

**KOCAELİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**KAUÇUK REOLOJİSİ ÖLÇÜMÜ İÇİN PROTOTİP TEST CİHAZI
TASARIMI VE İMALATI**

HASAN ÇAKIR

KOCAELİ – 2023

KOCAELİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

KAUÇUK REOLOJİSİ ÖLÇÜMÜ İÇİN PROTOTİP TEST CİHAZI
TASARIMI VE İMALATI

HASAN ÇAKIR

Prof.Dr. Tamer SINMAZÇELİK
Danışman, Kocaeli Üniv.

.....

Dr. Öğr. Üyesi Yasemin YILDIRAN AVCU
Jüri Üyesi, Kocaeli Üniv.

.....

Doç.Dr. Ekren ALTUNCU

Jüri Üyesi, Sakarya Uygulamalı Bilimler Üniv.

Tezin Savunulduğu Tarih: 19.06.2023

ETİK BEYAN VE ARAŞTIRMA FONU DESTEĞİ

Kocaeli Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü tez yazım kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez/proje çalışmada,

- Bu tezin/projenin bana ait, özgün bir çalışma olduğunu,
- Çalışmamın hazırlık, veri toplama, analiz ve bilgilerin sunumu olmak üzere tüm aşamalarında bilimsel etik ilke ve kurallara uygun davrandığımı,
- Bu çalışma kapsamında elde edilen tüm veri ve bilgiler için kaynak gösterdiğim ve bu kaynaklara kaynakçada yer verdiğimi,
- Bu çalışmanın Kocaeli Üniversitesi'nin abone olduğu intihal yazılım programı kullanılarak Fen Bilimleri Enstitüsü'nün belirlemiş olduğu ölçütlere uygun olduğunu,
- Kullanılan verilerde herhangi bir tahrifat yapmadığımı,
- Tezin/Projenin herhangi bir bölümünü bu üniversite veya başka bir üniversitede başka bir tez/proje çalışması olarak sunmadığımı,

beyan ederim.

☐ Bu tez/proje çalışmasının herhangi bir aşaması hiçbir kurum/kuruluş tarafından maddi/alt yapı desteği ile desteklenmemiştir.

☒ Bu tez/proje çalışması kapsamında üretilen veri ve bilgiler Tekno Kauçuk Sanayii AŞ'den maddi/alt yapı desteği alınarak gerçekleştirilmiştir.

Herhangi bir zamanda, çalışmamla ilgili yaptığım bu beyana aykırı bir durumun saptanması durumunda, ortaya çıkacak tüm ahlaki ve hukuki sonuçları kabul ettiğimi bildiririm.

Hasan ÇAKIR

YAYIMLAMA VE FİKRİ MÜLKİYET HAKLARI

Fen Bilimleri Enstitüsü tarafından onaylanan lisansüstü tezimin/projemin tamamını veya herhangi bir kısmını, basılı ve elektronik formatta arşivleme ve aşağıda belirtilen koşullarla kullanıma açma izninin Kocaeli Üniversitesi'ne verdiğimi beyan ederim. Bu izinle Üniversiteye verilen kullanım hakları dışındaki tüm fikri mülkiyet hakları bende kalacak, tezimin/projemin tamamının ya da bir bölümünün gelecekteki makale, kitap, tebliğ, lisans, patent gibi çalışmalarda kullanımı, danışmanımın isim hakkı saklı kalmak koşuluyla ve her iki tarafın bilgisi dâhilinde bana ait olacaktır.

Tezin/projenin kendi özgün çalışmam olduğunu, başkalarının haklarını ihlal etmediğimi ve tezimin/projenin tek yetkili sahibi olduğumu beyan ve taahhüt ederim. Tezimde yer alan telif hakkı bulunan ve sahiplerinden yazılı izin alınarak kullanılması zorunlu metinlerin yazılı izin alarak kullandığımı ve istenildiğinde suretlerini Üniversiteye teslim etmeyi taahhüt ederim.

Yükseköğretim kurulu tarafından yayınlanan ***“Lisansüstü Tezlerin Elektronik Ortamda Toplanması, Düzenlenmesi ve Erişime Açılmasına İlişkin Yönerge”*** kapsamında tezim aşağıda belirtilen koşullar haricinde YÖK Ulusal Tez Merkezi/ Kocaeli Üniversitesi Kütüphaneleri Açık Erişim Sisteminde erişime açılır.

- ☐ Enstitü yönetim kurulu kararı ile tezimin/projemin erişime açılması mezuniyet tarihinden itibaren 2 yıl ertelenmiştir.
- ☐ Enstitü yönetim kurulu gerekçeli kararı ile tezimin/projemin erişime açılması mezuniyet tarihinden itibaren 6 ay ertelenmiştir.
- ☒ Tezim/projem ile ilgili gizlilik kararı verilmemiştir.

Hasan ÇAKIR

ÖNSÖZ VE TEŞEKKÜR

Bu tez çalışması, reolojik karakterizasyon test cihazlarının geliştirilmesi ve elde edilen sonuçların Cadmould programında analiz edilmesi üzerine odaklanmaktadır. Reolojik testler, malzemelerin akış ve deformasyon özelliklerini incelemek için kullanılırken, Cadmould gibi bilgisayar destekli mühendislik yazılımları, enjeksiyon kalıplama ve benzeri işleme süreçlerinin analizinde ve optimizasyonunda kullanılır. Bu çalışma, bu iki yöntemin entegrasyonunu ve işleme süreçlerine uygulanmasını incelemektedir.

Bu çalışmamın gerçekleştirilmesi için gerekli malzeme, altyapı ve bilgi birikimleriyle verdikleri desteklerden dolayı Dr. Yavuz DOĞAN ve Tekno Kauçuk firmasına teşekkür ederim. Yapmış olduğum çalışmalarda beni destekleyen Asil.A. AKSEKİLİ'ye teşekkür ederim.

Yüksek lisans tez çalışmam sırasında bilgi birikimi ve tecrübesiyle bana yol gösteren, değerli danışman hocam Prof. Dr. Tamer SINMAZÇELİK'e sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Hayatımın her döneminde bana destek olan annem Maviye ÇAKIR ve babam Nazmi ÇAKIR ve eşim Ebru ÇAKIR'a desteklerinden dolayı teşekkür ederim.

Mayıs-2023

Hasan ÇAKIR

İÇİNDEKİLER

ETİK BEYAN VE ARAŞTIRMA FONU DESTEĞİ	i
YAYIMLAMA VE FİKRİ MÜLKİYET HAKLARI	ii
ÖNSÖZ VE TEŞEKKÜR.....	iii
İÇİNDEKİLER.....	iv
ŞEKİLLER DİZİNİ	vi
TABLOLAR DİZİNİ.....	viii
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ	ix
ÖZET	xi
ABSTRACT	xii
1. GİRİŞ.....	1
2. TEORİK BİLGİLER	3
2.1. Polimer Kavramı	3
2.2. Elastomer Kavramı	3
2.3. Kauçuk Kavramı.....	4
2.3.1. Doğal Kauçuk (Nr)	5
2.3.2. Etilen Propilen Dien Monomer (EPDM).....	7
2.3.3. Aktilonitril Bütadien Kauçuk (NBR)	7
2.3.4. Polibütadien Kauçuk (BR).....	8
2.4. Vulkanizasyon	9
2.4.1. Vulkanizasyon Eğrisi.....	10
2.5. Newtonian Akışkanlar	13
2.6. Newtonian Olmayan Akışkanlar	14
2.7. Reoloji.....	15
2.7.1. Reolojik Karakterizasyon Ölçüm Aletleri	18
2.7.2. Reoloji Etki Faktörleri	20
2.8. Reoloji Çalışmaları	24
2.8.1. Ekstrüzyon Basıncı Kesme Hızı Bağımlılığı.....	24
2.8.2. Kalıp Geometrisine Bağlı Akış Eğrileri	26
2.8.3. Sıcaklığın Akış Eğrileri İlişkisi	27
2.8.4. Viskozite Model Doğrulama.....	29
2.9. Kayma Reolojisi	30
2.9.1. Dinamik Kayma Reolojisi	33
2.10. Reoloji Modelleri.....	35
2.10.1. Cross Modeli	35
2.10.2. Maxwell Modeli	36
2.11. Viskoz Akış Modelleri.....	37
2.11.1. Power Law	38
2.11.2. Carreau Viskozite Modeli.....	39
2.11.3. Modified Carreau Modeli	40
2.11.4. Arrhenius Denklemi.....	41
2.11.5. Williams, Ferry ve Landel Denklemi	42
2.12. Model Doğrulama.....	44
2.12.1. Bagley Düzeltmesi Kullanımı	44
2.12.2. Rabinowitsch Düzeltmesinin	47
3. MALZEME VE YÖNTEM	50
3.1. Reolojik Karakterizasyon Cihazı Tasarımı Geliştirilmesi	50

3.1.1. Nozul Tasarımı	55
3.1.2. Vida Tasarımı	57
3.1.3. Silindir Tasarımı	59
3.1.4. Servo Motor Kullanımı.....	61
3.2. Sensör Kullanımı	62
3.2.1. Basınç Sensör Kullanımı	62
3.2.2. Sıcaklık Sensör Kullanımı	65
3.3. Usb Veri Toplama Cihazı Kullanımı	68
3.4. Bilgisayar Destekli Mühendislik Yöntemiyle Analiz.....	72
3.4.1. Cadmould Kullanımı	73
4. ARAŞTIRMA BULGULAR VE TARTIŞMA	76
4.1. Doğrulama Deney Seti Tasarımı	76
4.2. Model Doğrulama.....	81
4.3. Reolojik Karakterizasyon Test Sonuçları	87
4.4. Cadmould Test Sonuçları	91
4.5. Analiz Sonuçları Karşılaştırma	94
5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER	97
KAYNAKLAR.....	98
KİŞİSEL YAYIN VE ESERLER.....	104
ÖZGEÇMİŞ.....	105

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 2.1.	Polimer molekülü	3
Şekil 2.2.	Elastomer eğrisi.....	4
Şekil 2.3.	Kauçuk parçalar.....	5
Şekil 2.4.	Heavea Brasiliensis ağacındaki lateks.....	6
Şekil 2.5.	Doğal kauçuk kimyasal yapısı	6
Şekil 2.6.	EPDM kauçuk kimyasal yapısı	7
Şekil 2.7.	NBR kauçuk kimyasal yapısı	7
Şekil 2.8.	BR kauçuk kimyasal yapısı	8
Şekil 2.9.	Vulkanizasyon bağ yapısı.....	9
Şekil 2.10.	Osilasyonlu reometri ölçüm cihazı.....	10
Şekil 2.11.	Hareketli kalıp reometri ölçüm cihazı	11
Şekil 2.12.	Vulkanizasyon eğrisi	11
Şekil 2.13.	Vulkanizasyon bölümleri	12
Şekil 2.14.	Kayma-Hız gerilimi.....	14
Şekil 2.15.	Gerilme bileşenleri	16
Şekil 2.16.	Paralel iki plaka arası basit kayma defarmasyonu gösterimi	16
Şekil 2.17.	Osilasyonlu reoloji test cihazı çalışma şeması	18
Şekil 2.18.	Kapiler reometri reoloji test cihazı.....	19
Şekil 2.19.	Van der Waals bağ yapısı.....	23
Şekil 2.20.	Viskozimetre tüpü	37
Şekil 2.21.	Rotovisko cihaz	38
Şekil 2.22.	Carreau model eğrisi	39
Şekil 2.23.	Kapiler akış şema	44
Şekil 2.24.	Bagley düzeltme faktörü	45
Şekil 3.1.	Geliştirilmiş reoloji karakterizasyon cihazı kontrol diyagramı	50
Şekil 3.2.	Geliştirilmiş kapiler reometri test cihazı arka görünüş	52
Şekil 3.3.	Kapiler reometri şema	53
Şekil 3.4.	Geliştirilmiş reolojik karakterizasyon test cihazı görsel	54
Şekil 3.5.	Geliştirilmiş reolojik karakterizasyon test cihazı nozul çıkışı.....	55
Şekil 3.6.	Geliştirilmiş reolojik karakterizasyon test cihazı nozul	56
Şekil 3.7.	Geliştirilmiş reolojik karakterizasyon test cihazı tahrik mekanizması	61
Şekil 3.8.	Basınç çözünürlük	63
Şekil 3.9.	Piezoelektrik basınç sensör yapısı.....	64
Şekil 3.10.	Sensör görsel	67
Şekil 3.11.	Sensör ölçü	68
Şekil 3.12.	Veri toplama cihazı	68
Şekil 3.13.	Veri toplama ekranı arayüzü	71
Şekil 3.14.	Veri toplama ekranı	71
Şekil 3.15.	Veri toplama cihazı ve sensör görsel.....	72
Şekil 3.16.	CADMould arayüz	74
Şekil 4.1.	Salyangoz kalıp görsel.....	76
Şekil 4.2.	Salyangoz kalıp numune görseli.....	77
Şekil 4.3.	Salyangoz kalıp numune yüzey görseli.....	77
Şekil 4.4.	Nr kauçuk 140 °C ve 190 bar dolum analiz sonucu	83
Şekil 4.5.	Nr kauçuk 150 °C ve 190 bar dolum analiz sonucu	83

Şekil 4.6.	Nr kauçuk 160 °C ve 190 bar dolum analiz sonucu	83
Şekil 4.7.	Toplanan Tork Değer	88
Şekil 4.8.	Bagley ve -Rabinowitsch düzeltmelerinin Sonucu	89
Şekil 4.9.	Malzeme kütüphanesi	91
Şekil 4.10.	Reaktif viskozite model	92
Şekil 4.11.	Analiz parametreleri ekranı	92
Şekil 4.12.	Cadmould mesh boyut	92
Şekil 4.13.	CADMould dolum süresi	93
Şekil 4.14.	Cadmould analiz süre	93
Şekil 4.15.	CADMould sıcaklık analiz sonucu	94
Şekil 4.16.	CADMould maksimum sıcaklık analiz sonucu	94
Şekil 4.17.	Boru askı lastiği izometrik görünüş	95
Şekil 4.18.	Boru askı lastiği önden görünüş	96
Şekil 4.19.	Boru askı lastiği yandan görünüş	96



TABLolar DİZİNİ

Tablo 3.1.	Vida kalite faktörü.....	58
Tablo 3.2.	Basınç sensörü ölçüm özellikleri	65
Tablo 3.3.	Basınç sensör amplifikatörü özellikleri.....	65
Tablo 3.4.	Sensör sıcaklık aralığı özellikleri	66
Tablo 3.5.	Sensör doğruluk	66
Tablo 3.6.	Analog çıkış özellikleri	69
Tablo 3.7.	Analog giriş özellikleri.....	70
Tablo 4.1.	NR 12480 karışımı 180 bar deney dolum tablosu.....	78
Tablo 4.2.	NR 12480 karışımı 180 bar deney dolum tablosu.....	78
Tablo 4.3.	NR 12480 karışımı 190 bar deney dolum tablosu.....	78
Tablo 4.4.	EPDM 24155 karışımı 170 bar deney dolum tablosu	78
Tablo 4.5.	EPDM 24155 karışımı 180 bar deney dolum tablosu	79
Tablo 4.6.	EPDM 24155 karışımı 190 bar deney dolum tablosu	79
Tablo 4.7.	NBR 15270 karışımı 170 bar deney dolum tablosu	79
Tablo 4.8.	NBR 15270 karışımı 180 bar deney dolum tablosu	80
Tablo 4.9.	NBR 15270 karışımı 190 bar deney dolum tablosu	80
Tablo 4.10.	BR 34150 karışımı 170 bar deney dolum tablosu.....	80
Tablo 4.11.	BR 34150 karışımı 180 bar deney dolum tablosu.....	81
Tablo 4.12.	BR 34150 karışımı 190 bar deney dolum tablosu.....	81
Tablo 4.13.	NR 12480 karışımı 170 bar CAE analiz deney karşılaştırma	83
Tablo 4.14.	NR 12480 karışımı 180 bar CAE analiz deney karşılaştırma	84
Tablo 4.15.	NR 12480 karışımı 190 bar CAE analiz deney karşılaştırma	84
Tablo 4.16.	EPDM 24155 karışımı 170 bar CAE analiz deney karşılaştırma.....	84
Tablo 4.17.	EPDM 24155 karışımı 180 bar CAE analiz deney karşılaştırma.....	84
Tablo 4.18.	EPDM 24155 karışımı 190 bar CAE analiz deney karşılaştırma.....	85
Tablo 4.19.	NBR 15270 karışımı 170 bar CAE analiz deney karşılaştırma.....	85
Tablo 4.20.	NBR 15270 karışımı 180 bar CAE analiz deney karşılaştırma.....	86
Tablo 4.21.	NBR 15270 karışımı 190 bar CAE analiz deney karşılaştırma.....	86
Tablo 4.22.	BR 34150 karışımı 170 bar CAE analiz deney karşılaştırma	86
Tablo 4.23.	BR 34150 karışımı 180 bar CAE analiz deney karşılaştırma	87
Tablo 4.24.	BR 34150 karışımı 190 bar CAE analiz deney karşılaştırma	87
Tablo 4.25.	Karışım özellik	88
Tablo 4.26.	Kamal- Sourour model sabiti	89
Tablo 4.27.	Toplanan veri sonucu kayma oranı ve viskozite değeri	90
Tablo 4.28.	Simülasyon ve deneysel sonuçlar.....	95

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

C_1	: Analiz dolum oranı
D_1	: Salyangoz kalıp dolum oranı
E_a	: Viskon akışkan aktivasyon enerjisi
G'	: Enerji depolama modülü
G''	: Viskoz kayıp modülü
M_{100}	: Kalıp toplam çentik sayısı
M_n	: Kalıp dolum çentik sayısı
T_g	: Camsı geçiş sıcaklığı
γ_0	: Kayma defarmasyon genliği
η_0	: Çok düşük kayma hızı
η_∞	: Çok yüksek kayma hızı
η_c	: Düzeltilmiş viskozite değeri
σ_{ij}	: Gerilme tensörü
τ_0	: Sıfır kayma viskozitesi
$^{\circ}\text{C}$	: Derece
CD	: Kapasitif direnç
E	: Elastik modül
m/s	: Metre/saniye
mm	: Milimetre
ms	: Milisaniye
Q	: Debi
R	: Evrensel gaz sabiti
SY	: Sapma yüzdesi
T	: Mutlak sıcaklık
B	: Sıcaklık bağımlılık parametresi
$\varepsilon(t)$	: Defarmasyon
λ	: Faz kayması
$\sigma(t)$	: Gerilme
Ψ	: Akış profili sınır tabaka kalınlığı
K	: Kelvin
W	: Elastik enerji
t	: Zaman
γ	: Kayma defarmasyonu
δx_2	: Malzeme eleman yüksekliği
η	: Viskozite
λ	: Faz açısı
μ	: Dinamik viskozite
μ	: Dinamik viskozite
π	: Pi sayısı
τ	: Kayma gerilimi
ω	: Açısal hız
UV	: Ultraviyole
V	: Volt
V/ μs	: Volt/ Nanosaniye
μs	: Nanosaniye

Kısaltmalar

ADC	: Analog to Digital Converter (Analog-Dijital Dönüştürücü)
ASTM	: American Society for Testing Materials (Uluslararası Amerikan Test ve Materyalleri Topluluğu)
BR	: Polybutadiene Rubber (Polibütadien Kauçuk)
BT	: Bagley-Torvik
CAE	: Computer Aided Engineering (Bilgisayar Destekli Mühendislik)
cP	: Centipoise
CR	: Chloroprene Rubber (Kloropren Kauçuk)
cSt	: Centistokes
dB	: Desibel
EPDM	: Ethylene Propylene Diene Monomer (Etilen propilen dien monomer)
MDR	: Moving Die Rheometer (Hareketli kalıp reometresidir)
mV	: Milivolt
N/A	: Not Available (Uygulanabilir değil)
NBR	: Akrilonitril bütadien kauçuk
NR	: Natural Rubber (Doğal kauçuk)
ODR	: Oscillation Disc Rheometer (Salınımlı disk reometresi)
P	: Poise
Pa.s	: Pascal Saniye
PLC	: Programmable Logic Controller (Programlanabilir mantık denetleyici)
SBR	: Styrene butadiene rubber (Stiren bütadien kauçuk)
USB	: Universal Serial bus (Evrensel seri veri)
DAQ	: Data Acquisition (Veri toplama)

KAUÇUK REOLOJİSİ ÖLÇÜMÜ İÇİN PROTOTİP TEST CİHAZ TASARIMI VE İMALATI

ÖZET

Geleneksel kauçuk endüstrisinde sıkıştırma kalıpları kullanılmaktadır. Ancak bu üretim tekniği zaman alıcı ve hassas olmayan bir üretim türüdür. Bundan dolayı enjeksiyon kalıplama prosesi geliştirilmiş ve yüksek nitelikli ürünler üretilebilir hale gelmiştir. Enjeksiyon kalıplama daha iyi vulkanizasyon süresi, daha az çapak miktarı ve ürünlerde daha tutarlı mekanik özellikler konusunda avantaj sağlamaktadır. Tasarlanan reolojik karakterizasyon test cihazı ile yapılan reolojik karakterizasyon ölçümünde bir potta eriyik haline getirilen malzemeye bir silindir yardımıyla kuvvet uygulanır ve malzeme uzunluğu ve çapı belli olan nozuldan geçirilir. Bu ölçümler sonucunda malzemenin akma eğrileri belirlenir ve elde edilen malzeme akma eğrileri ile sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak bilgisayar ortamında analiz yapılır. Reolojik testten alınan veriler ile bilgisayar ortamında analiz yapılarak proje henüz prototip fazındayken proses parametrelerini ve yeni ürünlerin yarı mamülden mamüle geçiş sürecinde kullanılacak karışımın doğrulanması amaçlanmaktadır. Bilgisayar ortamında yapılan simülasyon, kauçuk enjeksiyon kalıplama tasarım ve prosesini kolaylaştırmaktadır. Simülasyon çıktılarına göre pahalı kalıplar işlenmeden önce bilgi sahibi olunur. Sonuç olarak deneme yanılma sürelerini ve enjeksiyon kalıp revizyon maliyetleri azaltmaktadır. Aynı zamanda tasarımı yapılacak olan reolojik karakterizasyon test presinden karışıma ait özellikler elde edilecektir. Bu özelliklerin belirlenmesinde basınç ve sıcaklık değişimleri etkili olacaktır. Reolojik karakterizasyon test pres çıktıları ile simülasyon sonuçları karşılaştırılacaktır. Bu karşılaştırmalara göre kauçuk karışım özellikleri korele edilecektir. Sonuç olarak NR ve NBR karışımlarının reolojik testi, model oluşturulması ve bu model doğrultusunda oluşturulan malzeme kütüphanesi analiz sonuçları %5 dolum yüzdesi sapmasının altında kalarak başarıyla sonuçlanmıştır.

Anahtar Kelimeler: Bagley, Kapiler, Kauçuk, Reoloji, Viskosite.

DESIGNING AND MANUFACTURING OF PROTOTYPE TEST UNIT FOR MEASURING OF RUBBER RHEOLOGY

ABSTRACT

In the traditional rubber industry, compression molds are used. However, this production technique is time-consuming and not precise. Therefore, the injection molding process has been developed, enabling the production of high-quality products. Injection molding provides advantages such as better vulcanization time, less flash, and more consistent mechanical properties. In the rheological characterization test conducted with the designed test device, a force is applied to the material, which is in a molten state in a pot, with the help of a cylinder, and the material is passed through a nozzle with a known length and diameter. Flow curves of the material are determined based on these measurements, and computer-based analysis is carried out using the obtained flow curves and finite element method. The aim is to verify the process parameters and the mixture to be used in the transition from semi-finished to finished products during the prototyping phase of the project by analyzing the data obtained from the rheological test in a computer environment. The simulations performed in the computer environment facilitate the design and process of rubber injection molding. Valuable insights are gained before expensive molds are processed. As a result, it reduces trial and error periods and injection mold revision costs. At the same time, the characteristics of the mixture will be obtained from the rheological characterization test press, which will be designed. Pressure and temperature changes will affect the determination of these characteristics. The outputs of the rheological characterization test press will be compared with the simulation results. Based on these comparisons, the rubber mixture properties will be correlated. In conclusion, the rheological testing, model creation, and material library generated based on NR and NBR mixtures have been successfully concluded with analysis results having a deviation of less than 5% in filling percentage.

Keywords: Bagley, Capillary, Rheology, Rubber, Viscosity.

1. GİRİŞ

Reoloji, malzemelerin akış ve deformasyon davranışlarıyla ilgilidir. Reolojik özellikler, malzemelerin süneklik, viskozite ve elastikiyet gibi özellikleriyle ilgilidir. Bu özellikler, malzemelerin işlenmesi, depolanması ve kullanılması sırasında önemli rol oynar. Reoloji, polimerler, gıdalar, kozmetikler ve ilaçlar gibi çeşitli endüstrilerde uygulanabilir ve bu endüstrilerin her birinde önemli bir araştırma alanıdır.

Reolojik karakterizasyon, malzemelerin akışkanlık, viskozite ve elastikiyet gibi özelliklerinin ölçülmesi ve analiz edilmesi sürecidir. Bu özellikler, ürünlerin işlenmesi sırasında önemli rol oynar. Reolojik özellikler, ürünlerin süreçlerindeki enerji gereksinimlerini, ekipman seçimini ve süreç optimizasyonunu etkiler.

Reolojik test sonuçları ve Cadmould kalıp analiz verileri, polimerlerin ve diğer malzemelerin enjeksiyon kalıplama ve benzeri işleme süreçlerinde kullanılabilir. Bu veriler, süreç optimizasyonu ve kalıp tasarımı açısından değerlidir.

Reolojik test sonuçları, polimerlerin ve diğer malzemelerin akış davranışlarını ve viskozite-gerilme ilişkilerini belirlemeye yardımcı olur. Bu bilgiler, malzemenin işlenebilirliği ve enjeksiyon kalıplama süreçlerindeki performansı hakkında önemli ipuçları sağlar.

Reolojik veriler işleme sürecine uygun malzemelerin belirlenmesine, enjeksiyon basıncı, sıcaklık ve hız gibi süreç parametrelerinin ayarlanmasına rehberlik edebilir. Akış kanalları, nozul boyutları ve soğutma sistemleri gibi kalıp tasarımı özelliklerinin optimizasyonuna katkıda bulunabilir.

Cadmould, bilgisayar destekli mühendislik (CAE) yazılımıdır ve enjeksiyon kalıplama süreçlerinin analizi ve optimizasyonu için kullanılır. Cadmould kalıp analiz verileri malzemenin kalıp içindeki akışını ve dağılımını simüle eder ve böylece doldurma sürecinin optimizasyonunu sağlar. Kalıp içindeki sıcaklık dağılımını ve soğuma sürecini analiz eder, böylece çevrim sürelerinin kısaltılması ve ürün kalitesinin iyileştirilmesi sağlanır. Kalıp içindeki gerilme ve çözünme durumlarını değerlendirir ve böylece ürünün mekanik özelliklerini ve boyutsal stabilitesini optimize etmeye yardımcı olur.

Reolojik test sonuçları ve Cadmould kalıp analiz verileri, enjeksiyon kalıplama ve diğer işleme süreçlerinde kullanılarak, malzeme seçimi, süreç optimizasyonu ve kalıp tasarımı açısından değerli bilgiler sağlar. Bu entegrasyon üretim verimliliğini artırmaya, ürün kalitesini iyileştirmeye ve maliyetleri düşürmeye yardımcı olabilir.

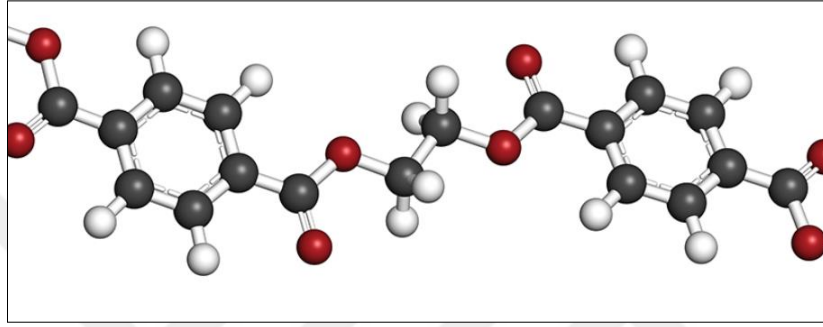
Reolojik test sonuçları ve Cadmould entegrasyon süreci, reolojik testler ve diğer malzeme karakterizasyon yöntemleri kullanılarak malzemelerin özellikleri belirlenmelidir. Cadmould gibi CAE yazılımları kullanılarak işleme süreçleri modellenmeli ve süreç parametreleri optimize edilmelidir. Reolojik test sonuçları ve Cadmould analiz verileri dikkate alınarak, kalıp tasarımı özellikleri belirlenmeli ve optimizasyon süreci gerçekleştirilmelidir. Geliştirilen kalıp ve işleme süreçleri, gerçek dünya koşullarında test edilmeli ve gerekli durumlarda iyileştirmeler yapılmalıdır. Bu sayede, üretim süreçlerinin verimliliği ve ürün kalitesi sürekli olarak artırılabilir.

Yüksek lisans tez çalışmasının ilk bölümünde reolojik karakterizasyon alanında literatür araştırması yapılmış ve bilgiler verilmiştir. Bu bölümden sonra tez çalışması kapsamında geliştirilmiş reolojik test cihazı geliştirme süreçleri ve bilgisayar destekli mühendislik analiz yöntemi hakkında bilgiler verilmiştir. Bu bölümden sonra NR, NBR, BR ve EPDM kauçuklar için deney setleri tasarımı yapılmıştır. Deney setleri sonuçları ile bilgisayar destekli mühendislik analiz paket programında malzeme kütüphanesi oluşturulmuştur. Oluşturulan malzeme kütüphanesinin deney setlerinin doğrulaması yapılmıştır. Son bölümde endüstriyel uygulama yapılmış ve oluşturulan malzeme kütüphanesi kullanım alanları hakkında bilgiler verilmiştir.

2. TEORİK BİLGİLER

2.1. Polimer Kavramı

Polimer çok sayıda küçük molekülün kovalent bağlarla birbirine bağlanarak oluşturduğu makromoleküldür. Monomer adı verilen küçük moleküller uygun koşullarda polimerizasyon tepkimesi sonucu birbirleri ile kimyasal bağ yaparlar ve polimer moleküllerine dönüşürler. Şekil 2.1’de polimer molekülü bağ yapısı gösterilmektedir.



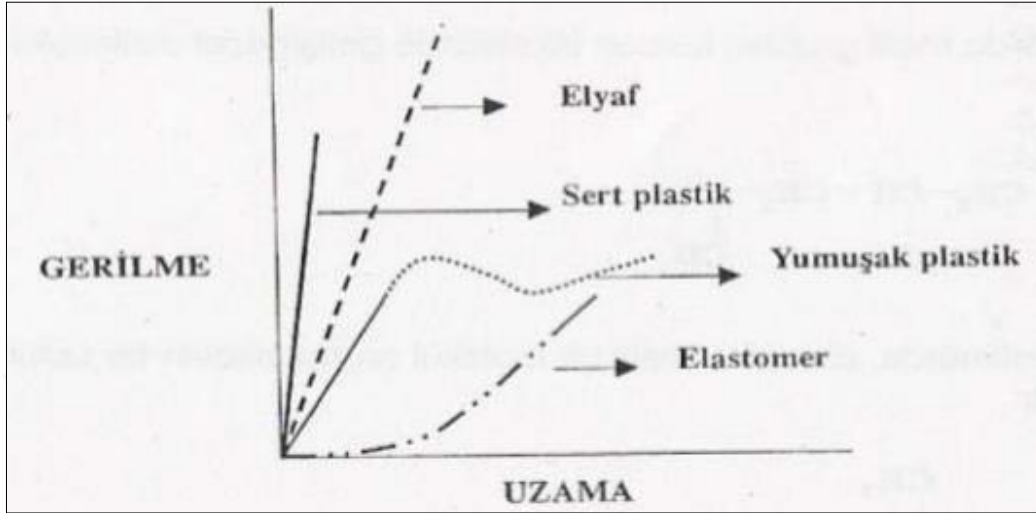
Şekil 2.1. Polimer molekülü (URL-1)

Polimerleri diğer klasik kimyasal maddelerden ayıran en önemli özellik, moleküllerinin büyüklüğüdür. Bu nedenle polimer kelimesi bütün yüksek molekül ağırlıklı maddeleri kapsar. Polimerlerin üstün özelliklerine makromoleküler yapılarının katkısı büyüktür (Saçak, 1998).

