunu belirtmişlerdir. Her test koşulunda kalınlık şişmesinin çap şişmesinden daha yüksek olduğunu söylemişlerdir. Bunu ise kalıp girişindeki karmaşık yapıda olan akış modelinin analizi ile açıklamışlardır. Deneyler sırasında renkli katmanlı teknik (Colored layer technique) kullanmışlardır. Sonuç olarak Intawong ve diğerleri çalışmaları sonucunda doğal kauçuk bileşeninin ekstrüzyonu sırasında meydana gelen ekstrüzyon şişmesi durumunun kalıp geometrisi ve kalıp tasarımı ile ilişkili olduğunu belirtmişlerdir [19].

Koopmans çalışmasında, yüksek yoğunluklu 2 farklı polietilen (PE)'i izotermal, zamana bağlı ve izotermal olmayan durumlarını dikkate alarak, şişme özelliklerini 2 adet dairesel ve 3 adet ıraksak (divergent) kalıp kullanarak deneysel olarak test etmiştir. 801 ve 802 arasında az miktarda molekül ağırlığı dağılımı bulunmaktadır. 801 ve 802 için kısa zamandaki şişme karakteristiği, kalıp geometrisi ve akış hızından bağımsız olarak ikincisi için daha düşük bir çap şişmesi sonucu vermiştir. Sonuç olarak belirli bir kalıp konfigürasyonu ve malzeme için, akış hızının ekstrüdat şişmesi üzerindeki etkisinin neredeyse ihmal edilebilir olduğunu belirtmiştir. Bir HDPE reçinesinin şişme özelliklerini değiştirmek için kalıp veya mandrel geometrisindeki küçük varyasyonların çok daha etkili olduğunu eklemiştir. İzotermal olamayan koşullarda soğutma ile şişmenin azaltılması durumlarında malzemenin kısa zamandaki şişme karakteristiğinin büyük önem taşıdığını ve bu durumun reçine halindeki malzemenin molekül ağırlığı dağılımının (MAD) düzenlenmesi ile değiştirilebileceğini söylemiştir. Aynı zamanda MAD'ndaki düzenlemeler ile maksimum şişme üzerinde olduğu gibi zaman davranışı üzerinde de değişikliklere yol açtığını çalışmaları sonucu elde etmiştir [20].

Liang çalışmasında, kısa tüp ekstrüzyonundaki akışı ve şişme oranlarını belirlemek için iki farklı çeşitte (SI: kalsiyum karbonat takviyeli doğal kauçuk bileşeni ve SII, siyah karbon takviyeli doğal kauçuk/bütadien–stiren kauçuk/cis-1,4-bütadien doğal kauçuk) doğal kauçuk bileşen kullanmıştır. Liang kılcal reometre kullanılarak yapılan deneylerde sıcaklığı 90°C' de tuttuğunu, görünür kayma hızının ise 10 ile 4000 S^{-1} arasında değiştiğini söylemiştir. Bu deney koşullarında kılcal reometre kullanarak ekstrüzyon koşullarının malzemenin reolojik özellikleri üzerindeki etkisi ile şişme davranışı üzerindeki etkisini araştırdığını belirtmiştir. Sonuç olarak SI için 90°C'de uzun kalıp ile ekstrüzyonda kalıp şişme oranının artması ile duvardaki kayma hızının da arttığını ve aralarındaki ilişkinin lineer olduğunu söylemiştir. SII için 90°C'de uzun kalıp için kalıp şişme oranının artması ile duvardaki kayma hızının da arttığını ve kısa kalıp için de kalıp şişme oranının artması ile duvardaki kayma hızının da hızla arttığını eklemiştir. Kalıp girişindeki akış modelinin polimerik akışkanların kısa kalıp ile ekstrüzyonları sırasında doğrudan, akışı ve kalıp şişme oranını etkilediğini ve kalıp girişindeki akış modelinin belirlenmesinde ise girişteki doğal değişim açısının öneminin büyük olduğunu belirtmiştir [21].

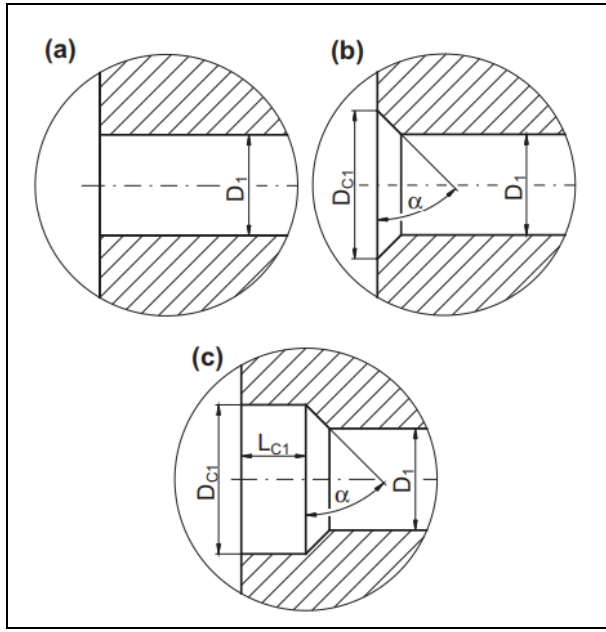
Rejon ve Dealy zamanın ve kalıp duvarındaki kayma hızının bir fonksiyonu olarak çap ve kalıp şişmesini belirleyebilmek için çalışmalar yürütmüşlerdir. Deneylerinde 170°C'de üç

çeşit polietilen ve 190°C’de bir çeşit polipropilen kullanmışlardır. Ekstrüdat ile aynı sıcaklık ve yoğunluğa sahip bir yağ içine ekstrüde edilerek, çekme yokluğunda izotermal şişmenin ölçülmesinin mümkün olduğunu söylemişlerdir (absence of drawdown). Bir denge durumuna ulaşmak için birkaç dakika gerekirken, şişme durumunun %70, %80’lik bir kısmının ilk veya ikinci saniyede meydana geldiğini belirtmişlerdir. Kalıp ağırlık şişmesi (parison weight swell) ve kılcal kalıp ekstrüdat şişmesi gibi şişme parametreleri arasındaki ilişkiyi incelemişlerdir. Dış ve iç çapları sırasıyla 0.613 cm ve 0.5 cm olan ve 7.5 cm’lik bir uzunluğa sahip olan düz bir dairesel kalıp kullanmışlardır. Uzunluğun boşluk genişliğine oranı 100’ün üzerinde tutmuşlardır, böylece ekstrüdat davranışı giriş koşullarından ve uzunluktan bağımsız olmuştur. Sonuç olarak şişme ve kayma hızı açısından, üç çeşit polietilen için ortaya çıkan eğrilerin aynı olduğunu, polipropilenin ise açıkça onlardan farklı eğriye sahip olduğunu belirtmişlerdir. Kalınlıkta olan şişmenin, çapta olan şişmeden polietilen için daha az olduğunu ve polipropilen için ise bu durumun tam tersi olduğunu söylemişlerdir. Verilen duvar kayma hızında, polietilen için kılcal kalıp şişmesinin, kalıp ağırlık şişmesinden daha yavaş olduğunu söylerlerken polipropilen için ise bu durumun daha hızlı olduğunu söylemişlerdir [22].

2.4. Kalıp Geometrisinin Çapaklanma Davranışına Etkisi

Musil ve Zatloukal çalışmalarında, eriyik HDPE polimerinin kalıp çıkışında kenarlara çapaklanma davranışını test etmek için sayısal ve deneysel çalışmalar yürütmüşlerdir. Kalıp çıkış geometrisinin çapaklanma davranışına etkisini saptayabilmek için çeşitli geometrilerde paslanmaz çelik malzemeden imal edilmiş farklı kılcal kalıplar kullanmışlardır. Düz kılcal kalıbın kalıp çıkış açısı 0°, kılcal kanal çapı 1,6 mm ve L/D oranı 9,375’dir. Diğer kılcal kalıpların ise kalıbı ise kalıp çıkış açıları 15°, 30° ve 45° olarak düz kılcal kalıptan türetmişlerdir. Hem düz hem pahlı geometriye sahip kompleks geometrideki kılcal kalıba ise kademeli geçişli kılcal kalıp demişlerdir ve 1, 2, 5, 8 mm L_{cl} uzunluklarında çeşitlerini yapmışlardır ayrıca bu kalıplar için açıyı 45°’de sabitlemişlerdir. Bütün kalıp çeşitleri için kılcal çapını (D_{cl}) 2 mm de sabit tutmuşlardır. Deneyler sonucunda optimum kalıp çıkış açısı 15° ve kademeli geçişli kılcal kalıbının uzunluğunu 2/15 olarak bulmuşlardır. Kompleks kılcal kalıbın, pahlı kılcal kalıplara göre daha kararlı olduğunu tespit etmişlerdir. 15° pahlı kalıpta çapaklanma kütesinin yoğunluğunun düz kılcal kalıba göre %56 azaldığını ve açı 45° ye kadar yükseldikçe sıvanma miktarının artmaya başladığını belirtmişlerdir. Musil ve Zatloukal HDPE’ nin ekstrüzyonu sırasında

kademeli geçişli kılcal kalıp geometrisine sahip kalıbın konik kısmının uzunluğunun ve kalıp çıkış açısının iç kalıp sıvanmasının yoğunluğunun üzerine olan etkisinin değişken olduğunu gözlemlemişlerdir. Bu değişken olan durumun, pahlı kalıplarda, kademeli geçişli kalıplara göre daha belirgin olduğunu ve kademeli geçişli kalıplarda bu durumun daha sabit olduğunu belirlemişlerdir. Şekil 2.5’de deneylerde kullandıkları kılcal kalıp geometrilerinin kesit görünüşleri verilmiştir [23].



Şekil 2.5. Deneylerde kullanılan kılcal kalıpların çıkış bölgeleri: (a) düz kılcal kalıp (b) pahlı kılcal kalıp (c) kademeli geçişli kılcal kalıp [23]

Chaloupkova ve Zatloukal kalıp sıvanması davranışının belirlenmesi aşamasında karmaşıklığı minimuma indirebilmek için malzeme olarak metallosen esaslı LLDPE kullanmışlardır. Soğutma sistemi yardımı ve kalıp sonundaki gerilme durumlarının kontrolünü sağlayabilen içi dolu olmayan boru profilinde ekstrüzyon kalıbı kullanarak deneysel olarak testler yapmışlardır. Kalıptaki sıvanmayı teorik olarak açıklayabilmek için FEM ile White-Metzner modelini kullanmışlardır. Sonuç olarak Chaloupkova ve Zatloukal, kalıp çıkış bölgesinde kritik bir negatif basınç olduğunu söylemişlerdir. Bunun da eriyik haldeki polimerde emilme durumuna yol açması sebebiyle kalıp sıvanması durumunu meydana getirdiğini belirtmişlerdir. Eriyiğin sıcaklığının, kütsel debinin ve dıştan uygulanan soğutma etkisinin kalıp sıvanmasında önemli rol oynadığını söylemişlerdir. Negatif basınç kriterinin dikkate alınmasının, ekstrüzyon kalıplarının

tasarlanmasında, doğru malzeme seçilmesinde ve uygun işlem koşullarının belirlenmesinde kalıp sıvanma davranışının engellenmesi açısından yararlı olacağını eklemişlerdir [24].

Gander ve Giacomini bu çalışmalarında ölçülü analizler (dimensional analysis) kullanarak kalıp sıvanma problemini incelemişlerdir. Kalıp sıvanma probleminin plastik işlemciler için kronik bir problem olmaya devam ederken, herhangi bir polimer işleme uygulamasında bu problemi çözmek için analitik çözümler veya sayısal analizlerin henüz olmadığını belirtmişlerdir. Ayrıca, kalıp sıvanma problemi üzerine yayınlanan hiçbir verinin, kendi boyutsal analizlerinden daha anlamlı korelasyonlar geliştirecek kadar kapsamlı olmadığını söylemişlerdir. Boyut analizinin, yayınlanmış literatürdeki gerçek sistemlere henüz uygulanmadığını eklemişlerdir. Bununla birlikte, Gander kısa bir süre önce film üflemede kalıp sıvanması davranışını incelerken bu yöntemi uygulamıştır. Polidispersite indeksini deneysel olarak değiştirerek Gander şunları bulmuştur:

$$BR = \alpha(P^{I\beta} - 1) \quad (2.2)$$

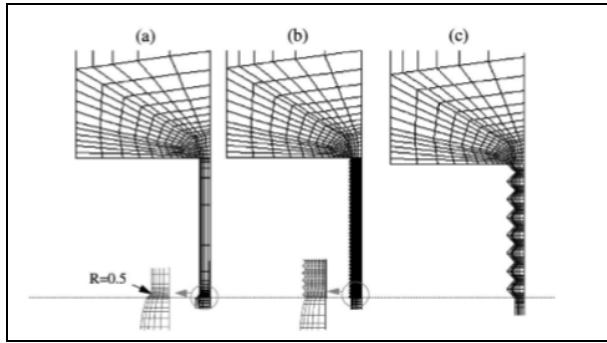
Bu eşitlikte α (karışımın ana bileşeni) ve β 'nin (karışımın az miktarda olan bileşeni) sabit parametreler olduğunu söylemişlerdir. BR kalıptaki sıvanma oranını, PI ise polidispersite indeksini belirtmektedir [25].

Hogan, Walia ve Dems çalışmalarında, kalıpta sıvanma ve şişme davranışları arasındaki ilişkiyi daha iyi anlayabilmek için yapılmıştır. Malzeme olarak etilen-okten-poliolenin elastomer reçinesi (resin) kullanmışlardır. Bu çalışma ile şişmenin, kalıpta oluşan sıvanma davranışının ortaya çıkmasındaki ana sebep olmadığını kanıtlamışlardır. Kayma hızı sabit iken kalıbın L/D oranının artması ile kalıptaki sıvanma artarken şişme davranışının azaldığını söylemişlerdir. Kalıpta sıvanma davranışının polimerin içinde bulunan oligomerik türlerin kaymadan kaynaklı olarak kalıp yüzeyine doğru yer değiştirmesine yol açtığını belirtmişlerdir. Yüksek oranlarda kayma hızı ve gerilmelerin daha yüksek oranda yer değiştirmeye sebep olduğunu ve bunun da sonucu olarak kalıp duvarındaki oligomerik türlerin konsantrasyonunun arttığını belirlemişlerdir. Kalıpta sıvanma davranışının reçineye, katkı maddelerine ve deneyler sırasındaki sıcaklık seviyelerine göre farklılık gösterdiğini söylemişlerdir. Kalıp tasarımı açısından, kalıptaki kesme hızı veya kayma gerilmesinin en aza indirilmesi gerektiğini söylemişlerdir. Kayma hızını veya kayma gerilmesini etkileyen birincil parametrelerin kalıp çapı ve reçinenin akış hızı olduğunu

belirtmişlerdir. Kalıp sıvanma davranışı açısından, sabitlenmiş bir akış hızı ve sıcaklıkta, uygulama için mümkün olan en büyük kalıp çapının ve en düşük L/D oranının seçilmesinin uygulanabilirlik yönünden avantajlı olacağını sonuçları arasında belirtmişlerdir [26].

2.5. Kalıp Geometrisinin Yüzey Kalitesine Etkisi

Lineer alçak yoğunluklu polietilenin ekstrüzyonu sırasında yüzeyde oluşan düzensizliklerinin nedeni kalıbın çıkışında meydana gelen yüksek seviyedeki uzama gerilmeleridir. Rutgers ve Mackley bu çalışmalarında LLDPE için kalıp kanal geometrisinin ve duvar sınır şartlarının, ekstrüzyon sırasında oluşan yüzey düzensizliklerinin şekillenmesine olan etkisini araştırmışlardır. Ekstrüzyon sonrası oluşan yüzey, taramalı elektron mikroskopu (SEM) ile incelenmiştir. Durağan akışın simülasyonu için Polyflow yazılımı kullanmışlardır. Deneysel sonuçlar ile simülasyonlar arasındaki benzerliğin iyi derecede olduğunu belirtmişlerdir. Şekil 2.6'da deneylerde kullanılan farklı kalıp numunelerinin simülasyonda çözüm oranı uygulanmış halleri verilmiştir.



Şekil 2.6. Deneylerde kullanılan farklı kalıp numunelerinin simülasyonda çözüm oranı uygulanmış halleri: 0,5 mm çıkış çaplı kalıp 4 (a) 0.1 mm dişli yapıda olan kalıp 2 (b) 0.5 mm dişli yapıda olan kalıp 3 (c) [27]

Rutgers ve diğerleri, kalıbın çıkışındaki ekstrüdat yüzeyindeki malzemenin 0,8-1 MPa derecesine kadar olan kritik gerilme seviyesine ulaştığında, ekstrüzyon yüzeyi kararsızlığını 100 μm 'lik bir genlik ile gözlemlemişlerdir. Dairesel çıkışın ekstrüdat yüzeyindeki akış geçişininin (flow transition) şiddetini azalttığını söylemişlerdir [27].

Arda ve Mackley bu çalışmalarında kalıp çıkışının kıvrımının, floropolimer katkısını ve kalıp yüzeyinin pürüzlülüğünün yüzey kalitesine (pullanmış yüzey görünümü) olan etkisini incelemişlerdir. Deneysel çalışmalarını simülasyonlarla desteklemişlerdir. Malzeme olarak

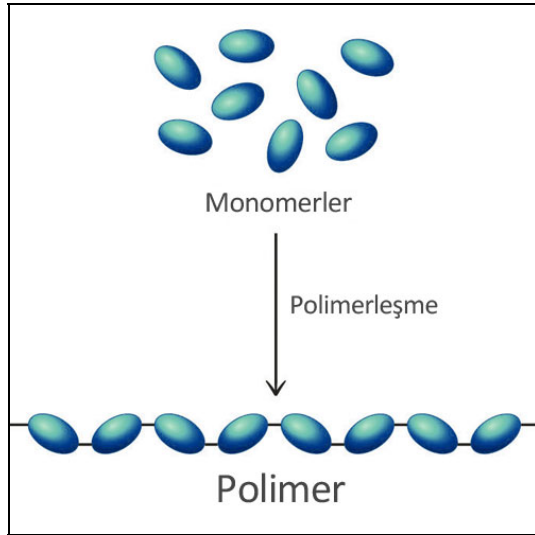
LLDPE ve HDPE kullanmışlardır. Kalıp çıkışının kıvrımlı yapıda olmasının çıkıştaki eriyik malzemenin gerilimini azaltması dolayısı ile yüzey kalitesini azalttığını söylemişlerdir. Sonuç olarak kalıp yüzeyinin pürüzlülüğünün azaltılmasının duvarda kısmi kaymaya sebep olması nedeni ile yüzey kalitesini azalttığını, HDPE malzemesinin LLDPE malzemesine göre yüzey kalitesi seviyesinin daha yüksek olduğunu belirtmişlerdir. Ayrıca yüzey kalitesi seviyesini azaltmanın en iyi yolunun duvarda kaymaya neden olması sebebi ile floropolimer malzemesinin katkısı ile olduğunu söylemişlerdir. Bu katkı ile ekstrüzyon sırasındaki basınç değişiminin de azaldığını eklemişlerdir [28].

Literatürde yapılan çalışmalar incelendiğinde, bütün deneysel çalışmalarda yöntem uyumlu olmayan (off-line) kılcal reometre deney düzeneğinin kullanıldığı görülmüştür. Bu çalışmanın literatürdeki çalışmalardan en büyük farkı, reolojik karakterizasyon için yöntem uyumlu (in-line) test düzeneğinin kullanılmış olmasıdır.

3. POLİMERLER

3.1. Polimerin Tanımı

Polimerler, çok sayıda makro molekülün düzenli bir şekilde, kimyasal bağlarla bağlanarak oluşturdukları yüksek molekül ağırlıklı bileşiklerdir. Karbonun hidrojen, oksijen, azot ve diğer elementler ile oluşturduğu monomer adı verilen, basit yapılı moleküllerdeki bağın koparılarak, uzun ve zincirli bir yapıya dönüştürülmesi ile elde edilen malzemelerdir [29,30]. Şekil 3.1’de polimerin elde edilmesi temsili görülmektedir [31].



Şekil 3.1. Polimerleşme [31]

3.2. Plastikler

Plastik terimi, Yunanca’da döküme uygun anlamındaki “plastikos” ve dökme anlamındaki “plastos” kelimesinden türetilmiştir. Malzemenin işlenmesi sırasında kolay şekil alabilmesinden dolayı bu isim türetilmiştir. Polimer, polimerizasyon sonucu oluşmuş saf maddeye verilen isimdir ve genellikle uzun zincir benzeri moleküllerin tanımlanması amacıyla kullanılır. Polimerler çok ender olarak saf halde, katkı maddesi katılmadan, kullanılırlar. Plastik kelimesi ise, polimerlere çeşitli katkılar katıldıktan sonra ortaya çıkan malzeme için kullanılır. Polimerlere katılan katkı maddelerinin birçok çeşidi vardır, bunlardan bazıları antistatik katkılar, pigmentler, dolgular, yağlayıcılar, takviyeler, bağlayıcı katkılar, kararlılaştırıcılar, alev önleyicilerdir [32].

Plastikler genellikle moleküler yapıları ve bağ mekanizmaları gibi özelliklerine göre sınıflandırılırlar. Plastikler kendi aralarında termoplastikler, termosetler ve elastomerler olmak üzere 3 ana gruba ayrılırlar.

Plastikler lineer veya dallanmış büyük moleküllerden yani makromoleküllerden oluşmuşlardır. Termoplastiklerde, makromoleküller arasında kimyasal bağ bulunmaz. Bu bağların bulunmaması termoplastiklerin tekrar tekrar işlenebilmesine imkân sağlamaktadır. Aynı zamanda termoplastikler kimyasal çözücülerde çözülebilmektedir. Termoplastikleri makromoleküllerin dizilişine göre ikiye ayırmak mümkündür. Eğer makromoleküllerin dizilişi rastgele gerçekleşmiş ise malzeme “amorf” olarak adlandırılır. Amorf malzemelere katkı malzemeleri katılmadığı sürece şeffaf bir görünüme sahiptirler. Bazı termoplastiklerde yer yer makromoleküllerin dizilişleri bir düzen ihtiva eder. Bu tarz termoplastikler “yarıkristal” olarak adlandırılır. Plastiklerde makromoleküller karmaşık ve birbirine dolaşmış bir yapı ihtiva eder. Bu da plastik malzemelerin %100 oranında kristalli bir yapıya sahip olmasını engeller. Bu yüzden plastik malzemelerde kristalli bölgeler arasında amorf bölgelerde yer alır. Kristalleşmiş bölgelerin tüm alana oranı “kristallik derecesi” olarak adlandırılır. Fakat daha basit zincir yapısına sahip olan plastik malzemelerin kristallik derecesi daha yüksektir [33]. Şekil 2.2’de yarı kristalin yapıdaki bir termoplastiğin zincir dizilimi gösterilmektedir.

Termoplastiklere ısıtılıp ergitildikten sonra şekil verilmektedir. Ürün haline getirilen katılaşmış termoplastik, tekrar ısıtılıp ergitilerek yeni bir ürüne dönüştürülebilir. Ancak termoplastiğin fiziksel özelliklerinde değişiklik olması istenmediği için tekrar ergitilip soğutma işlemi bir noktadan sonra sınırlandırılmaktadır.

Termoplastikler; Sellülozikler, poliamitler ve viniller olmak üzere 3 ana gruba ayrılmaktadırlar.

Isı verilmesi sonrasında basınç uygulamada yalnız bir defa istenilen şekli alabilen plastiklerdir. Şekillendirilmiş bir termoset plastiğe yeniden ısı verilerek tekrar şekillendirmek mümkün değildir. Termoset malzeme tekrar ısıtılırsa bozunmaya uğrar. Termosetler çapraz bağlı bir yapıya sahiptir. Bu plastiklerde polimerizasyon işlemi malzemeyi ihtiva eden monomerlerin bir araya getirildiği reaktörde başlar ve kalıplama işlemi sırasında biter. Termosetler oda sıcaklığında sıvı halde bulunurlar. Geçirdikleri

çeşitli kimyasal işlemlerden sonra katı hal alabilirler. Isıtıldıklarında sertleşirler. Termosetlere örnek olarak polyester, epoksi, PVC ve asetol verilebilir [33].

Termosetlerin polimerizasyonu genelde iki aşamalı bir süreçtir. İlk aşamada termoseti oluşturacak monomerler bir araya getirilir. İkinci aşama ise üretim sürecinin içerdiği kalıpta meydana gelir. Yüksek basınç ve sıcaklıkta monomerler reaksiyona girer ve polimer zincirleri oluşur. Bu durumda polimer zincirlerinde reaksiyona girmemiş birimler bulunmaktadır. Basınç ve sıcaklık etkisiyle polimer zincirleri arasında yan bağlar meydana gelir ve kalıplanmış bir termoseti oluşturan polimer zincirleri arasında ağ yapısında bağlar oluşur [34].

Termosetler, termoplastiklere göre daha rijittirler. Ayrıca daha yüksek mukavemet, yüksek kullanım sıcaklığı ve dış etkenlere karşı dayanımları yönünden termoplastiklerden daha üstündürler.

Ancak, termosetler termoplastikler gibi ergitilip tekrar şekillendirilememektedirler. Bunun nedeni termosetlerdeki polimer zincirlerinin kuvvetli bağlar ile oluşması neticesinde ortaya çıkan üç boyutlu ağ yapısıdır. Fenoplastlar, aminoplastlar, poliesterler, polieterler ve poliüretanlar en yaygın kullanılan termoset malzemelerdir.

Elastomerler, çapraz bağlı ve uzun zincirli yapıdadırlar. Polimer zincirlerinin birbirlerine zayıf çapraz bağlarla bağlı olması sebebiyle yüksek elastik şekil değiştirme kabiliyetine sahiptirler. Bazı elastomerler ilk boyutlarına göre %500 ve üzerinde uzama gösterip tekrar eski hallerine geri dönebilmektedirler. Elastomerlerdeki çapraz bağların artmasıyla malzeme daha dayanımlı ve rijit bir yapıya dönüşmektedir. Poliizopiren, polibütadiyen, poliizobütilen ve poliüretan en yaygın kullanılan elastomerlerdir.

Bu çalışmada kullanılan PP malzemesi termoplastik bir malzemedir. Monomer polipropilenin polimer hale getirilmesi ile elde edilir. Kablo kılıfı yapımı, otomotiv sanayisinde, ambalaj yapımı, temiz odalarda, savunma sanayisinde, çeker ocaklarda, laboratuvarlarda ve birçok farklı alanlarda kullanılmaktadır. Kullanım alanı genişliği ve literatürde sıklıkla kullanılan bir malzeme olması sebebi ile bu tez çalışmasında tercih edilmiştir.