2.2. Elastomer Kavramı

Oda sıcaklığında kuvvet etkisi ile boyu en az iki katı uzayabilen ve kuvvetler kaldırıldığında orjinal haline dönen polimer malzemelere elastomer denir. Bu yetenekleri polimer zincirleri arasındaki az orandaki çapraz bağlardan kaynaklanır. Çekme etkisinden polimer zincirleri birbiri üzerinden kayar. Ancak çapraz bağlar kalıcı akışı önler ve kuvvetin kaldırılmasıyla moleküler ilk pozisyonlarına dönerler. Elastomerler çapraz bağlı yapıya sahip olup uzun zincirli yapıdadırlar. Çapraz bağların oluşumundan sonra elastomerlerin erimesi söz konusu değildir. Polimer maddelerin en önemli yanı, bu maddelerin doğal ürünler yerine materyal olarak kullanılmasına olanak sağlayan mekanik özelliklerdir. Plastik, kauçuk ve elyaflar o malzemenin gerilme uzama eğrisine bakarak sınıflandırılırlar. Bu amaçla, bir doğrultuda gelen kuvvet ile polimer örneğinin kopma uzaması sırasındaki davranışı gözlenir.

Gerilme polimer örneğinin birim alanına uygulanan kuvveti; gevşeme ise, uzamasını belirtir (Sommer, 2014). Şekil 2.2’de elastomerin gerilme ve uzama grafiği gösterilmektedir.



Şekil 2.2. Elastomer eğrisi (Savran, 2001)

Elastomer polimerlerin seyrek çapraz bağlanması ile oluşan veya ağ yapısı halidir. Elastomer hal için polimerin; yüksek molekül ağırlığına, düşük zincirler arası çekim kuvvetine, amorf yapıya ve çapraz bağlanabilme özelliğine sahip olması gerekir. Polimerlerin elastik davranışlarda bulunması için camsı geçiş sıcaklığının düşük ve tümü ile amorf olması gerekir. Polimer zincirlerinin çeşitli hareketleri kolayca yapabilmesi ve moleküller arası çekim kuvvetlerinin küçük olması zorunludur. Çapraz bağlar esnekliğin tersinir olmasını sağlar. Gerilme ile zincirler, uygulanan kuvvet doğrultusuna yönelir ve bir miktar kristallenirler. Böylece uzamaya karşı artan bir direnç oluşur (Osswald ve diğ., 2008).

2.3. Kauçuk Kavramı

1770’de Joseph Priestley kauçuk numunelerini ilk kez İngiltere’ye getirmiştir. John Boyd Dunlop tarafından ilk havalı bisiklet lastiği de 1888 yılında üretilmiştir. 1903’de Paris’de ilk kauçuk fabrikası kurulmuştur. 1909’da Almanya’da Bayer laboratuvarlarında F. Holman tarafından da ilk sentetik kauçuk üretilerek dünyada ilk patenti alınmıştır.

1912 de Almanya’da %100 sentetik kauçuktan ilk otomobil lastiği üretilmiştir. 1929 da Hermann Staudinger Bütadienden SBR ve NBR kauçuklarını elde etmiş (Sommer, 2014).



Şekil 2.3. Kauçuk parçalar (URL-2)

Şekil 2.3’de örnek kauçuk parçalar gösterilmiştir. Kauçuklar çapraz bağlanmamış, ama çapraz bağlanabilme özelliğine sahip yani vulkanize olabilen polimerlerdir. Yüksek sıcaklıkta ve deforme edici kuvvetlerin etkisi altında akışkan özelliği gösterirler ve uygun şartlar altında şekillendirilebilirler. Çapraz bağlanabilme özelliği vulkanizasyonla açıklanabilir. Vulkanizasyon, kauçuğun kimyasal yapı değişikliğine uğrayarak yani çapraz bağlanma reaksiyonu göstererek geri dönüşümsüz olarak elastik özelliklere sahip duruma gelme işlemidir (Graf, 2016).

2.3.1. Doğal Kauçuk (Nr)

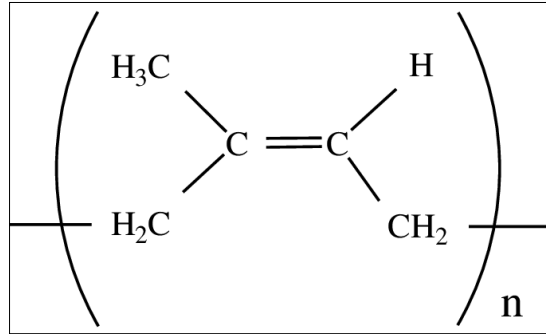
Doğal kauçuk, esas olarak kauçuk ağacı sütünden elde edilir. Kauçuk ağacının gövdesindeki kabuk kısmı, ağaçtan özel bir şekilde kesilir ve kauçuk sütü özel bir kabın içine toplanır. Kauçuk sütü, ağırlıklı olarak kauçuk ve su karışımından oluşur. Kauçuğun elde edilmesi, sütün yoğunlaştırılması ve çeşitli işlemlerle gerçekleştirilir. Elde edilen kauçuk, çeşitli endüstriyel uygulamalarda kullanılmaktadır (Ongun ve diğ., 2017). Şekil 2.4’de Heavea Brasiliensis ağacından kauçuk toplanmasına ilişkin görsel gösterilmiştir.



Şekil 2.4. Heavea Brasiliensis ağacındaki lateks (Tan, 2019)

Doğal kauçuk, diğer polimerlerden farklı olarak birçok benzersiz özellik sunar. Bunlar arasında yüksek esneklik, dayanıklılık, mükemmel sızdırmazlık, yüksek mukavemet, sıcaklık toleransı, hafiflik ve kolay işlenebilirlik yer alır. Ayrıca doğal kauçuk, suya ve bazı kimyasallara karşı dayanıklılığıyla bilinir. Bu özellikler, doğal kauçuğun yaygın bir endüstriyel malzeme haline gelmesini sağlamıştır.

Doğal kauçuğun yapısı, kimyasal ve fiziksel özellikleri, ayrıca üretim sürecinde kullanılan tekniklerin hepsi doğal kauçuk endüstrisinde önemlidir. Doğal kauçuk, uzun zincirli kauçuk molekülleri bir polimerdir. Bu polimer, diğer elastomerik malzemelerin çoğundan farklı olarak, ağ şeklinde düzenlenir ve doğal kauçuğun benzersiz özelliklerine katkıda bulunur (Nishino ve diğ., 2018).

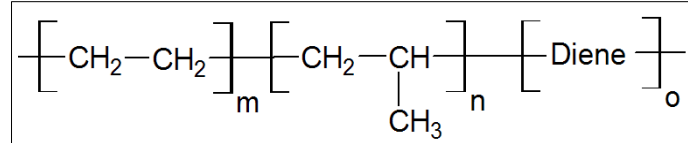


Şekil 2.5. Doğal kauçuk kimyasal yapı (Surya ve diğ., 2018)

Doğal kauçuğun özellikleri, moleküler yapısına ve kauçuğun üretildiği bitkilerin türüne bağlıdır. Örneğin, kauçuğun sıcaklığa ve oksijene karşı dayanıklılığı, kauçuğun yapısındaki çift bağların miktarına bağlıdır. Şekil 2.5’de doğal kauçukların çift bağ yapısı gösterilmiştir. Doğal kauçuğun mukavemeti, aynı zamanda kauçuğun sütündeki doğal kauçuk içeriğine de bağlıdır (Rana ve diğ., 2018).

2.3.2. Etilen Propilen Dien Monomer (EPDM)

EPDM kauçuk, etilen propilen dien monomeri kauçuğunun kısaltmasıdır. Bu kauçuk türü, etilen, propilen ve dien monomerlerinden elde edilir. EPDM kauçuk, dayanıklılığı, elastikiyeti, çevre dostu olması ve birçok endüstride kullanımı nedeniyle oldukça popüler bir malzemedir. EPDM kauçuk molekül yapısı Şekil 2.6’da gösterilmiştir.



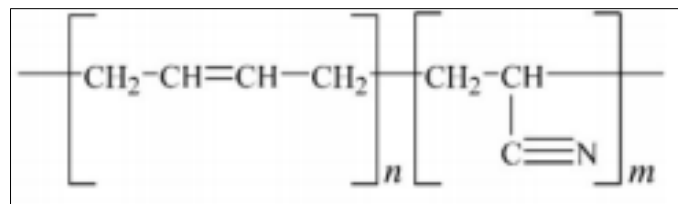
Şekil 2.6. EPDM kauçuk kimyasal yapısı (Özge Y. 2019)

EPDM kauçuğun bir diğer önemli özelliği de düşük sıcaklıklara karşı dayanıklılığıdır. Bu özellik, EPDM kauçuğun soğuk iklim koşullarında kullanımını mümkün kılar. Ayrıca, EPDM kauçuğun esnekliği ve yüksek elastikiyeti, birçok farklı şekil ve boyutta üretilmesini sağlar (Ciesielski, 1999).

EPDM kauçuğun özellikleri, monomer birimlerinin oranına ve kauçuk üretim sürecine bağlıdır. Örneğin, yüksek oranda propilen içeren EPDM kauçuğunun sıcaklığa karşı dayanıklılığı daha yüksektir. Ayrıca, EPDM kauçuğun geri dönüşümü de mümkündür. Bu özellikler, EPDM kauçuğun çevre dostu ve sürdürülebilir bir malzeme olarak kabul edilmesine yardımcı olur.

2.3.3. Aktilonitril Bütadien Kauçuk (NBR)

NBR kauçuk, nitril-butadien kauçuk olarak da bilinir ve genellikle petrol, yağ ve kimyasallara karşı dayanıklılığı için tercih edilen bir kauçuk türüdür. NBR kauçuk, nitril ve butadien monomerlerinin polimerizasyonu ile elde edilir. Nitril ve bütadien bağ yapısı Şekil 2.7’de gösterilmiştir. Isıya, yağlara, hidrokarbonlara, asitlere ve bazlara karşı yüksek direnç gösterir.



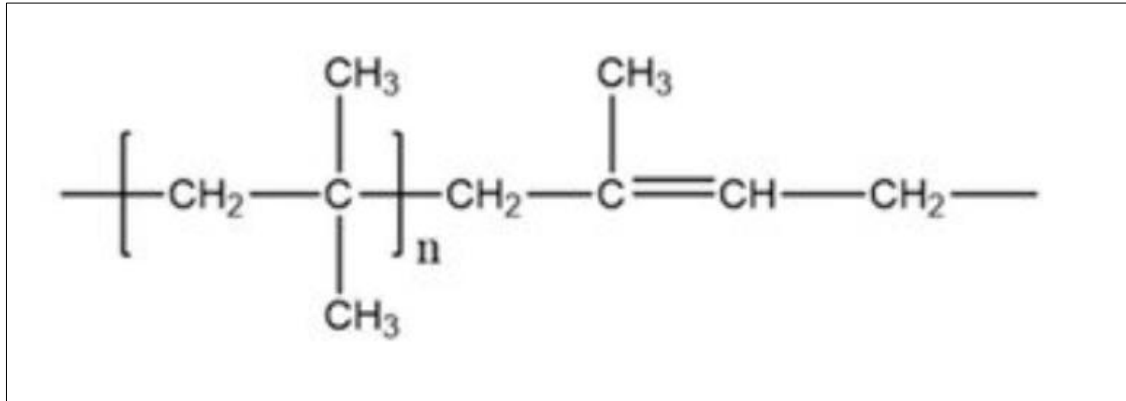
Şekil 2.7. NBR kauçuk kimyasal yapısı (Fazli ve arkadaşları 2020)

NBR kauçuk petrol ürünleri, kimyasallar, yağlar ve hidrokarbonlar dahil olmak üzere birçok kimyasala karşı yüksek dayanıklılık gösterir. Düşük sıcaklıklara karşı yüksek direnç gösterir ve sıcaklık toleransı -40°C ile 100°C arasındadır. Su, yağ ve gaz sızdırmazlığı sağlar (Rahiman ve diğ., 2005).

NBR kauçuk, yüksek aşınma dayanıklılığına sahiptir ve uzun ömürlüdür. Ancak malzemenin bazı dezavantajları da vardır. Yüksek sıcaklıklarda, kaygan hale gelebilir. Amonyak ve hidrojen peroksit gibi bazı kimyasallarla temas edildiğinde hasar görebilir. Ozon ve hava kirliliği gibi çevresel faktörlere karşı orta düzeyde dayanıklılık gösterir (Chakraborty ve diğ., 2007).

2.3.4. Polibütadien Kauçuk (BR)

Butadien kauçuğu, polimerizasyon yoluyla elde edilen bir sentetik kauçuk türüdür. Kimyasal adı polibütadien olan bu malzeme, butadien monomerinin polimerizasyonu sonucu elde edilir. Yapısında çift bağlar içeren uzun polimer zincirleri bulunan butadien kauçuğu, doğal kauçukla benzer özellikler gösterir. Şekil 2.8’de BR kauçuğun kimyasal yapısı gösterilmiştir. Yüksek dayanıklılık, elastikiyet ve yırtılma direnci, bu kauçuğun birçok endüstride kullanılmasını sağlar (White, 2019).

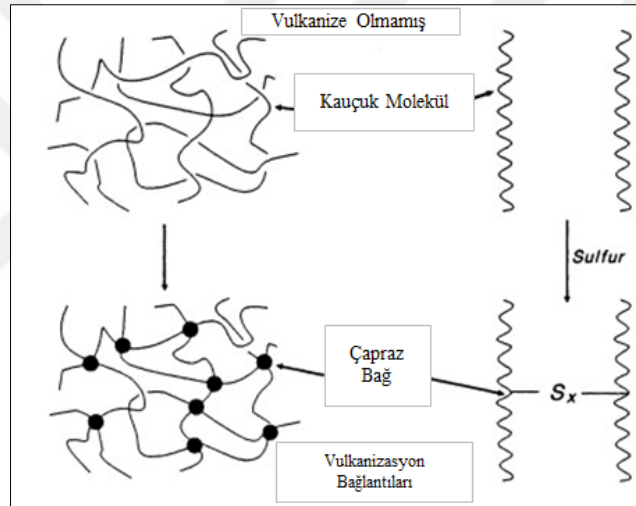


Şekil 2.8. BR kauçuk kimyasal yapısı (Heo ve Young 2015)

Butadien kauçuğu otomobil lastikleri, kamyon lastikleri, bisiklet lastikleri, uçak lastikleri, ayakkabı tabanları ve diğer lastik malzemelerde kullanılır. Yüksek elastikiyeti sayesinde, bu malzeme darbe emilimini artırır ve sarsıntıyı azaltır. Ayrıca, birçok yapıştırıcı ve yapıştırıcı bandın yapımında kullanılan bir malzemedir (Pate ve diğ., 2016).

2.4. Vulkanizasyon

Vulkanizasyon, termoplastik özelliklerde olan kauçuğun elastik forma dönüşmesi olarak tanımlanır. Vulkanizasyon sırasında kimyasal değişikliğe uğrayarak çapraz bağlanma gerçekleşir. Vulkanizasyon genellikle kauçuk veya elastomerik malzemelere uygulanan bir işlemdir. Bu malzemelere mekanik olarak dayatılan oldukça büyük bir deformasyondan sonra zorla yaklaşık orijinal şekline geri çekilirler. Vulkanizasyon, geri çekme kuvvetini arttıran ve deforme edici kuvvetin çıkarılmasından sonra kalan kalıcı deformasyon miktarını azaltan bir işlem olarak tanımlanabilir. Genellikle çapraz bağlı bir moleküler ağı oluşturulmasıyla elde edilir. Çapraz bağlar ve vulkanizasyon bağlantıları Şekil 2.9’da gösterilmiştir.



Şekil 2.9. Vulkanizasyon bağ yapısı (Coran, 2013)

Vulkanizasyon işlemi basınç ve sıcaklık etkisi altında belirli bir zaman sonucunda gerçekleşebilir. Kauçuk esneklik teorisine göre, bir deformasyona direnmek için geri çekilme kuvveti, birim elastomer hacmi başına polimer zincirlerinin sayısı ile orantılıdır. Destekleyici bir polimer zinciri, ağ birleşimleri arasındaki doğrusal bir polimer moleküler segmentidir. Bağlantı noktalarının veya çapraz bağlantıların sayısındaki artış, destekleyici zincirlerin sayısında bir artış sağlar. Vulkanize olmamış lineer bir polimerde sadece moleküler zincir dolaşmaları birleşme yerleri oluşturur (Katun, 1996).

Vulkanizasyon, polimer zincirleri arasına çapraz bağların sokulmasıyla ağ bağlantılarının kimyasal olarak üretilmesi işlemidir. Bir çapraz bağ, kısa zincirli bir

kükürt atomu grubu, tek bir kükürt atomu, bir karbon-karbon bağı, bir polivalent organik radikal, bir iyonik küme veya bir polivalent metal iyonu olabilir. İşlem genellikle vulkanize edici maddelerle karıştırılmış kauçuğun basınç altında bir kalıpta ısıtılmasıyla gerçekleştirilir. Vulkanizasyon, kauçukta üç boyutlu ağ yapıları üreten ve kauçuk ürünlerine daha fazla stabilite sağlama konusunda en iyi bilinen işlem olan kükürt ile çapraz bağlanma reaksiyonudur. Vulkanizasyon, 1920'lerde H. Staudinger tarafından makromolekül kavramının geliştirilmesinden önce 1839'da Goodyear tarafından keşfedilmiştir. O zamandan beri kükürt çapraz bağlama reaksiyonları, hızlandırıcılarda, aktivatörlerde, geciktiricilerde ve benzeri işlemlerin ve mekanik özelliklerin iyileştirilmesi için ardışık yeniliklerle geliştirildi.

Otomobiller ve uçaklar için pnömatik lastikler gibi hemen hemen tüm kauçuk ürünleri, vulkanizasyon işlemi kullanılarak üretilmektedir (Mark ve diğ., 2013).

2.4.1. Vulkanizasyon Eğrisi

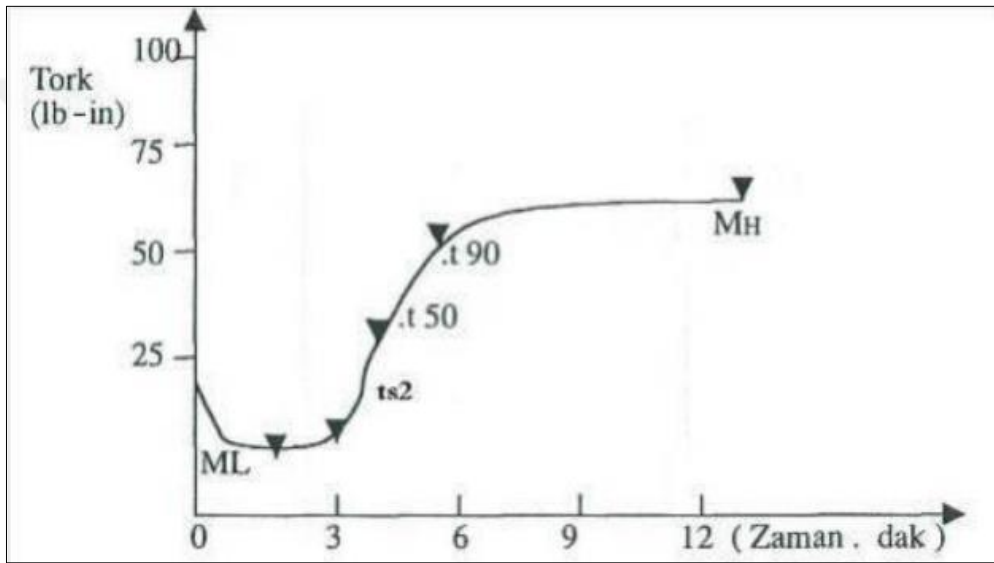
Vulkanizasyon eğrilerini üretmek için iki ana ekipman kullanılır. Bunlardan biri osilasyonlu disk reometresi (ODR) ve hareketli kalıp reometresidir (MDR). Şekil 2.10'de osilasyonlu disk reometri cihazı ve Şekil 2.11'de hareketli kalıp reometri cihazı gösterilmiştir. Reometre ile karışımın vulkanizasyon özelliklerini ölçer ve vulkanizasyon eğrisini oluşturur. Karışıma yüksek sıcaklık ve basınç altında salınım gerilimi uygular ve çapraz bağ yoğunluğundaki artışın sonucu olarak torktaki artışı zamanın fonksiyonu olarak ifade eder. Vulkanizasyon özellikleri ASTM D 2084 6 da belirtilmiştir (Saini ve Gupta, 2001).



Şekil 2.10. Osilasyonlu reometri ölçüm cihazı (URL-3)



Şekil 2.11. Hareketli kalıp reometri ölçüm cihazı (URL-4)



Şekil 2.12. Vulkanizasyon eğrisi (URL-5)

Ts2: Pişme başlangıç zamanı

ML: Minimum tork

Mh: Maksimum tork

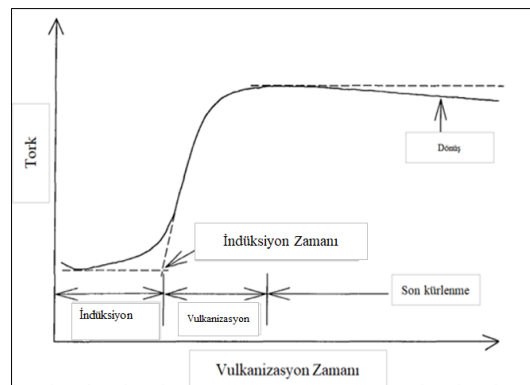
T90: Maksimum pişmeye ulaştığındaki zaman

T90 üretim esnasında pres süresini belirlemede yardımcı olur. MH gerilme, yırtılma ve kopma dayanımı gibi özelliklerle ilgilidir.

Vulkanizasyon eğrisi, vulkanizasyon işleminin sonuçlarını gösteren bir grafiğe verilen isimdir. Şekil 2.12’de vulkanizasyon eğrisi gösterilmiştir. Eğri, kauçuğun vulkanizasyon işlemine tabi tutulduğu sıcaklık ve zaman aralığını gösterir. Kauçuğun belirli bir

sıcaklık ve süre boyunca ne kadar vulkanize olduğunu gösterir. Vulkanizasyon eğrisi, kauçuğun özelliklerinin anlaşılmasına ve vulkanizasyon işleminin optimize edilmesine yardımcı olur. Vulkanizasyon eğrisi, birkaç farklı bölüme ayrılabilir. Bu bölümler, işlemin farklı aşamalarını ve kauçuğun farklı özelliklerini gösterir. İlk bölüm, ön ısıtma bölgesidir. Kauçuk örneği, vulkanizasyon işlemi öncesi ısıtılır. Kauçuğun vulkanizasyon işlemine daha iyi tepki vermesini sağlar. İkinci bölüm, indüksiyon bölgesidir. Kauçuk molekülleri, sülfür ve diğer katkı maddeleri ile birleşir. Vulkanizasyon işleminin en önemli aşamalarından biridir. İndüksiyon bölgesi, kauçuk molekülleri arasında bağlantıların oluştuğu bölgedir.

Bu bölgede, kauçuk molekülleri arasında sülfür atomları arasında yeni bağlar oluşur ve kauçuk molekülleri birbirine bağlanır. Üçüncü bölüm, vulkanizasyon bölgesidir. Kauçuk molekülleri tamamen vulkanize olur. Kauçuk molekülleri arasında daha fazla bağlantı oluşur ve kauçuk daha sert hale gelir. Vulkanizasyon işlemi sona erer ve kauçuk tamamen vulkanize olmuş hale gelir. Son bölüm, soğutma bölgesidir. Bu bölümde, vulkanize kauçuk örneği soğutulur. Soğuma işlemi, vulkanize kauçuğun özelliklerini daha da iyileştirir ve tamamen vulkanize hale getirir. Soğuma bölgesi, vulkanizasyon işleminin son aşamasıdır ve kauçuğun kullanıma hazır hale gelmesini sağlar. Bu bölümleri gösteren grafik Şekil 2.13'te gösterilmiştir. Vulkanizasyon eğrisi, kauçuk ürünlerin üretiminde ve kalite kontrolünde önemli bir araçtır. Eğri, vulkanizasyon işleminin optimize edilmesine yardımcı olur ve kauçuk ürünlerin özelliklerini anlamak için kullanılır. Örneğin, eğri, kauçuğun sertleşme süresini, maksimum sertleşme derecesini ve vulkanize kauçuğun özelliklerini gösterir (Thommas, 1998).



Şekil 2.13. Vulkanizasyon bölümleri (Sun ve Isayev,2009)

2.5. Newtonian Akışkanlar

Newtonian akışkanlar, akışkanlar mekaniği alanında en basit ve yaygın olarak karşılaşılan akışkan türüdür. Bu akışkanlar, İngiliz fizikçi ve matematikçi Sir Isaac Newton'un adını taşıyan akışkanlar olarak bilinir. Newtonian akışkanlar, viskozite ve kayma hızı arasında doğrusal bir ilişki sergiler ve bu nedenle mekanik davranışları tahmin etmek daha kolaydır.

Newtonian akışkanların en önemli özelliği, viskozite (akışkanın sürtünme direnci) ve kayma hızı arasındaki doğrusal ilişkidir. Bu ilişki, Newton'un viskozite yasası olarak da bilinir ve Denklem (2.1)'de gösterilmiştir (White, 2011).

$$\tau = \mu \left(\frac{du}{dy} \right) \quad (2.1)$$

Denklem (2.1)'de τ , kayma gerilimi; μ , dinamik viskozite; $\left(\frac{du}{dy} \right)$ ise kayma hızıdır. Bu denklem, Newtonian akışkanların viskozitesinin, sıcaklık ve basınç gibi dış faktörlerle değişebilse de, kayma hızından bağımsız olduğunu gösterir.

Newtonian akışkanlar, viskozitelerine göre sınıflandırılabilir. Düşük viskoziteli akışkanlar hızlı akar ve sürtünme direnci düşüktür. Yüksek viskoziteli akışkanlar ise daha yavaş akar ve sürtünme direnci yüksektir.

Newtonian akışkanların akış eğrileri doğrusaldır ve orijinden geçer. Bu, viskozite değerinin eğimin tersi olduğu anlamına gelir. Akış eğrisinin doğrusal olması, Newtonian akışkanların kayma hızına bağlı olarak viskozitelerinin değişmediğini gösterir (Çengel ve Cimbala, 2013).

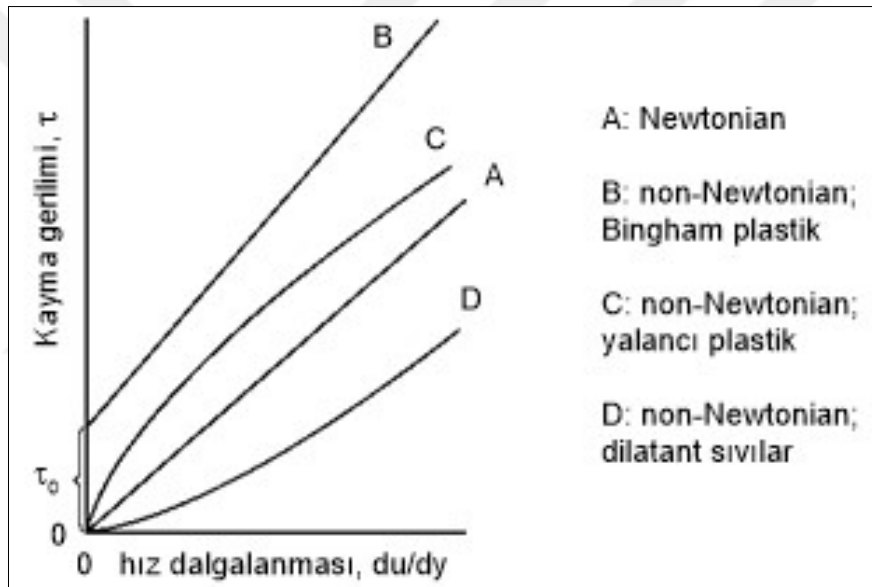
Newtonian akışkanlar, kararlı ve homojen bir yapıya sahiptir. Bu kapsamda homojen yapıları, Newtonian akışkanların içinde bulunan moleküllerin, tüm hacim boyunca düzenli ve eşit dağıldığı anlamına gelmektedir. Bu özellik sayesinde, Newtonian akışkanların mekanik davranışları tutarlı ve öngörülebilir hale gelir.

Newtonian akışkanların viskozitesi, sıcaklık ve basınç gibi çevresel faktörlerden etkilenir. Sıcaklık arttıkça, akışkanın viskozitesi genellikle azalır. Bu nedenle, ısıtma ve soğutma sistemlerinde kullanılan akışkanların viskozitesi sıcaklık değişikliklerine göre

ayarlanmalıdır. Basınç arttıkça, viskozite genellikle artar, ancak bu etki genellikle sıcaklık etkisinden daha küçüktür (Fox ve diğ., 2011).

2.6. Newtonian Olmayan Akışkanlar

Newtonian olmayan akışkanlar, viskozite ve kayma hızı arasında doğrusal olmayan bir ilişki sergileyen akışkanlardır. Şekil 2.14’de kayma hızı gerilimi gösterilmiştir. Bu tür akışkanlarda, kayma hızı arttıkça viskozite değişir ve bu değişim, doğrusal olmayan bir şekilde gerçekleşir. Bu durum, Newtonian olmayan akışkanların mekanik davranışlarının tahmin edilmesini ve kontrol edilmesini daha zor hale getirir (Barnes ve diğ., 1989).



Şekil 2.14. Kayma-Hız gerilimi (URL-6)

Newtonian olmayan akışkanlar, viskozite-kayma hızı ilişkisine göre sınıflandırılabilir:

a. Zaman Bağımsız Newtonian olmayan Akışkanlar: Bu tür akışkanlarda, viskozite değişimi anlık olarak gerçekleşir ve zamanla değişmez. Zaman bağımsız non-Newtonian akışkanlar, iki alt kategoriye ayrılır:

i. Şekil Bozunmalı Akışkanlar: Kayma hızı arttıkça viskozite azalan akışkanlardır. Bu tür akışkanlar, "pseudoplastik" olarak da bilinir. Örnek olarak, keçap, kan ve bazı polimer solüsyonları verilebilir.

ii. Şekil Kalınlaşmalı Akışkanlar: Kayma hızı arttıkça viskozite artan akışkanlardır. Bu tür akışkanlar, "dilatant" olarak da bilinir. Örnek olarak, nişasta su karışımı, bazı seramik süspansiyonları ve bazı polimer solüsyonları verilebilir.

b. Zaman Bağımlı Newtonian olmayan Akışkanlar: Bu tür akışkanlarda, viskozite değişimi zamanla değişir ve bu değişim, uygulanan gerilimin süresine bağlıdır.

Zaman Bağımsız Newtonian Olmayan Akışkanlar: Bu tür akışkanlar, viskozite değişiminin anında gerçekleştiği ve zamanla değişmediği akışkanlardır. Bu tür akışkanlar, kayma hızıyla doğrusal olmayan bir viskoziteye sahiptirler.

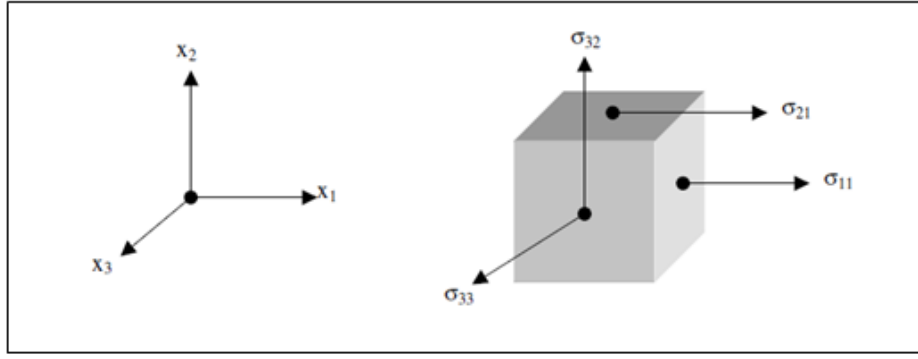
2.7. Reoloji

Reoloji, malzemelerin deformasyon, akış ve mekanik davranışlarının incelenmesine odaklanan bir disiplindir. Malzemelerin viskoelastik özellikleri, mekanik özellikleri ve akış özellikleri üzerine çalışır.