4. MATERYAL VE METOD

Bu bölümde deneyler sırasında kullanılan malzeme, deneysel ekipmanlar ve izlenen yollar üzerinde durulmuştur.

4.1. Polipropilen (PP) Hakkında Genel Bilgiler

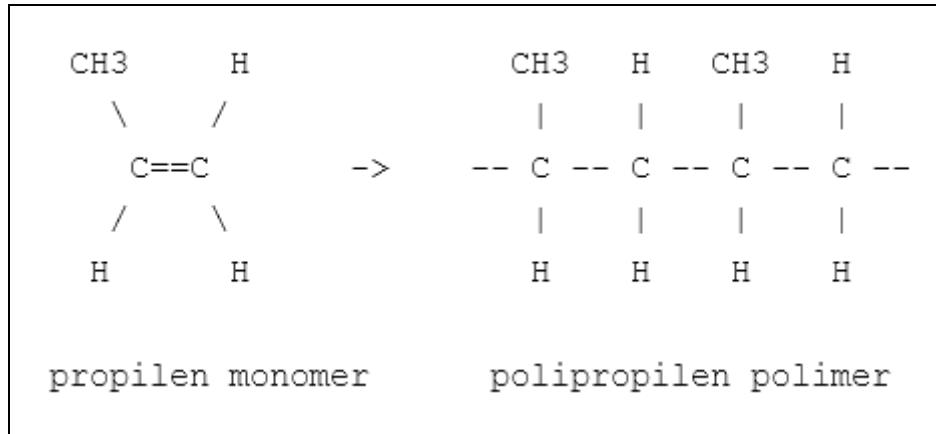
PP yarı şeffaf, beyaz renkli ve oda sıcaklığında katı halde bulunan bir termoplastik çeşididir. Kırılganlığı azdır, asitlere karşı dirençlidir ve ergime noktası 175 °C civarındadır. Isı ve ışığın etkisiyle kolayca bozunabilir. PP'nin su emiciliği düşüktür fakat su geçirgenliği vardır. Polipropilenin fiziksel ve kimyasal özellikleri Çizelge 4.1'de verilmiştir.

Çizelge 4.1. Polipropilenin fiziksel ve kimyasal özellikleri

ÖZELLİKLERİ	METOD	BİRİM	PETOPLEN MH 418
Erime akış hızı (230°C, 2.16 kg)	ASTM D1238	g/10dak	1,6
Yoğunluk 23°C	ASTM D1505	g/cm ³	0,905
Akmada gerilme dayanımı	ASTM D638	MPa	33
Kopmada gerilme dayanımı	ASTM D638	MPa	45
Renk b- değeri (10D65)	Hunter Lab.	-	1,8
Erime noktası (DSC)	ASTM D3417	°C	163
Deformasyon sıcaklığı	ASTM D648	°C	113
İzod darbe dayanımı 23°C (çentikli)	ASTM D256	J/m	23
Rockwell sertliği	ASTM D785	R-scale	94
Bükülme Mod (Flex modullus) 23°C	TS EN ISO 178	MPa	1360
Su emme (doymuş)	TS EN ISO 62	%	0,1
Maksimum sürekli çalışma sıcaklığı	-	°C	100
Minimum sürekli çalışma sıcaklığı	-	°C	5

PP hafif bir malzeme olup katı haldeki (oda sıcaklığında) yoğunluğu 0,905 gr/cm³'tür. Hafif bir plastiktir. Rijit bir termoplastik olan polipropilen yüksek mekanik özelliklere sahiptir. Çekme dayanımı yaklaşık olarak 3500 N/ cm²'dir. Mekanik özelliklerini yüksek sıcaklıklara kadar koruyabilmektedir. Darbe dayanımı yüksektir. Elektriksel özellikleri çok

iyi olan polimer, kimyasal maddelere karşı da direnç gösterir. PP, birçok plastik işleme yöntemiyle şekillendirilebilmektedir [34]. Şekil 4.1’de bir polipropilen molekülünün yapısı verilmiştir [35].



Şekil 4.1. Polipropilen malzemesinin molekül yapısı [35]

Polipropilen malzemesinin günümüzde 150’den fazla çeşiti vardır. Polipropilen su tesisatı elemanları, otomotiv sanayi, ev eşyaları, elektrik kablosu, boru yapımı vb. birçok alanda kullanılmaktadır. Bu çalışmada PETKİM Petoplen MH 418 kodlu PP kullanılmış olup genel özellikleri Çizelge 4.2’de verilmiştir.

Çizelge 4.2. PETKİM Petoplen MH 418 kodlu PP’in genel özellikleri

Özellikler	Ergime Akış İndeksi (g/10 dak)	Yoğunluk (23°C) (g/cm ³)	Akmada Çekme Dayanımı (MPa)	Elastiklik Modülü (E) (MPa)	Poisson Oranı (ν)
Değer	4.0-6.0	0.905	34	1300	0.35

4.2. Plastik Ekstrüzyon Makinesi Hakkında Bilgiler

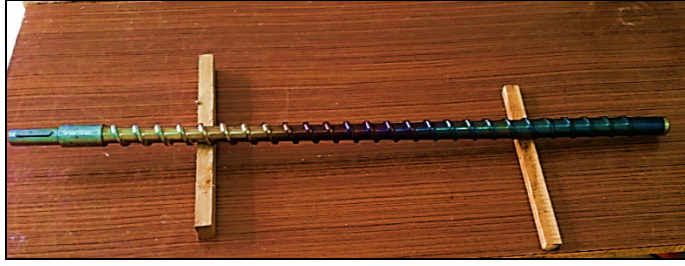
Tez çalışmasında kullanılan plastik ekstrüzyon makinesinin modeli NOVOMA NTB 30/25D’dir. Kullanılan plastik ekstrüzyon makinesi, TÜBİTAK 1001 projesi desteği ile (Proje No:115M041) Novoma Makine Sanayi ve Tic. A.Ş.’ den satın alınmıştır.

Deneyleerde kullanılan plastik ekstrüzyon makinesi Şekil 4.2’de görölmekte olup mekanik özellikleri şöyledir: Vida çapı 30 mm, ekstrüzyon işleme boyu (L/D) 25 D net, maksimum vida devri 124 devir/dak., teorik kapasitesi ise ≈ 14 kg/saat’tir.



Şekil 4.2. Plastik Ekstrüzyon Makinesi NOVOMA NTB 30/25D

Vida ve kovan Şekil 4.3’de görölmektedir. TÜV sertifikalı Enformak PT A.Ş. tarafına imal ettirilmiştir. Kovan ve vidanın üretiminde malzeme olarak nitrasyon çeliği 1.8550 (DIN1.2891,34CrAl Ni7) kullanılmıştır. Üretilen vida ve kovan daha sonra uzun süreli bir derin gaz nitrasyonu yoluyla sertleştirme (0,6-0,7 mm derinlikte 66-70 HRc sertlikte) işlemine tabi tutulmuştur. Plastik ekstrüzyon makinelerinde kullanılan vidalarda, kovan içerisindeyken sıyırma durumunun engellenmesi için kama bulunmaktadır. Eriyik haldeki malzemenin kalitesini arttırmak için karıştırıcısı bulunan bir üniversal olmayan vida Şekil 4.3’de verilmiştir. Çizelge 4.3’de ise deneyleerde kullanılan üniversal olmayan vidanın özellikleri verilmiştir.



Şekil 4.3. Deneylerde kullanılan plastik ekstrüzyon makinesinin vidası

Çizelge 4.3. Deneylerde kullanılan plastik ekstrüzyon makinesinin vidasının özellikleri

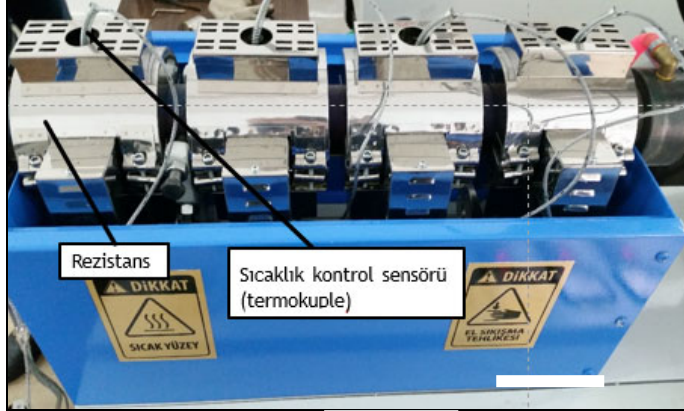
Vida çapı	30 mm
Vida işleme boyu (L/D)	25 D net.
Maksimum vida devri	124 devir/dak
Teorik kapasite	≈14 kg/saat
Sıkıştırma oranı (h_1/h_2)	2.3

Eriyik haldeki malzeme kovandan çıkarken, dairesel bir hareketle çıkmaktadır. Bunun sebebi vidanın dairesel hareketidir. Eriyik haldeki akışkanın homojen bir dağılıma sahip olması beklendiği için, bu dairesel hareketin ortadan kaldırılması gerekmektedir. Böylece eriyiğin kalitesi arttırılmaktadır. Kovan çıkışındaki dairesel hareketin doğrusal harekete dönüştürülebilmesi için, kovan çıkışına 1.2344 sıcak iş takım çeliğinden imal edilmiş bir delikli plaka (breaker plate) yerleştirilmiştir. Şekil 4.4’de deneylerde kullanılan delikli plaka verilmiştir.



Şekil 4.4. Deneylerde kullanılan delikli plaka

Kovan üzerinde 4 adet rezistan ve sıcaklık kontrol sensörleri bulunmaktadır. Bu sayede sıcaklık 400 °C'ye kadar ± 0.1 °C hassasiyet ile kontrol edilebilmektedir. Şekil 4.5'de kovan üzerinde bulunan sıcaklık kontrol sensörleri ve rezistanlar verilmiştir. Kovan üzerinde ayrıca 4 adet soğutma fanı bulunmaktadır.



Şekil 4.5. Kovan üzerindeki bulunan sıcaklık kontrol sensörleri ve ısıtıcı rezistanlar

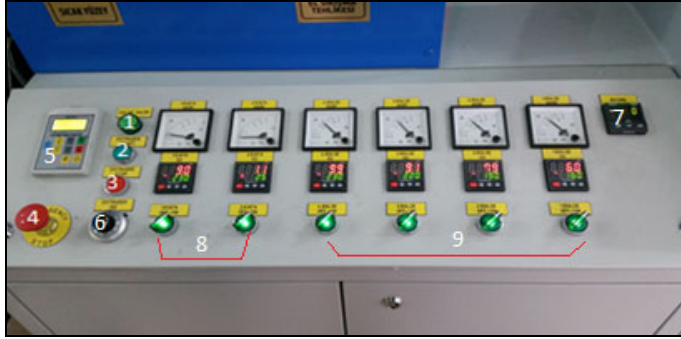
TÜV sertifikalı, DRE 373 serisi Yılmaz marka redüktör ve 5.5 kW AC motor EBMpapst marka cebri soğutma fanları ile soğutulup plastik ekstrüzyon makinesinin tahrik edilmesinde kullanılmıştır. Şekil 4.6'da 5.5 Kw AC motor ve redüktör gösterilmiştir.



Şekil 4.6. Tahrik motoru ve redüktör sistemi

Deneyler sırasında ekstüderde CE ve ISO 9001:2008 sertifikalı Amerikan ürünü olan Gefran marka basınç sensörü ile sistem üzerine, ISO 9001:2008 sertifikalı İtalyan ürünü ASCON dijital proses kontrolörü de entegre edilmiştir. Deneylerde ölçülen basınç verileri bu sistem ile ölçülmüştür.

Plastik ekstrüzyon makinesinin ünitesinde 4'ü kovan üzerindeki sıcaklığı, 2'si kalıp sıcaklığını kontrol etmek üzere toplam 6 bölgede termostat kontrolü bulunmaktadır. Vidanın çok alçak ve çok yüksek sıcaklıklarda çalışıp hasara uğramaması için SSR (katı hal rolesi) ile PID sistemle sıcaklık kontrolleri yapılmaktadır. Vida hızı 5.5 Kw Medel marka AC vektörel tip hız kontrol cihazı ile sonsuz ayar edilebilir özelliğindedir. Elektrik Kontrol kabini ISO 9001:2008 belgeli Medel Elektronik tarafından üretilmiştir. Kullanılan tüm elektrik malzemeleri CE güvenlik normlarına uygundur. Vidanın sıkışması sonucu oluşabilecek yüksek amperajlar için akım koruması mevcuttur. Şekil 4.7' de elektrik kontrol paneli görülmektedir.



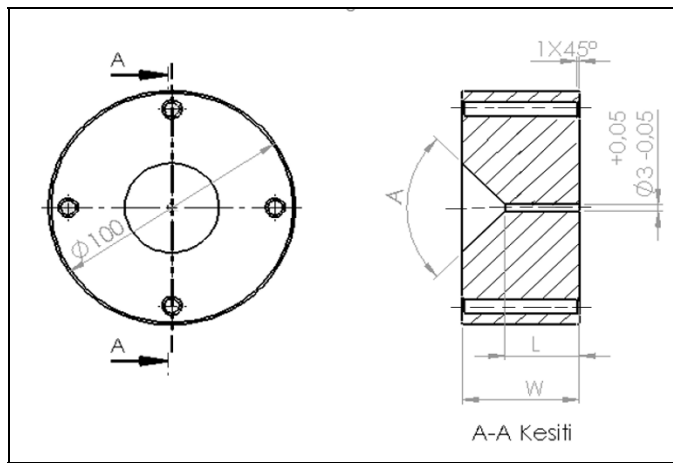
Şekil 4.7. Plastik ekstrüzyon makinesi kontrol paneli

Şekil 4.7'de belirtilen 1; Sıcaklık kontrol ünitesi set edilen değerlere ulaştığında yanan yeşil ışığı 2; Ekstrüzyon makinesi çalıştırma butonunu, 3; Ekstrüzyon makinesi durdurma butonunu, 4; acil durdurma butonunu, 5; Vida hızı, akım, gerilim, çekilen güç değerlerinin gösterildiği paneli, 6; vida hızının ayarlandığı butonu, 7; Basıncın gösterildiği ekranı, 8; Kalıp üzerindeki sıcaklık sensörlerinin ayarlandığı paneli, 9; Kovan üzerinde bulunan sıcaklık kontrol ünitesinin kontrol panelini ifade etmektedir.

Deneyler sırasında kullanılan kalıpların tasarlanması aşamasında ASTM D5422-09 [34] , ASTM D3835-16 [35] ve literatürde bulunan kılcal kalıp yaklaşımları [36] dikkate alınmıştır. Ayrıca, sektöründe öncü olan Malvern, Haake, Goettfert ve Celsum firmalarının tasarımları incelenip L/D oranı belirlenmiştir. Ticari firmaların ürettikleri kılcal kalıp tasarımlarının incelenmiştir ve bu ölçülere uygun kılcal kalıplar imal edilmiştir. Kalıplar Sky Makine, Doğanlar, Bornova, İzmir'de yaptırılmıştır.

Kalıp içi akış sırasında meydana gelen basınç ve sıcaklık değerlerindeki değişimler, plastik ekstrüzyon makinesinin kontrol paneli üzerindeki göstergeler yardımı ile belirlenmiştir.

Kılcal kalıplar imalat çeliğinden üretilmiştir. Kalıp çapı 3 mm olan, L/D oranları 10, 15, 20 olan ve 75, 45, 60, 90, 105, 120, 180° açılarında olan 9 kılcal kalıp imal edilmiş ve deneylerde kullanılmıştır. 180°'lik kılcal kalıp açısına sahip kalıp için bundan sonra açısız kalıp olarak bahsedilecektir. Şekil 4.8'de kılcal kalıpların genel teknik resmi görülmektedir. Açı ve ölçüler ise Çizelge 4.4'de verilmiştir.



Şekil 4.8. Kalıp teknik resmi

Çizelge 4.4. Kılcal kalıp giriş açısı değerleri ve genel boyutlar

Kalıp No	A (°)	L (mm)	W (mm)	D (mm)	L/D
1	75	30	47,6	3	10
2	75	45	62,6	3	15
3	75	60	77,6	3	20
4	45	30	47,6	3	10
5	60	30	47,6	3	10
6	90	30	47,6	3	10
7	105	30	47,6	3	10
8	120	30	47,6	3	10
9	180	30	47,6	3	10

Aşağıda Şekil 4.9, 4.10, 4.11, 4.12, 4.13, 4.14, 4.15, 4.16, 4.17'deneyler sırasında kullanılan kalıplar verilmiştir.



Şekil 4.9. Deneyler sırasında kullanılan 1 numaralı kalıp



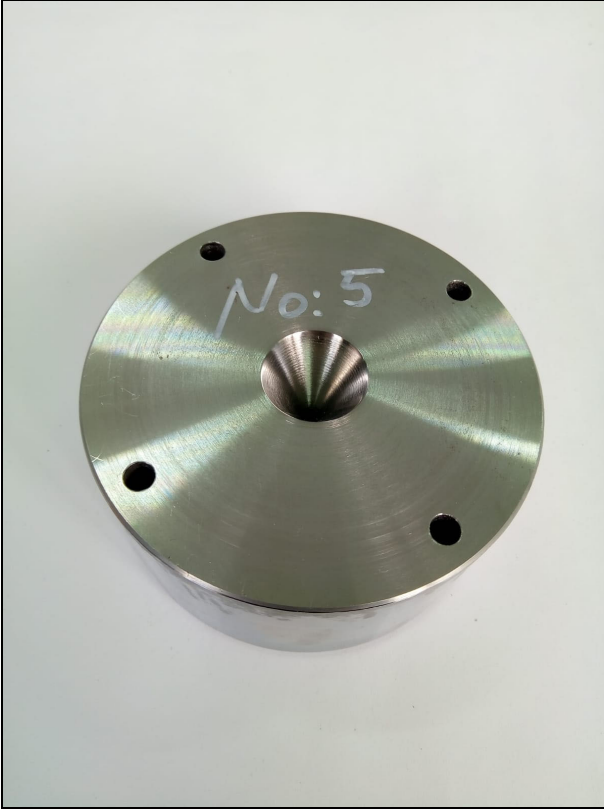
Şekil 4.10. Deneyler sırasında kullanılan 2 numaralı kalıp



Şekil 4.11. Deneyler sırasında kullanılan 3 numaralı kalıp



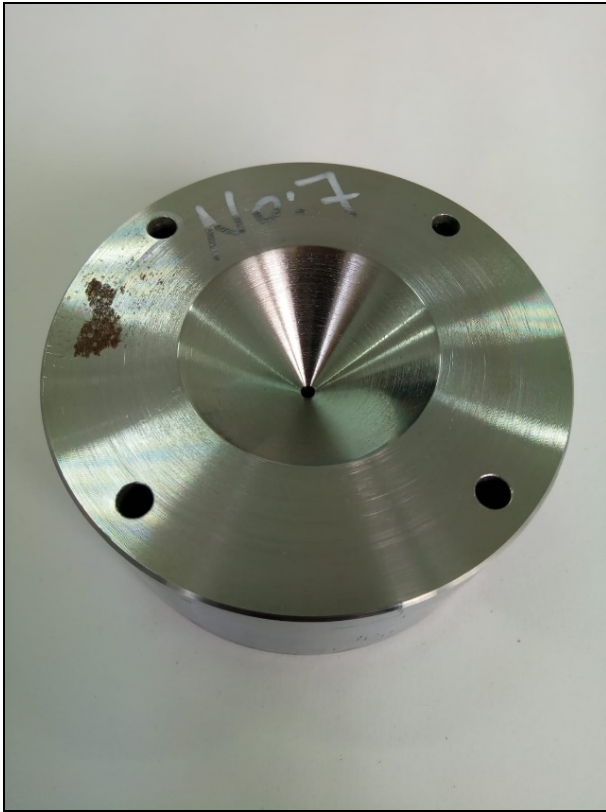
Şekil 4.12. Deneyler sırasında kullanılan 4 numaralı kalıp



Şekil 4.13. Deneyler sırasında kullanılan 5 numaralı kalıp



Şekil 4.14. Deneyler sırasında kullanılan 6 numaralı kalıp



Şekil 4.15. Deneyler sırasında kullanılan 7 numaralı kalıp



Şekil 4.16. Deneyler sırasında kullanılan 8 numaralı kalıp



Şekil 4.17. Deneyler sırasında kullanılan 9 numaralı kalıp

İstenilen hızda profil üretmek, vidanın dönme hızı ve oluşan eriyik akışından etkilendiği için mümkün değildir. Üretim hızını arttırmak için çekiciler kullanılır. Çekici kısmın ayarlanması ile de profil üstüne farklı geometriler oluşturulabilir. Bu işlem sıcak kalıp sonrası gerçekleştirilir.

4.3. Metod

PP malzeme deneyler öncesinde Etüv fırında 2 saat bekletilerek nem alma işlemine tabi tutularak kurutulmuşlardır. Kurutulmuş PP malzeme deneylerde kullanılmak üzere ekstruder hunisine boşaltılmıştır. PP malzeme 210 C ve 230 C eriyik sıcaklığına ulaşınca test edilmiştir. Plastik ekstrüzyon makinesinin kovan üzerinde bulunan 4 sıcaklık bölgesi ve kalıp üzerinde bulunan sıcaklık değerlerinin ayarlandığı sıcaklıklar sırası ile Çizelge 4.5’de gösterilmiştir.

Çizelge 4.5. Plastik ekstrüzyon makinesi kovan bölge sıcaklık değerleri

1. Bölge C	2. Bölge C	3. Bölge C	4. Bölge C	Kalıbın Sıcaklığı C
160	180	210	210	210
160	190	220	230	230

Plastik ekstrüzyon makinesi kovani üzerindeki bölgeler belirlenen sıcaklık değerlerine ulaştığında, ekstruder vida düşük bir devirle döndürülmeye başlamıştır ve PP malzemenin kovan içerisinden makineye akmaya başlaması sağlanmıştır. Belirli bir süre sonra eriyik hale gelen PP kalıptan dışarı çıkmaya başlamıştır. Çıkan ekstrüdat bir konveyör üzerine akarak toplanmıştır. Polimer akmaya başladıktan 5 dakika sonra sistem kararlı hale geldiğinden deneysel ölçümlere başlanmıştır. Her deneyde reolojik ölçümler için ekstruderden 1 dakika boyunca akıtılan ekstrüdat numune toplanmıştır. Toplanan ekstrüdat numune 1 dakika sonra el aleti yardımıyla kesilerek sürekli akıştan ayrılmış ve ağırlığı Şekil 4.18’de verilen 0,01 gram hassasiyetindeki Radwag PS 510 R.1 hassas terazi yardımıyla ölçülmüştür. Ölçümler sırasında ASTM D5422-09 standardına bağlı kalınmıştır.



Şekil 4.18. Ölçümler sırasında ağırlık ölçümlerinde kullanılan hassas terazi

Çizelge 4.6. Deneysel şartlar

Sıcaklık °C	Vida Devirleri (devir/dak)				
210°C	20	40	60	80	100
230°C	20	40	60	80	100

Tartma işlemi sonunda, ilgili deney şartındaki kütleli debi elde edilir. Her bir deney 3 kez tekrar edilerek aritmetik ortalama kütleli debi olarak kullanılır. Reometrik hesaplamalarda kullanılmak üzere kütleli debi değerinin hacimsel debi değerine dönüştürülmesi gerekmektedir. Bu işlem eriyik PP'nin yoğunluğu kullanılarak yapılmıştır. Kütleli debi ilgili sıcaklıktaki yoğunluğa bölünür. Bunun için eriyik PP'nin 210 °C'deki yoğunluğu 0,795 g/cm³ ve 230 °C 'deki yoğunluğu ise 0,785 g/cm³ olarak alınarak yapılmıştır. Bu değerler eriyik PP'ye ait Basınç (P) – Özgül hacim (V) – Sıcaklık (T) eğrilerinden elde edilmiştir. İlgili deney sonucunda ölçülen eriyik basıncı ve eriyik hacimsel debi değerleri Eşitlik 4.1 ve Eşitlik 4.2 kullanılarak kayma gerilmesi ve kayma hızı değerleri hesaplanır. Bulunan kayma gerilmesi ve kayma hızı değerleri yardımı ile de Eşitlik 4.3 kullanılarak eriyik viskozitesi hesaplanır.

$$\tau_a = \frac{\Delta P}{4 \cdot \left(\frac{L}{D}\right)} \quad (4.1)$$

$$\dot{\gamma}_a = \frac{32 \cdot Q}{\pi \cdot D^3} \quad (4.2)$$

$$\eta_a = \frac{\tau_a}{\dot{\gamma}_a} \quad (4.3)$$

Kütlesel debiler birimlerin g/s'ye çevrilmesi ile belirlenmiştir. Bu işlem 3 kez tekrar edilmiştir. Ağırlık ölçümlerinin tamamlanmasından sonra, numuneler numaralandırılıp laboratuvar koşullarında 24 saat bekletilmiştir. Her numune için 3 kez tekrar edilen kütle değerlerinin aritmetik ortalamaları hesaplanmıştır. Yoğunluk 210°C için 0,000795 g/mm³, 230°C için 0,000785 g/mm³ kabul edilmiştir. Her sıcaklık ve her açı için bulunan kütleli debi değerlerinin yoğunluğa bölünmesiyle hacimsel debiler hesaplanmıştır. Elde edilen veriler yardımı ile hacimsel debi, kütleli debi, yoğunluk, kayma hızı, kayma gerilmesi ve bunlara bağlı olarak viskozite değerleri hesaplanmıştır.

Buraya kadar anlatılan işlemler Çizelge 4.6'de verilen vida devri değerleri için tekrarlanır. Daha sonra eriyik sıcaklık değeri 230°C'ye çıkarılarak tüm işlemler yeniden tekrarlanarak eriyik PP'nin ilgili kalıp için farklı akış hızları ve sıcaklıktaki reolojik karakterizasyonu tamamlanır. Kalıp değiştirilerek işlemlere devam edilir. Bu sırada elde edilen kayma gerilmesi, kayma hızı ve viskozite görünür değerler olup düzeltilmeleri gerekmektedir.