Bir dizi test ve analiz teknikleri kullanarak kauçuk malzemelerin özelliklerini karakterize eder. Bu teknikler arasında gerinim ölçümü, akış ölçümü, sıkıştırma ölçümü, dinamik mekanik analiz ve termal analiz yer alır. Bu tekniklerin kombinasyonu, kauçuk malzemelerin viskoelastik özelliklerinin, mekanik özelliklerinin ve akış özelliklerinin ayrıntılı bir şekilde analiz edilmesine olanak tanır (Rudolph ve Osswalt, 2014).

Kauçuk malzemelerin deformasyon davranışını anlamak için gerinim ölçümlerine dayanır. Şekil 2.15’de gerinim bileşenleri gösterilmiştir. Gerinim ölçümleri, kauçuk malzemenin deformasyonunu ölçmek için tasarlanmış özel cihazlar kullanılarak yapılır. Bu cihazlar, kauçuk malzemelerin gerinimine ve geri çekilme davranışına bağlı olarak değişen bir kuvvete tepki verir. Gerinim ölçümleri, kauçuk malzemelerin elastik özelliklerini, viskoz özelliklerini ve viskoelastik özelliklerini karakterize etmek için kullanılır (Shaw ve MacKnight, 2018).

Genellikle, bir malzemenin belirli bir noktasının çevresindeki gerilme durumunu tam olarak tanımlamak için normal ve kayma gerilmesinin dokuz bileşenini belirtmek gereklidir. Gerilmeler, üzerinde kuvvetin etilediği yüzeyi belirten i ve kuvvetin yönünü belirten j olmak üzere σ_{ij} tensörü olarak adlandırılır. Bu yüzden, gerilme bileşenlerini aşağıdaki gibi bir matris biçiminde yazmak uygundur.



Şekil 2.15. Gerilme bileşenleri (Ariff, 2003)

Momentum korunumu prensibini kullanarak, ilgili yüzeyde gerilme tensörünün simetrik olduğu $\sigma_{ij} = \sigma_{ji}$, herhangi bir i ve j değeri için kanıtlanabilir. Sonuç olarak, yalnızca altı bağımsız gerilme bileşeni vardır. Bu nedenle, pratik ölçümlerde, sadece kayma gerilmeleri ve farklı yönlerde etki eden normal gerilmeler arasındaki farklar reolojik anlam taşır. Bu öneme sahip gerilmeler şunlardır (Ariff, 2003):

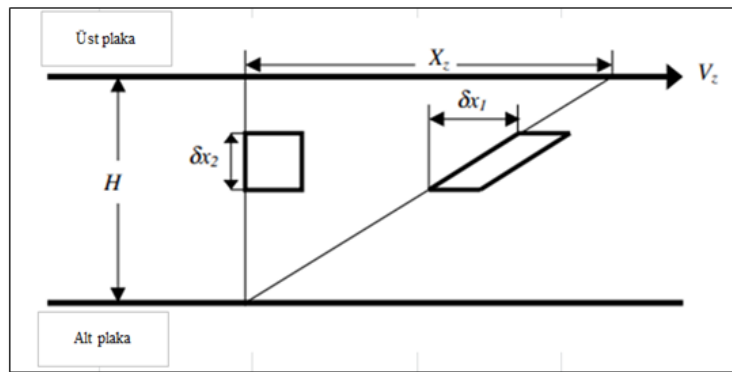
$$\sigma_{ij} = \begin{bmatrix} \sigma_{11} & \sigma_{12} & \sigma_{13} \\ \sigma_{21} & \sigma_{22} & \sigma_{23} \\ \sigma_{31} & \sigma_{32} & \sigma_{33} \end{bmatrix} \quad (2.2)$$

Kayma gerilmes $\tau = \sigma_{21}$

$$\text{Normal Gerilme } N_1 = \sigma_{11} - \sigma_{22} \quad (2.3)$$

$$\text{Normal Gerilme } N_2 = \sigma_{22} - \sigma_{33} \quad (2.4)$$

Basit kaymada, malzemenin iki paralel plaka arasındaki deformasyonu, üst plakanın X_z mesafesi boyunca lineer olarak yer değiştirmesiyle meydana gelir, bu Şekil 2.16'da gösterilmiştir.



Şekil 2.16. Paralel iki plaka arası basit kayma defarmasyonu gösterimi (Ariff, 2003)

Plakaların yüzeyinde kayma olmadığı ve ataletin ihmal edilebileceği varsayılırsa, malzemenin her bir elemanı tam olarak aynı yerel deformasyona tabi olacaktır ve bu kayma deformasyonu, γ olarak adlandırılır. Denklem (2.5)'te kayma defarmasyonu gösterilmiştir (Ariff,2003) ;

$$\gamma = \frac{dx_1}{dx_2} \quad (2.5)$$

Denklem (2.6)'da δx_2 malzeme elemanının yüksekliği ve δx_1 elemanın üst yüzeyinin yer değiştirmesidir. Deformasyon uniform olduğundan yani elemanın boyutundan bağımsız olduğundan, Denklem (2.5), plakalar arasındaki boşluğun miktarları H ve üst plakanın lineer yer değiştirmesi X_z 'yi ilişkilendiren bir ifadeye dönüşür (Ariff,2003).

$$\gamma = \frac{v_z}{H} \quad (2.6)$$

Eğer üst plaka sabit bir hızda, V_z hareket ettirilecekse, bu genellikle sürekli akışkanların sabit hızda kesme durumuna benzer, bu deformasyonla ilişkili akış sabit basit kayma hızı olarak adlandırılır ve belirli bir yerel pozisyondaki kayma hızı Denklem (2.7)'deki gibi tanımlanır (Ariff, 2003).

$$\dot{\gamma} = \frac{d\gamma}{dt} = \frac{V_z}{H} \quad (2.7)$$

Malzeme türüne bakılmaksızın, yani katı veya sıvı, bir malzemenin gerilme ve deformasyon ilişkisini tanımlar. Katı ve sıvıların klasik teorisi iyi bir şekilde oluşturulmuştur ve bunlar, malzemenin ideal olarak elastik katılar veya ideal viskoz sıvılar (Newtonian) olarak düşünüldüğü uç durumları temsil eder. Bu klasik teorilere daha net bir arka plan sağlamak adına, bir cismin deformasyonu ile ilişkili iki fiziksel kavram dikkate alınır. İlk olarak, dış kuvvetler tarafından yapılan iş, malzemede birim hacim başına bir elastik enerji (W) depolanacak şekilde malzemede saklanabilir. İkinci olarak, dış kuvvetler tarafından yapılan iş, deformasyon hızında geri döndürülemez bir şekilde dağıtılabilir (D). Eğer bir malzeme ideal olarak elastikse, $W \neq 0$ ve $D = 0$ 'dır. Oysa, bir malzeme ideal olarak viskoz ise, $W = 0$ ve $D \neq 0$ 'dır (Vinogradov & Malkin, 1980).

Kauçuk reolojisi, kauçuk malzemelerin karakterizasyonu için birçok standart test yöntemi içerir. Bu test yöntemleri arasında gerinim ölçümleri için ASTM D412,

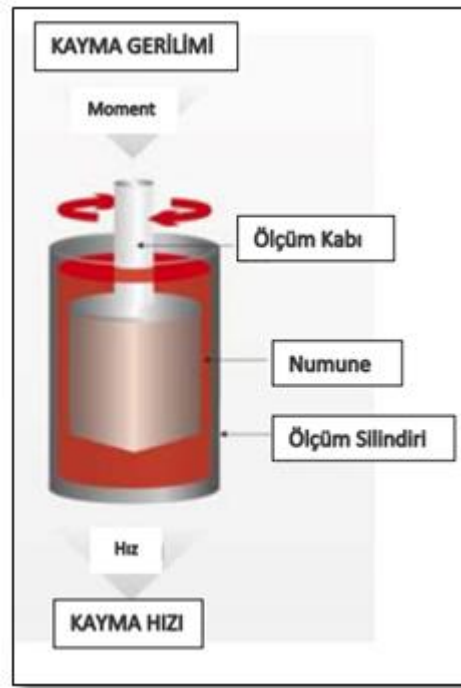
sıkıştırma ölçümleri için ASTM D575, akış ölçümleri için ASTM D5289 ve dinamik mekanik analiz için ASTM D4065 gibi standartlar yer alır. Bu standartlar, kauçuk malzemelerin özelliklerini karakterize etmek için sıkça kullanılan yöntemlerdir (Hofmann, 2001).

Kauçuk reolojisi, kauçuk malzemelerin tasarımı, üretimi ve uygulaması süreçlerinde kullanılır. Kauçuk malzemelerin doğru şekilde üretildiğinden ve istenen özelliklere sahip olduklarından emin olmak için kauçuk reolojisi testleri yapılır.

2.7.1. Reolojik Karakterizasyon Ölçüm Aletleri

Reolojik ölçümler, çeşitli teknikler ve cihazlar kullanarak gerçekleştirilir. En yaygın reolojik ölçüm teknikleri arasında dönen silindir reometreleri, kapiler reometreler ve osilasyonlu reometreler bulunmaktadır. Bu cihazlar, malzemelerin reolojik özelliklerini ölçmek için farklı prensiplere dayanır ve her birinin avantajları ve sınırlamaları vardır.

Dönen silindir reometreleri, malzeme örneklerinin iki paralel plaka veya koni plaka geometrisi arasında sıkıştırıldığı ve dönen plaka veya koni üzerinde tork uygulandığı bir sistem kullanır. Bu yöntem, malzemenin viskozitesini ve elastikiyetini ölçebilir, ancak genellikle yüksek viskoziteli malzemeler için daha uygundur ve düşük viskoziteli malzemeler için hassasiyet eksikliği yaşayabilir.



Şekil 2.17. Osilasyonlu reoloji test cihazı çalışma şeması (URL-7)

Şekil 2.17’de gösterilen dönen silindir kapiler reometri cihazlarında viskozite kanunu göre viskozite hesaplaması Denklem (2.9)’daki gibi yapılabilir (Morrison 2001).

$$\eta = \frac{\tau}{\dot{\gamma}} \quad (2.8)$$

Kapiler reometreler, malzemenin bir kapiler tüp veya kanal içinden zorlandığı bir sistem kullanır. Malzeme tüp boyunca akarken, tüpün duvarlarına sürtünmesi nedeniyle bir basınç düşüşü meydana gelir. Bu basınç düşüşü ölçülerek malzemenin viskozitesi ve viskoelastik özelliklerini hesaplamak için kullanılır.



Şekil 2.18. Kapiler reometri reoloji test cihazı (URL-8)

Kapiler reometreler, geniş bir viskozite aralığındaki malzemeler için uygundur, ancak viskoelastik özelliklerin ölçülmesi için daha az hassastır. Şekil 2.18’de kapiler reometri reoloji test cihazı gösterilmiştir.

Osilasyonlu reometreler, malzemelerin osilasyonlu gerilme veya deformasyon altında reolojik özelliklerini ölçmek için kullanılır. Bu cihazlar, malzemelerin kompleks viskozitesi, elastikiyet modülü ve kayma modülü gibi dinamik reolojik özelliklerini ölçebilir. Osilasyonlu reometreler, genellikle düşük gerilme ve deformasyon değerleri altında çalışarak malzemelerin lineer viskoelastik bölgesini incelemek için uygundur.

Her bir reolojik ölçüm tekniği ve cihazı, belirli malzemeler ve uygulamalar için avantajlar ve sınırlamalar sunar. Örneğin, dönen silindir reometreleri ve osilasyonlu reometreler genellikle viskoelastik özelliklerin ölçülmesinde daha hassas ve güvenilir olsa da, kapiler reometreler geniş bir viskozite aralığındaki malzemeler için daha

uygundur. Bu nedenle, yeni bir reolojik karakterizasyon test cihazı geliştirilirken, mevcut cihazların avantajları ve sınırlamaları dikkate alınmalıdır.

2.7.2. Reoloji Etki Faktörleri

1.7.2.1 Polimerin Dağılımı Faktör Etkisi

Polimerler, doğal veya sentetik yollarla üretilen büyük molekülü bileşiklerdir. Polimerlerin özellikleri, kimyasal bileşimi, molekül ağırlığı ve polimerin dağılımı faktörü (PDI) gibi faktörlere bağlıdır. PDI, polimer moleküllerinin molekül ağırlığı dağılımını ifade eder. Polimerin molekül ağırlığı dağılımının homojen olması, polimerin özelliklerinde homojenliğe neden olur ve daha iyi performans sağlar.

Polimerlerin üretiminde, PDI'nin uygun seviyelerde tutulması, polimerlerin kalitesi ve özellikleri açısından önemlidir. Polimerlerin endüstriyel uygulamalarında, polimerin PDI'si, polimerin performansı üzerinde belirleyici bir faktördür. Polimerin PDI'si, kristallenme davranışını, mekanik özellikleri, viskoziteyi ve çözünürlüğü etkileyebilir (Malcolm, 1990).

Polimer endüstrisinde PDI' nin kontrolü, polimer üretiminde daha homojen polimerlerin elde edilmesine, daha iyi performans sergilemelerine ve ürün kalitesinin artmasına olanak tanır. Polimerin PDI'si, aynı zamanda polimerin uygulamalarında da önemlidir. Örneğin, düşük PDI'ye sahip polimerler, yüksek mukavemetli filmler, elastomerler ve sert plastikler gibi uygulamalarda kullanılabilirken, yüksek PDI'ye sahip polimerler daha çok esnek plastikler ve kauçuklar için uygundur (Moller ve Matyjaszewski, 2012).

1.7.2.2 Sıcaklık Faktör Etkisi

Sıcaklık, reolojik özellikler üzerinde önemli bir etkiye sahiptir. Malzeme sıcaklığı, malzeme akışkanlığı, elastikiyeti ve viskozitesi üzerinde doğrudan etkilidir. Daha yüksek sıcaklıklarda, malzemeler daha az viskoz ve daha akışkan hale gelir.

Newtonian olmayan sıvılar için kabul edilmiştir. Arrhenius tipi ilişki, viskoziteyi sıcaklıkla aşağıdaki gibi ilişkilendirebilir.

$$\eta_0 = A \cdot e^{E_a/RT} \quad (2.9)$$

Denklem (2.9)'da, A , viskozitenin birimleriyle aynı birimlere sahip üstelöncesi faktördür, E_a , viskoz akışın aktivasyon enerjisi, R evrensel gaz sabiti ve T , viskozite ölçümüne karşılık gelen mutlak sıcaklıktır. Polimerlerin aktivasyon enerjileri, büyük moleküler ağırlıkları ve hem zincir sertliği hem de yan dal boyutlarındaki artış nedeniyle düşük moleküler ağırlıklı sıvılardan daha yüksektir. Polimer akışı için tipik aktivasyon enerjisi değerleri 2.09×10^7 ile 2.09×10^9 J/kg-mol arasında değişmektedir (Gupta, 2000).

Polimer viskozitesinin sıcaklığa bağımlılığını tanımlayan başka bir ilişki, Williams, Landel ve Ferry tarafından önerilen ve Williams, Landel ve Ferry (WLF) denklemi olarak bilinen ilişkidir (Ferry, 1970) ve aşağıdaki gibi ifade edilir:

$$\log \frac{\eta_0(T)}{\eta_0(T_g)} = \frac{-17.44(T-T_g)}{51.6+(T-T_g)} \quad (2.10)$$

Burada, T ölçüm sıcaklığı, T_g camsı geçiş sıcaklığı, $\eta_0(T)$ ölçülen sıcaklıktaki sıfır kayma viskozitesi ve $\eta_0(T_g)$ polimerin camsı geçiş sıcaklığındaki sıfır kayma viskozitesidir. Denklem (2.10)'un, T_g ve $T_g + 100 K$ arasındaki bir sıcaklık aralığında tüm polimerlere yaklaşık olarak uygulanabilir olduğu bulunmuştur. Camsı geçiş sıcaklığının çok üstündeki sıcaklıklarda veya kristalin polimerler için erime noktasında, polimerin viskozitesi iyi bir yaklaşım ile Arrhenius denklemini takip eder (Gupta, 2000).

1.7.2.3 Basınç Faktör Etkisi

Basınç, bir malzemenin deformasyon ve akış özelliklerinde önemli bir rol oynar. Örneğin, bir malzeme üzerindeki basınç arttıkça, malzemenin viskozitesi artar. Bu nedenle, malzemelerin akış davranışları, basınç değişimlerine hassastır. Bu nedenle, malzemelerin reolojik özelliklerinin doğru bir şekilde karakterize edilmesi için basınç faktörü göz önünde bulundurulmalıdır.

Basınç faktörü, malzemenin reolojik özelliklerini etkilerken, aynı zamanda malzemenin yapısal özelliklerini de etkileyebilir. Örneğin, polimer materyallerin basınç altında nasıl davrandığı, polimer malzemelerin şekil ve boyutlarının nasıl değiştiği ve polimerlerin

yapısal değişikliklerinin basınç faktöründen nasıl etkilendiği hala araştırılmaktadır (Barnes ve diğ., 1989).

Reoloji, malzemelerin deformasyon ve akış davranışlarını anlamak için genellikle gerilme, deformasyon ve akış hızı gibi özelliklerin ölçüldüğü bir dizi deney kullanır. Bu deneylerin çoğu, basınç faktörünün etkilerini de değerlendirir. Örneğin, malzemelerin akış davranışlarının karakterizasyonu için, basınç altındaki akış hızı arttıkça, malzemenin viskozitesi artar. Bu nedenle, basınç faktörü, malzemenin akış davranışlarını karakterize etmek için kullanılan temel bir ölçüt olarak kabul edilir (Rudolph ve Osswald, 2014).

1.7.2.4 Moleküler Yapı Etkisi

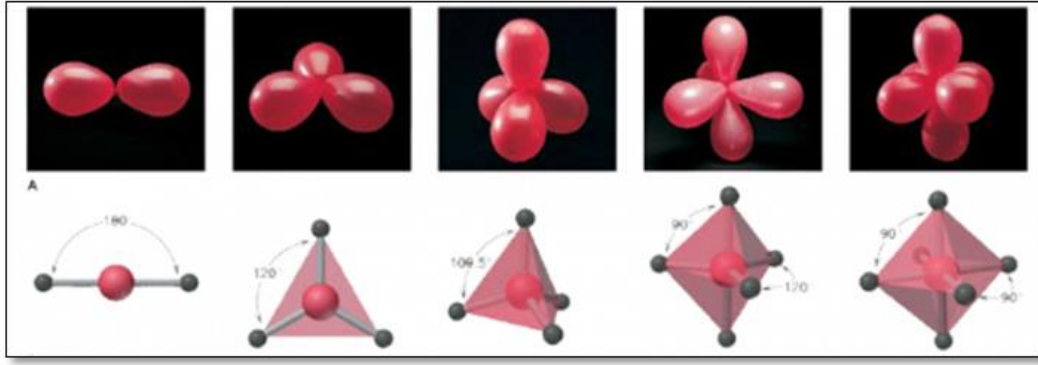
Moleküler yapının reolojiye etkisi, malzemelerin akış ve deformasyon özelliklerinin moleküler düzeydeki yapılarından nasıl etkilendiği ile ilgilidir. Polimerler, biyomakromoleküller, nanokompozitler ve kompleks sıvılar gibi malzemelerin reolojik özellikleri, moleküler düzeydeki yapılarına bağlı olarak değişir.

Moleküler yapının reolojiye etkisi aşağıdaki faktörlerle ilişkilidir:

Molekül ağırlığı ve dağılımı: Malzemelerin reolojik özellikleri, molekül ağırlığı ve molekül ağırlığı dağılımına bağlı olarak değişir. Daha yüksek molekül ağırlığına sahip polimerlerin viskozite ve elastikiyeti, daha düşük molekül ağırlığına sahip olanlardan daha fazla olabilir (Bryson, 1970).

Moleküler yapı, moleküllerin düzeni ve geometrisiyle ilgilidir. Doğrusal, dallı, yıldız şeklinde veya ağ yapılı polimerler gibi farklı moleküler yapılar, malzemelerin reolojik özelliklerini etkiler.

Van der Waals kuvvetleri, hidrojen bağları ve elektrostatik etkileşimler gibi moleküler etkileşimler, malzemelerin reolojik özelliklerini etkiler. Şekil 2.19’de Wan der Waals bağ yapısı gösterilmiştir. Bu etkileşimler, moleküller arasında kuvvetler oluşturarak malzemelerin akış ve deformasyon davranışlarını değiştirir.



Şekil 2.19. Van der Waals bağ yapısı (URL-9)

Moleküler ağırlıkla birlikte viskozitenin hızla artması beklenir. Denklem (2.11) de gösterilen moleküler ağırlığın iki katına çıkmasının, belirli bir kayma gerilmesinde, termoplastikler için ilgi alanında olan moleküler ağırlık, M aralığında viskozitede, on katlık bir değişime neden olduğu bulunmuştur. Bu ilişki genellikle aşağıdaki şekilde ifade bulunur (Cogswell, 1981).

$$\eta = KM^{3.5} \quad (2.11)$$

Polimer çözelti ve eriyiklerin reolojik özellikleri, polimer ve çözücü molekülleri arasındaki etkileşimlerle belirlenir. Bu etkileşimler, polimer çözeltilerin viskozite, elastikiyet ve viskoelastikiyet gibi özelliklerini etkiler.

Polimer nanokompozitler, nanometre boyutlu dolgu maddeleri içeren polimer matrislerdir. Nanokompozitlerin reolojik özellikleri, dolgu maddesi ve polimer matrisi arasındaki etkileşimlerle belirlenir. Bu etkileşimler, nanokompozitlerin mekanik özelliklerini ve akış davranışlarını etkiler (Gupta, 2000).

1.7.2.5 Akış Geometrisi Etkisi

Akış geometrisi, malzemelerin reolojik özelliklerini etkileyen önemli bir faktördür. Akış geometrisi, bir malzemenin akış ve deformasyon özelliklerini belirleyen, malzemenin içindeki veya çevresindeki geometrik yapıdır.

Reolojik özellikler, malzemelerin viskozite, elastikiyet, viskoelastikiyet ve akış davranışı gibi mekanik özellikleriyle ilgilidir. Akış geometrisinin reolojiye etkisi, akış alanlarının şekli, boyutu ve yönelimi ile ilgilidir ve bu faktörler, malzemelerin işleme, üretim ve uygulamalarında önemli rol oynar.

Malzemelerin reolojik özellikleri, kayma ve gerilme düzeylerine bağlı olarak değişir. Akış geometrisi, kayma ve gerilme düzeylerini etkileyerek malzemelerin akış ve deformasyon davranışlarını değiştirir (Micheali, 1992).

Akış geometrisi, akış hızı ve süresini etkiler. Akış hızı ve süresi, malzemelerin viskozite, elastikiyet ve viskoelastikiyet gibi reolojik özelliklerini belirler. Akış geometrisi, akış alanlarının şekli ve boyutunu belirler. Akış alanlarının şekli ve boyutu, malzemelerin reolojik özelliklerini etkileyen gerilme ve deformasyon dağılımını etkiler. Akış geometrisi, akış yönelimini etkiler. Akış yönelimi, malzemelerin reolojik özelliklerini belirleyen ve akış ve deformasyon özelliklerini yönlendiren bir faktördür (Han, 1976).

(Cogswell, 1981) makalesi, akış geometrisinin reolojiye etkisini inceleyen önemli bir çalışmadır. Bu makale, ekstrüzyon ve enjeksiyon kalıplama gibi polimer işleme tekniklerinde kullanılan çeşitli akış geometrilerinin reolojik özellikler üzerindeki etkilerini inceler. Her bir akış geometrisi için reolojik modellerin geliştirilmesi ve uygulanması yoluyla, polimer akışkanlarının davranışının anlaşılmasına yönelik bir çerçeve sunar. Ayrıca, polimer akışkanlarının sıcaklığı, viskozite, elastikiyet ve diğer özellikleri ile akış geometrisinin tasarımı arasındaki ilişkiyi inceleyerek, polimer işleme tekniklerinin daha iyi optimize edilmesine katkı sağlar.

2.8. Reoloji Çalışmaları

2.8.1. Ekstrüzyon Basıncı Kesme Hızı Bağımlılığı

Ekstrüzyon basıncı kesme hızı bağımlılığı, polimerlerin şekillendirilmesi sırasında sıkça karşılaşılan bir fenomendir. Bu fenomen, polimerlerin viskoelastik doğası nedeniyle ortaya çıkar. Polimerler viskoelastik malzemelerdir, yani hem sıvı hem de katı davranışları sergilerler. Bu nedenle, polimerlerin şekillendirilmesi sırasında hem deformasyon hızı hem de basınç gibi faktörler, ekstrüzyon basıncını etkileyebilir (Gupra, 2000).

Ekstrüzyon işlemi, polimer malzemenin bir kalıp veya matris içinden geçirilerek bir şekile sokulmasıdır. Ekstrüzyon basıncı, malzeme akışkanlığını belirler ve bu akışkanlık da malzeme akış hızını ve sonuçta ürün özelliklerini etkiler. Ekstrüzyon basıncı,

malzemenin akışkanlığını etkileyen faktörlerden biridir ve bu faktörün çoğu zaman deformasyon hızıyla ilişkisi vardır.

Deformasyon hızı arttıkça, polimer malzeme daha fazla gerilir ve bu gerilme de malzemenin akışkanlığını artırır. Artan akışkanlık, ekstrüzyon basıncını da artırır. Bunun tersi de geçerlidir, yani deformasyon hızı azaldıkça, malzeme daha az gerilir ve akışkanlığı azalır. Bu da ekstrüzyon basıncını azaltır.

Örneğin, bir polimer malzemenin akışkanlık özelliklerini ölçmek için dinamik kesme reolojisi cihazı kullanılabilir. Bu cihaz, malzemeyi belirli bir frekansta kesme gerilimine maruz bırakarak malzemenin akışkanlık özelliklerini ölçer. Deformasyon hızı arttıkça, malzemenin akışkanlığı artar.

Kayma hızı ve ekstrüzyon basıncı arasındaki ilişki, polimer ürünlerinin üretiminde işlemi anlamak ve optimize etmek için önemlidir. Kayma hızı, kayma kuvvetlerine maruz kalan bir malzemenin hız gradyanını ölçerken, ekstrüzyon basıncı malzemeyi kalıptan geçirmek için gereken kuvvettir.

Kayma hızı ve ekstrüzyon basıncı arasındaki ilişki, malzemenin özelliklerine ve işlem koşullarına bağlı olarak değişebilir. Daha yüksek bir kayma hızı, malzemenin daha fazla işlenmesine neden olur ve bu da daha yüksek bir ekstrüzyon basıncına yol açar. Ayrıca, malzemenin viskozitesi de ekstrüzyon basıncını etkiler. Yüksek viskoziteli bir malzeme daha yüksek bir ekstrüzyon basıncı gerektirirken, düşük viskoziteli bir malzeme daha düşük bir ekstrüzyon basıncı gerektirir.

Kayma hızı ve ekstrüzyon basıncı arasındaki ilişki, özellikle polimerlerin üretimi için önemlidir. Polimerler, genellikle uzun zincirli moleküllerden oluşurlar ve bu nedenle işleme sırasında özel dikkat gerektirirler. Polimerlerin ekstrüzyon işlemi, polimeri kalıptan geçirerek istenen şekil ve boyuta getirir. Ancak, polimerlerin özellikleri, özellikle viskozitesi, ekstrüzyon işlemi için uygun olmayabilir.

Ekstrüzyon işlemi için en uygun kayma hızı ve ekstrüzyon basıncı, polimerin özelliklerine ve işlem koşullarına bağlı olarak belirlenir. Bu nedenle, polimerlerin işlenmesi için gerekli olan optimum koşulların belirlenmesi, üretim sürecinin verimliliği ve kalitesi için önemlidir.

2.8.2. Kalıp Geometrisine Bağlı Akış Eğrileri

Akış eğrileri, polimerlerin reolojik özelliklerinin incelenmesinde sıklıkla kullanılan bir yöntemdir. Polimerin viskozite davranışını tanımlayan akış eğrileri, bir malzemenin akışkanlığına ve akış direncine bağlı olarak şekillenir. Akış eğrileri genellikle viskozite veya kayma gerilimi ile akış hızı arasındaki ilişkiyi ifade ederler.

Akış eğrileri, özellikle ekstrüzyon işlemlerinde kullanılan kalıp geometrisine bağlı olarak değişebilir. Kalıp geometrisi, malzemenin akışkanlığı, akış hızı ve sıcaklığı gibi faktörlere göre optimize edilebilir. Bu nedenle, kalıp geometrisinin polimerlerin akış eğrilerine olan etkisi, ürün kalitesi ve verimliliği açısından önemlidir.

Kalıp geometrisinin akış eğrilerine olan etkisi, genellikle farklı kalıp açıklıkları ve kalıp uzunlukları kullanılarak incelenir. Örneğin, daha geniş bir kalıp açıklığı, malzemenin daha yüksek bir akış hızında akmasına izin verebilirken, daha uzun bir kalıp, malzemenin daha fazla şekillenmesine olanak tanıyabilir.

Ayrıca, kalıp geometrisinin malzemenin polimerizasyon derecesine ve molekül ağırlığına da etkisi olabilir. Özellikle, daha yüksek molekül ağırlığına sahip polimerler daha yüksek viskozite değerleri gösterirler ve bu nedenle daha geniş bir kalıp açıklığına veya daha uzun bir kalıba ihtiyaç duyabilirler.

Akış eğrileri ve kalıp geometrisi, polimerlerin ekstrüzyon işlemleri sırasında kullanılmasına ilişkin önemli bilgiler sağlayabilir. Bu bilgiler, ürün kalitesini ve üretim verimliliğini artırmak için kalıp geometrisinin nasıl optimize edileceği konusunda yol gösterici olabilir. Örneğin, daha geniş bir kalıp açıklığı veya daha uzun bir kalıp, daha yüksek üretim hızlarına izin vererek, üretim süresini kısaltabilir ve maliyetleri azaltabilir.

Kalıp geometrileri polimerik malzemelerin akış davranışını belirlemede önemli bir rol oynar. Kalıbın uzunluk-çap oranı, giriş açısı ve çıkış açısı gibi geometrik parametreleri, polimerik malzemenin akış özelliklerini büyük ölçüde etkiler. Bu nedenle, kalıp geometrisi, polimerik malzemelerin işlenmesi için kullanılan ekstrüzyon, enjeksiyon kalıplama, sıcak daldırma kalıplama ve diğer işleme yöntemlerinde önemli bir tasarım parametresidir.

Bir kalıbın geometrisi, malzeme akış hızını ve basıncını etkileyerek, malzemenin akış davranışını değiştirir. Bu, kalıp tasarımının optimize edilmesi gerektiği anlamına gelir, çünkü yanlış bir kalıp tasarımı, istenmeyen akış davranışlarına neden olabilir. Örneğin, kalıp tasarımı, malzemenin yeterince karışmamasına neden olabilir, böylece malzeme homojen olmayan bir şekilde kalıba aktarılır. Bu da malzeme özellikleri üzerinde olumsuz etkileri olabilir.

Kalıp geometrisi, akış hızı dağılımı, kesme oranı, türbülans ve akış aşınması gibi akış özelliklerini de etkiler. Akış hızı dağılımı, malzemenin kalıp içindeki farklı bölgelerde farklı hızlarda akmasına neden olabilir. Kesme oranı, malzemenin kesilmesi veya karıştırılması sırasında uygulanan zorluğu ifade eder. Kalıp geometrisi, kesme oranını etkileyerek, malzemenin akış davranışını da değiştirir. Türbülans, malzemenin hızlı bir şekilde hareket ederek, farklı akış hızlarına neden olmasıdır. Akış aşınması ise, malzemenin kalıp yüzeyi ile teması sırasında aşınmaya uğramasına ve malzeme özelliklerinin bozulmasına neden olabilir.

Bir malzemenin akış davranışını karakterize etmek için, farklı kalıp geometrileri kullanılabilir. Bu kalıplar, farklı kesit alanlarına sahip olan ve farklı uzunluk-çap oranlarına sahip olan kalıplardan oluşur. Malzeme, kalıp içinde bir basınç altında zorlanarak, farklı kesme oranlarına ve akış hızlarına maruz kalır. Böylece elde edilen akış eğrileri, malzemenin akış davranışını tanımlamak için kullanılabilir.