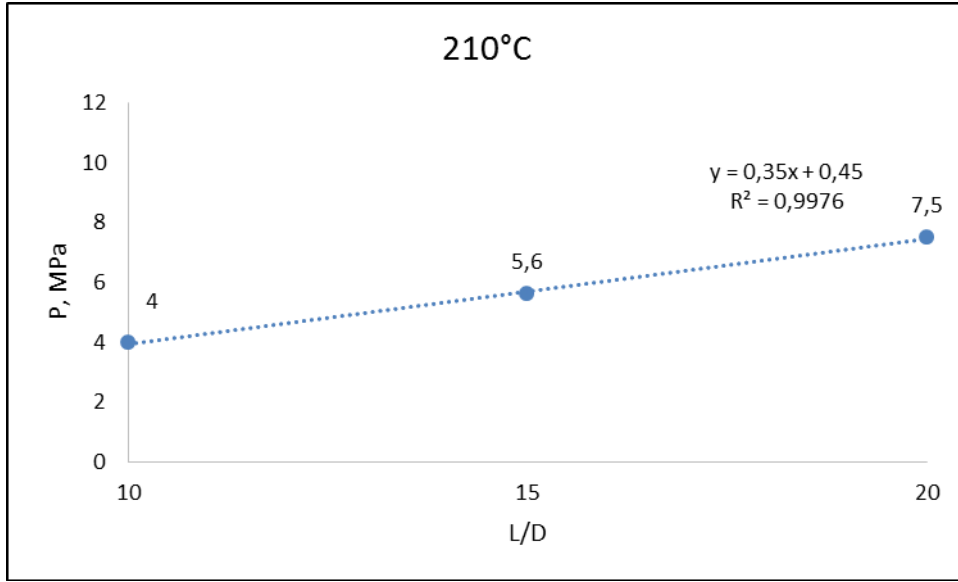
4.3.1. Bagley düzeltmesi

Görünür kayma gerilmesi değerlerinin elde edilmesi için farklı kalıpların aynı sıcaklık ve aynı devirlerdeki basınçları hesaplanmıştır. Gerçek kayma gerilmesinin hesaplanması için ise basınç kayıplarının bilinmesi gerekmektedir. Farklı kalıplara ait aynı sıcaklık ve aynı devirlerdeki basınç değerlerinin eğrileri çizilip giriş basınç değerleri (P_g) elde edilmiştir. Giriş basınçlarının, sensörden okunan basınç değerlerinden (P_0) çıkarılması ile ise düzeltilmiş basınç değerleri (ΔP) elde edilmiştir. Düzeltilmiş basınç değerleri kullanılarak gerçek kayma gerilmesi değerleri elde edilmiştir.

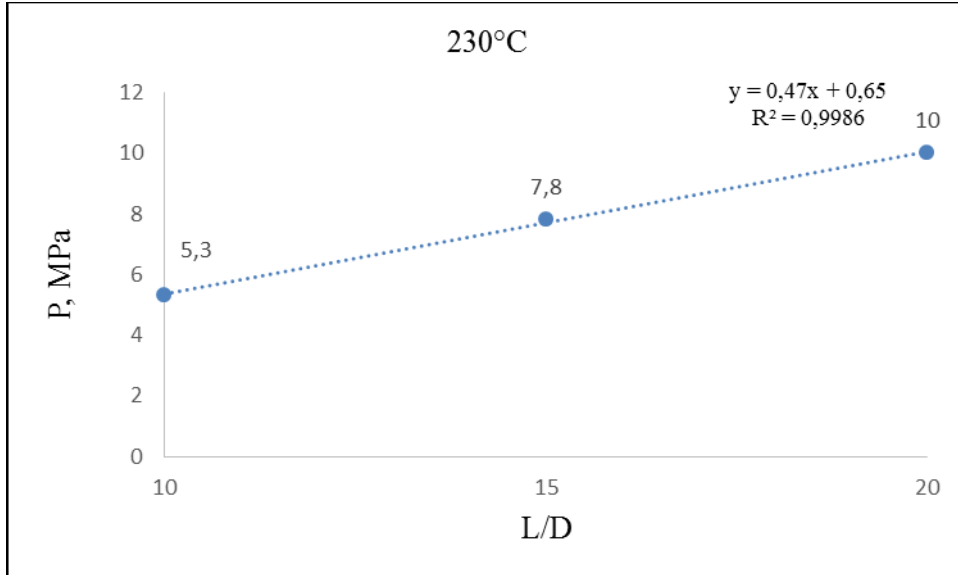
Deneyssel verilere dayalı olarak hesaplanan kayma gerilmesinde kullanılan eriyik basınç değeri, kalıba giriş bölgesinden ölçülmüştür. Oysaki Eşitlik 4.1, basıncın kalıp akışındaki değerini dikkate alır. Ölçüm yapılan nokta ile kalıp çıkışı arasındaki basınç kaybının bulunup, bu değere bağlı olarak basınçlarının düzeltilmesi gerekmektedir. Bu nedenle aynı çapta, farklı uzunlukta kalıplar kullanılarak aynı şartlardaki basınçlar Şekil 4.19 ve 4.20'de görüldüğü gibi bir eğri elde etmek için kullanılır. Eğrinin y eksenini kestiği yer sıfır uzunluktaki kalıpta olması gereken basınç için gerekli kaybı vermektedir. Gerçek kayma gerilmesinde kullanılacak basınç değeri Eşitlik 4.4 kullanılarak elde edilir.

$$\Delta P = P_{\text{ö}} - P_g \quad (4.4.)$$

Elde edilen basınç, Eşitlik 4.1’de kullanılarak gerçek kayma gerilmeleri bulunur. L/D oranları 10,15 ve 20 iken basınç değerleri kullanılarak basınç düşüşleri tespit edilip Bagley eğrisi çizilmiştir.



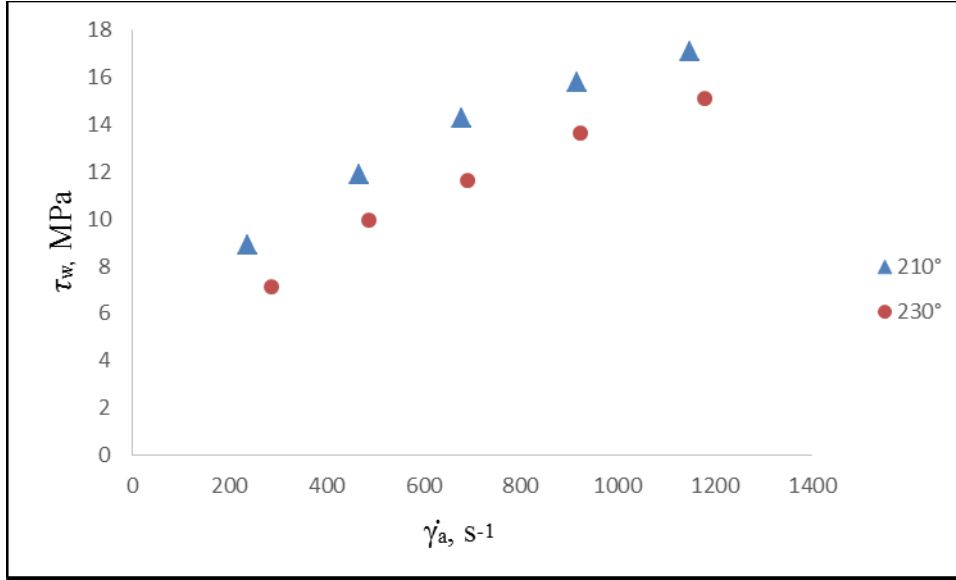
Şekil 4.19. D=3 mm, 210°C için Bagley eğrisinin tespiti



Şekil 4.20. D=3 mm, 230°C için Bagley eğrisinin tespiti

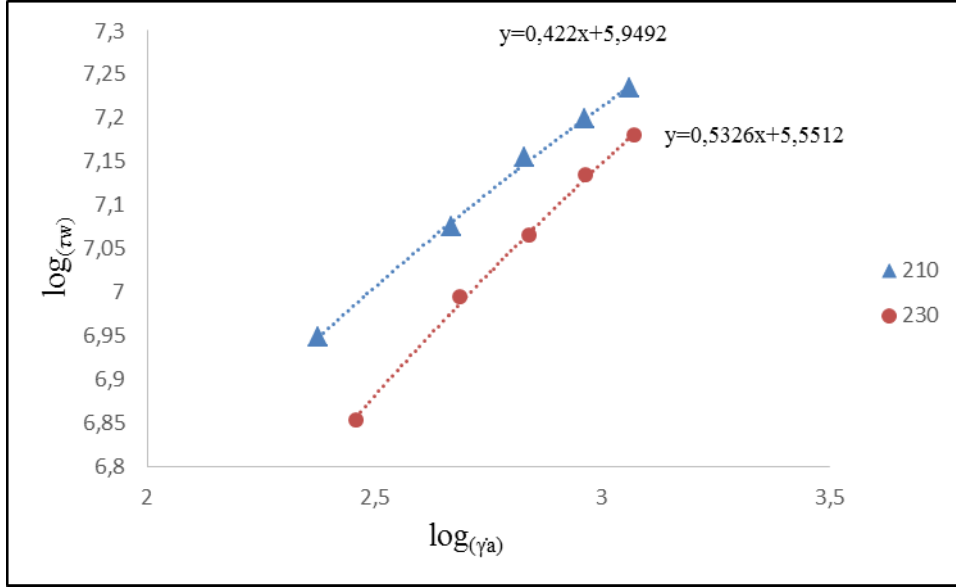
4.3.2. Power-Law indeksinin tespiti ve Rabinowitsch düzeltmesi

Elde edilen gerçek kayma gerilmesi ve görünür kayma hızı değerleri kullanılarak akış eğrisi Şekil 4.21’de görüldüğü gibi elde edilir.



Şekil 4.21. 75°'lik kalıp; 210 °C ve 230°C; L/D=10 için görünür kayma hızı-gerçek kayma gerilmesi grafiği

Eğrilerin eğimi (n), eriyik PP'nin Newtonyen davranışta sapma oranını göstermektedir ve Power Law indeksi olarak bilinir. Eğimin elde edilebilmesi için akış eğrisi logaritmik ölçekte çizilir, eğrilere doğrusal bir denklem uygulayarak elde edilen eğim (n) Şekil 4.22'dedir.



Şekil 4.22. 75°'lik kalıp; 210 °C ve 230°C; L/D=10 için logaritmik ölçekte kayma hızı-gerçek kayma gerilmesi grafiği

Eriyik sıcaklığı 210 °C için n değeri 0,422 ve 230 °C için ise n değeri 0,532 olarak bulunmuştur. Eşitlik 4.5 kullanılarak görünür kayma hızına Rabinowitsch düzeltmesi uygulanarak gerçek kayma hızı hesaplanır.

$$\dot{\gamma}_w = \left(\frac{3n+1}{4n} \right) \cdot \dot{\gamma}_a \quad (4.5)$$

4.3.3. Viskozitenin hesaplanması

Eşitlik 4.3'de, görünür kayma gerilmesi ve görünür kayma hızına bağlı olarak görünür viskozite hesaplanmıştır. Gerçek viskozite değeri ise bulunan gerçek kayma gerilmesi ve kayma hızı kullanılarak Eşitlik 4.6 yardımı ile hesaplanır.

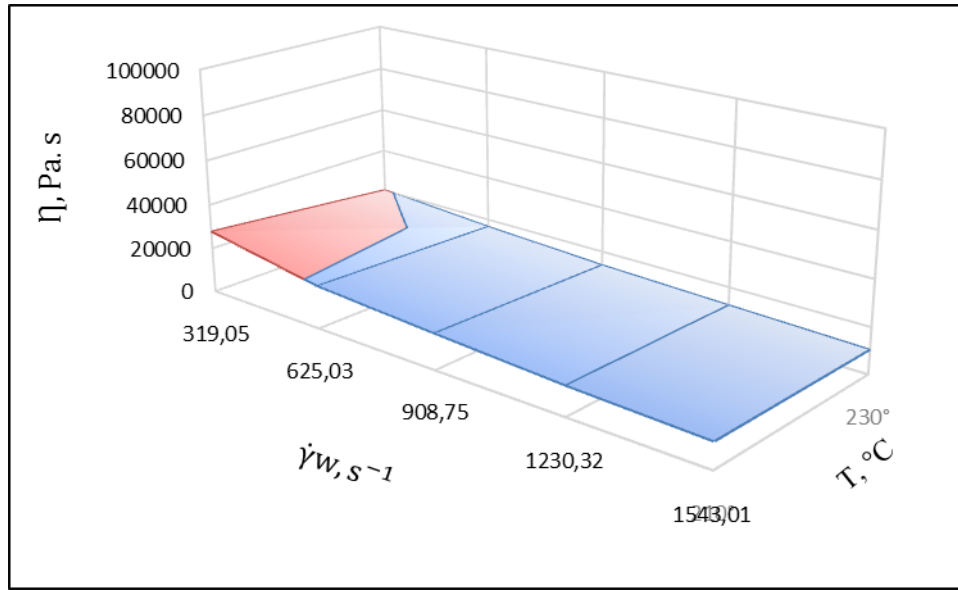
$$\eta_w = \frac{\tau_a}{\dot{\gamma}_a} = \frac{\tau_a}{\frac{3n+1}{4n} \dot{\gamma}_w} = \left(\frac{4n}{3n+1} \right) \cdot \frac{\tau_a}{\dot{\gamma}_w} \quad (4.6)$$

5. BULGULAR

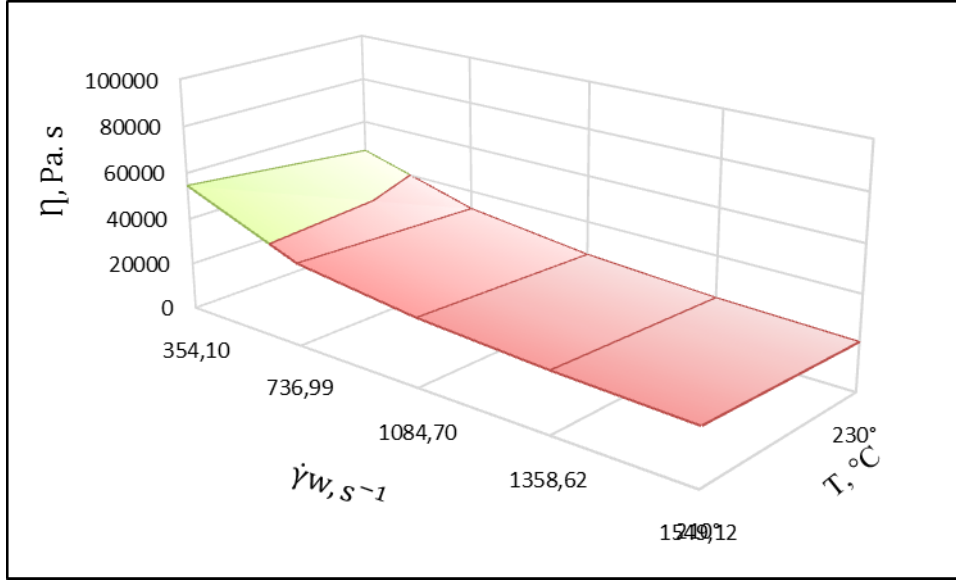
PP malzemesinin reolojik özelliklerini tespit edebilmek için 2 farklı sıcaklıkta, 5 farklı vida devrinde ve 9 farklı kılcal kalıp ile deneyler gerçekleştirilmiştir. Bu deneysel sonuçlara bağlı olarak, PP eriyik PP reolojik karakterizasyonu gerçekleştirilmiştir. Bulgular aşağıda verilmiştir.

5.1. L/D Oranı Sabit İken Sıcaklığın Viskoziteye Etkisi

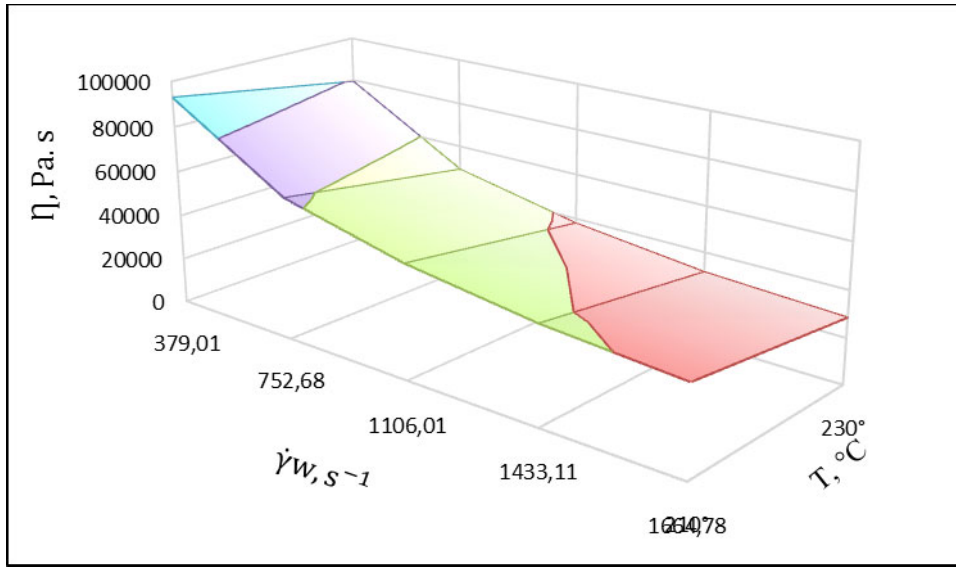
75°'lik kalıp ile yapılan deneyler de 3 farklı L/D oranı kullanılmıştır. L/D oranı 10, 15 ve 20 iken kalıp açısı sabit tutulmuştur ve kayma hızı-viskozite grafikleri çizilmiştir. Aşağıda Şekil 5.1-5.2-5.3'de oluşturulan grafikler verilmektedir.



Şekil 5.1. 75°'lik kalıp; 210 °C ve 230°C; L/D=10 için kayma hızı - viskozite grafiği



Şekil 5.2. 75°'lik kalıp; 210 °C ve 230°C; L/D=15 için kayma hızı - viskozite grafiği

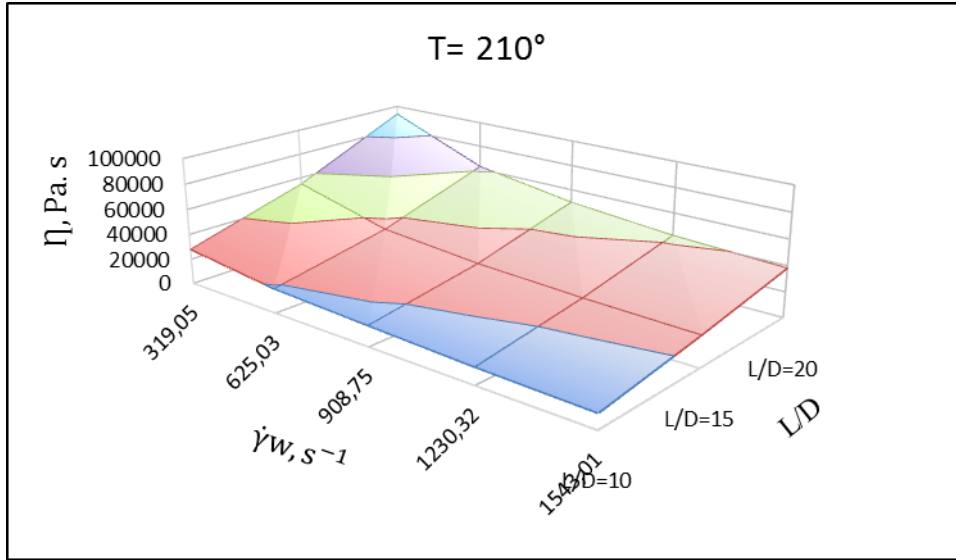


Şekil 5.3. 75°'lik kalıp; 210 °C ve 230°C; L/D=20 için kayma hızı - viskozite grafiği

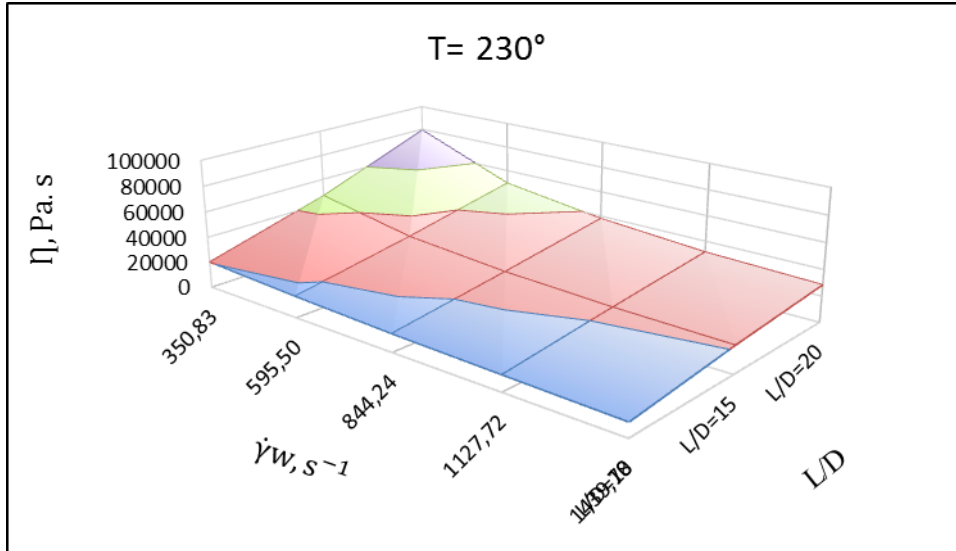
Grafiklerden anlaşılacağı gibi kayma hızının artması ile birlikte viskozite değeri düşmüştür (Kayma incelmesi). Aynı kayma hızındaki viskozite değerlerinden düşük sıcaklıkta olanın viskozite değerinin daha yüksek olduğu belirlenmiştir. Düşük sıcaklıklarda kayma hızının viskoziteye etkisi daha belirgindir.

5.2. L/D Oranının Viskoziteye Etkisi

$T=210^{\circ}$ ve $T=230^{\circ}$ için L/D oranları 10, 15, 20 iken kayma hızı ve viskozite değerleri karşılaştırılmıştır. Deneyler sonucunda bulunan değerler ile aşağıdaki grafikler çizilmiştir. (Bkz: Şekil 5.4-5.5).



Şekil 5.4. 75°'lik kalıp; 210 °C ; L/D=10, 15, 20 için kayma hızı - viskozite grafiği

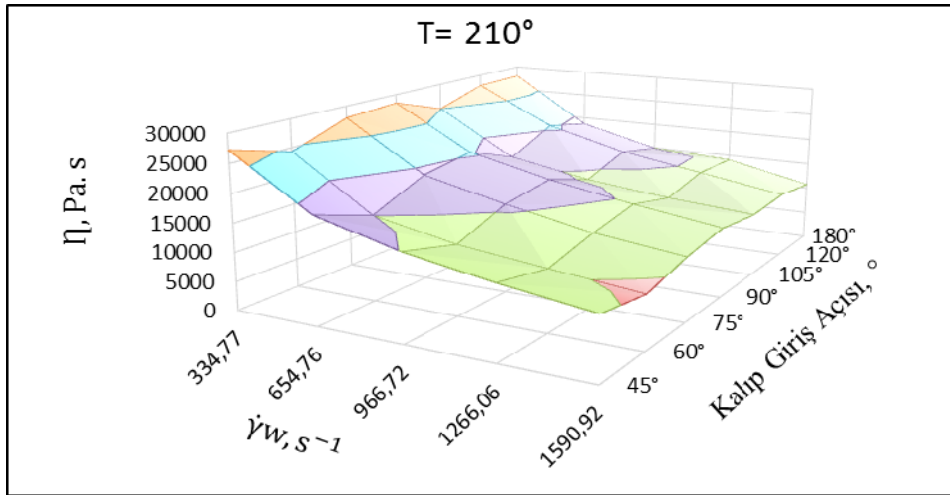


Şekil 5.5. 75°'lik kalıp; 230°C; L/D=10, 15, 20 için kayma hızı - viskozite grafiği

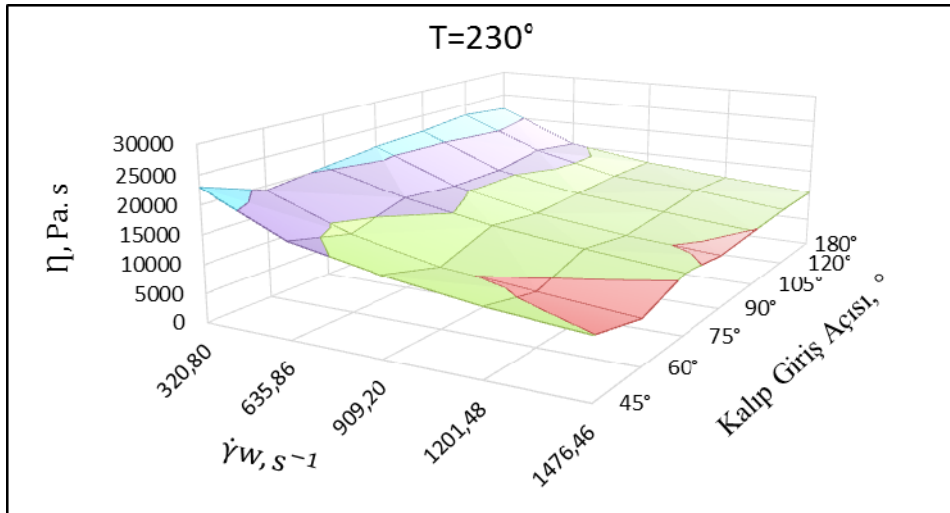
Düşük sıcaklıklarda kayma hızının viskoziteye etkisi daha fazladır. L/D oranı arttıkça kayma hızı ve viskozitenin arttığı belirlenmiştir. Aynı sıcaklık ve L/D oranında ise kayma hızı arttıkça viskozitenin değerinin azaldığı görülmüştür.

5.3. Kalıp Giriş Açısının Viskoziteye Etkisi

$T=210^{\circ}$ ve $T=230^{\circ}$ için L/D oranı 10 iken kayma hızı ve viskozite değerleri, kalıp giriş açısı 45, 60, 75, 90, 105, 120° olan kalıplar için ve açısız kılcık kalıp için kıyaslanmıştır. Deneyler sonucunda bulunan değerler Şekil 5.6-5.7 ile grafiksel olarak gösterilmiştir.