2.8.3. Sıcaklığın Akış Eğrileri İlişkisi

Akış eğrileri, polimerlerin viskozite özelliklerinin analiz edilmesinde önemli bir araçtır. Sıcaklık, polimerlerin akış eğrilerine önemli ölçüde etki eder. Genellikle, polimerlerin viskozitesi sıcaklık arttıkça azalır. Bunun nedeni, sıcaklığın polimer moleküllerinin hareketliliğini artırmasıdır. Bu moleküler hareketlilik artışı, polimer zincirlerinin daha rahat hareket etmesine izin verir ve bu da viskoziteyi azaltır. Sıcaklık arttıkça, polimer zincirlerinin sıvılaşma sıcaklığına yaklaşması nedeniyle, polimer viskozitesi daha da azalır. Bu nedenle, akış eğrileri, sıcaklık değişimlerine karşı duyarlıdır ve sıcaklık kontrolü gerektiren polimer işlemede önemlidir.

Polimerlerin sıcaklığa duyarlılığı, polimerin yapısal özelliklerine, molekül ağırlığına ve molekül dağılımına bağlıdır. Örneğin, lineer polimerler genellikle sıcaklığa daha duyarlıdır ve molekül ağırlığı arttıkça daha az sıcaklık duyarlı hale gelirler. Diğer yandan, geniş molekül dağılıma sahip polimerler, sıcaklık duyarlılığı daha yüksek olabilir. Bu nedenle, polimer üreticileri, polimerin sıcaklık duyarlılığını, polimerin yapısını ve molekül özelliklerini belirlemek için akış eğrilerini kullanırlar (Shaw ve MacKnight, 2018).

Akış eğrilerinin sıcaklık etkisi, endüstriyel uygulamalarında önemli bir rol oynar. Polimerlerin akış eğrileri, örneğin enjeksiyon kalıplama, ekstrüzyon, döküm ve kaplama gibi işlemler sırasında sıcaklık kontrolünün kritik olduğu yerlerde kullanılır. Bu işlemler sırasında, polimerin akış özellikleri, kalıp veya makineye bağlı olarak değişebilir. Bu nedenle, işlem sıcaklığı, polimerin doğru şekilde şekillenmesini sağlamak için çok önemlidir (Macosko, 1994).

Örneğin, enjeksiyon kalıplama işleminde, polimer eritme sıcaklığı, polimerin doğru şekilde akışını sağlamak için kritiktir. İşlem sıcaklığı, polimerin akış eğrilerine doğrudan etki eder ve bu nedenle, kalıp tasarımı ve işlem parametreleri için doğru sıcaklık aralığının belirlenmesi gereklidir.

Sıcaklığın akış eğrileri üzerindeki etkisi, polimerlerin akışkanlık özelliklerinin anlaşılması açısından önemlidir. Sıcaklık, polimer zincirlerinin hareketliliği ve düzenliliği üzerinde doğrudan bir etkiye sahiptir ve bu da polimerin akışkanlığına yansır. Polimerin sıcaklığa duyarlılığı, endüstriyel uygulamalar için önemli bir özelliktir, çünkü malzemelerin kullanım sıcaklıkları değişebilir.

Polimerlerin sıcaklığa duyarlılığı, malzemenin viskozitesi ve akışkanlık davranışı ile ilgilidir. Sıcaklık arttıkça, polimer zincirlerinin hareketliliği artar ve polimerin viskozitesi düşer. Bu, polimerin daha az dirençle akmasına ve daha yüksek bir akış hızına sahip olmasına neden olur. Sıcaklık azaldıkça, polimer zincirlerinin hareketliliği azalır ve polimerin viskozitesi artar. Bu, polimerin daha yüksek dirençle akmasına ve daha düşük bir akış hızına sahip olmasına neden olur.

Polimerin sıcaklığa duyarlılığı, polimerin üretimi, işlenmesi ve kullanımı açısından önemlidir. Polimerlerin üretimi sırasında, malzemenin sıcaklıkla çalışma aralığı, polimerin istenen özelliklerini elde etmek için ayarlanabilir. İşleme sırasında, sıcaklık kontrolü, malzemenin akışkanlık özelliklerinin ve işlenme performansının optimize edilmesine yardımcı olur. Son olarak, polimerlerin kullanımı sırasında, sıcaklık kontrolü, malzemenin istenilen performans özelliklerinin korunmasına yardımcı olur (Cogswell, 1981).

Akış eğrileri, polimerin viskozitesinin değişimi ile ilgili bilgi sağlar ve polimerin akışkanlık davranışını tanımlar. Sıcaklık, polimerin akışkanlık özellikleri üzerinde doğrudan bir etkiye sahip olduğundan, akış eğrileri de sıcaklığa bağlıdır. Akış eğrileri, polimerin işlenmesi ve kullanımı sırasında malzemenin performansının değerlendirilmesinde önemlidir.

Akış eğrilerinin sıcaklıkla nasıl değiştiği konusunda yapılan çalışmalar, farklı malzemelerin işlenmesinde kullanılan teknikleri optimize etmek için kullanılabilir. Bu çalışmalar, malzemelerin işlenebilirliğinin artırılmasına, işleme sürelerinin kısaltılmasına ve maliyetlerin azaltılmasına yardımcı olabilir. Bu nedenle, sıcaklığın akış eğrilerine etkisi, malzeme işleme endüstrisi için önemli bir araştırma konusudur (Yanovsky, 2012).

2.8.4. Viskozite Model Doğrulama

Viskozite modellerinin doğrulanması, bir polimerin akışkanlık özelliklerinin doğru bir şekilde tahmin edilebilmesi için önemlidir. Viskozite modelleri, polimer çözelti ve eriyiklerinin akışkanlık özelliklerini hesaplamak için kullanılır. Bu modeller, polimerin kimyasal özellikleri, molekül ağırlığı, dağılımı ve çözelti ortamı ile etkileşimleri gibi faktörleri dikkate alarak oluşturulur. Ancak, bu modellerin doğruluğu, modelin uygulandığı polimer sistemi ve uygulama koşulları ile ilgilidir.

Viskozite modellerinin doğrulanması, modelin polimer çözeltisi veya eriyiği için uygunluğunu belirlemek için kullanılır. Bu, modelin polimer çözeltisi veya eriyiği özelliklerini tam olarak yansıttığından emin olmak için önemlidir. Bu nedenle, polimer çözeltisi veya eriyiğinin viskozitesi deneysel olarak ölçülür ve model tarafından

hesaplanan viskozite değerleri ile karşılaştırılır. Eğer modelin tahminleri ölçümlerle uyumluysa, model doğrulanmış olur. Polimerlerin doğru viskozite davranışları, polimerin işleme özellikleri, ürün kalitesi ve verimliliği açısından kritiktir. Özellikle, polimer işleme teknolojileri için, akışkanlık özellikleri ve akışkanlık modelleri, proses tasarımı ve optimizasyonu için önemlidir (Brostow ve diğ., 2008).

Viskozite modelleri aynı zamanda yeni polimer materyallerin geliştirilmesi ve karakterizasyonu için de önemlidir. Polimer bilimciler, yeni polimer malzemelerinin akışkanlık özelliklerini öngörmek için viskozite modellerini kullanırlar. Bu modeller, polimer malzemenin farklı endüstriyel ve bilimsel uygulamalar için uygunluğunu belirlemek için de kullanılır. Bunlar genellikle viskozite, sıcaklık, basınç ve kesme hızı gibi faktörlere bağlıdır. Ancak, model parametrelerinin belirlenmesi, bazen zor ve zaman alıcı olabilir (Özen ve Kalyon, 2008)

Doğrulama, bir viskozite modelinin doğruluğunu ve tahmin etme yeteneğini değerlendirmek için kullanılan bir süreçtir. Bu süreçte, deneysel veriler, modelin tahminlerine karşı doğrulanır ve modelin performansı değerlendirilir. Doğrulama, modelin kullanıldığı polimer işleme sürecinde başarılı bir şekilde kullanılabileceğinden emin olmak için önemlidir.

Bununla birlikte, viskozite modelleri, polimer işleme işlemlerinin karmaşıklığı nedeniyle her zaman doğru sonuçlar vermezler. Bu nedenle, doğrulama süreci, modelin doğruluğunu artırmak için model parametrelerinin ayarlanması ve belirlenmesi gibi işlemlerle sürekli olarak iyileştirilmelidir.

Viskozite modellerinin doğrulanması ve karakterizasyonu için birçok yöntem vardır. Bunlar arasında dinamik mekanik analiz (DMA), dinamik çekiş testleri, reolojik testler, gözeneklilik analizleri ve manyetik rezonans görüntüleme (MRI) gibi teknikler bulunmaktadır. Bu yöntemler, viskozite modellerinin doğruluğunu artırmak için bir araç olarak kullanılabilir (Piccarolo ve diğ., 2012).

2.9. Kayma Reolojisi

Kayma reolojisi, kauçukların akış davranışını karakterize etmek için kullanılan bir yöntemdir. Kayma reolojisi, kauçukların katı halde davranışını tanımlayan, çeşitli

mekanik parametreleri ölçen ve bu parametrelerin çeşitli koşullar altında nasıl değiştiğini inceleyen bir araçtır. Kayma reolojisi, çeşitli sıcaklıklar ve hızlarda farklı malzemelerin akış davranışını inceler. Bu sayede, farklı kauçukların reolojik davranışlarının anlaşılması ve performanslarının iyileştirilmesi mümkün hale gelir (Kamal ve diğ., 2021).

Kauçukların kayma reolojik özellikleri, genellikle kauçuk karışımının hazırlanmasından başlayarak, karışımın kalitesinin kontrol edilmesine kadar birçok farklı aşamada belirlenir. Kayma reolojik özelliklerin belirlenmesi, karışımın sıcaklığı, süresi, viskozitesi, elastikiyeti ve diğer parametreleri gibi birçok farklı faktöre bağlıdır. Bu nedenle, kauçuk endüstrisinde reoloji çalışmaları, malzeme bilimi, kimya ve mühendislik bilimlerinin birleştiği bir alan olarak kabul edilir.

Kayma reolojik özelliklerin belirlenmesinde kullanılan cihazlar arasında kapiler reometreler, plaka-disk reometreler, paralel plaka reometreler ve dinamik mekanik analiz cihazları yer alır. Bu cihazlar, kauçuk malzemelerinin viskozite, elastikiyet ve diğer özelliklerini ölçmek için tasarlanmıştır. Kauçuk endüstrisi, uzun yıllardır kayma reoloji ve diğer reolojik çalışmaların faydalarını fark etmiştir. Kauçuk ürünleri üretirken, reolojik özelliklerin karakterizasyonu, proses kontrolü ve kalite kontrolü için kritik önem taşır (Eisa ve Al-Masry, 2007).

Kauçuğun reolojik özellikleri, üretim sürecinde çok önemli bir rol oynar. Kauçuğun işlenmesi sırasında, özellikle karmaşık şekilli ürünlerin üretiminde, malzemenin akışkanlığına ve viskoelastik davranışına dikkat edilmesi gerekir.

Sabit bir kayma deneyinden, üç malzeme fonksiyonu ölçülebilir: viskozite (η), birinci ve ikinci normal gerilme farkları (N_1 ve N_2), bunlar daha önce “1.7. Reoloji” bölümünde açıklanmıştır. Bu fonksiyonlar arasında, viskozite en basit ve en önemli fonksiyondur ve kayma gerilmesi, τ , ile kayma hızı, $\dot{\gamma}$, oranı olarak tanımlanır.

Denklem (2.12), viskozitenin aslında çoğu polimer akışı için kayma hızının bir fonksiyonu olduğunu gösteren denklemi temsil etmek için modifiye edilmiş bir yoldur (Kamal ve diğ., 2021).

$$\eta(\dot{\gamma}) = \frac{\tau}{\dot{\gamma}} \quad (2.12)$$

Eğer viskozite zaman ve kayma hızından bağımsızsa, sıvı Newtonyen olarak tanımlanır, aksi takdirde Newtonyen olmayan olarak tanımlanır. Bazı sıvılar için, akış için kritik gerilme ek özellik (τ_y) de belirlenebilir. Viscoelastic sıvılar söz konusu olduğunda, yani viskoz özelliklerle birlikte esneklik sergileyen sıvılar, normal gerilme farkları (N1 ve N2) sergiler.

Kayma reolojisi, bir malzemenin viskoelastik davranışını tanımlayan bir dizi parametre içerir. Bu parametreler, malzemenin viskoz ve elastik bileşenlerinin etkisini gösterir. Kayma reolojisi, malzemelerin gerçek davranışını doğru bir şekilde tanımlayabilen bir modeldir ve bu nedenle, malzeme tasarımı, endüstriyel uygulamalar ve diğer pek çok alanda önemlidir.

Kayma reolojisi, bir malzemenin kayma davranışını modellemek için bir dizi matematiksel denklem kullanır. Bu denklemler, malzemenin viskoz ve elastik bileşenlerinin etkisini gösterir ve malzemenin kayma gerilmesi ve deformasyonu arasındaki ilişkiyi açıklar. Kayma reolojisi, gerçek malzemelerin viskoelastik davranışlarını doğru bir şekilde modelleyebilir ve bu nedenle, malzeme tasarımı ve endüstriyel uygulamalar için önemlidir.

Kayma reolojisi, malzemelerin kayma davranışını incelemek için farklı yöntemler kullanır. En yaygın kullanılan yöntemlerden biri, malzemenin kayma gerilmesi ve deformasyonu arasındaki ilişkiyi belirlemek için bir kayma hücresi kullanmaktır. Kayma hücresi, iki paralel plaka arasında sıkıştırılmış bir malzemeyi tutar. Malzeme, bir plaka üzerinde kayarken, kayma gerilmesi ve deformasyon ölçülebilir. Bu veriler, malzemenin viskoelastik davranışını tanımlamak için kullanılabilir.

Kayma reolojisi, malzemelerin viskoelastik davranışını tanımlayan bir dizi parametre içerir. Bu parametreler, malzemenin kayma gerilmesi, kayma hızı ve sıcaklık gibi faktörlerin etkisini gösterir. Kayma reolojisi, bu parametrelerin değişimini hesaba katarak, malzemelerin gerçek davranışını tanımlayabilen bir modeldir.

2.9.1. Dinamik Kayma Reolojisi

Dinamik kayma reolojisi malzemelerin kayma davranışlarını ölçen bir yöntemdir. Bu yöntem genellikle sıvıların ve yarı katıların özelliklerinin belirlenmesinde kullanılır. Dinamik kayma reolojisi, özellikle polimer ve kauçuk gibi malzemelerin özelliklerinin belirlenmesinde önemlidir. Bu özellikler, malzemenin işlevselliği, işlemesi ve üretilebilirliği hakkında bilgi verir.

Dinamik kayma reolojisi ölçümleri, dinamik bir şekilde malzemenin şekil değiştirme davranışını inceler. Bu ölçümler, malzeme akışkanlığı, kıvamı, viskozitesi ve elastik modülünü belirlemeye yardımcı olur. Bu özellikler, malzemenin işlenmesi, akışkanlığı, dayanıklılığı ve diğer özellikleri üzerinde etkili olabilir (Lu ve Quin, 2019).

Dinamik kayma reoloji ölçümleri, malzemenin davranışını bir spektrometre aracılığıyla ölçerek gerçekleştirilir. Bu yöntemde, malzeme test edilirken kayma kuvveti ve kayma hızı ölçülür. Bu veriler, malzemenin viskozitesini, elastikiyet modülünü ve diğer özelliklerini hesaplamak için kullanılır (Papadopoulou ve diğ., 2020).

Denklem (2.13)'de γ_0 uygulanan deformasyonun genliği veya maksimumu ve ω salınım frekansıdır. Osilasyonlu kayma nedeniyle oluşan kayma gerilmesi de sinüzoidal olacak, ancak deformasyon dalga formuna göre bir faz açısı, λ , ile faz kayması yaşayacaktır (Ariff,2003).

$$\gamma = \gamma_0 \sin(\omega t) \quad (2.13)$$

Denklem (2.14)'te γ_0 uygulanan deformasyonun genliği veya maksimumu ve ω salınım frekansıdır. Osilasyonlu kayma nedeniyle oluşan kayma gerilmesi de sinüzoidal olacak, ancak deformasyon dalga formuna göre bir faz açısı, λ , ile faz kayması olacaktır(Ariff, 2003):

$$\tau = \tau_0 \sin(\omega t + \lambda) \quad (2.14)$$

Trigonometri çözümlemesinden, gerilme dalgası iki bileşene ayrılabilir, yani biri fazda ve diğeri 90° dış fazda. İki malzeme fonksiyonu, G' ve G'' sırasıyla Denklem (2.15)'deki gibi türetilir (Ariff, 2003).

$$\tau = \gamma_0 [G' \sin(\omega t) + G'' \cos(\omega t)] \quad (2.15)$$

Elastik modül matematiksel modeli Denklem (2.16)'da gösterilmiştir (Ariff, 2003).

$$G' = \left(\frac{\tau_0}{\gamma_0}\right) \cos \lambda \quad (2.16)$$

Viskoz modül matematiksel modeli Denklem (2.17)'da gösterilmiştir (Ariff, 2003).

$$G'' = \left(\frac{\tau_0}{\gamma_0}\right) \sin \lambda \quad (2.17)$$

Kompleks modül matematiksel modeli Denklem (2.18)'da gösterilmiştir (Ariff, 2003).

$$G^* = \frac{\tau_0}{\gamma_0} = \sqrt{(G')^2 + (G'')^2} \quad (2.18)$$

Deformasyonun hızıyla olan ilişkisini ve modülün viskoziteyle olan ilişkisini göz önünde bulundurarak, başka bir önemli parametre türetilebilir, yani karmaşık viskozite aşağıdaki denklemle verilir.

Kompleks viskozite matematiksel modeli Denklem (2.19) ve Denklem (2.20)'de gösterilmiştir (Ariff,2003).

$$\eta^* = \frac{\tau_0}{\gamma_0 \omega} = \frac{\tau_0}{\dot{\gamma}} = \sqrt{\left(\frac{G'}{\omega}\right)^2 + \left(\frac{G''}{\omega}\right)^2} \quad (2.19)$$

$$\eta = \frac{G}{\omega} = \frac{\tau_0}{\gamma_0 \omega} \quad (2.20)$$

Elastik veya depolama modülü, G' , uygulanan deformasyonla fazda olan gerilme ile ilişkilidir ve malzemenin elastik doğası hakkında bilgi sağlar. Viskoz veya kayıp modülü, G'' , deformasyonla 90° dış fazda olan gerilme bileşenini tanımlar. Bu parametre malzemenin viskoz doğasını karakterize eder. Karmaşık viskozite, η^* G' ve G'' den türetilir ve genellikle Cox ve Merz (1958) tarafından bulunduğu gibi, çoğu sıvı için sabit kayma viskozitesine eşittir ve bu eşdeğerlik deneysel Cox-Merz kuralı olarak bilinir.

Dinamik kayma reoloji ölçümleri, malzemelerin sıvılaşma, çökme ve diğer davranışlarını belirlemek için de kullanılır. Örneğin, polimer çözeltilerinin viskozitesi ve stabilitesi gibi faktörler, bu ölçümler aracılığıyla belirlenebilir (Smitthipong ve Koonsaeng, 2017).

2.10. Reoloji Modelleri

2.10.1. Cross Modeli

Cross modeli, malzemelerin reolojik davranışını tanımlayan bir modeldir. Bu model, malzemelerin viskoelastik davranışlarını birleştirir ve viskoz ve elastik bileşenlerin etkisini gösterir. Cross modeli, malzemelerin reolojik özelliklerini hesaplamak için bir dizi matematiksel denklemden oluşur. Bu denklemler, malzemenin gerilme-deformasyon davranışını tanımlayan bir dizi parametre içerir. Bu parametreler, malzemenin viskoz ve elastik bileşenlerinin etkisini gösterir.

Cross modeli

$$\frac{\eta - \eta_{\infty}}{\eta_0 - \eta_{\infty}} = \frac{1}{1 + (K\dot{\gamma})^m} \quad (2.21)$$

Denklem (2.21)'de η_0 ve η_{∞} sırasıyla çok düşük ve çok yüksek kayma hızlarında viskozitenin asimptotik değerlerini ifade eder. K, zamanın boyutuyla birlikte sabit bir parametredir ve alternatif olarak aşağıdaki formülle temsil edilebilir (Morrison,2001).

$$K = \frac{1}{\dot{\gamma}_b} \quad (2.22)$$

Denklem (2.22)'de $\dot{\gamma}_b$, η 'nin kayma hızını karakterize eder.

Cross modeli, malzemenin viskoz ve elastik özelliklerini birleştirerek, malzemenin reolojik davranışını tanımlar. Bu model, Maxwell modeli ve Kelvin-Voigt modelinin birleştirilmesinden oluşur. Maxwell modeli, malzemenin viskoz davranışını, Kelvin-Voigt modeli ise malzemenin elastik davranışını tanımlar (Morrison,2001).

Cross modeli, Maxwell modelindeki viskoz bileşenin, Kelvin-Voigt modelindeki elastik bileşenin üzerine eklendiği bir yapıdadır. Bu model, malzemenin viskoelastik davranışını birleştirir ve malzemenin gerilme-deformasyon davranışını modellemek için kullanılır. Cross modeli, gerçek malzemelerin viskoelastik davranışını doğru bir şekilde tanımlar ve malzemelerin reolojik davranışlarının hesaplanması için kullanılır.

Cross modeli, gerçek malzemelerin reolojik davranışlarını doğru bir şekilde tanımlayabilen bir modeldir. Bu model, viskoz ve elastik davranışların birleştirilmesiyle

malzemenin gerçek davranışını hesaplayabilir. Bu nedenle, Cross modeli, malzeme tasarımı, endüstriyel uygulamalar ve diğer pek çok alanda önemlidir.

Cross modeli, gerilme-deformasyon davranışını modellemek için kullanılır. Bu model, gerilme-deformasyon davranışının zaman ve sıcaklıkla nasıl değiştiğini hesaba katarak malzemenin reolojik davranışını tanımlar. Cross modeli, malzemelerin gerçek davranışını doğru bir şekilde tanımlayabilen bir modeldir.

2.10.2. Maxwell Modeli

Maxwell Modeli, reoloji ve viskoelastik malzemelerin davranışını inceleyen fiziksel bir modeldir. Bu model, İskoç fizikçi ve matematikçi James Clerk Maxwell tarafından 19. yüzyılda geliştirilmiştir. Viskoelastik malzemeler, elastik ve viskoz özelliklere sahip malzemelerdir. Maxwell modeli, bu tür malzemelerin mekanik davranışlarını anlamaya yardımcı olmak için basit yay ve sönümleme elemanlarının seri bağlantısıyla gösterir (Ferry, 1980).

Maxwell modelinin sınırlamaları gerçek dünya malzemelerinin daha karmaşık viskoelastik davranışlarını tam olarak temsil etmeyebilir. Sadece lineer viskoelastik davranışlar için geçerlidir. Çok sayıda bileşen içeren karmaşık malzemeler için uygulanması zordur.

Maxwell modeli, bir yay ve bir dashpot'un seri bağlantısı olarak gösterilir. Bu, elastik (yay) ve viskoz (dashpot) özelliklerin bir araya gelerek malzemenin viskoelastik özelliklerini oluşturduğunu gösterir (Maxwell, 1867).

Modelin temel denklemleri:

$$\sigma(t) = E_\epsilon(t) + \eta\left(\frac{\delta_\epsilon(t)}{\delta_\epsilon}\right) \quad (2.23)$$

Denklem (2.23)'te $\sigma(t)$ gerilme, $\epsilon(t)$ deformasyon, E elastik modül, η viskozite ve t zamandır (Maxwell, 1867). Modelin amaçları şunlardır:

Malzemenin elastik ve viskoz bileşenlerinin etkileşimini anlamak ve zamanla değişen mekanik tepkileri tahmin etmektir. Viskoelastik malzemelerin gerilme ve deformasyon ilişkisini incelemek için kullanılır (Findley ve Davis 2013).

2.11. Viskoz Akış Modelleri

Viskozite, bir sıvının direncini ifade eden bir ölçüttür. Bir sıvının viskozitesi, sıvının içindeki moleküllerin birbirlerine olan sürtünmesi nedeniyle meydana gelen sürtünme kuvvetlerine bağlıdır. Bu sürtünme kuvvetleri, sıvının içindeki moleküllerin hareketini engeller ve sıvının akışını yavaşlatır. Dolayısıyla, bir sıvının viskozitesi, sıvının içindeki moleküllerin hareketinin zorluğuna bağlıdır.

Viskozite, farklı ölçü birimleri kullanılarak ifade edilebilir. Bu ölçü birimleri arasında Pascal saniye (Pa.s), poise (P), centipoise (cP) ve centistokes (cSt) bulunur.

Viskozite, birçok teknolojik uygulama için önemli bir özellik olduğu için, sıvıların viskozitesinin doğru bir şekilde ölçülmesi önemlidir. Bu nedenle, viskozite ölçümleri için farklı teknikler kullanılır. Duyarlılık, doğruluk, tekrarlanabilirlik, çözünürlük ve hız gibi faktörler, bir viskozite ölçüm yönteminin seçilmesinde önemli rol oynar.

Viskozite ölçümü için en yaygın kullanılan yöntemlerden biri, saydam bir viskozimetre tüpü içindeki sıvının, tüpün içindeki sürtünme kuvveti ile hareket ettiği zaman ölçülen süreyi kullanmaktır.

Tüpün boyutu ve sıvının hareket hızı, viskozite ölçümü için önemli faktörlerdir. Sıvının viskozitesi, sıvının hareket hızına göre değiştiğinden, tüpün çapı ve uzunluğu, sıvının hareket hızını etkiler ve doğru bir ölçüm yapılması için bu faktörlerin dikkate alınması gerekir.



Şekil 2.20. Viskozimetre tüpü (URL-10)

Viskozite ölçümü için kullanılan bir diğer yöntem, bir kapalı borudan geçen sıvıdaki basınç kaybını ölçmektir. Şekil 2.20’de viskozimetre tüpü gösterilmiştir. Bu yöntem, sıvının akış hızına göre değişen viskozitesi olan sıvıların ölçümünde de kullanılabilir. Yöntemin doğruluğu, sıvının basınç kaybı ve akış hızı arasındaki doğrusal ilişkiden kaynaklanır. Viskozite, birçok endüstride önemli bir rol oynadığı için, farklı sıvıların viskozitelerini ölçmek için çeşitli teknikler ve cihazlar geliştirilmiştir. Bu cihazlar arasında rotovisko, kapiler viskozimetre, manyetik alan viskozimetre, ultrasonik viskozimetre ve akışkan akışı analizörü bulunur.



Şekil 2.21. Rotovisko cihaz (URL-11)

Rotovisko, viskozite ölçmek için kullanılan bir cihazdır ve Şekil 2.21’de cihaz gösterilmiştir. Bu cihaz, bir rotorun sıvı içindeki hareketine karşı direnci ölçerek viskozitenin belirlenmesini sağlar. Kapiler viskozimetre, sıvının belirli bir tüpten akmasının süresini ölçerek viskozitenin belirlenmesini sağlar. Manyetik alan viskozimetre, sıvının akışkanlığını manyetik alan kullanarak ölçer. Ultrasonik viskozimetre, sıvının akışkanlığını ultrasonik dalga boyunca ölçer.

2.11.1. Power Law

Power Law modeli, viskozitenin ölçülmesinde yaygın olarak kullanılan bir modeldir. Bu model, bir sıvının viskozitesini, kesme hızı ve kuvveti arasındaki ilişkiyi açıklamak için kullanılır. Bu model, sıvının içsel direnci ve akışkan dinamiği özellikleri hakkında önemli bilgiler sağlar. Denklem 2.24’de Power law modeline ait denklem gösterilmiştir (Thakur ve Gupta, 2009).

$$\eta = a^n_T K \cdot \dot{\gamma}^{(n-1)} \quad (2.24)$$

Power Law modeli, sıvının akışkanlık özelliğini tanımlayan bir matematiksel modeldir. Bu modelde, sıvının viskozitesi bir kesme hızı fonksiyonu olarak ifade edilir. Bu fonksiyon, sıvının kesme hızı ile viskozitenin arasındaki ilişkiyi ifade eder. Power Law modelinde, sıvının viskozitesi Denklem (2.25)'daki gibi ifade edilir.

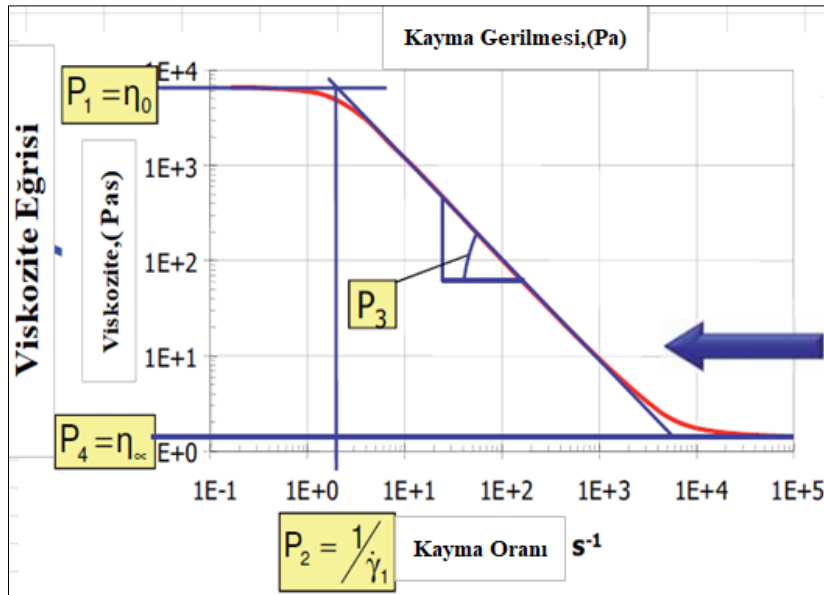
$$\tau = K \dot{\gamma}^n \quad (2.25)$$

Denklem (2.25)'de τ kesme gerilmesi, $\dot{\gamma}$ kesme hızı, K model sabiti ve n Power Law indeksi olarak bilinir (Thakur ve Gupta, 2009)..

Özellikle, çok yüksek veya çok düşük viskoziteye sahip sıvılar için Power Law modeli uygun değildir (Wiederseiner ve diğ., 2005).

2.11.2. Carreau Viskozite Modeli

Carreau viskozite modeli, birçok viskozite modeli gibi, viskoziteyi kesme hızı ve kesme gerilmesi arasındaki ilişki olarak ifade eder. Ancak, Carreau modeli, viskozitenin sadece kesme hızına değil, aynı zamanda sıvının yapısına da bağlı olduğunu varsayar. Bu nedenle, Carreau modeli, bir sıvının viskozitesinin değişkenliğini ifade edebilir. Carreau model eğrisi Şekil 2.22'te gösterilmiştir.



Şekil 2.22. Carreau model eğrisi (Duretek,2005)

Carreau modeli, birçok farklı bileşenli sıvılar için uygun olabilir. Bu modellerin bir avantajı, sıvının yapısına bağlı olarak değişen bir viskozite fonksiyonu sağlamasıdır.

Carreau modeli;

$$\eta = \eta_0 + (\eta_\infty - \eta_0) \left(1 + (\lambda \dot{\gamma})^2 \right)^{\left(\frac{n-1}{2} \right)} \quad (2.26)$$

Denklem (2.26)'da η_0 , λ , η ve η_∞ , model parametreleri olarak bilinir. η_0 , sıvının düşük kesme hızında viskozitesini ifade eder. λ , sıvının karakteristik kesme hızını ifade eder. η , sıvının viskozitesindeki değişiklikleri ifade eder. η_∞ , ise, yüksek kesme hızında sıvının viskozitesini ifade eder (Carreau, 1972).

Carreau modelinin önemli uygulaması, polimer endüstrisidir. Polimerlerin viskozitesi, polimerlerin üretiminde ve işlenmesinde çok önemlidir. Carreau modeli, polimer viskozitesinin ölçülmesinde kullanılır ve polimer üretim sürecinin verimliliğini artırır.

2.11.3. Modified Carreau Modeli

Modified Carreau model (MCM), bir sıvının viskozitesini ölçmek için kullanılan bir matematiksel modeldir. MCM, Carreau modelinin bir varyasyonudur ve sıvının akışkanlık özelliklerini daha doğru bir şekilde ifade edebilir.

MCM, bir sıvının viskozitesinin değişkenliğini, sıvının kesme hızına ve sıcaklığına göre değişen bir şekilde ifade eder. Bu model, birçok endüstriyel uygulamada kullanılır ve sıvının akışkanlık özelliklerinin doğru şekilde ölçülmesini sağlar. MCM, Carreau modeli gibi birçok bileşenli sıvı için uygun olabilir.

$$\eta = \eta_0 + (\eta_\infty - \eta_0) \left(1 + (\lambda \dot{\gamma})^a \right)^{\left(\frac{n-1}{a} \right) \exp(-\beta(T-T_0))} \quad (2.27)$$

Denklem (2.27)'de η_0 , λ , η , η_∞ , a , β , T ve T_0 , model parametreleri olarak bilinir. η_0 , sıvının düşük kesme hızında viskozitesini ifade eder. λ , sıvının karakteristik kesme hızını ifade eder. η , MCM'nin Power Law indeksidir ve sıvının viskozitesindeki değişiklikleri ifade eder. η_∞ , yüksek kesme hızında sıvının viskozitesini ifade eder. a , bir kesme hızı bağımlılık parametresidir. β ise sıcaklık bağımlılık parametresidir ve T , sıcaklığı ifade eder. T_0 , referans sıcaklığıdır (Liu ve diğ., 2022).

MCM, birçok endüstriyel uygulama için önemlidir. Örneğin, polimer endüstrisinde, MCM, polimer viskozitesini ölçmek için kullanılır ve polimer üretim sürecinin verimliliğini artırır.

MCM'nin bir diğer avantajı, sıvının viskozitesindeki değişkenliği daha doğru bir şekilde ifade edebilmesidir. Özellikle yüksek sıcaklıklarda, sıvıların viskozitesi genellikle değişir ve bu değişkenlik, bazı modeller tarafından tam olarak ifade edilemeyebilir. Ancak, MCM'nin sıcaklık bağımlılık parametresi (β), sıvının sıcaklığına bağlı olarak viskozitenin değişkenliğini ifade eder. Bu, MCM'nin sıvıların akışkanlık özelliklerini daha doğru bir şekilde ölçmesine olanak tanır.

MCM'nin bir başka avantajı, sıvının akışkanlık özelliklerindeki Newtonian olmayan etkileri de dikkate almasıdır. Newtonian sıvılar, sıvıların viskozitesinin kesme hızına bağlı olmadığı anlamına gelir. Ancak, birçok sıvı, özellikle bileşenli sıvılar, Newtonian olmayan davranış gösterir. Bu sıvılar, sıvının kesme hızı ve yapısına bağlı olarak viskozitesinde değişiklikler gösterir. MCM, bu Newtonian olmayan etkileri de dikkate alarak, sıvının viskozitesini daha doğru bir şekilde ifade eder (Toğrul ve Arslan, 2005).

2.11.4. Arrhenius Denklemi

Arrhenius denklemi, kimyasal reaksiyonların hızını sıcaklıkla ilişkilendiren bir matematiksel modeldir. Bu denklem, sıcaklığın kimyasal reaksiyon hızı üzerindeki etkisini incelemek için kullanılır. Arrhenius denklemi, birçok endüstriyel uygulamada ve bilimsel araştırmada kullanılır.

Arrhenius denklemi, 1889 yılında İsveçli kimyager Svante Arrhenius tarafından keşfedildi. Arrhenius, bu denklemi, kimyasal reaksiyonların sıcaklıkla değişen hızını açıklamak için geliştirdi (Klinowski ve Packer 1982).

Arrhenius denklemi, aşağıdaki formülasyona sahiptir:

$$K = A_e - \frac{E_a}{RT} \quad (2.28)$$

Denklem (2.28)'de K , kimyasal reaksiyonun hızını ifade eder. A_e , preeksponansiyel faktördür ve reaksiyonun entropi ve aktivasyon enerjisi ile ilgilidir. E_a , aktivasyon

enerjisini ifade eder. R , gaz sabiti olarak bilinir ve T , sıcaklığı ifade eder (Arrhenius, 1889).

Arrhenius denklemi, sıcaklığın kimyasal reaksiyon hızı üzerindeki etkisini incelemek için kullanılır. Bu denklem, birçok endüstriyel uygulama için önemlidir. Örneğin, polimer endüstrisinde, Arrhenius denklemi, polimerizasyon reaksiyonlarının hızını tahmin etmek için kullanılır. Ayrıca, gıda endüstrisinde, Arrhenius denklemi, gıda ürünlerinin depolama koşullarını belirlemek için kullanılır. Bu, gıda ürünlerinin kalitesinin korunmasını sağlar (Agrawal ve Pandey, 2015).

Arrhenius denklemi, birçok endüstriyel uygulama için önemlidir. Ancak, denklem, bazı kısıtlamalara sahiptir. Örneğin, bu denklem, sadece sabit hacim ve sabit basınç koşullarında geçerlidir. Ayrıca, Arrhenius denklemi, aktivasyon enerjisi sabit kaldığı sürece doğru sonuçlar verir. Bu nedenle, denklemin kullanımı, deneysel koşulların dikkatli bir şekilde seçilmesini gerektirir.

2.11.5. Williams, Ferry ve Landel Denklemi

Williams, Ferry ve Landel (WLF) denklemi, polimerlerin viskoelastik özelliklerinin sıcaklık ve frekans gibi değişkenlere bağlı olarak nasıl değiştiğini modelleyen matematiksel bir denklemdir. Bu denklem, Williams, Landel ve Ferry tarafından 1955 yılında önerilmiştir ve polimerlerin davranışını anlamak için çok önemli bir araç haline gelmiştir.

WLF denklemi, viskozite-temperatür süperpozisyon prensibine dayanır ve genellikle aşağıdaki şekilde ifade edilir:

$$\log \left(\frac{a}{T_g} \right) = \frac{C_1(T-T_g)}{(C_2+T-T_g)} \quad (2.29)$$

Denklem (2.29), $\frac{a}{T_g}$ camsı geçiş sıcaklığı, C_1 ve C_2 ise denklem parametreleri olarak bilinir. a , polimerin dinamik modülünü ifade eder ve T , sıcaklığı ifade eder (Williams ve diğ., 1995).

Denklem (2.29) polimerlerin dinamik davranışını, sıcaklık ve frekans değişimlerine bağlı olarak tahmin etmek için kullanılır.

WLF denklemi, polimerlerin davranışını modellerken, polimerin camsı geçiş sıcaklığına dayalı bir yaklaşım kullanır. Camsı geçiş sıcaklığı, polimerin amorf bölgesindeki moleküllerin hareketinin sınırlı olduğu bir sıcaklık noktasıdır. Bu sıcaklıkta, polimer sertleşir ve kırılmanlaşır. WLF denklemi, polimerin bu sertleşme davranışını modelleyerek, polimerin viskoelastik özelliklerini tahmin etmeye çalışır (Williams ve diğ., 1995).

WLF denklemi, polimerlerin davranışını anlamak için kullanılan önemli bir araçtır. Özellikle, polimerlerin uzun süreli davranışlarını modellerken ve polimerlerin sıcaklık değişimlerine nasıl tepki verdiğini anlamak için kullanılır. WLF denklemi, polimerlerin sertleşme davranışını modelleyerek, polimerlerin sıcaklık değişimlerine nasıl tepki vereceğini tahmin eder. Bu nedenle, polimerlerin tasarımı ve endüstriyel uygulamalarında önemli bir rol oynar.

Özellikle polimerlerin endüstriyel uygulamalarında, polimerlerin tasarımı ve üretimi için önemlidir. Polimerlerin sıcaklık değişimlerine nasıl tepki verdiğini, polimerlerin kalitesi ve dayanıklılığı açısından önemlidir. WLF denklemi, polimerlerin davranışını modelleyerek, polimer üreticilerinin ve tasarımcılarının, polimerlerin sıcaklık değişimlerine nasıl tepki vereceğini tahmin etmelerine yardımcı olur.

WLF denklemi, polimerlerin sertleşme davranışını modellediği için, polimerlerin deformasyon davranışlarını da tahmin edebilir. Polimerlerin deformasyon davranışları, polimerlerin kullanıldığı birçok alanda önemlidir. Örneğin, polimerlerin kullanıldığı otomobil parçalarının deformasyon davranışları, otomobilin güvenliği açısından önemlidir (Yashin ve Isayev 1999).

WLF denklemi, polimerlerin viskoelastik özelliklerini modellerken, birçok kısıtlamaya sahiptir. Örneğin, denklem, sadece sabit basınç altındaki polimerler için geçerlidir ve polimerin özellikleri, polimerin üretildiği koşullara bağlı olarak değişebilir. Ayrıca, WLF denklemi, polimerlerin dinamik davranışını modellerken, polimerin gerçek davranışını tam olarak yansıtmayabilir.

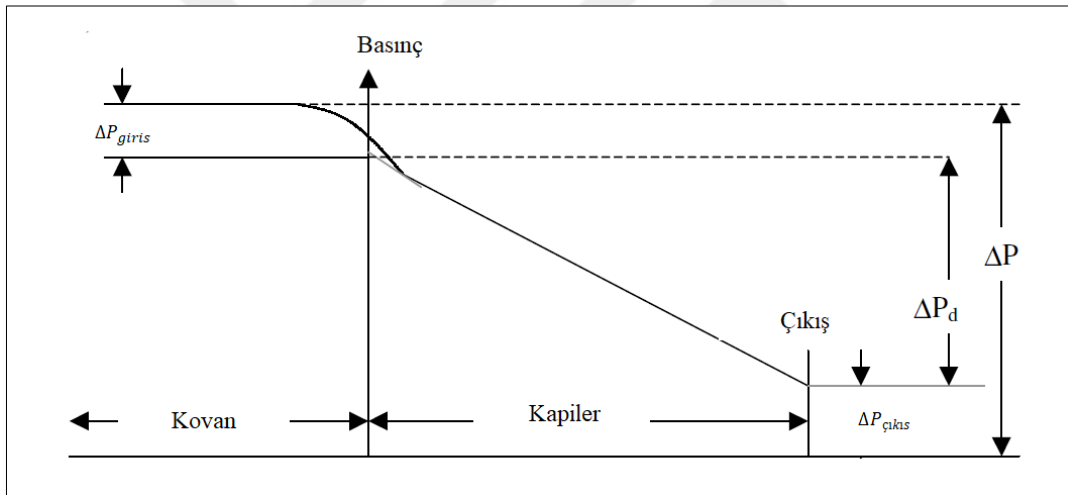
Bu nedenle, WLF denklemi, polimerlerin davranışını modellerken, dikkatli bir şekilde kullanılmalı ve deney sonuçlarıyla karşılaştırılmalıdır (Schaefer ve Eirich, 1951).

2.12. Model Doğrulama

2.12.1. Bagley Düzeltmesi Kullanımı

Bagley düzeltmesi, Kapiler Reometre deneyindeki yoğunluk farkı nedeniyle düşük hızlarda ölçülen akış gerilmelerinin doğru bir şekilde hesaplanmasına yardımcı olan bir düzeltme yöntemidir. Bu düzeltme yöntemi, kapiler reometrenin en önemli özelliklerinden biri olan düşük hızlarda bile yüksek hassasiyetle ölçüm yapabilmesini sağlar (Barnes, 1999).

Bu düzeltme yöntemi, 1956 yılında American Institute of Physics dergisinde yayınlanan bir makalede ilk kez tanıtıldı. Makalenin yazarı olan R. F. Bagley, düşük hızlarda ölçülen akış gerilmelerinin yoğunluk farkı nedeniyle yanlış hesaplanabileceğini fark etti ve bu nedenle düzeltme yöntemini geliştirdi (Diethelm 2010).



Şekil 2.23. Kapiler akış şema (Ariff, 2003)

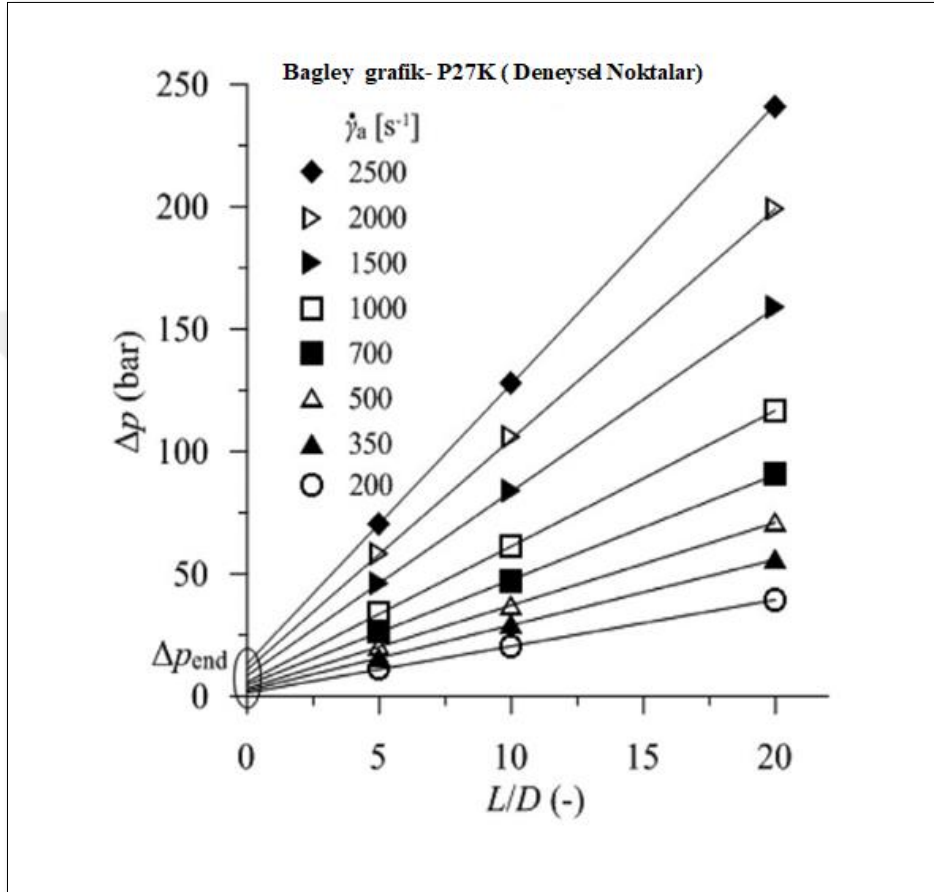
$$\Delta P = \Delta P_d + \Delta P_{end} \quad (2.30)$$

$$\Delta P_{end} = \Delta P_{giris} + \Delta P_{çıkis} \quad (2.31)$$

Şekil 2.23.'te ΔP toplam basınç düşmesini, ΔP_d nozuldaki uzunluğu boyunca gerçekleşen basınç kaybını, ifade etmektedir. Denklem (2.30) ve (2.31) Şekil 2.23.'e göre hazırlanmıştır.

Bagley düzeltmesi, kapiler reometredeki akışın tam olarak uzunlamasına olduğu varsayımına dayanır. Bu varsayım, akışın radyal bileşeninin yokluğunu ve kılcal boru

yüzeyinde sürtünmenin yokluğunu içerir. Bagley düzeltmesi, akışın radyal bileşenini hesaplayarak akış gerilmenin gerçek değerini hesaplar. Düzeltme yöntemi, akış gerilmesi verilerinin zamana göre türevlerinin alınmasını içerir. Şekil 2.24'te Bagley düzeltme faktörü gösterilmiştir. (Bagley ve Torvik 1983).



Şekil 2.24. Bagley düzeltme faktörü (Filip ve diğ., 2020)

Bagley düzeltmesinin kullanımı oldukça yaygındır. Kapiler reometrenin birçok endüstriyel uygulamasında, düşük hızlarda ölçülen akış gerilmelerinin doğru bir şekilde hesaplanması önemlidir. Bagley düzeltmesi, bu endüstrilerde kullanılan kapiler reometrelerin doğruluğunu artırır ve sonuçların güvenilirliğini artırır.

Bagley düzeltmesi, kapiler reometre deneylerinde akışın uzunlamasına doğruluğunu artırarak akış gerilme verilerinin doğruluğunu artırır. Bu nedenle, düşük hızlarda ölçülen akış gerilmeleri ile ilgili endüstriyel uygulamalarında, kapiler reometrenin doğruluğunu artırmak için Bagley düzeltmesi kullanılması önerilir. Bu referanslar, Bagley düzeltmesi yönteminin geliştirilmesi ve kullanımı hakkında öncü araştırmaları içerir. Bagley'in

1956 tarihli makalesi, yöntemin ilk kez tanımlandığı ve polimer eriyiklerinde akış sınır şartlarına ilişkin analizleri sunduğu için önemlidir. Peppas ve Graessley'nin çalışmaları, yöntemin uygulanabilirliğini ve etkinliğini test etmek için örnek olarak polimer çözeltilerini kullandılar. Hamed ve Armstrong, farklı düzeltme yöntemlerinin karşılaştırılması ve Bagley düzeltmesinin özellikle elongasyonel viskozimetrelerde kullanımı konusunda detaylı bir analiz sundular. Larson'un makalesi, polimer eriyiklerinin viskoelastik özelliklerini tanımlamak için kullanılan çeşitli konstitütif denklemleri ele alır ve Bagley düzeltmesinin bu denklemlerle uyumlu olduğunu gösterir (Laun, 2005).

Bagley düzeltmesi formülü, bir kapiler reometri deneyinde elde edilen akışkanlık eğrisi verilerini düzeltmek için kullanılan bir matematiksel formüldür. Bagley düzeltmesi, kapiler reometri deneyinde kullanılan geometrinin bir sonucu olarak ortaya çıkan hız profillerinin yanlış ölçümünü düzeltmek amacıyla kullanılır.

Bagley düzeltmesi formülü, aşağıdaki gibi yazılabilir:

$$\eta_c = \eta \left[1 + 2.838 \left(\frac{d}{L} \right)^{2.660} \left(1.472 \left(\frac{d}{L} \right) - 1 \right) \right] \quad (2.32)$$

Denklem (2.32)'de η_c , düzeltilmiş viskozite değerini, η ölçülen viskozite değerini, d kapiler iç çapını, L kapiler uzunluğunu ifade eder (Bagley ve Torvik, 1983).

Bagley düzeltmesi, özellikle yüksek viskoziteli sıvıların ölçümünde oldukça önemlidir. Bu tür sıvılar, kapiler içinde yoğunlaştığından ve viskozitesi dağılımının homojen olmadığından, ölçülen viskozite değerleri üzerinde yanıltıcı etkilere neden olabilir. Bagley düzeltmesi, bu etkileri minimize ederek doğru viskozite değerlerinin elde edilmesini sağlar (Mewis ve Wagner, 2012).

Bagley düzeltmesi formülü, kapiler reometri deneyleri için standart bir yöntem olarak kabul edilir ve çeşitli endüstriyel uygulamalarda yaygın olarak kullanılmaktadır.

$$G'(\omega) = \left(\frac{2L}{\pi r^2} \right) \frac{\left[\ln \left(\frac{2L}{r} \right) - 0.5 + \psi \left(1 + \frac{k}{\tanh k} \right) \right]}{[\omega(CD+2)]} \quad (2.33)$$

Denklem (2.33)'te $G'(\omega)$, Bagley düzeltmesi sonrası düzgünleştirilmiş dinamik modül, L , ölçüm bölgesinin uzunluğu, r , ölçüm bölgesinin yarıçapı, k , akışkanın eğim oranı, Ψ ,

akış profilindeki sınır tabaka kalınlığını temsil eder ve ω , açısal frekansı ifade eder. CD, kapasitif direnci ve 2 kablo bağlantısının kapasitif ve endüktif direncinin toplamına eşittir (Trujillo ve diğ., 2016).

Reolojik testler, malzemenin deformasyonuna veya uygulanan bir kuvvete yanıt olarak malzemenin akış özelliklerini incelemek için tasarlanmıştır. Testler, birçok farklı şekilde gerçekleştirilebilir, ancak hepsi aynı temel prensibe dayanır. Bir reolojik test sırasında, bir malzeme bir sıkıştırma, gerilme veya kesme kuvveti uygulanır ve malzeme bu kuvvete nasıl yanıt verdiği ölçülür.

Bagley düzeltmesi, reolojik testler sırasında malzeme özelliklerini daha doğru bir şekilde ölçmek için kullanılır. Bu düzeltme, düzensiz şekilli parçacıkların hareketini modellemek için kullanılan Bagley-Torvik (BT) modelinde kullanılır. Bu modelde, parçacıkların boyutları dağılım gösterdiğinden, hareketleri birbirinden farklı olabilir ve Bagley düzeltmesi kullanılarak daha doğru sonuçlar elde edilebilir.

Reolojik testlerde Bagley düzeltmesi, özellikle düşük frekanslı testler sırasında kullanışlıdır. Bu testler sırasında, malzeme özellikleri zamanla değişebilir ve bu nedenle, BT modelinde Bagley düzeltmesi kullanılarak bu değişiklikler hesaba katılabilir. Bagley düzeltmesi, malzemenin gerçek viskozite ve elastikiyet özelliklerinin doğru bir şekilde ölçülmesini sağlar.

Reolojik testlerde Bagley düzeltmesi kullanımı, malzemenin gerçek viskozite ve elastikiyet özelliklerinin daha doğru bir şekilde ölçülmesini sağlar. Özellikle düşük frekanslı testler sırasında, malzeme özellikleri zamanla değişebilir ve bu nedenle, Bagley düzeltmesi kullanılarak bu değişiklikler hesaba katılabilir (Hadinata ve diğ., 2005).

2.12.2. Rabinowitsch Düzeltmesinin

Rabinowitsch düzeltmesi, 20. yüzyılın ortalarında Belaruslu matematikçi Iosif Rabinowitsch tarafından ortaya atılmıştır. Rabinowitsch'in yöntemi, o dönemde doğrusal programlama problemlerinin çözümü için geliştirilen diğer algoritmalarından farklıydı ve daha etkili bir yaklaşım sunuyordu.

Rabinowitsch düzeltmesi, hedef fonksiyonunun ve kısıtların doğrusal olduğu doğrusal programlama (LP) problemlerinde kullanılır. Rabinowitsch düzeltmesinin temel amacı, bir LP probleminin yapılabilirliğini ve optimal çözümünü belirlemektir. Bu düzeltme, optimal çözümün koordinatlarını ve değerlerini elde etmek için kullanılan algoritmalara ek bilgiler sağlar (Cardinaels ve diğ., 2006).

Düzeltilmiş problem, orijinal problemin kısıtlarına ek olarak yeni kısıtlar içerir. Bu yeni kısıtlar, Rabinowitsch düzeltmesinin temelini oluşturan ve orijinal problemdeki değişkenlerin yeni değerlerini sağlayan eşitliklerdir.

Rabinowitsch düzeltmesi uygulanırken, orijinal doğrusal programlama problemi Denklem (2.34), (2.35) ve (2.36) takip edilerek yazılabilir:

$$C^Tx \quad (2.34)$$

$$Ax = b \quad (2.35)$$

$$x \geq 0 \quad (2.36)$$

C^T , hedef fonksiyonun katsayılarını içeren transpoze vektör; A, kısıtlar matrisi; ve b, kısıtlar vektörüdür (Karger-Kocsis 2001).

Rabinowitsch düzeltmesi, özellikle LP problemlerinin yapılabilirliği ve optimal çözümüne odaklanır. Bu düzeltme, ana problemin ve düzeltilmiş problemin (Rabinowitsch düzeltmesi uygulanmış problem) arasındaki ilişkiye dayanır. Düzeltilmiş problem, orijinal problemin kısıtlarına ek olarak yeni kısıtlar içerir.

Bu yeni kısıtlar, Rabinowitsch düzeltmesinin temelini oluşturan ve orijinal problemdeki değişkenlerin yeni değerlerini sağlayan eşitliklerdir (Ariff ve Arkadaşları 2012).

Rabinowitsch düzeltmesini uygulamak için, orijinal probleme Denklem (2.37), (2.38) ve (2.39)'daki eşitlikler eklenir.

$$x_i * x_j = 0 \quad (2.37)$$

$$i = 1, 2, \dots, n \quad (2.38)$$

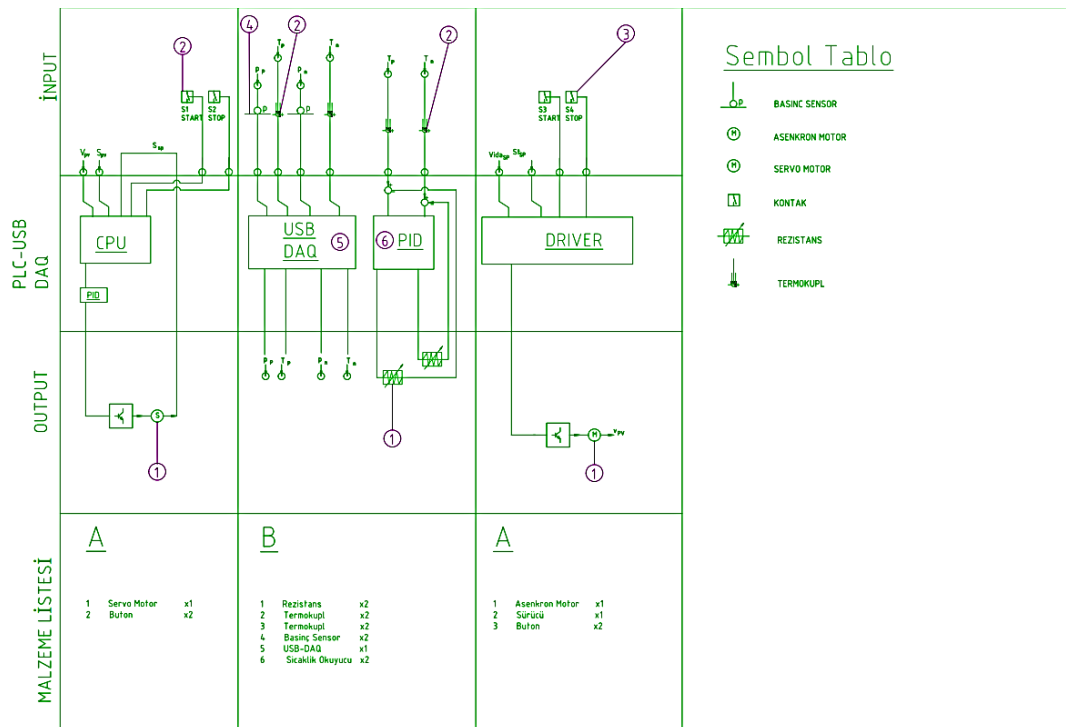
$$j = 1, 2, \dots, n \quad (2.39)$$

Bu eşitlikler, her i ve j için, x_i ve x_j 'nin sıfıra eşit olduğunda, çözümün sıfır olduğunu ifade eder. Bu düzeltme sayesinde, elde edilen düzeltilmiş problem daha iyi bir yapıya sahip olacaktır ve optimal çözüm daha kolay bulunabilir (Gupta 1999).



3. MALZEME VE YÖNTEM

Bu bölümde reoloji karakterizasyon cihaz geliştirmesi sırasında makinenin tasarımıdan bahsedilecektir. Cihazda kullanılacak sensörlerin özelliklerinden ve çalışma prensipleri, veri toplama cihaz özellik ve toplama yöntemi anlatılacaktır. Şekil 3.1’de reoloji karakterizasyon cihazı kontrol diyagramı gösterilmektedir. Toplanan verilerin işlenmesi için matematiksel modellere ve bu modellerin kullanımı yer almaktadır. Son olarak Bilgisayar Destekli Mühendislik (CAE) tanımı ve CAE analizinde kullanılacak program tanıtılacaktır.



Şekil 3.1. Geliştirilmiş reoloji karakterizasyon cihazı kontrol diyagramı

3.1. Reolojik Karakterizasyon Cihazı Tasarımı Geliştirilmesi

Reolojik test cihazı geliştirme süreci, mevcut cihazların sınırlamalarını ve kullanıcı gereksinimlerini dikkate alarak yeni bir cihaz tasarımı geliştirmeyi içerir. Bu süreç, aşağıdaki adımları içerir.

a. Kullanıcı ihtiyaçlarının ve gereksinimlerin analizi: Reolojik test cihazının potansiyel kullanıcıları ve uygulamaları belirlenir ve bu kullanıcıların ihtiyaç ve beklentileri analiz edilir.

- b. Cihaz tasarımı ve bileşen seçimi: Yeni cihazın temel tasarım prensipleri belirlenir ve mekanik, elektronik ve yazılım bileşenleri seçilir. Bileşenlerin entegrasyonu için plan oluşturulur.
- c. Prototip geliştirme ve test etme: Cihazın prototipi monte edilir ve işlevselliği test edilir. Bu süreçte, cihazın performansı ve doğruluğu değerlendirilir ve gerekli düzeltmeler yapılır.
- d. Üretim ve kalite kontrol: Geliştirilen cihaz, seri üretime hazır hale getirilir ve üretim süreci ve kalite kontrol protokolleri geliştirilir.

Reolojik karakterizasyon test cihazı geliştirme süreci, mevcut cihazların avantajlarını ve sınırlamalarını dikkate alarak yeni bir cihaz tasarımı geliştirmeyi ve bu cihazın potansiyel uygulama alanlarını incelemeyi amaçlamaktadır. Geliştirilen cihazın başarısı ve uygulanabilirliği, cihazın özelliklerine, hassasiyetine ve kullanım kolaylığına bağlı olarak değişebilir.

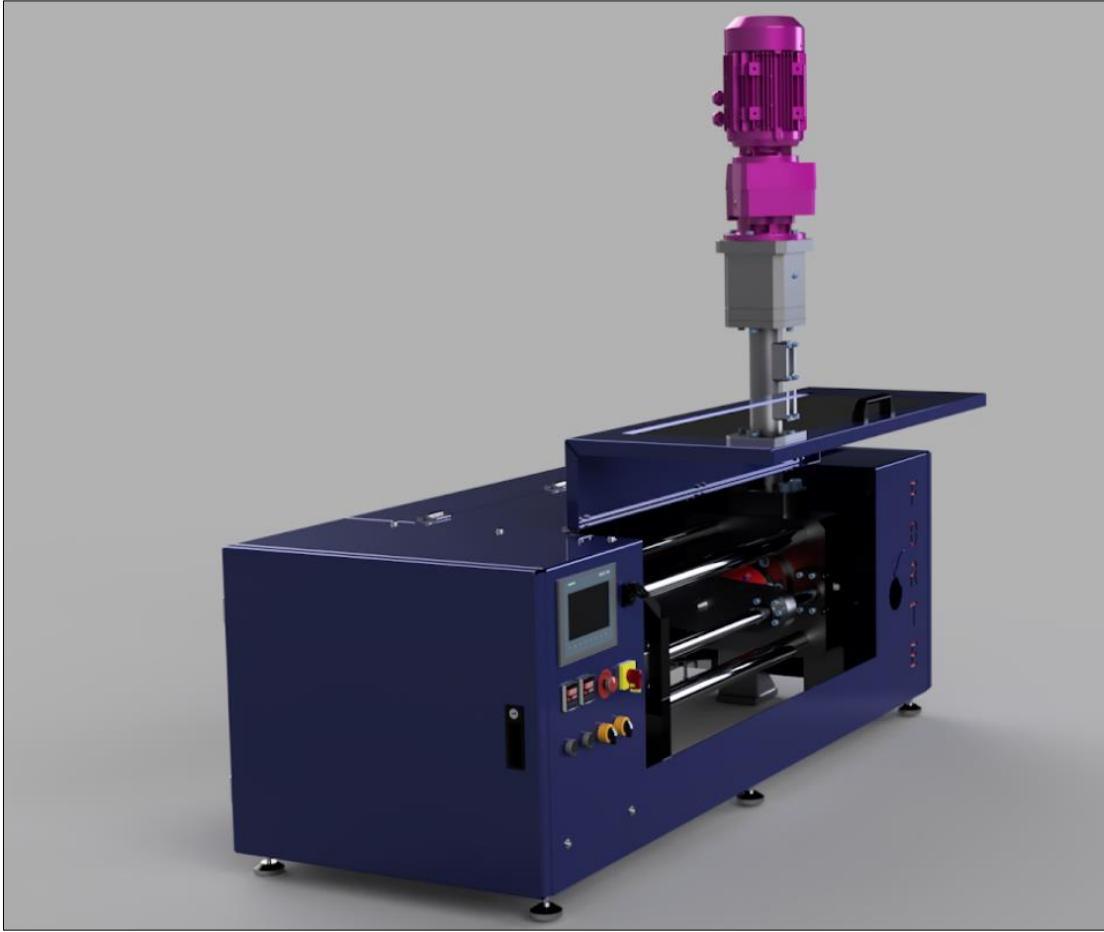
Yukarıdaki maddeler ışığında geliştirilmiş reolojik karakterizasyon test cihazı Şekil 2.2’de gösterilmiştir.