Şekil 5.6. Kalıp giriş açısı 45, 60, 75, 90, 105, 120° olan kılcık kalıplar ve açısız kılcık kalıp için 210°C; L/D=10 iken kayma hızı - viskozite grafiği

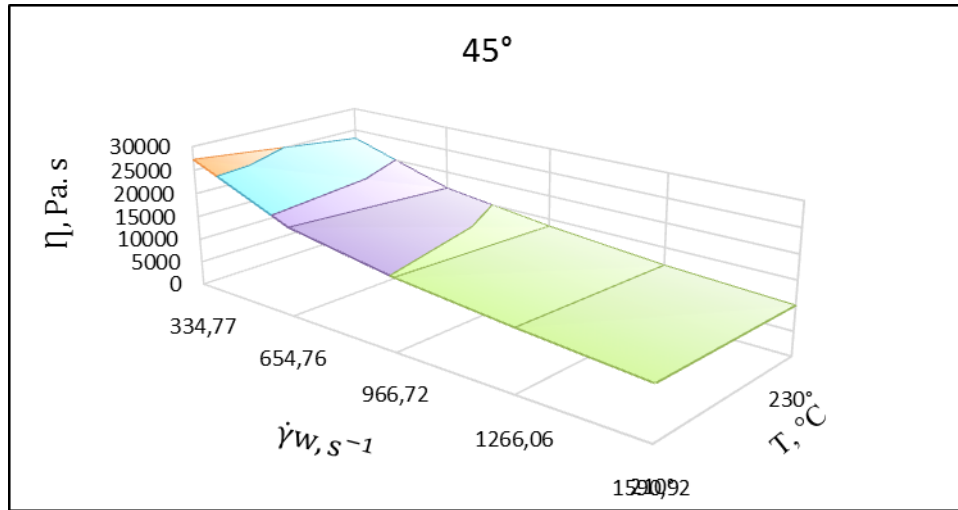


Şekil 5.7. Kalıp giriş açısı 45, 60, 75, 90, 105, 120° olan kılcık kalıplar ve açısız kılcık kalıp için 230°C; L/D=10 iken kayma hızı – viskozite grafiği

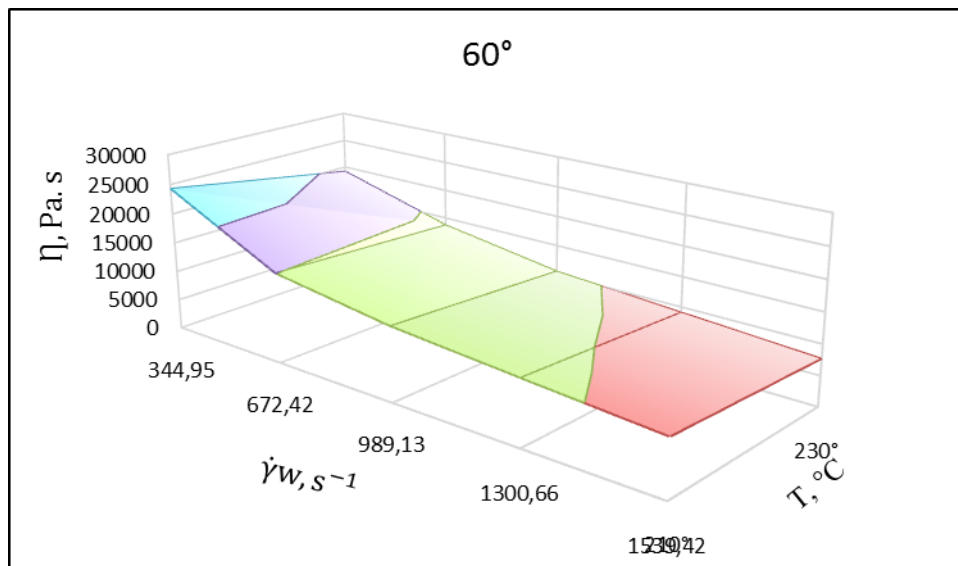
Grafiklerden de anlaşıldığı üzere, giriş açısının azalması üzere, giriş açısının azalması ile birlikte viskozite düşmektedir. Bunun anlamı yüksek açılarda uzama viskozitesi daha etkindir ve akma direnci oluşmaktadır.

5.4. Kalıp Giriş Açısı Sabit İken Sıcaklığın Viskoziteye Etkisi

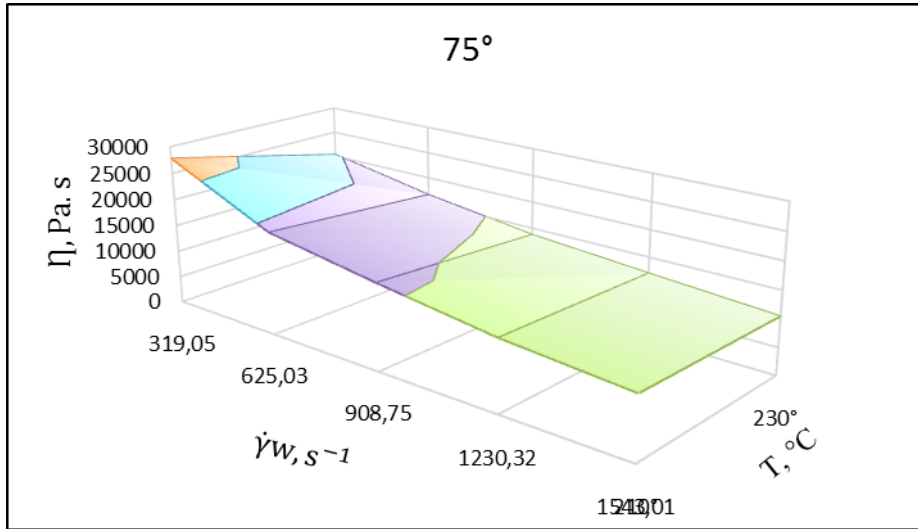
$T=210^{\circ}$ ve $T=230^{\circ}$ için L/D oranları 10 iken farklı kalıp açıları için kayma hızı ve viskozite değerleri karşılaştırılmıştır. Deneyler sonucunda bulunan değerler ve sonuçlar Şekil 5.8-5.9-5.10-5.11-5.12-5.13-5.14 numaralı grafikler ile gösterilmiştir.



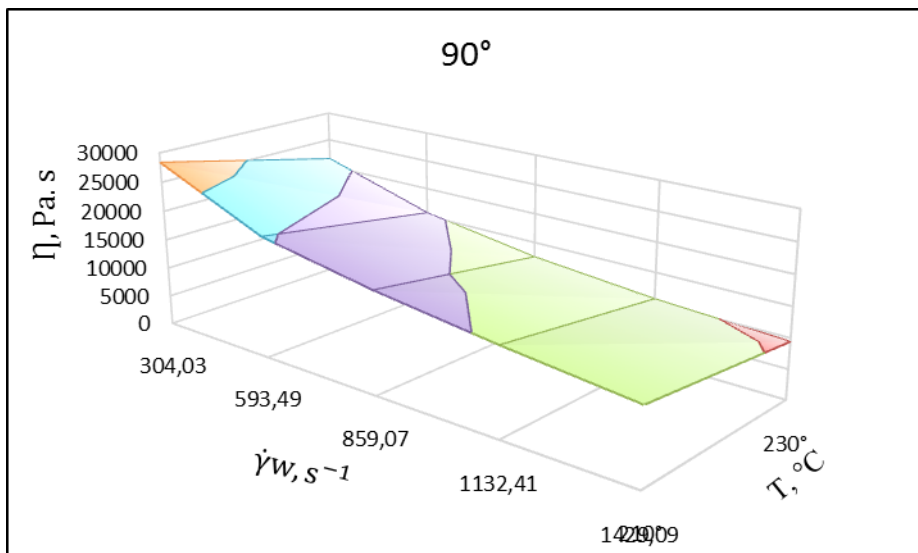
Şekil 5.8. 45°'lik kalıp için, 210° ve 230°C'de ; $L/D=10$ iken kayma hızı - viskozite grafiği



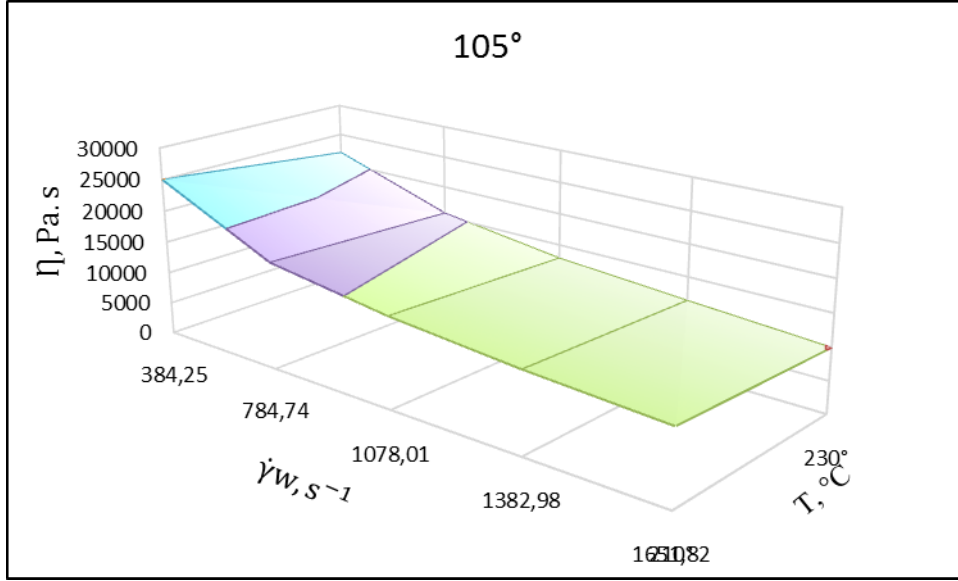
Şekil 5.9. 60°'lik kalıp için, 210° ve 230°C'de ; $L/D=10$ iken kayma hızı - viskozite grafiği



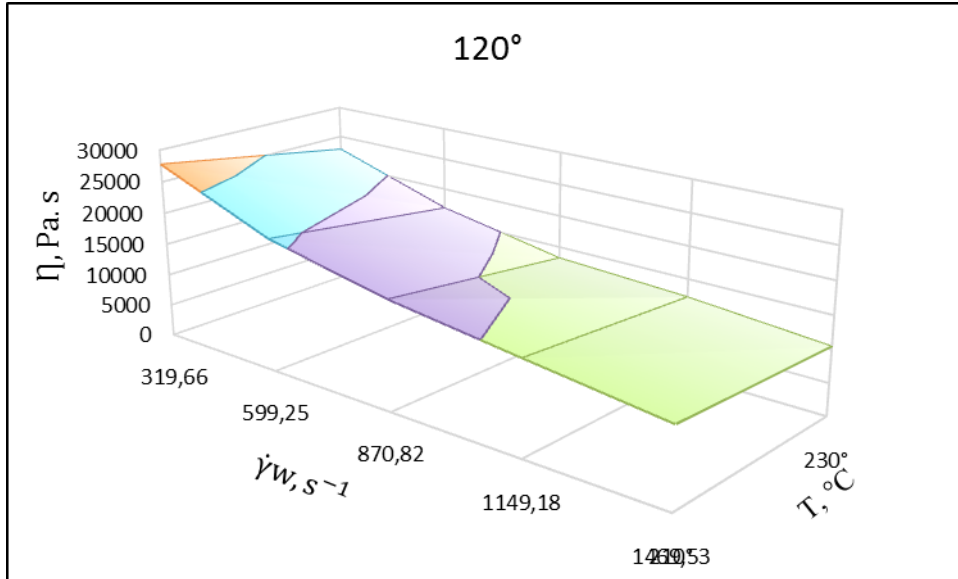
Şekil 5.10. 75°'lik kalıp için, 210° ve 230°C'de ; L/D=10 iken kayma hızı - viskozite grafiği



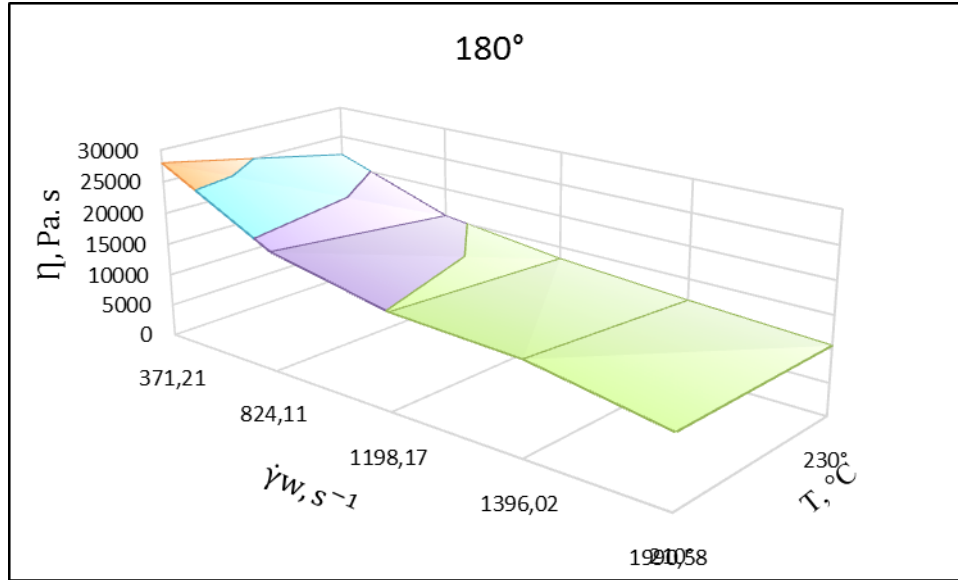
Şekil 5.11. 90°'lik kalıp için, 210° ve 230°C'de ; L/D=10 iken kayma hızı - viskozite grafiği



Şekil 5.12. 105°'lik kalıp için, 210° ve 230°C'de ; L/D=10 iken kayma hızı - viskozite grafiği



Şekil 5.13. 120°'lik kalıp için, 210° ve 230°C'de ; L/D=10 iken kayma hızı - viskozite grafiği



Şekil 5.14. Açısız kalıp için, 210° ve 230°C’de ; L/D=10 iken kayma hızı - viskozite grafiği

Sıcaklık 210 °C’den, 230 °C’ye yükseldiğinde viskozitenin düştüğü görülmüştür. Aynı sıcaklıkta kalıp giriş açısı 90 °C’lik kalıpta ve açısız kalıpta, düşük kayma hızlarında, viskozite diğer giriş açılarındaki kalıplara göre daha yüksektir. 60 °C’lik kalıpta kayma hızı 500 S^{-1} ’in altında iken 230 °C’de, viskozite diğer giriş açılarındaki kalıplara göre daha küçük değerlerde ölçülmüştür.