Reolojik karakterizasyon test cihazı geliştirilmesi ve uygulamalarıyla ilgili gelecekteki araştırma yönleri şunları içerebilir:

- a. Yeni ölçüm teknikleri ve algoritmalar: Reolojik özelliklerin ölçülmesinde daha hassas ve güvenilir ölçüm teknikleri ve algoritmaların geliştirilmesi, bu alandaki bilgi ve anlayışın artmasına katkıda bulunabilir.
- b. Çok fonksiyonlu ve modüler cihazlar: Çeşitli reolojik ölçüm tekniklerini ve uygulamalarını bir araya getiren çok fonksiyonlu ve modüler cihazların geliştirilmesi, kullanıcıların ihtiyaçlarını daha iyi karşılayabilir ve ölçüm süreçlerini daha verimli hale getirebilir.
- c. Otomatik ve akıllı cihazlar: Reolojik ölçümlerin otomatikleştirilmesi ve akıllı cihazlarla entegrasyonu, veri toplama ve analiz süreçlerini daha hızlı ve daha doğru hale getirebilir.
- d. Sürdürülebilir ve çevre dostu cihazlar: Enerji tüketimi ve atık üretimi açısından sürdürülebilir ve çevre dostu reolojik ölçüm cihazlarının geliştirilmesi, çevresel etkilerin azaltılmasına katkıda bulunabilir.

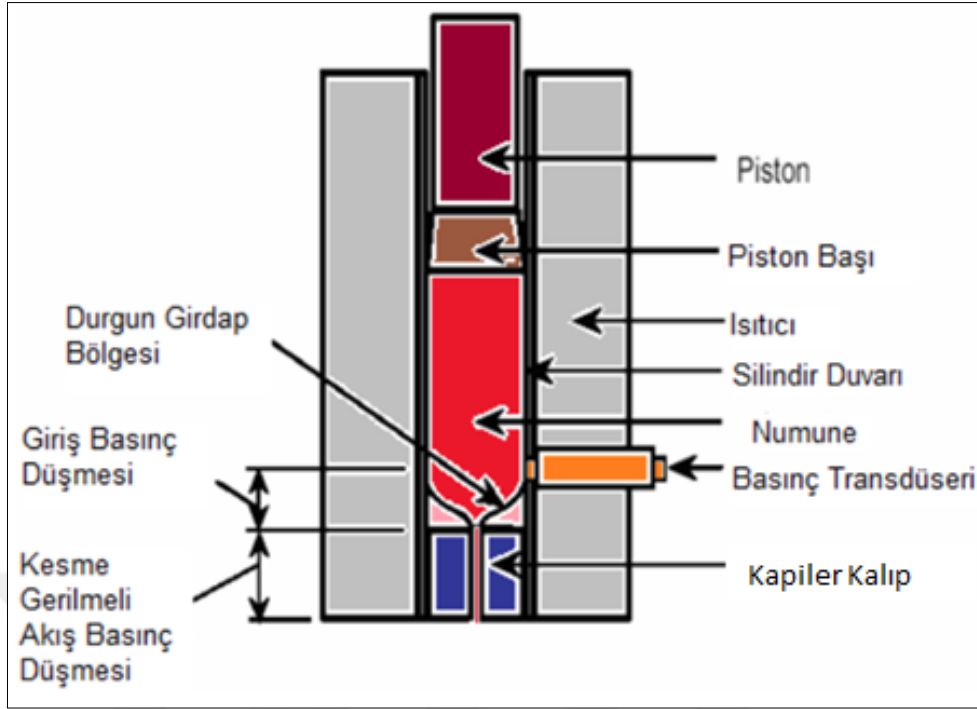
e. Uygulamalar ve endüstriyel işbirlikleri: Geliştirilen cihazların gerçek dünya uygulamaları ve endüstriyel işbirlikleri, bu alandaki bilgi ve anlayışın artmasına ve teknolojinin daha geniş bir alana yayılmasına yardımcı olabilir.

Bu potansiyel araştırma yönleri, reolojik karakterizasyon test cihazı geliştirme sürecini ve uygulamalarını ileriye taşıyarak, endüstride ve akademide daha fazla başarı ve inovasyon sağlayabilir.



Şekil 3.2. Geliştirilmiş kapiler reometri test cihazı arka görünüş

Reolojik karakterizasyon cihazları, kauçuk malzemelerin akışkanlık özelliklerini ölçmek için özellikle yararlıdır. Kauçuk malzemeler, viskoelastik özelliklere sahip olduklarından, klasik reoloji cihazları kullanılarak ölçmek zordur. Kapiler reoloji cihazları ise, kauçuk malzemelerin akışkanlık özelliklerini düşük akış hızlarında ölçmek için idealdirler. Şekil 3.2’de karakterizasyon reometri şeması gösterilmiştir.



Şekil 3.3. Kapiler reometri şema (Önder, 2008)

Reolojik karakterizasyon cihazları, malzemenin akışkanlık özelliklerini ölçmek için farklı akış hızlarını kullanabilirler. Bu sayede, malzemenin viskozite, kayma modülü, deformasyon hızı, elastik modülü gibi özellikleri farklı akış hızlarında ölçülebilir. Bu özellikleri ölçmek, malzemenin performansını belirlemek ve üretim süreçlerini optimize etmek için önemlidir. Şekil 3.3’de kapiler reometri şeması verilmiştir.

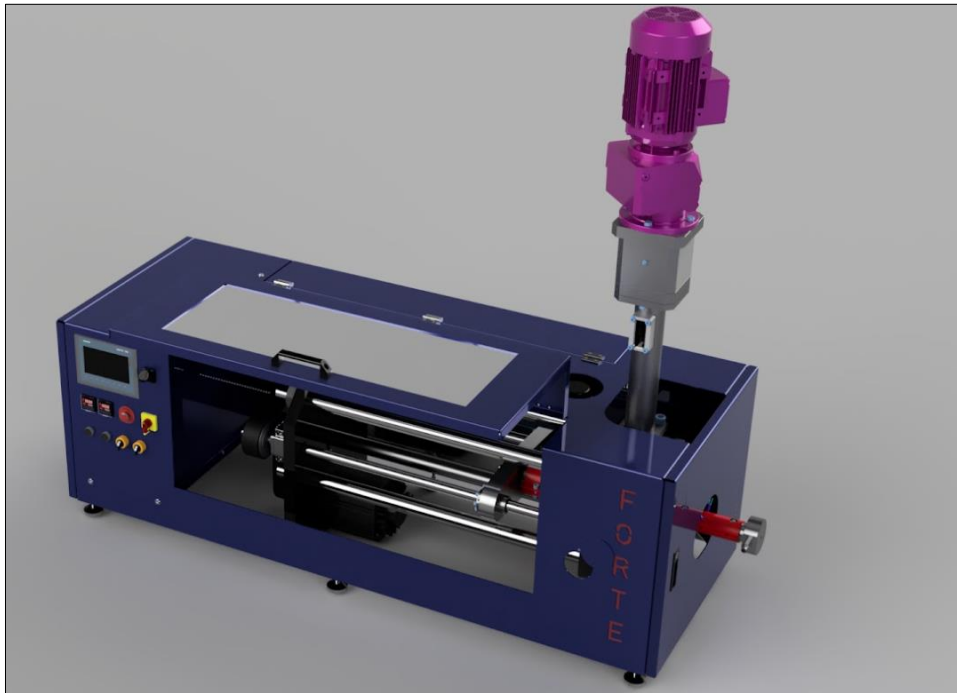
Reolojik karakterizasyon cihazları, yüksek hassasiyetli ve tekrarlanabilir ölçümler yapabilme yeteneği ile öne çıkarlar. Bu cihazlar, malzemelerin farklı sıcaklıklarda ve deformasyon hızlarında nasıl davrandığını ölçebilirler. Ayrıca, farklı kapiler nozul çapları kullanarak malzemenin farklı viskozite aralıklarında nasıl davrandığını da ölçebilirler.

Reolojik karakterizasyon cihazları, kauçuk malzemelerin karakterizasyonunda sıklıkla kullanılırlar. Örneğin, lastik üreticileri, kauçuk malzemelerin akışkanlık özelliklerini ölçerek, lastiklerin özelliklerini optimize edebilirler. Ayrıca, kauçuk malzemenin işlenmesi sırasında deformasyon hızı ve sıcaklık değişimlerinin nasıl etkilendiğini anlamak için kapiler reoloji cihazları kullanılır.

Reolojik karakterizasyon cihazları, kauçuğun farklı sıcaklıklarda ve farklı deformasyon hızlarında akış özelliklerini ölçebilirler. Bu bilgiler, kauçuğun farklı uygulamalardaki akışkanlık özelliklerini belirlemek için kullanılabilir. Ayrıca, kapiler reoloji cihazları, kauçuğun farklı bileşenlerinin akış özellikleri üzerindeki etkilerini de inceleyebilirler. Bu da kauçuğun bileşimindeki değişikliklerin kauçuğun akış özellikleri üzerindeki etkisini belirlemek için önemlidir.

Reolojik karakterizasyon cihazları, özellikle kauçuğun kalitesini belirlemek ve üretim sürecinde kauçuğun işlenebilirliğini optimize etmek için kullanılır. Ayrıca, kauçuk kapiler reoloji cihazları, kauçuğun akış özellikleri ile farklı katkı maddelerinin etkileşimlerini ve malzeme işleme yöntemlerinin etkisini incelemek için de kullanılır.

Bu çalışmada reoloji testi için gereken Reolojik karakterizasyon cihaz tasarımı geliştirilmiş ve imal edilmiştir. Şekil 3.4’de geliştirilmiş kapiler reometri test cihazı gösterilmektedir. Burada tasarım ile ilgili bilgiler verilecektir. Tasarımı pratik uygulamalar yapılacak şekilde yapılmıştır. Bu uygulamalar kauçuğun nozul boşluğu içindeki sıcaklık ve basınç değişikliklerindeki ölçümlere dayanır. Bu nedenle, iyi tahmin elde etmenin anahtarı, ekipman üzerinde çok verimli ölçüm verilerine sahip olmaktır.

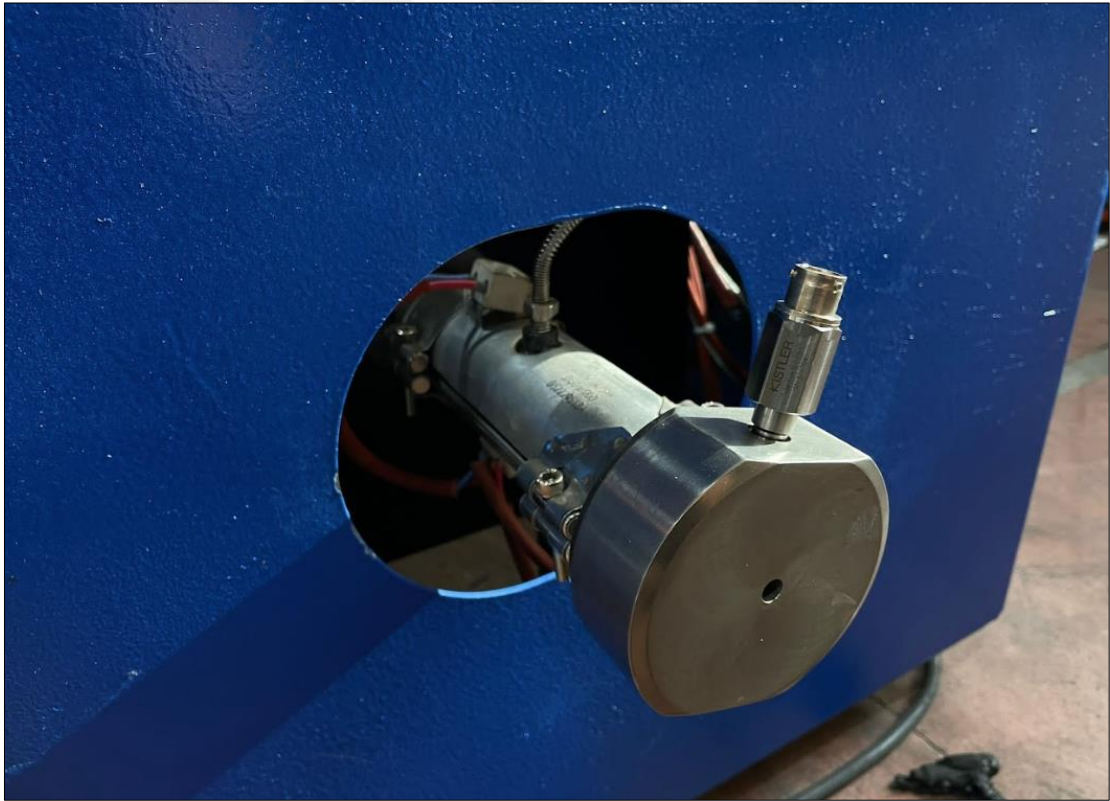


Şekil 3.4. Geliştirilmiş reolojik karakterizasyon test cihazı görsel

3.1.1. Nozul Tasarımı

Nozul tasarımında Haagen-Poiseuille akış denkleminden yararlanılmıştır. Şekil 3.5.'te nozul çıkışı gösterilmektedir. Hagen-Poiseuille akış denklemi, birçok akışkanın, boru, tüp veya kanallar boyunca düzgün hareket ettiği varsayımına dayanan bir denklemdir. Bu denklem, boru içindeki akışkanın basınç, yoğunluk, borunun çapı ve uzunluğu ile bağlantılıdır.

Haagen-Poiseuille akış denklemi, laminar akışta bir sıvının belirli bir basınç gradyanı altında kapiler bir boru boyunca nasıl akacağını tanımlar. Bu denklem, bir sıvının hızının, basınç gradyanı ile kapılan alanın, sıvının viskozitesi ve borunun uzunluğu ve yarıçapı arasındaki ilişkiyi ifade eder. Haagen-Poiseuille denklemi, akışkanların sürekli akışı, kapiler akışlar ve kan akışı gibi birçok uygulamada kullanılır.

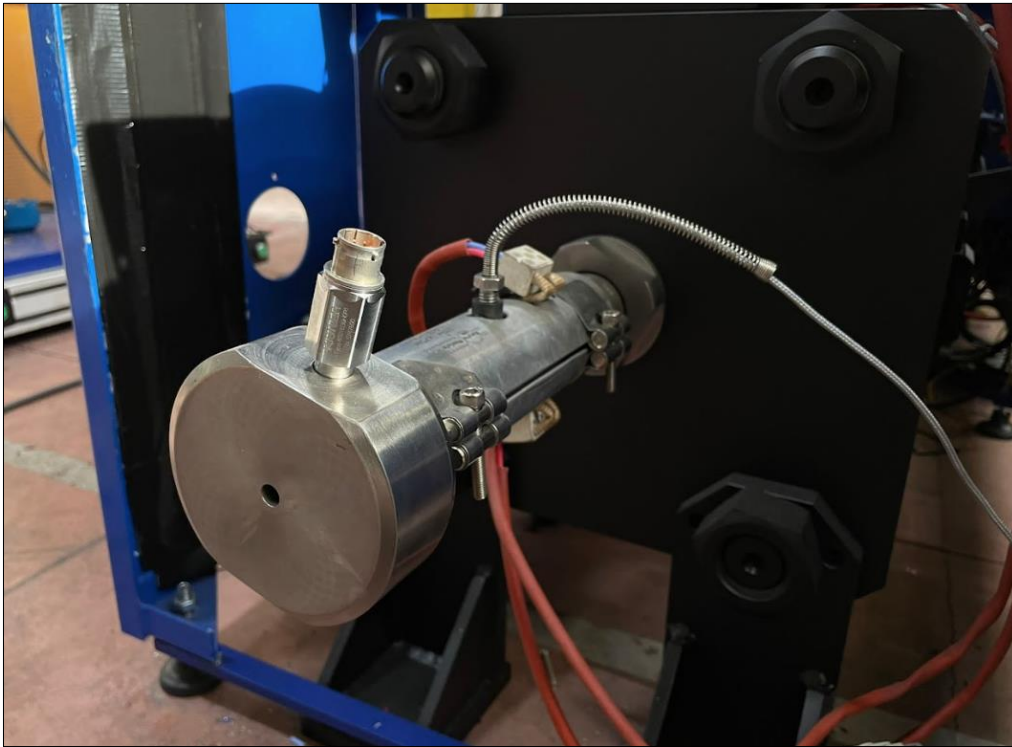


Şekil 3.5. Geliştirilmiş reolojik karakterizasyon test cihazı nozul çıkış
Hagen-Poiseuille akış denklemi Denklem (3.1)'de gösterilmiştir.

$$Q = \frac{(\pi r^4 \Delta P)}{(8 \mu L)} \quad (3.1)$$

Denklem (3.1)'de Q , debiyi(m^3/s); r , borunun iç yarıçapını(m); ΔP (bar), borunun her iki ucundaki basınç farkını; μ (Pa.s), akışkanın viskozitesini ve L (m), borunun uzunluğunu ifade eder (Rudolph ve Osswald, 2014).

Denklem (3.1) kullanılarak nozul çapı 0.008 m ve boru uzunluğu 0.64 m olarak seçilmiştir. Denklemde yer alan $\mu = 300$ (Pa.s) olarak kabul edilmiştir. Ortalama viskozite değerinden motor gücü hesaplanmış ve servo motor seçimi yapılmıştır. Şekil 3.5. ve Şekil 3.6'da nozul gösterilmektedir.



Şekil 3.6. Geliştirilmiş reolojik karakterizasyon test cihazı nozul

Hagen-Poiseuille denklemi, viskoz bir sıvının dairesel bir borudan düzgün bir şekilde akışını açıklar. Denklem, akış hızı, viskozite, basınç ve boru geometrisi arasındaki ilişkiyi ifade eder. Bu denklem, bir sıvının belirli bir boruda ne kadar hızlı akabileceğini hesaplamak için kullanılır.

Hagen-Poiseuille akış denklemi, akışkanın laminar akış koşullarında olduğu ve akışkanın türbülanslı akış koşullarının önemsiz olduğu durumlarda geçerlidir. Ayrıca, denklem, akışkanın viskozitesinin, sıcaklık, basınç ve diğer faktörlere bağlı olarak değişebileceği gerçeğini hesaba katmaz. Hagen-Poiseuille akış denklemi, akışkanın

laminar akışı için geçerlidir ve akışkanın Reynolds sayısının düşük olduğu durumlarda uygulanır.

3.1.2. Vida Tasarımı

Enjeksiyon pres vida tasarımı, plastik enjeksiyon kalıplama sürecinde polimer malzemelerin eritilmesi, karıştırılması ve ürüne enjekte edilmesi için kritik bir bileşendir. Vida tasarımı, enjeksiyon kalıplama sürecinin verimliliği ve ürün kalitesi üzerinde büyük etkiye sahiptir. İdeal bir vida tasarımı, malzemeyi homojen bir şekilde ısıtarak ve karıştırarak pota uygun basınçta ve hızda enjekte etmelidir. Enjeksiyon pres vida tasarımının ana bileşenleri ve süreci:

Vida tipi seçimi: Enjeksiyon pres vidaları genellikle tek vidalı veya çift vidalı olabilir. Tek vidalı vidalar daha yaygındır ve plastik malzemelerin eritilmesi ve homojenleştirilmesi için daha uygun iken, çift vidalı vidalar daha karmaşık reçineler veya renkli plastiklerle çalışmak için kullanılabilir.

Vida geometrisi: Vida geometrisi, malzeme akışını ve plastikleştirme sürecini kontrol eden önemli bir faktördür. Vida geometrisi, vida çapı, L/D oranı (vida uzunluğu/çapı), sıkıştırma oranı, helis açısı ve kanal derinliği gibi parametreleri içerir. Bu parametreler, kullanılan plastik malzemenin özelliklerine ve ürünün gereksinimlerine göre belirlenmelidir. Tasarlanan reolojik karakterizasyon test cihazında tek vida kullanılmıştır, vida uzunluğu 350 mm hatvesi ise 25 mm seçilmiştir. Tablo 3.1.'de vidanın imalat özellikleri ve toleransları gösterilmiştir.

Tablo 3.1. Vida kalite faktörü

VİDA KALİTE FAKTÖRLERİ		ARANILAN DEĞER	TOLERANS
BOYUT KONTROL	HATVE	25 mm	±0.50 mm
	VİDA ÜSTÜ ÇAPI	Ø34.90 mm	0.00 mm +0.10 mm
	VİDA DIŞ KALINLIĞI	4 mm	±0.50 mm
	VİDA DIŞ DİBİ ÇAPI (GİRİŞ-ÇIKIŞ)	Ø25 mm	±0.25
	KOVAN DELİK ÇAPI	Ø35.00 mm	0.00 mm +0.175 mm
	KOVAN DELİK ÇAPINDAKİ OVALLIK	0 mm	0.00 mm +0.02 mm
	VİDADAKİ DOĞRUSALLIK	1 mt'de 0.05 mm	0.00 mm +0.02 mm
	KOVANDAKİ DOĞRUSALLIK	1 mt'de 0.05 mm	0.00 mm +0.02 mm
	VİDA YÜZEYİNDEKİ YÜZEY PÜRÜZLÜLÜĞÜ (Ra)	▼▼▼	0.00 µm + 5 µm
	KOVAN DELİĞİNDEKİ YÜZEY PÜRÜZLÜLÜĞÜ(Ra)	▼▼▼	0.00 µm + 5 µm
SERTLİK KONTROL	VİDA SERTLİĞİ DIN 1.8550 - GAZ NİTRASYON	65HRC	± 3HRC
	KOVAN SERTLİĞİ DIN 1.8550 - GAZ NİTRASYON	65HRC	± 3HRC
KROM KAPLAMA KALINLIK	SERT KROM KAPLAMA KALINLIĞI	60 µm	± 15µm

Enjeksiyon pres vidaları genellikle ısıtma bölgesine ve soğutma bölgesine sahiptir. Isıtma bölgesi, malzemenin erime noktasına ulaşmasını sağlar ve soğutma bölgesi, erimiş malzemenin kalıba enjekte edilmeden önce uygun sıcaklıkta tutulmasına yardımcı olur. Bu bölgelerdeki ısıtma ve soğutma elemanlarının düzgün bir şekilde tasarlanması, enerji verimliliği ve ürün kalitesi için önemlidir. Tasarlanan reolojik karakterizasyon test cihazında soğutma elemanı kullanılmamıştır. Isıtma olarak ceket tipi rezistans kullanılmıştır.

Vida malzemesi, enjeksiyon pres vidalarının dayanıklılığı ve ömrü için kritik öneme sahiptir. Genellikle, vidalar yüksek sertlik ve aşınma direncine sahip çelik alaşımlarından yapılır. Ayrıca, vida yüzeyinin korozyon ve aşınmaya karşı korunması için nitriding, krom kaplama veya diğer yüzey işlemleri uygulanabilir.

Vida sürücü ve motor, enjeksiyon pres vidalarının dönmesini ve hareketini sağlar. Vida sürücü ve motor seçimi, enjeksiyon presinin kapasitesi, malzeme tipi ve üretim hızı gibi faktörlere bağlıdır. Vida motoru, genellikle hidrolik, elektrikli veya servo motorlardan seçilebilir. Elektrikli ve servo motorlar daha enerji verimli ve hızlı tepki süresine sahipken, hidrolik motorlar daha düşük maliyetli ve daha yaygın olarak kullanılır. Elektrikli 2 kW gücünde asenkron motor tercih edilmiştir. Sürücü kullanılarak vida hızı ayarlanabilir olmuştur.

Vida kontrol sistemi, enjeksiyon pres vidalarının hızını, basıncını ve sıcaklığını izlemek ve düzenlemek için kullanılır. Bu kontrol sistemi, süreç verimliliğini ve ürün kalitesini artırmak için önemlidir. Programlanabilir Mantık Denetleyici (PLC) veya diğer ileri kontrol sistemleri, enjeksiyon pres vidalarının hassas kontrolünü sağlar. Sürücünden giden akım sinyalleri ile verimliliği PLC tarafından kontrol edilmektedir.

3.1.3. Silindir Tasarımı

Kauçuk enjeksiyon presi silindir tasarımı, kauçuk enjeksiyon kalıplama sürecinde erimiş kauçuk malzemenin doğru şekilde ısıtılması, karıştırılması ve kalıba enjekte edilmesini sağlamak için önemli bir bileşendir.

Silindir geometrisi, kauçuk malzemenin akışını ve ısıtma sürecini kontrol eden önemli bir faktördür. Silindir geometrisi, silindir çapı, L/D oranı (silindir uzunluğu/çapı) ve

giriş ve çıkış açıklıkları gibi parametreleri içerir. Bu parametreler, kullanılan kauçuk malzemenin özelliklerine ve ürünün gereksinimlerine göre belirlenmelidir. Tasarlanan reolojik karakterizasyon test cihazında 150 mm silindir çapı seçilmiştir.

Kauçuk enjeksiyon presi silindirleri genellikle ısıtma bölgesine ve soğutma bölgesine sahiptir. Isıtma bölgesi, malzemenin erime noktasına ulaşmasını sağlar ve soğutma bölgesi, erimiş malzemenin kalıba enjekte edilmeden önce uygun sıcaklıkta tutulmasına yardımcı olur. Bu bölgelerdeki ısıtma ve soğutma elemanlarının düzgün bir şekilde tasarlanması, enerji verimliliği ve ürün kalitesi için önemlidir. Tasarlanan reolojik karakterizasyon test cihazında soğutma elemanı kullanılmamıştır. Isıtma olarak ceket tipi rezistans kullanılmıştır.

Silindir malzemesi, kauçuk enjeksiyon presi silindirlerinin dayanıklılığı ve ömrü için kritik öneme sahiptir. Genellikle, silindirler yüksek sertlik ve aşınma direncine sahip çelik alaşımlarından yapılır. Ayrıca, silindir yüzeyinin korozyon ve aşınmaya karşı korunması için nitriding, krom kaplama veya diğer yüzey işlemleri uygulanabilir.

Silindir kontrol sistemi, kauçuk enjeksiyon presi silindirlerinin hızını, basıncını ve sıcaklığını izlemek ve düzenlemek için kullanılır. Bu kontrol sistemi, süreç verimliliğini ve ürün kalitesini artırmak için önemlidir. PLC veya diğer ileri kontrol sistemleri, kauçuk enjeksiyon presi silindirlerinin hassas kontrolünü sağlar. Silindir hareketi sonsuz vidalar ile sağlanmaktadır. Sonsuz vidalara gelen tahrik servo motordan gelmektedir. Silindiri hassas pozisyonlandırmak için servo motor sürücüsünden veriler gerçek zamanlı olarak okunmaktadır. Bu veriler doğrultusunda hareket gerçekleşmektedir.

Kauçuk enjeksiyon presi silindirlerinin ve vidanın düzenli bakımı, süreç verimliliği ve ürün kalitesi için önemlidir. Silindir ve vida aşındığında veya korozyona uğradığında, malzeme akışı ve enjeksiyon süreci etkilenebilir. Bu nedenle, silindir ve vidanın düzenli olarak kontrol edilmesi ve gerekli değişikliklerin yapılması önerilir.

Sonuç olarak, kauçuk enjeksiyon presi silindir tasarımı, kauçuk enjeksiyon kalıplama sürecinin verimliliği ve ürün kalitesi üzerinde büyük bir etkiye sahiptir. İyi bir silindir tasarımı, kauçuk malzemenin homojen bir şekilde ısıtılması, karıştırılması ve kalıba enjekte edilmesini sağlar. Silindir geometrisi, ısıtma ve soğutma sistemleri, silindir

malzemesi, vida tasarımı, kontrol sistemleri ve silindir tasarım optimizasyonu gibi faktörler, kauçuk enjeksiyon presi silindir tasarımının başarısı için önemlidir.

3.1.4. Servo Motor Kullanımı

Kuvvet ve deplasman kontrollü sürülerek gerekli olan basıncı daha hassas ve kontrolü sağlanır. Servo silindirler özellik olarak kuvvet, geri dönüşlü, yüksek hızlı, yüksek ölçüm hassasiyetli çalışırlar. Entegre edilmiş puls sayıcı ile çekme ve basma işlemlerini robust şekilde ölçüm yapar. Hassas konumlandırma için enkoder entegre edilmiştir. Silindirdeki elektrikli motor servo sürücü tarafından tahrik edilir. Şekil 3.7.'de tahrik mekanizması gösterilmiştir.



Şekil 3.7. Geliştirilmiş reolojik karakterizasyon test cihazı tahrik mekanizması

Servo motor tahrikli silindirler, kauçuk enjeksiyonda kullanılan hidrolik silindirlerden daha hassastırlar. Basınç esnasında gelen tepki kuvvetlerini belirli bir sistemde toplayarak üretim için gerekli basınçları belirlenebilir. Hassas konumlandırma ile bize çalışmalarımızda esneklik sağlar. Kapiler ölçüm sırasında kuvvetlerin uygulanmasında daha hassas sonuçlar alınır.

Servo motor tahrikli silindir kullanan, presleme hareketinin her aşaması tüm ayrıntılarıyla sinyaller ile kontrol edilir. Presleme noktasına hızla yaklaşılr, presleme anında hız ani olarak düşürölerek çarpma engellenir. Presleme sonrası ani çekilme hareketi yapılır. Bu sayede tüm çevrim süresi minimize edilir.

Dış sensörler kullanılmaksızın, kapalı devre olarak pres operasyonu kontrol edilir. Olası parça kırılmalarında, hatalı parça beslemelerinde servo pres önceden belirlenen karşı reaksiyon kuvvetini doğru olarak okuyamayacağından operatörü uyarır. Hatalı parçanın test edilmesini engeller ve daha test anında kalite kontrol mekanizması oluşturur. Tüm yapılan operasyonlar, uygulanan kuvvetler ve alınan karşı reaksiyon kuvvetleri ileride gereksinim duyulması olasılığına karşı dijital ortamda saklanabilir.

Diğer yandan servo motor tahrikli silindirler elektriğı direkt olarak kullanırlar ve genel sistem verimliliğı %95 civarındadır.

3.2. Sensör Kullanımı

3.2.1. Basınç Sensör Kullanımı

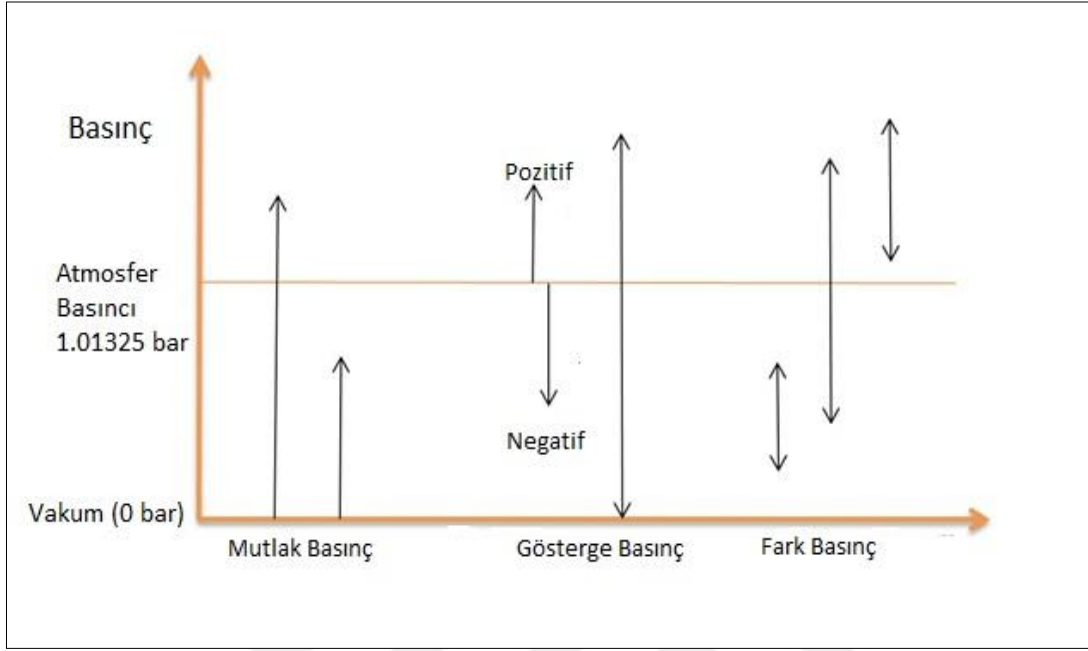
Türetilmiş bir büyüklük olan basınç, basınç sensörleri ile ölçölür. Basınç sensörü uygulanan basıncı algılayıp, bunu analog sinyale çevirir. Analog sinyal ise gerekli dönüştürücüler ile uygulamalarda kullanılarak verilere dönüştürölür.

Basınç sensörleri çoğı zaman sistemlerin ve sistem süreçlerinin izlenmesi ve kontrol edilmesi için kullanılır. Yanlış ölçölün veya kontrol edilemeyen basınç işletme ve süreç için istenmeyen ve maliyetli sonuçlar doğurur. Şekil 3.8.'de basınç türleri gösterilmiştir. Basınç ölçölümünde kullanılan türler;

Mutlak Basınç Ölçölümü: Mutlak basınç ölçölümünde, ölçölün referans basınç değerinden farkı alınarak ölçölüm yapılır. Referans olarak sıfır basınç yani vakum olarak alınır.

Gösterge Basınç Ölçölümü: Gösterge basınç ölçölümü anlık atmosfer basıncına göre basıncın ölçölmesidir. Anlık atmosfer basıncındaki değışiklikler ölçölümü pozitif ya da negatif yönde etkiler. Gösterge basıncı atmosferik basınçtan yüksek ise pozitif basınç; atmosferik basınçtan düşük ise negatif veya vakum basıncı adını alır. (Atmosfer basıncından düşük basınç seviyeleri genel olarak vakum olarak adlandırılır.)

Fark Basınç Ölçümü: Farklı iki noktadan alınan ölçüm değerlerinin farkı, fark basıncı verir.

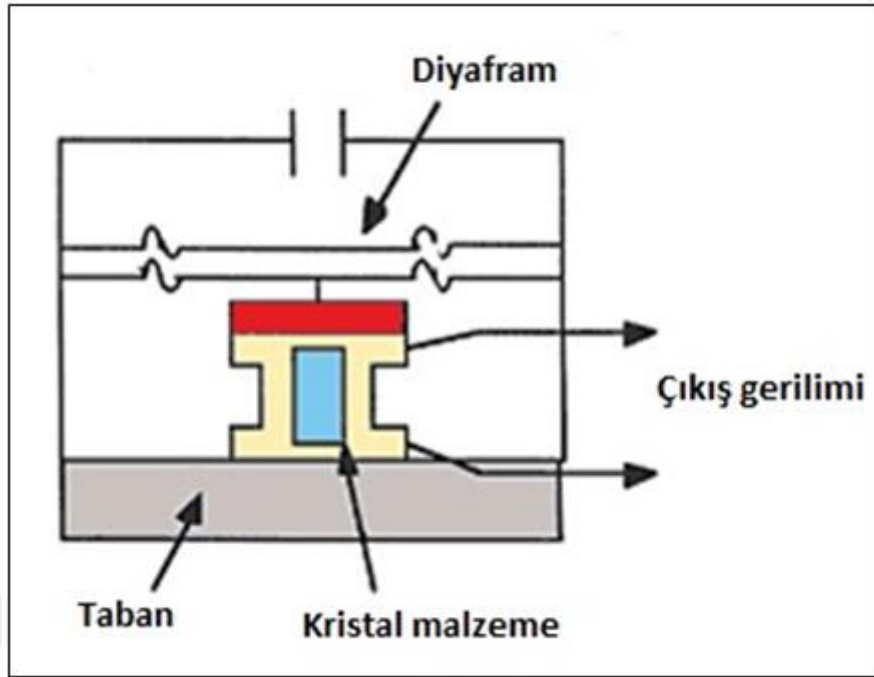


Şekil 3.8. Basınç çözünürlük (URL-13)

Piezoelektrik basınç sensörü, piezoelektrik etkisine dayanan bir prensip ile ölçüm yapar. Piezoelektrik etkisinde, belirli maddelere uygulanan basınç veya kuvvet (mekanik güç) malzeme üzerinde düşük mertebelerde gerilim indüklenmesine yol açar. Sensörde ise, yapısında bulunan kristal türü malzemeye uygulanan basınç sonucu, basıncın miktarına doğru orantılı olarak gerilim indüklenir. Oluşan milivolt mertebesindeki gerilim gerekli dönüştürücü cihazlar kullanılarak basınç değerlerini veri halinde bize sunar.

Kristal malzemeye uygulanan basınç geri çekildiğinde, gerilim indüklenmesi de sona erer. Yapısı gereği, çıkış gerilimi üretmesi için herhangi bir dış beslemeye bağlı değildir.

Piezoelektrik basınç sensörleri dinamik ölçüm noktalarında daha çok tercih edilir. Çünkü hızlı basınç değişimlerini algılayabilecek yapıdadır. Diğer bir kullanım alanı ise otomotiv sanayidir. Motor parçalarındaki hataları, küçük deformasyonları bulmak için kullanılır. Şekil 3.9’da piezoelektrik basınç sensörü yapısı gösterilmiştir.



Şekil 3.9. Piezoelektrik basınç sensör yapı(URL-13)

Reolojik karakterizasyonda, kavite basıncı sıvılaştırılmış plastik ile doldurulur ve enjeksiyon nozulu içindeki basınç üretilen mamülün kalitesinin önemli bir göstergedir. Boşluk basıncı profili, tüm işlem boyunca proses parametreleri ile ilgili spesifik gözlemlerin yapılmasını sağlar. Doğrudan kalıba entegre edilmiş piezoelektrik boşluk basınç sensörleri, ilgili basınç eğrilerinin hassas ve son derece dinamik ölçümünü sağlar.

Test sürecinde bu tür sürekli ölçümler, enjeksiyon süreç içi izleme yoluyla verimli ve sürdürülebilir optimizasyonunu sağlayan süreç izleme temelini oluşturur.

Enjeksiyonda kullanılan bu sensör 3000 bara kadar ölçümlerde kullanılır. Basınç sensörün tüm cephesine etki eder ve kuvarz ölçüm elemanına iletilir. Basınç değişimi 0-10 V aralığında okunur ve veri toplama cihazında veriler toplanır.

Tablo 3.2’de kullanılan basınç sensörünün çalışma aralığı verilmiştir. Tablo 3.3’de basınç sensörünün amfisinin özellikleri ve çalışma aralığı belirtilmiştir. Kullanılan sensörün tüm parçaları ölçüm doğruluğu bakımında korozyona dayanıklı olmalıdır.

Tablo 3.2. Basınç sensörü ölçüm özellikleri

Ölçüm aralığı (yüksek basınç sensör >1 000 bar)	bar	0 ... 3 000
Ölçüm aralığı(düşük basınç sensör $\leq$ 1 000 bar)	bar	0 ... 3 000
Aşırı yüklenme (yüksek basınç sensör >1 000 bar)	bar	3 500
Aşırı yüklenme (düşük basınç sensör $\leq$ 1 000 bar)	bar	1 500
Yorulma ömrü	Yük değişimi(%)	>2.5 · 106

Tablo 3.3. Basınç sensör amplifikatörü özellikleri

Besleme voltaj	V	18 ... 30
Anlık tüketim	mA	<50
Amplifikatörün frekans aralığı (–3 dB)	kHz	1
Ofset düzeltme aralığı	Sensör Doğrusallığı (%)	50
Çıkış sinyal, basınç (ölçüm aralığına bağlı olarak) Voltaj çıkış	V	0 ... 10
Akım çıkışı	mA	4 ... 20
Çıkış sinyal, sıcaklık voltaj 0 ... 350° = 0 ... 3.5 V	mV/K	10
Akım çıkış 0 ... 350°C = 4 ... 11 Ma	µA/K	20

3.2.2. Sıcaklık Sensör Kullanımı

Tasarlanan reolojik karakterizasyon test cihazında test sırasında sıcaklık sensörleri, malzeme özelliklerinin doğru bir şekilde ölçülmesi için oldukça önemlidir.

Bu nedenle, sıcaklık sensörlerinin doğru bir şekilde kullanılması ve kalibrasyonu, doğru test sonuçları elde etmek için kritik öneme sahiptir.

Kapiler reometri testi sırasında kullanılacak sıcaklık sensörünün doğru bir şekilde seçilmesi önemlidir. Sensörün ölçüm aralığı, hassasiyeti, tepki süresi ve doğruluğu gibi

faktörler dikkate alınmalıdır. Ayrıca, test sırasında kullanılan malzemenin özellikleri de sensör seçiminde önemli bir rol oynar. Tablo 3.4’de sıcaklık sensörünün çalışma aralıkları verilmiştir.

Tablo 3.4. Sensör sıcaklık aralığı özellikleri

Sensör	°C	0 ... 350
Sensör kablo	°C	0 ... 300
Uzatma kablo (sensör amplifikatör arasında °C 0 ... 80)	°C	0 ... 80
Amplifikatör	°C	0 ... 60
Telafi sıcaklık aralığı	°C	25.. 350
Sensör kablosu bağlantısı ve versiyon için kablo H0 ... 2	°C	0..150

Sensörlerin kalibrasyonu, doğru sıcaklık ölçümleri yapmalarını sağlar. Sensör kalibrasyonu için, önceden bilinen sıcaklıklara sahip bir ortam kullanılabilir. Bu ortamda, sensörlerin okumaları ile ölçülen sıcaklıklar karşılaştırılarak sensörlerin doğru bir şekilde kalibre edilmesi sağlanabilir. Tablo 3.5’de sıcaklık sensörünün doğruluk oranları verilmiştir.

Tablo 3.5. Sensör doğruluk

Tekrarlanabilirlik	Sensör Doğrusallığı (%)	<0.1
Doğrusallık	Sensör Doğrusallığı (%)	±0.5
Basınç histerisis	Sensör Doğrusallığı (%)	<0.8
Termal sıfır kayması	Sensör Doğrusallığı (%)	<±0.5*
Termal hassasiyet değişimi	Sensör Doğrusallığı (%)	<±0.5
Doğal frekans	kHz	>165
İvme hassasiyeti	bar/g	<0.1
Koruma derecesi		IP65
Sıcaklık kesinlik	°C	±5

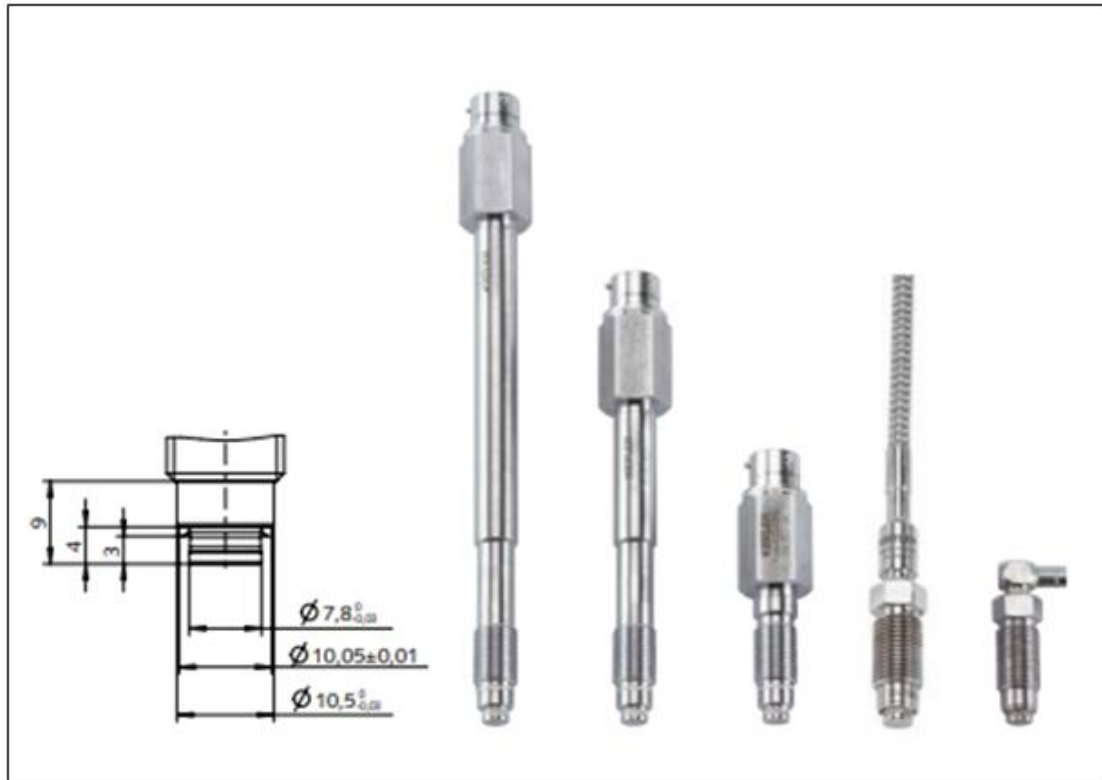
Kapiler reometri testi sırasında sıcaklık sensörleri, malzemenin özelliklerinin doğru bir şekilde ölçülmesi için doğru konumda yerleştirilmelidir. Bu sebepten dolayı nozul

başlangıç ve bitiş noktalarına sıcaklık sensörü yerleştirilmiştir. Sensör boyutları Şekil 3.10. ve Şekil 3.11’de gösterilmiştir.

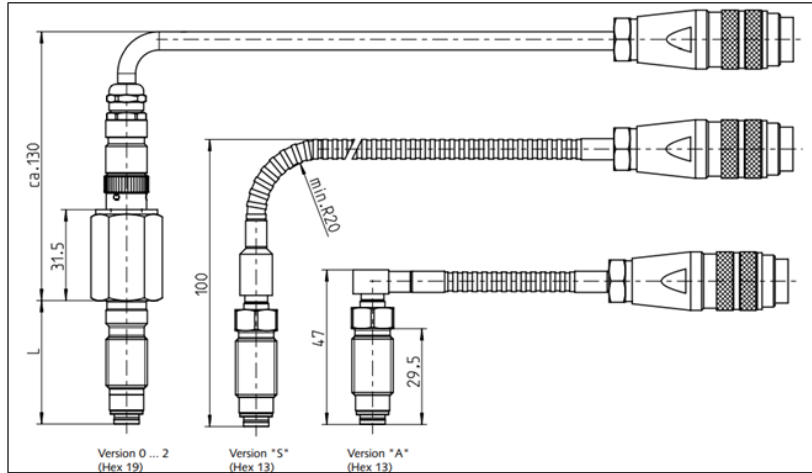
Sensörler, malzeme örneğinin yakınında ve mümkün olduğunca homojen bir sıcaklık dağılımı sağlamak için malzemenin tam ortasına yerleştirilmelidir.

Kapiler reometri testi sırasında sıcaklık sensörleri, malzemenin sıcaklık değişimlerini sürekli olarak ölçmelidir. Bu nedenle, sensör okuma sıklığı önemlidir. Sensörlerden gelen veriler, gerçek zamanlı olarak toplanır.

Kapiler reometri testi sırasında sıcaklık sensörleri, malzemenin sıcaklık değişimlerine göre test parametrelerinin ayarlanmasına yardımcı olur. Bu sayede, malzemenin gerçek mekanik özellikleri doğru bir şekilde ölçülebilir. Test parametreleri arasında, örneğin, test hızı, test sıcaklığı ve test süresi gibi değişkenler yer alır.



Şekil 3.10. Sensör görsel (URL-14)



Şekil 3.11. Sensör ölçü (URL-14)

3.3. Usb Veri Toplama Cihazı Kullanımı

USB DAQ (USB Veri Toplama) cihazları, fiziksel gerçek dünya sinyallerini (sıcaklık, basınç, gerilim, akım vb.) dijital sinyallere dönüştüren ve bu sinyalleri bilgisayarlara aktaran cihazlardır.

USB DAQ cihazları, ölçme, izleme ve kontrol sistemlerinin temel bileşenlerindendir ve endüstriyel, bilimsel ve mühendislik uygulamalarında kullanılır. Şekil 3.12’de veri toplama cihazı gösterilmiştir.



Şekil.3.12. Veri toplama cihazı (URL-15)

USB DAQ cihazları, tak ve çalıştır özelliğine sahiptir, bu da kurulum ve kullanımın kolay olduğu anlamına gelir. USB bağlantısı sayesinde, cihazlar doğrudan bir

bilgisayara veya dizüstü bilgisayara bağlanabilir ve hızlı bir şekilde veri toplamaya başlayabilir.

USB DAQ cihazları, farklı sensör türlerine (termokupl, potansiyometre vb.) bağlanarak, geniş bir ölçüm aralığı ve farklı fiziksel sinyalleri ölçebilir. Yüksek hızlı veri toplama ve yüksek çözünürlüklü ADC (Analog-Dijital Dönüştürücü) bileşenleri ile donatılmıştır. Bu, hassas ölçümler ve hızlı tepki süreleri sağlar.

Analog ve Dijital Giriş/Çıkış: USB DAQ cihazları, analog ve dijital giriş/çıkış kanallarına sahiptir, bu da çeşitli uygulamalar ve sensörlerle kullanılabilmesini sağlar. Ayrıca, bazı cihazlar, gerilim, akım ve termokupl gibi birden fazla sinyal türüne destek sağlar. Tablo 3.6’de analog çıkış özellikleri belirtilmiştir. Tablo 3.7’de analog giriş özellikleri belirtilmiştir.

Tablo 3.6. Analog çıkış özellikleri

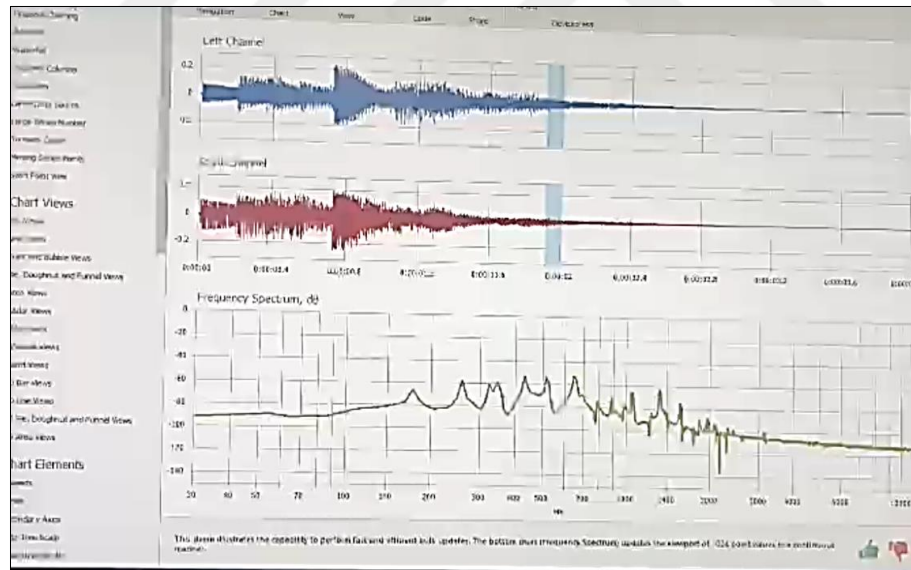
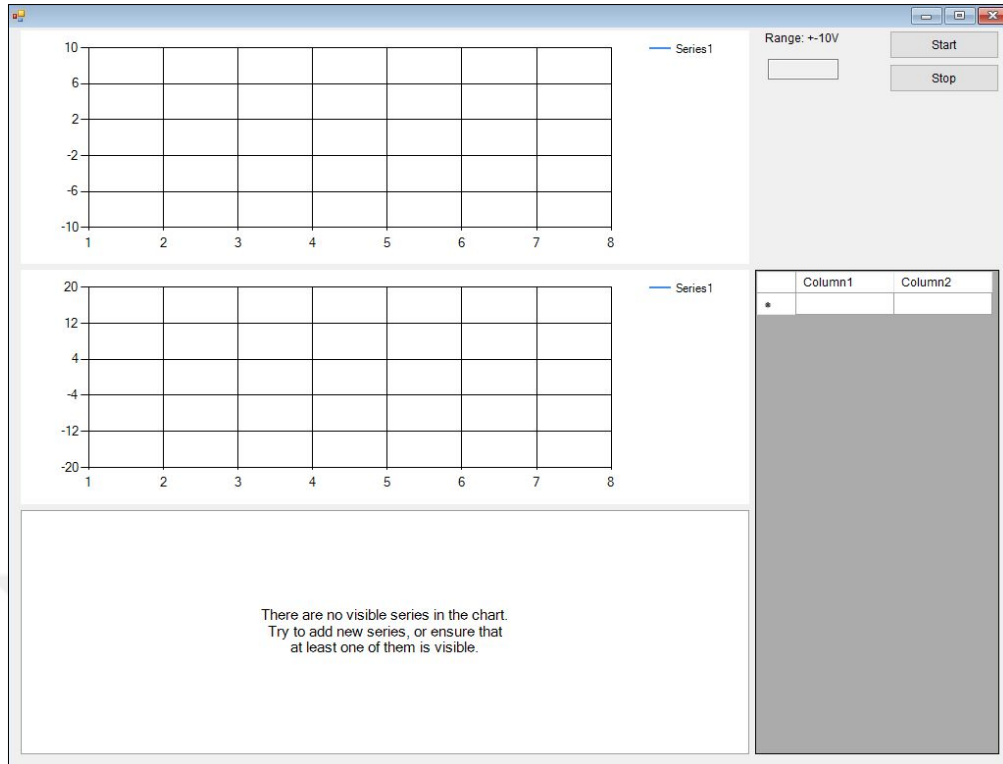
Analog Çıkış	
Kanal sayısı	2 Voltaj çıkış
Çözünürlük	16-bit
Maksimum güncelleme hızı	1 MS/s
Çıktı aralığı	± 10 V
Ofset hatası	± 0.15 mV
Kazanç hatası	$\pm 0.05\%$ of FSR
Çıkış sürüş kapasitesi	± 5 mA
Dönüş oranı	2.2 V/ μ s
Yerleşme zamanı	26 μ s
Yükselen zaman	6 μ s
Düşen zaman	6 μ s
Çıkış mod	Programlanabilir giriş çıkış, sürekli

Tablo 3.7. Analog giriş özellikleri

Analog Giriş	
Kararlılık	16-bit
Kanal sayısı	16 SE / 8 , voltaj giriş
Maksimum örnekleme oranı	250 kS/s(Çoğullama, kanal kazanım kuyruğu)
Programlanabilir kazanç	1, 5, 10, 50
Giriş aralığı(Voltaj)	± 10 V, ± 2 V, ± 1 V, ± 200 mV
Giriş aralığı Akım	N/A
Ofset hatası	± 0.1 mV (kazanç=1)
Kazanç hatası	$\pm 0.05\%$ of FSR (kazanç=1)
-3dB small signal bandwidth (gain=1)	600 kHz
ENOB (gain=1)	14.5-bit
FIFO arabellek boyutu	4 k örnek
Tetik kaynakları	Yazılım harici dijital, analog tetik
Tetik mod	Tetik sonrası, tetik gecikme, yeniden tetikleme, gate trigger, kapı tetiği
Harici dönüştürme kaynağı	Evet (üstü 250 kS/s)
Giriş bağlantısı	DC
Aşırı gerilim koruması	Devamlı ± 24 V
Giriş empedansı	Yüksek empedans > 1 G Ω
Veri transfer	Programlanabilir giriş çıkış, sürekli

USB DAQ cihazları, genellikle LabVIEW, MATLAB, Python ve diğer yazılım ortamları ile uyumludur. Geliştirilmiş reoloji test presinde Microsoft .NET C# üzerinden yazılmış arayüz program kullanılmaktadır. C Sharp ile yazılan arayüz programı Şekil 3.13 ve 3.14 'de gösterilmiştir.

USB DAQ cihazlarının kompakt boyutları ve hafifliği, taşınabilirliklerini artırır ve saha uygulamalarında kullanım için uygundur.



Şekil 3.14. Veri toplama ekranı

USB DAQ cihazları, özellikle endüstriyel otomasyon, süreç kontrolü, test ve ölçme uygulamalarında yaygın olarak kullanılmaktadır. Şekil 3.15’de kullanılan test ekipmanları gösterilmektedir. Bu cihazlar, güvenilir ve hassas ölçümler yaparak, uygulamaların performansını ve verimliliğini artırmaya yardımcı olur. USB DAQ cihazları, aşağıdaki alanlarda kullanılabilir.



Şekil 3.15. Veri toplama cihazı ve sensör görsel

3.4. Bilgisayar Destekli Mühendislik Yöntemiyle Analiz

Bilgisayar destekli mühendislik (CAE) yöntemleri, endüstriyel süreçlerin analizi ve optimizasyonu için güçlü araçlar sunar. Kalıp dolum analizi, enjeksiyon kalıplama sürecinin etkinliğini ve kalite kontrolünü artırmak için kullanılır ve tasarımcılara, süreç mühendislerine ve üreticilere değerli bilgiler sağlar.

Enjeksiyon kalıplama, plastik ve diğer polimer malzemelerin şekillendirilmesi için yaygın olarak kullanılan bir üretim yöntemidir.

Bu süreç, ergitilmiş plastik malzemenin yüksek basınç altında bir kalıba enjekte edilmesini ve soğutulduktan sonra kalıptan çıkarılmasını içerir. CAE kalıp dolum analizi, enjeksiyon kalıplama sürecinin daha iyi anlaşılmasına ve optimize edilmesine yardımcı olmak için kullanılır.

CAE kalıp dolum analizi, enjeksiyon kalıplama sürecinin önemli parametrelerini incelemek ve analiz etmek için kullanılır. Bu analizlerin amacı, süreç optimizasyonu,

malzeme tasarrufu, döngü sürelerinin azaltılması ve ürün kalitesinin artırılmasıdır. Kalıp dolum analizleri, şu parametreleri değerlendirir:

Malzeme özellikleri: Ergime sıcaklığı, viskozite, ısı kapasitesi, termal iletkenlik ve büzülme gibi malzeme özellikleri, süreç performansını ve son ürün kalitesini etkiler. CAE analizi, bu özelliklerin sürece etkisini değerlendirmeye yardımcı olur.

Enjeksiyon parametreleri: Enjeksiyon hızı, basınç, sıcaklık ve dolum süresi gibi enjeksiyon parametreleri, süreç etkinliğini ve kalite kontrolünü etkiler. CAE analizi, bu parametrelerin süreç üzerindeki etkisini incelemeye yardımcı olur.

Kalıp tasarımı: Kalıp geometrisi, soğutma kanallarının yerleşimi, kapı tasarımı ve yolluk sistemi gibi kalıp tasarım parametreleri, süreç ve ürün kalitesini etkileyen önemli faktörlerdir. CAE analizi, bu faktörlerin süreç üzerindeki etkisini değerlendirmeye yardımcı olur ve böylece daha iyi kalıp tasarımlarının geliştirilmesine olanak sağlar.

Kalıp tasarımı parametrelerinin analizi, daha etkili soğutma kanallarının yerleşimi, kapı tasarımının optimizasyonu ve yolluk sistemi tasarımının geliştirilmesine yardımcı olur.

CAE analizi, dolum süreci sırasında hava kabarcığı, yoğunlaşma ve çapak gibi kusurların önlenmesine veya azaltılmasına yardımcı olur. Bu, ürünün kalitesini ve performansını artırır.

CAE kalıp dolum analizi, enjeksiyon kalıplama sürecinin etkinliğini ve kalite kontrolünü artırmak için güçlü bir araçtır. Bu analizler, süreç parametrelerinin optimizasyonu, kalıp tasarımının iyileştirilmesi ve ürün kalitesinin artırılması gibi önemli avantajlar sağlar.

CAE yöntemlerinin kullanılması, tasarımcılara, süreç mühendislerine ve üreticilere değerli bilgiler sunarak, enjeksiyon kalıplama sürecinin daha iyi anlaşılmasını ve optimize edilmesini sağlar.

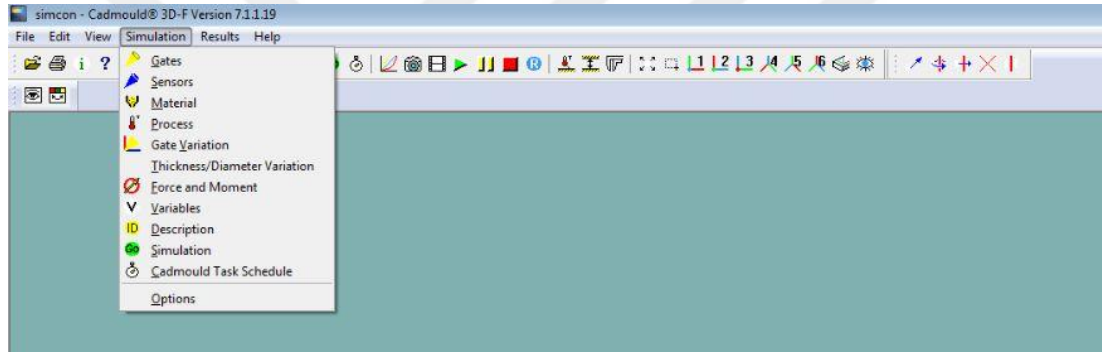
3.4.1. Cadmould Kullanımı

CADMould, kauçuk kalıpların tasarımı ve üretimi için kullanılan bir yazılım paketidir. Bu yazılım paketi, kalıp tasarımı ve imalatı sırasında karşılaşılan zorlukları çözmek için

geliştirilmiştir. CADMould, kauçuk kalıpların tasarımı, analizi, optimize edilmesi ve üretimi için birçok araç sunar.

Kalıp analizi, kalıp tasarımı ve üretimi sürecinde önemli bir rol oynar. Kalıp analizi, kalıp tasarımının doğruluğunu ve malzeme akışının kalıp içindeki davranışını kontrol etmek için kullanılır. Kalıp analizi, kalıp üretiminde hata ve sorunların önlenmesine yardımcı olur ve kalıp üretiminde maliyetleri azaltmaya yardımcı olur. Dolum analizi, dolum sıcaklık analizi gibi analizlerin çözümünde kullanılır.

CADMould'un kalıp analizi araçları, malzeme akışı, dolgu süresi, basınç dağılımı, malzeme soğuma hızı ve deformasyon analizi gibi birçok parametreyi ölçebilir. Şekil 3.16.'da CADMould program arayüzü gösterilmiştir.



Şekil 3.16. CADMould arayüz

CADMould, kalıp analizi sırasında, önceden belirlenen parametreler kullanılarak malzeme akışı simülasyonu yapar. Bu simülasyonlar, plastik malzemenin kalıp içindeki davranışını gösterir. Simülasyon sonuçları, tasarım hatalarının veya malzeme akışındaki sorunların tespit edilmesine yardımcı olur. Kalıp analizi araçları, kalıp tasarımını optimize etmek için de kullanılabilir. Örneğin, kalıp tasarımındaki değişiklikler, malzeme akışını optimize etmek için kullanılabilir. Bu tasarım değişiklikleri, kalıp imalatı sırasında malzeme kullanımını azaltabilir ve kalıp üretiminde maliyetleri azaltabilir.

CADMould, kalıp analizi konusunda birçok özelleştirilmiş araç sunar. Bu araçlar, malzeme akışı, basınç dağılımı, soğuma hızı ve deformasyon analizi gibi birçok parametreyi ölçer. Bu özellikler, kalıp tasarımı ve üretiminde önemli bir rol oynar.

CADMould'un kalıp analizi araçları, tasarım hatalarının veya malzeme akışındaki sorunların tespit edilmesine yardımcı olur. Bu sayede, kalıp tasarımı ve üretimi sürecinde hataların önlenmesi ve maliyetlerin azaltılması sağlanır. Ayrıca, CADMould'un tasarım optimizasyonu araçları, malzeme akışını optimize etmek için kullanılabilir ve malzeme kullanımını azaltarak maliyetleri düşürmeye yardımcı olabilir.

CADMould, kalıp analizi konusunda birçok araştırmaya konu olmuştur. Bu araştırmalar, CADMould'un kalıp tasarımı ve analizi konusundaki etkinliğini ve kullanımını gösterir.

Örneğin, Yapıcı ve arkadaşları (2015), plastik kalıpların tasarımı ve analizi için CADMould'un kullanımını inceleyen bir çalışma yapmışlardır. Bu çalışmada, CADMould'un kalıp tasarımı ve analizi konusunda etkili olduğu ve malzeme akışını optimize etmek için kullanılabileceği sonucuna varılmıştır.

Başka bir araştırma ise, Gao ve arkadaşlarının (2018) yaptığı çalışmadır. Bu çalışmada, CADMould'un polipropilen kalıp tasarımı ve analizi konusunda kullanımı incelenmiştir. Araştırma sonuçları, CADMould'un kalıp tasarımı ve analizi konusunda etkili bir araç olduğunu göstermiştir.