5.5. Kalıp Giriş Açısının Power Law İndeksine Etkisi

Deneyler sonucunda elde edilen sonuçlar ile hesaplamalar yapıldığında her kalıp için Power Law indeksi değişmiştir. Çizelge 5.1’de bu değişime ait veriler listelenmiştir.

Çizelge 5.1. Power Law indeksi değerleri

Eriyik Sıcaklığı (°C)	Açı (°)	n
210	45	0,4023
	60	0,3691
	75	0,422
	90	0,4698
	105	0,4519
	120	0,4485
	180	0,4422
230	45	0,4995
	60	0,3809
	75	0,5326
	90	0,4559
	105	0,4844
	120	0,4846
	180	0,5684

6. SONUÇLAR VE TARTIŞMA

L/D oranları aynı olan kalıpların aynı akış hızlarında sıcaklığın yükselmesiyle viskoziteleri azalmıştır ve L/D oranları aynı iken, aynı sıcaklık değerinde, vida dönüş hızının artmasıyla viskozite değeri azalmıştır. Bunun sebebi vida dönüş hızıyla artan sürtünmeden kaynaklı açığa çıkan ısıdır. Aynı açıdaki kalıplarda L uzunluğu arttıkça daha yüksek kayma gerilmesi değerleri elde edilmiştir. Bunun sebebi ise eriyik malzemenin kalıp içinde yol aldığı uzunluk artışından dolayı basıncın artmasıdır. Eriyik polipropilene uygulanan basınç arttıkça moleküller arasındaki boşluklar azalmaktadır. Basıncın artması ile kayma gerilmesi, kayma gerilmesinin artmasına bağlı olarak da viskozite değerleri yükselmektedir. Polimerik malzemeler eriyik hale geçtiklerinde Newtonyen davranıştan sapmaktadırlar ve kayma incelmesi davranışı göstermektedirler. PP malzemenin de deneysel sonuçlar neticesinde Newtonyen davranıştan saptığı ve kayma incelmesi gösterdiği belirlenmiştir. 2 farklı sıcaklık değeri göz önüne alındığında kayma hızının etkisinin, sıcaklığın etkisinden fazla olduğu gözlenmiştir. Ayrıca L/D oranındaki artış kayma hızında da farklılıklara neden olmuştur.

Yapılan deneyler sonucunda kayma hızı değerleri $319-1934\ S^{-1}$ aralığında elde edilmiştir. En düşük kayma hızı kalıp açısı 75° , L/D oranı 10 olan kalıpta elde edilmiştir. En büyük kayma hızı kalıp açısı 75° , L/D oranı 20 olan kalıpta elde edilmiştir. L/D oranı büyüdükçe kayma gerilmesinin arttığı sonucuna varılmıştır.

Bu tez çalışması sonucunda, yöntem uyumlu bir reometrik ölçüm düzeneği tek vidalı bir plastik ekstrüzyon makinesi kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Kurulan düzeneğin, reolojik karakterizasyonda kullanılabilir olduğu görülmüştür. Ayrıca kalıba giriş açılarının viskozite üzerine etkilerinin olduğu da görülmüştür.

KAYNAKLAR

1. Liang, J. Z. (2007). Effects of extrusion rate, temperature, and die diameter on melt flow properties during capillary flow of low-density-polyethylene, *Polymer-plastics technology and engineering*, 46(3), 245-249.
2. Zhong, L., Xu, H., Liang, J. and Liao A. (2011). Analysis of entrance converging flow of polymer melts. A comparison between Liang Model and Cogswell Model. *Advanced Materials Research Vols*, 311(313), 1110-1113.
3. Liang, J. Z. (2005). Estimation of entry natural converging angles during capillary extrusion flow of carbon black filled NR/SBR compound. *Polymer Testing*, 24, 435-438.
4. Liang, J. Z. (2002). Effects of extrusion conditions on rheological behavior of acrylonitrile–butadiene–styrene terpolymer melt. *Journal of Applied Polymer Science*, 85, 606-611.
5. Liang, J. Z. (2010). Analysis on planar entry converging flow of polymer melts. *Journal of Materials Science and Engineering with Advanced Technology*, 2(2), 217-233.
6. Liang, J. Z. and Ness, J. N. (1997). Investigation on the melt flow properties of polyethylene and polypropylene blends. *Polymer Testing*, 16, 379-389.
7. Liang, J. Z. (2002). Effects of extrusion conditions on rheological behavior of acrylonitrile–butadiene–styrene terpolymer melt. *Journal of Applied Polymer Science*, 85, 606-611.
8. Kelly, A. L., Gough, T., Whiteside, B. R. and Coates, P. D. (2009). *Journal of Applied Polymer Science*, 114, 864-873.
9. Sanetnik, D., Hausnerova, B., Filip P. and Hnatkova, E. (2018). Influence of capillary die geometry on wall slip of highly filled powder injection molding compounds, *Powder technology*, 325, 615-619.
10. Song, H. J., White, J. L., Min, K., Nakajima N. and Weissert F. C. (1998). Rheological properties, extrudate swell, and die entry extrusion flow marker experiments for rubber-carbon black compounds. *Advances in Polymer Technology*, 8(4), 431-449. 27.
11. Arman, M. A. A., Mohammad D. H. M. and Ahmed I. A. S. A. (2014). Simulation of pressure drop for combined tapered and nontapered die for polypropylene using ansys Polyflow. *Journal of Polymer and Textile Engineering*, 1(3), 22-29.
12. Liang, J. Z. (1995). Effect of the die angle on the extrusion swell of rubber compound. *Journal of Materials Processing Technology*, 52, 207-212.

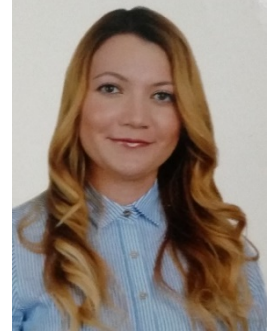
13. Liang, J. Z. (2000). *Influence of die angles on pressure drop during extrusion of rubber compound*. Department of Industrial Equipment and Control Engineering, South China University of Technology, Guangzhou 510641, People's Republic of China.
14. Liang, J. Z., Chan, J. S. F. and Wong, E. T. T. (2001). Effects of operation conditions and die angles on the pressure losses in capillary flow of polystyrene melt, *Journal of Materials Processing Technology*, 114, 118-121.
15. Han, C. D. (1973). Influence of the die entry angle on the entrance pressure drop, recoverable elastic energy, and onset of flow instability in polymer melt flow. *Journal of Applied Polymer Science*, 17, 1403-1413.
16. Rutgers, R. P. G., Mackley M. R. (2001). The effect of channel geometry and wall boundary conditions on the formation of extrusion surface instabilities for LLDPE. *Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanism*, 98, 185-199.
17. Liang, J. Z. (2007). Planar entry converging flow during extrusion of polymer melts. *Polymer-Plastics Technology and Engineering*, 46(5), 475-480.
18. Sombatsompop N., Dantongee R. (2001). Effect of die design on flow visualization and die swell of NR in a capillary rheometer. *Journal of Materials Science Letters*, 20, 1405-1408.
19. Huang, D. and White, J. L. (1980). Experimental and theoretical investigation of extrudate swell of polymer melts from small (length)/(cross-section) ratio slit and capillary dies. *Polymer Engineering and Science*, 20(3), 182-189.
20. Intawong N., Wiratket A. and Meechue P. (2014). Flow visualization and extrudate swell behavior of natural rubber compound in annular die capillary rheometer. *Polimeros*, 24(4), 434-440.
21. Koopmans, R. J. (1992). Extrudate swell of high density polyethylene. Part 3: extrusion blow molding die geometry effects. *Polyolefins R&D Dow Benelux N. V. 4530 AA Terneuzen, The Netherlands*, 32(23), 1755-1764.
22. Liang, J. Z. (2007). Die-swell behavior during the short-tube flow of rubber compounds. *Journal of Applied Polymer Science*, 104, 70-74.
23. Rejon, A. G., Dealy, J. M. (1982). Swell of extrudate from an annular die. *Polymer Engineering and Science*, 22(3), 158-165.
24. Musil, J. and Zatloukal, M. (2013). Effect of die exit geometry on internal die drool phenomenon during linear HDPE melt extrusion. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 56, 667-673.
25. Chaloupkova, K., Zatloukal, M. (2007). *Theoretical and experimental analysis of the die drool phenomenon for metallocene LLDPE*. Faculty of Technology, Polymer Centre, Tomas Bata University, Çek Cumhuriyeti.
26. Gander, J. D., Giacomini, A. J. (1997). Review of Die Lip Buildup in Plastics Extrusion. *Polymer Engineering and Science*, 37(7), 1113-1126.

27. Hogan, T. A., Walia P. and Dems, B. C. (2009). Investigation of the relationships between die build up and die swell. *Polymer Engineering and Science*, 333-343.
28. Arda, D. R. and Mackley, M. R. (2005). The effect of die exit curvature, die surface roughness and a fluoropolymer additive on sharkskin extrusion instabilities in polyethylene processing. *Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanism*, 126, 47-61.
29. Palabıyık, M. (2009). *Polimer kompozit malzemeler ile konstrüksiyon ve imalat*, İTÜ Makine Fakültesi, İstanbul.
30. Savaşçı Ö.T., Uyanık N. ve Akovalı G. (2002). *Plastikler ve Plastik Teknolojisi*, PAGEV Yayınları, 7-318.
31. İnternet: Polimerleşme. URL: <https://www.lafsozluk.com/2016/12/polimer-nedir-polimerlesme-ne-demektir.html>.
32. Crawford, R., J. (1998). *Plastics Engineering*. Third Edition. Elsevier Ltd.
33. Yaşar, H. (2001). *Plastikler Dünyası*, MMO Yayınları, Ankara, 2. Baskı, 97-389.
34. Ezdeşir A., Erbay E. , Taşkırın İ. , Yağcı M. A. , Cöbek M. , Bilgiç T. (1999). *Polimerler I*, İstanbul: PAGEV Yayınları, 17-167.
35. İnternet: Polipropilen. URL: https://www.google.com/search?rlz=1C1CHWA_trTR584TR584&biw=1600&bih=789&tbm=isch&sa=1&ei=YC9yXZ2sFY3cwALL1qDYBg&q=polipropilen&oq=polipropilen&gs_l=img.3.0110.8265.8507.8731.0.0.0.144.287.0j2.0.1.gws-wiz-img0i10i24.rcxGY08pwdA&ved=0ahUKEwid3J-b-bvkAhUNLIAKHUsrcGsQ4dUDCAY&uact=5#imgrc=516Rq9pMgwsusM:
36. ASTM D5422-09 (2009). *Standard Test Method for Measurement of Properties of Thermoplastic Materials by Screw-Extrusion Capillary Rheometer*. West Conshohocken, PA: ASTM International.
37. 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.
38. 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 Kongresi, Osmaniye.

ÖZGEÇMİŞ

Kişisel Bilgiler

Soyadı, adı : CİVELEK, Burcu
 Uyuğu : T.C.
 Doğum tarihi ve yeri : 19.12.1993, İzmir
 Medeni hali : Bekar
 Telefon : 507 142 58 53
 e-mail : burcu.civelek@windowlive.com



Eğitim

Derece	Eğitim Birimi	Mezuniyet Tarihi
Yüksek Lisans	Gazi Üniversitesi /İmalat Mühendisliği	Devam Ediyor
Lisans	Gazi Üniversitesi /İmalat Mühendisliği	2016
Lise	Ted Aliğa Koleji	2012

İş Deneyimi

Yıl	Yer	Görev
2019-2019	Pergo Medikal	Ar-Ge Mühendisi

Yabancı Dil

İngilizce

Yayınlar

1. Civelek B., Uluer O., Koş G. (2019 8-10 Mart). *Polipropilen Malzemenin Ekstrüzyonunda Kalıba Giriş Açısının Kalıp İçi Eriyik Akışına Etkisi*, EJONS 6. Uluslararası Matematik, Mühendislik, Fen ve Sağlık Bilimleri Kongresi, Adana.
2. Koş G., Uluer O., Civelek B., . (2019 8-10 Mart). *Plastik Ekstrüzyon Kalıplarında Hız Dengeleme İçin Akış Bölücülerin Kullanılabilirliği*, EJONS 6. Uluslararası Matematik, Mühendislik, Fen ve Sağlık Bilimleri Kongresi, Adana.

Hobiler

Piyano çalma, akrilik boya ile resim yapma



GAZİ GELECEKTİR..