4. ARAŞTIRMA BULGULAR VE TARTIŞMA

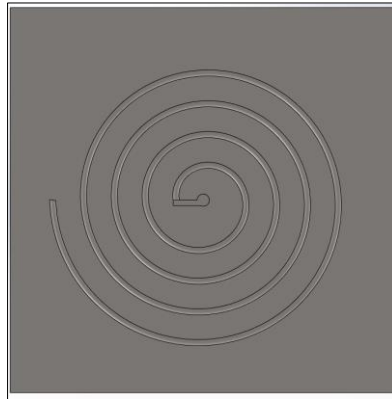
Bu bölümde doğrulama deney seti tasarımı yapılacak ve model doğruluğu kontrol edilecek. Reolojik karakterizasyon test cihazından veriler toplanacaktır. Bu toplanan veriler sonucunda matematiksel modeli hazırlanacaktır. Hazırlanan model sonuçlarına göre CAE analiz yapılacaktır. Son olarak reolojik karakterizasyon test cihaz verileri ile analiz verileri karşılaştırılacaktır.

4.1. Doğrulama Deney Seti Tasarımı

Bu bölümde reolojik karakterizasyon için deney seti hazırlanacak ve analizleri doğrulamak için model doğrulama yapılacaktır. Herbir karışım için farklı sıcaklık ve basınçlarda kalıp dolum oranlarına bakılacaktır. Aynı basınç ve sıcaklık değerinde CAE analizleri yapılacaktır. Analiz ve deney sonuçları karşılaştırarak sapma değerlerine bakılacaktır.

Mevcut kauçuk enjeksiyon makine parkurunda yapılan üretimlerde kullanılan sıcaklıklar baz alınarak 4 farklı kauçuk üzerinde çalışılacaktır. Seçilen 4 farklı kauçuk için 140°C, 150°C, 160°C sıcaklıklarında test hazırlıkları yapılacaktır. Her sıcaklık için çalışma basıncı 170, 180, 190 bar olarak seçilecektir.

Bu test metonda enjeksiyon preste imalat yapmak için salyangoz kalıp tasarımı yapılmış ve imal edilmiştir. Şekil 4.1’de salyangoz kalıp tasarımına ait görsel yer almaktadır. Salyangoz kalıp üzerindeki dolum yolu 5 mm lik ara ile markalanacaktır. Bu markalamadan kalıp dolum oranları tespiti yapılacaktır.



Şekil 4.1. Salyangoz kalıp görsel

Salyangoz kalıpta doldurulan kauçuğa ait görsel Şekil 4.2’de gösterilmiştir. Şekil 4.3’te Salyangoz kalıptan çıkarılan kauçuğun yüzeyi gösterilmiştir.



Şekil 4.2. Salyangoz kalıp numune görseli



Şekil 4.3. Salyangoz kalıp numune yüzey görseli

Deney testinde kullanılmak üzere 12480 kodlu NR karışımı, 24155 kodlu EPDM karışımı ve 15270 kodlu NBR karışımı ve 34150 kodlu BR karışımı kullanılacaktır.

Deney sonunda 12480 kodlu NR karışımı için farklı sıcaklık ve basınçlardaki dolum yüzdeleri Tablo 4.1, Tablo 4.2 ve Tablo 4.3’te gösterilmiştir.

Deney sonunda 24155 kodlu EPDM karışımı için farklı sıcaklık ve basınçlardaki dolum yüzdeleri Tablo 4.4, Tablo 4.5 ve Tablo 4.6’te gösterilmiştir.

Deney sonunda 15270 kodlu NBR karışımı için farklı sıcaklık ve basınçlardaki dolum yüzdeleri Tablo 4.7, Tablo 4.8 ve Tablo 4.9’te gösterilmiştir.

Deney sonunda 34150 kodlu BR karışımı için farklı sıcaklık ve basınçlardaki dolum yüzdeleri Tablo 4.10, Tablo 4.11 ve Tablo 4.12’te gösterilmiştir.

Tablo 4.1. NR 12480 karışımı 180 bar deney dolum tablosu

12480 NR		
Sıcaklık (°C)	Basınç (Bar)	Dolum Yüzdesi (%)
140°C	170 bar	74.21
150°C		98.76
160°C		99.07

Tablo 4.2. NR 12480 karışımı 180 bar deney dolum tablosu

12480 NR		
Sıcaklık(°C)	Basınç (Bar)	Dolum Yüzdesi (%)
140°C	180 bar	97.86
150°C		98.39
160°C		98.98

Tablo 4.3. NR 12480 karışımı 190 bar deney dolum tablosu

12480 NR		
Sıcaklık(°C)	Basınç (Bar)	Dolum Yüzdesi (%)
140°C	190 bar	98.52
150°C		99.38
160°C		99.75

Tablo 4.4. EPDM 24155 karışımı 170 bar deney dolum tablosu

EPDM 24155		
Sıcaklık(°C)	Basınç (Bar)	Dolum Yüzdesi (%)
140°C	170 bar	73.02
150°C		74.45
160°C		76.12

Tablo 4.5. EPDM 24155 karışımı 180 bar deney dolum tablosu

EPDM 24155		
Sıcaklık(°C)	Basınç (Bar)	Dolum Yüzdesi (%)
140°C	180 bar	76.95
150°C		77.40
160°C		77.75

Tablo 4.6. EPDM 24155 karışımı 190 bar deney dolum tablosu

EPDM 24155		
Sıcaklık(°C)	Basınç (Bar)	Dolum Yüzdesi (%)
140°C	190 bar	77.90
150°C		77.95
160°C		78.83

Tablo 4.7. NBR 15270 karışımı 170 bar deney dolum tablosu

15270 NBR		
Sıcaklık(°C)	Basınç (Bar)	Dolum Yüzdesi (%)
140°C	170 bar	93.02
150°C		94.45
160°C		96.12

Tablo 4.8. NBR 15270 karışımı 180 bar deney dolum tablosu

15270 NBR		
Sıcaklık(°C)	Basınç (Bar)	Dolum Yüzdesi (%)
140°C	180 bar	96.95
150°C		97.40
160°C		97.75

Tablo 4.9. NBR 15270 karışımı 190 bar deney dolum tablosu

15270 NBR		
Sıcaklık(°C)	Basınç (Bar)	Dolum Yüzdesi (%)
140°C	190 bar	97.90
150°C		97.95
160°C		98.83

Tablo 4.10. BR 34150 karışımı 170 bar deney dolum tablosu

34150 BR		
Sıcaklık(°C)	Basınç (Bar)	Dolum Yüzdesi (%)
140°C	170 bar	69.74
150°C		70.07
160°C		71.19

Tablo 4.11. BR 34150 karışımı 180 bar deney dolum tablosu

34150 BR		
Sıcaklık(°C)	Basınç (Bar)	Dolum Yüzdesi (%)
140°C	180 bar	69.71
150°C		70.13
160°C		72.57

Tablo 4.12. BR 34150 karışımı 190 bar deney dolum tablosu

34150 BR		
Sıcaklık(°C)	Basınç (Bar)	Dolum Yüzdesi (%)
140°C	190 bar	72.93
150°C		73.25
160°C		74.04

4.2. Model Doğrulama

Oluşturalan matematiksel model ile yapılan CAE analiz sonuçlarının ve deneysel sonuçların karşılaştırmaları yapılmış ve sapma yüzdeleri hesaplanmıştır. Doğrulama deney setinde kullanılacak olan salyangoz kalıpta dolum aralıklarını tespit edebilmek için 370 adet markalama yapılmıştır. Salyangoz kalıp üzerindeki markalamalar 5 mm'lik aralıklar ile markalanacaktır.

Kalıp Dolum Yüzdesi

$$D_1 = \frac{M_n}{M_{100}} \quad (4.1)$$

Denklem (4.1)' de M_n kalıp dolumundaki dolan çentik sayısını ifade etmektedir. M_{100} toplam çentik sayısı olan 370 sayısını ifade etmektedir. Buradaki hesaplama ile kalıp dolum yüzdesi hesaplanacaktır. Kalıp dolumunda kullanılan basınç ve sıcaklık değerlerinde Cadmould programında kalıp dolum analizi yapılacaktır. Cadmould paket programından kalıp dolumuna ait dolum yüzdesi çıktısı alınacaktır. Cadmould programından alınan dolum oranı C_1 olarak ifade edilecektir. Sapma yüzdesi SY olarak ifade edilecektir. Elde edilen çıktılar sonucunda sapma yüzdesini hesaplamak için denklem (4.2) kullanılacaktır.

Sapma Yüzdesi (%):

$$SY = \frac{D_1}{C_1} \times 100 \quad (4.2)$$

Denklem (4.2)'den elde edilen sapma yüzdesine göre oluşturulan modelin doğruluğu tespit edilecektir. Elde edilen sapma yüzdesi değerlerine göre oluşturulan malzeme modelleri korele edilecektir.

NR kauçuk için 190 bardaki 140°C, 150°C ve 160°C için CAE analiz sonucu örnek olarak Şekil 4.2, Şekil 4.3, Şekil 4.4'de gösterilmiştir.

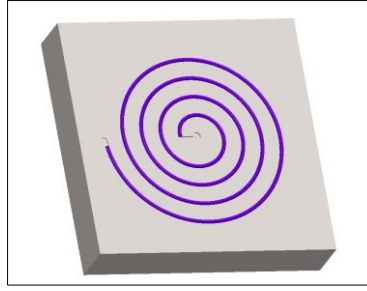
Tablolarda sırasıyla 12480 kodlu NR karışımı, 24155 kodlu EPDM karışımı ve 15270 kodlu NBR karışımı ve 34150 kodlu BR kodlu karışımlarına ait analiz sonuçları ve deney sonuçlarının karşılaştırılması verilmiştir.

Deney sonunda 12480 kodlu NR karışımı için farklı sıcaklıklardaki sapma yüzdeleri Tablo 4.13, Tablo 4.14 ve Tablo 4.15'te gösterilmiştir.

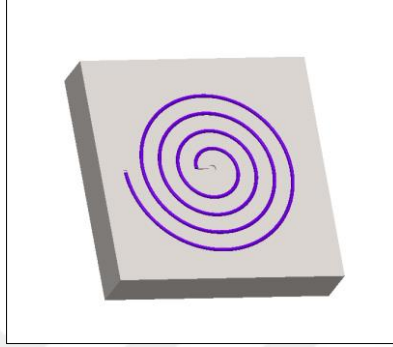
Deney sonunda 24155 kodlu EPDM karışımı için farklı sıcaklıklardaki sapma yüzdeleri Tablo 4.16, Tablo 4.17 ve Tablo 4.18'te gösterilmiştir.

Deney sonunda 15270 kodlu NBR karışımı için farklı sıcaklıklardaki sapma yüzdeleri Tablo 4.19, Tablo 4.20 ve Tablo 4.21'te gösterilmiştir.

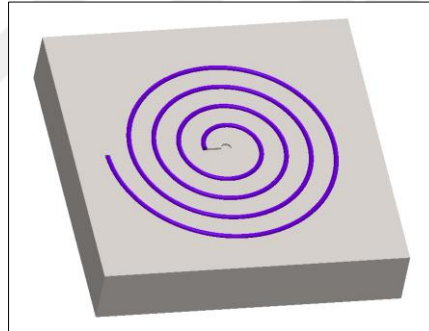
Deney sonunda 34150 kodlu BR karışımı için farklı sıcaklıklardaki sapma yüzdeleri Tablo 4.22, Tablo 4.23 ve Tablo 4.24'te gösterilmiştir.



Şekil 4.4. Nr kauçuk 140 °C ve 190 bar dolum analiz sonucu



Şekil 4.5. Nr kauçuk 150 °C ve 190 bar dolum analiz sonucu



Şekil 4.6. Nr kauçuk 160 °C ve 190 bar dolum analiz sonucu

Tablo 4.13 NR 12480 karışımı 170 bar CAE analiz deney karşılaştırma

12480 NR		
Sıcaklık(°C)	Basınç (Bar)	Sapma Yüzdesi(%)
140°C	170 bar	1.55
150°C		1.59
160°C		1.48

Tablo 4.14. NR 12480 karışımı 180 bar CAE analiz deney karşılaştırma

12480 NR		
Sıcaklık(°C)	Basınç (Bar)	Sapma Yüzdesi(%)
140°C	180 bar	1.35
150°C		1.39
160°C		1.23

Tablo 4.15. NR 12480 karışımı 190 bar CAE analiz deney karşılaştırma

12480 NR		
Sıcaklık(°C)	Basınç (Bar)	Sapma Yüzdesi(%)
140°C	190 bar	1.32
150°C		1.20
160°C		1.35

Tablo 4.16. EPDM 24155 karışımı 170 bar CAE analiz deney karşılaştırma

EPDM 24155		
Sıcaklık(°C)	Basınç (Bar)	Sapma Yüzdesi(%)
140°C	170 bar	2.50
150°C		2.45
160°C		2.80

Tablo 4.17. EPDM 24155 karışımı 180 bar CAE analiz deney karşılaştırma

EPDM 24155		
Sıcaklık(°C)	Basınç (Bar)	Sapma Yüzdesi(%)
140°C	180 bar	2.35
150°C		2.40
160°C		2.20

Tablo 4.18. EPDM 24155 karışımı 190 bar CAE analiz deney karşılaştırma

EPDM 24155		
Sıcaklık(°C)	Basınç (Bar)	Sapma Yüzdesi(%)
140°C	190 bar	2.98
150°C		3.01
160°C		2.48

Tablo 4.19. NBR 15270 karışımı 170 bar CAE analiz deney karşılaştırma

15270 NBR		
Sıcaklık(°C)	Basınç (Bar)	Sapma Yüzdesi(%)
140°C	170 bar	6.63
150°C		6.34
160°C		8.78

Tablo 4.20. NBR 15270 karışımı 180 bar CAE analiz deney karşılaştırma

15270 NBR		
Sıcaklık(°C)	Basınç (Bar)	Sapma Yüzdesi(%)
140°C	180 bar	7.31
150°C		11.36
160°C		11.19

Tablo 4.21. NBR 15270 karışımı 190 bar CAE analiz deney karşılaştırma

15270 NBR		
Sıcaklık(°C)	Basınç (Bar)	Sapma Yüzdesi(%)
140°C	190 bar	8.99
150°C		6.34
160°C		8.96

Tablo 4.22. BR 34150 karışımı 170 bar CAE analiz deney karşılaştırma

34150 BR		
Sıcaklık(°C)	Basınç (Bar)	Sapma Yüzdesi(%)
140°C	170 bar	9.74
150°C		10.07
160°C		7.19

Tablo 4.23. BR 34150 karışımı 180 bar CAE analiz deney karşılaştırma

34150 BR		
Sıcaklık(°C)	Basınç (Bar)	Sapma Yüzdesi(%)
140°C	180 bar	11.71
150°C		7.13
160°C		10.57

Tablo 4.24. BR 34150 karışımı 190 bar CAE analiz deney karşılaştırma

34150 BR		
Sıcaklık(°C)	Basınç (Bar)	Sapma Yüzdesi(%)
140°C	190 bar	8.93
150°C		8.25
160°C		10.04

4.3. Reolojik Karakterizasyon Test Sonuçları

Bölüm 4.2 ve 4.3’de yapılan model doğrulamasını gerçek dünya şartlarda görmek için boru askı lastiğinde uygulama yapmaya karar verilmiştir. Boru askı lastiğinde NR karışımı kullanılmıştır.

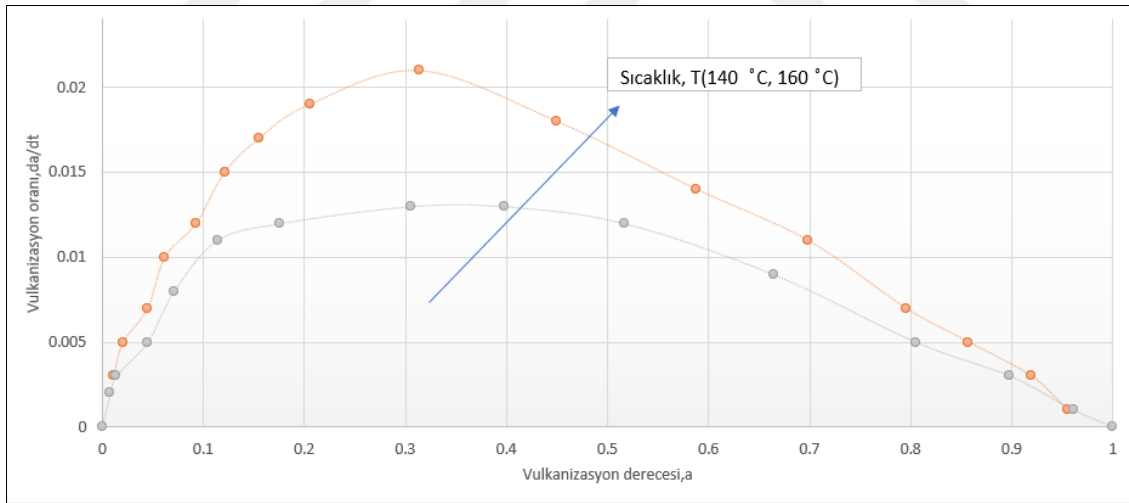
Reoloji testleri geliştirilmiş reolojik karakterizasyon test cihazında vida ağzına kauçuk şerit beslenerek başlanmıştır. Kauçuk şerit vida mekanizmasından geçerek kovani

doldurmaktadır. Kovan dolumundan sonra servo motorlar tarafından tahrik edilen silindir hareket ederek kovanda eriyik kauçuğu nozuldan dışarı atmaktadır. Bu esnada gövde ve nozul ucunda sıcaklık ve basınç ölçümleri yapılmaktadır. Yapılan bu ölçüm sonucundaki veri gerçek zamanlı olarak toplanıp analiz edilmektedir. Test sırasında kullanılan karışım özellikleri Tablo 4.25’de verilmiştir.

Tablo 4.25. Karışım özellik

	Yoğunluk(kg/m ³)	Özgül Isı(kg*K)	Termal iletkenlik(w/(m*K))
Karışım 12480	1080	1338	0,134

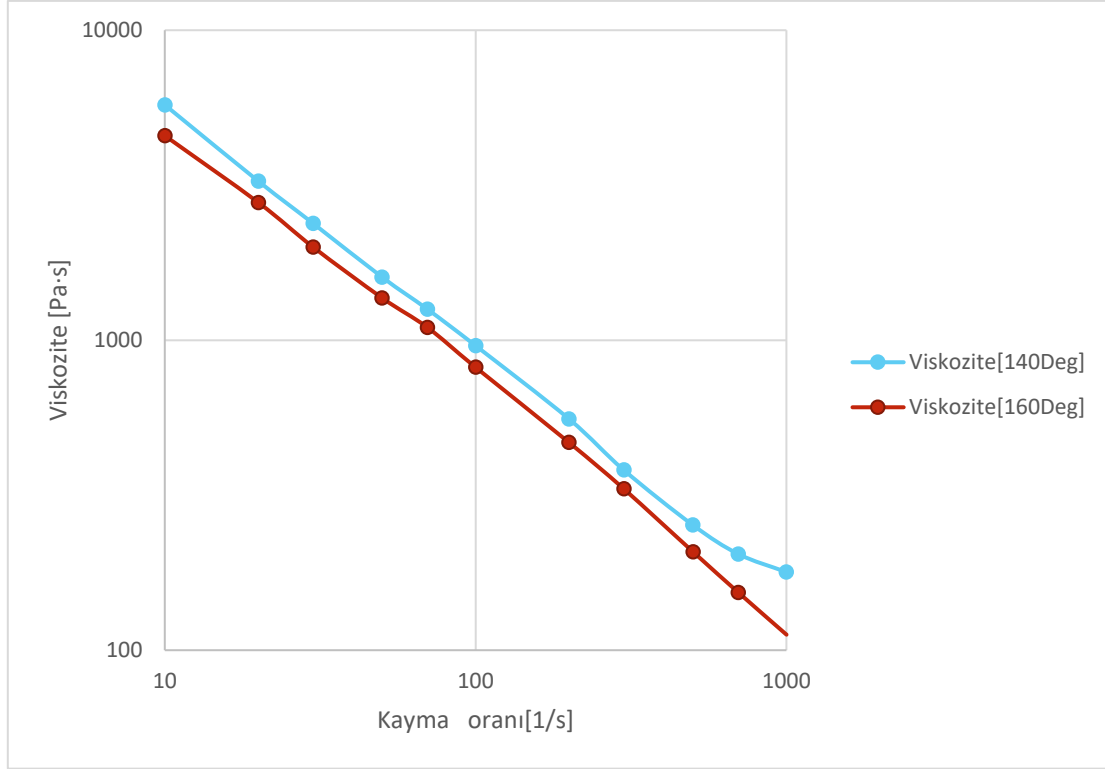
Geliştirilmiş kapiler reometri tez cihazı farklı sıcaklıklarda kauçuk bileşiğinin akış eğrilerini belirlemek için kullanılmaktadır. Deneyler 140°C ve 160°C’de L/D oranı = 80 iç çapı = 8 mm kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Cihazdan toplanan tork değerleri Şekil 4.7’de verilmiştir.



Şekil 4.7. Toplanan Tork Değer

Reolojik testler için kullanılan görünür kayma oranı değerleri ise 10, 30, 70, 200.14, 299.9, 499, 700, 1000.72 ($\frac{1}{s}$) şeklindedir. Tablo 4.26’da toplanan veriler yer almaktadır.

Şekil 4.8’de Bagley ve -Rabinowitsch düzeltmelerinin uygulanmasından sonra farklı sıcaklıklarda viskozitenin kayma hızına bağlı olarak çizilen verileri göstermektedir.



Şekil 4.8. Bagley ve -Rabinowitsch düzeltmelerinin Sonucu
Modelde kullanılacak Kamal-Sourour model sabitleri Tablo 3.15’de gösterilmiştir.

Tablo 4.26. Kamal- Sourour model sabiti

$A_1(s^{-1})$	0
$E_1/R(K)$	0
$A_2(s^{-1})$	$4.34 E + 07$
$E_2/R(K)$	76.3
m	0.67
n	1.35

Tablo 4.27. Toplanan veri sonucu kayma oranı ve viskozite değeri

Sıcaklık [°C]	Kayma oranı[1/s]	Viskozite [Pa·s]
140	10	5743,57
	20	3258,5
	30	2381,98
	50	1598
	70	1258,69
	100	960,16
	199,68	557,32
	299,75	381,23
	499,9	253,45
	700,04	204,32
	999,79	178,68
160	10	4570,13
	20	2780,45
	30	1997,57
	50	1369,32
	70	1099,4
	100	817,66
	199,68	468
	299,75	331,53
	500,83	207,61
	700,04	153,61
	1000,72	112,22

Kauçuk bileşiğinin reolojik özelliklerini tanımlamak için kullanılan Reaktif viskozite modeli aşağıdaki gibidir:

$$\eta(a, T, \dot{\gamma}) = \frac{\eta_0(T)}{1 + \left[\frac{\eta_0(T)\dot{\gamma}}{\tau^*} \right]^{1-n}} \left(\frac{\alpha_g}{\alpha_g - a} \right)^{C_1 + C_1 a} \quad (4.2)$$

Denklem (4.2)'de η , T ve n sırasıyla viskozite, sıcaklık ve kayma hızı duyarlılığını temsil ederken, τ^* Newtonian'dan non-Newtonian akışa geçişteki kayma gerilimini ifade etmektedir. Denklem (4.3) Cross-WLF modelinden gelmektedir. η_0 ise kayma hızı yavaşça sıfıra yaklaştığında viskoziteyi temsil eder ve aşağıdaki gibi tanımlanır:

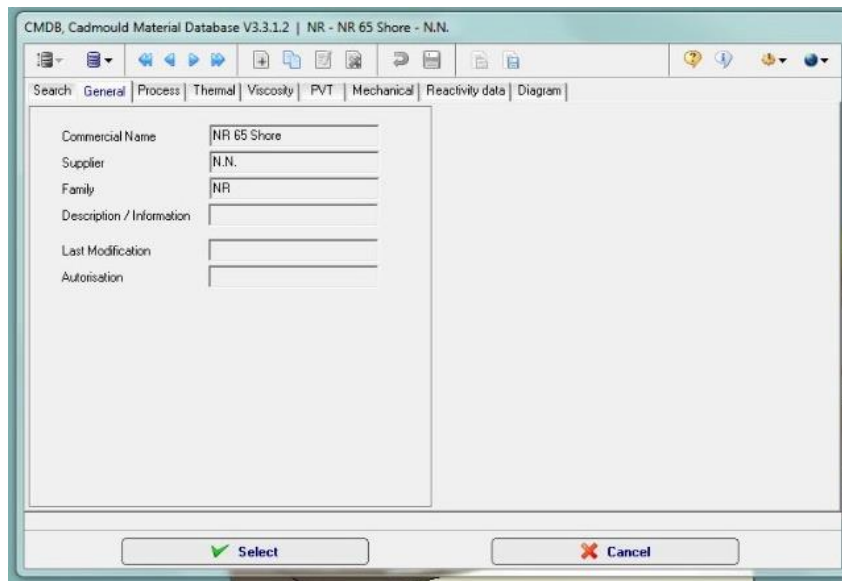
$$\eta_0 = B \exp\left(\frac{T_b}{T}\right) \quad (4.3)$$

B ön exponansiyel terimi temsil ederken, T_b , η_0 sıcaklığa olan duyarlılığını temsil etmektedir.

4.4. Cadmould Test Sonuçları

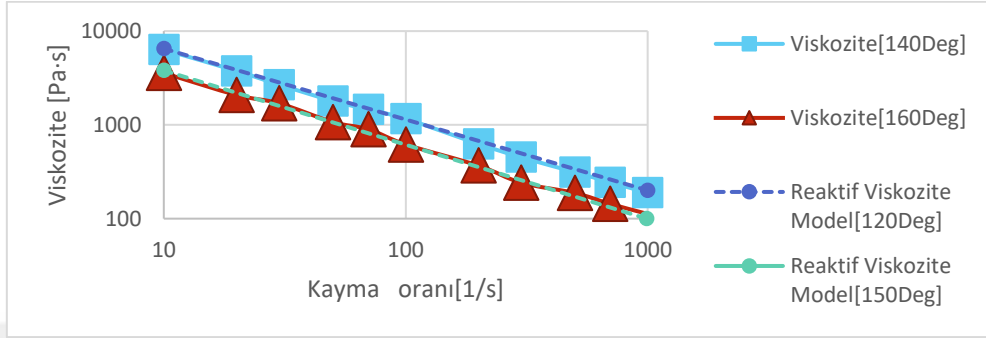
Cadmould CAE yazılımının analiz modülünün, kauçuk enjeksiyon kalıplama parçalarının uygun akış simülasyonlarını gerçekleştirme yeteneğini doğrulamak için bir karşılaştırma yapılır. Deneysel olarak belirlenen model parametreleri, kauçuk bileşenin enjeksiyon kalıplama sürecini, kalıp doldurma dinamiği ve malzeme kürleşmesi aşamalarını simüle etmek için kullanılır.

Geliştirilmiş kapiler reometri cihazından alınan verilerle malzeme kütüphanesi oluşturulmuş. Şekil 4.9'da Cadmould yazılımı kütüphane görseli yer almaktadır.



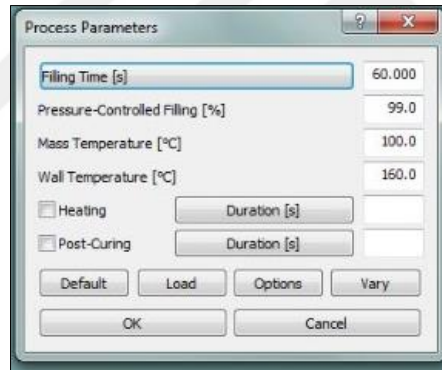
Şekil 4.9. Malzeme kütüphanesi

Şekil 4.10'da, 140°C ve 160°C'deki farklı kayma hızlarına sahip deneysel viskozite verileri ile Cadmould programından reaktif viskozite modeli tarafından oluşturulan eğriler arasında iyi bir uyum göstermektedir. Bu uyum, modelin viskozite davranışını doğru bir şekilde tahmin ettiğini göstermektedir.



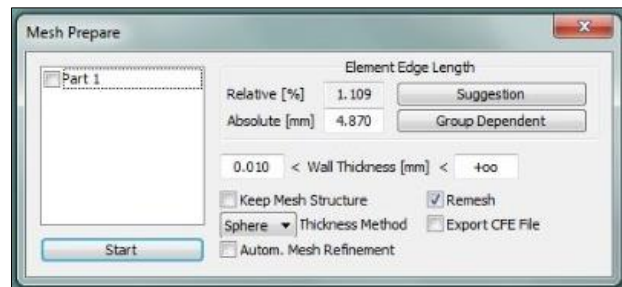
Şekil 4.10. Reaktif viskozite model

Şekil 4.11'de analizin gerçekleştirileceği sıcaklık ve dolum sürelerinin ayarlandığı proses parametre ayar ekranı gösterilmektedir.



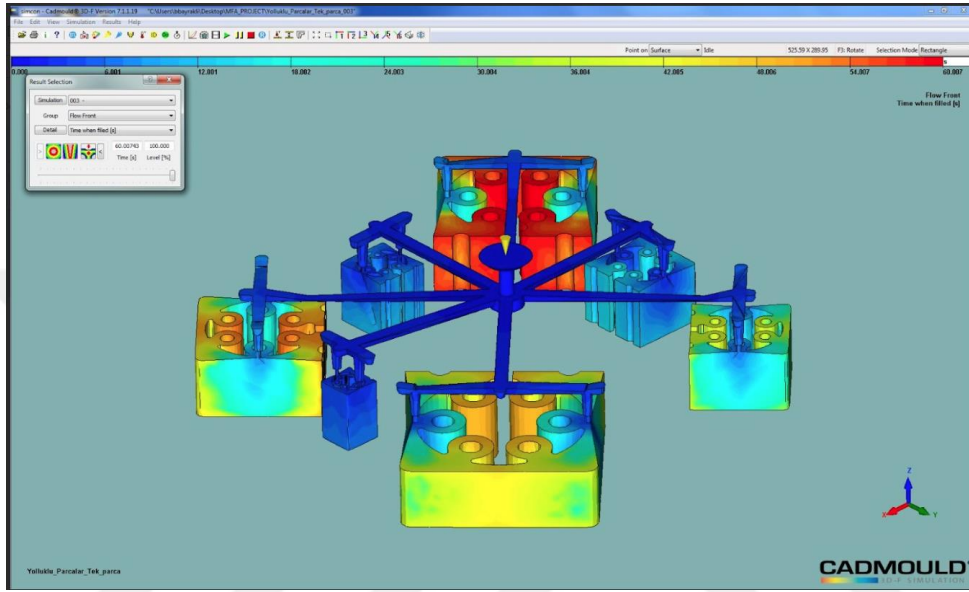
Şekil 4.11. Analiz parametreleri ekranı

Cadmould analiz programında analiz için seçilen mesh özellikleri Şekil 4.12'de gösterilmektedir.



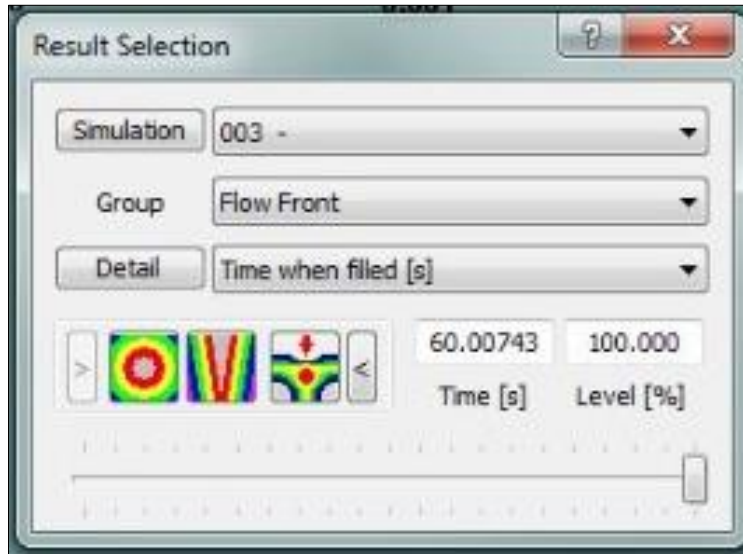
Şekil 4.12. Cadmould mesh boyut

Bilgisayar simülasyonu tarafından öngörülen doldurma süresiyle, kalıplanmış parçaların karşılaştırılmış ve analizin doğruluğu görülmüştür. Analiz sonucunda elde edilen verilerin, gerçekteki dolum akışı temsil ettiğini göstermektedir. Cadmould simülasyonundan elde edilen dolum süresi Şekil 4.13’da gösterilmiştir. Dolum süresi sonucu ile dolum deneyleri yoluyla elde edilen sonuçlar karşılaştırılır.



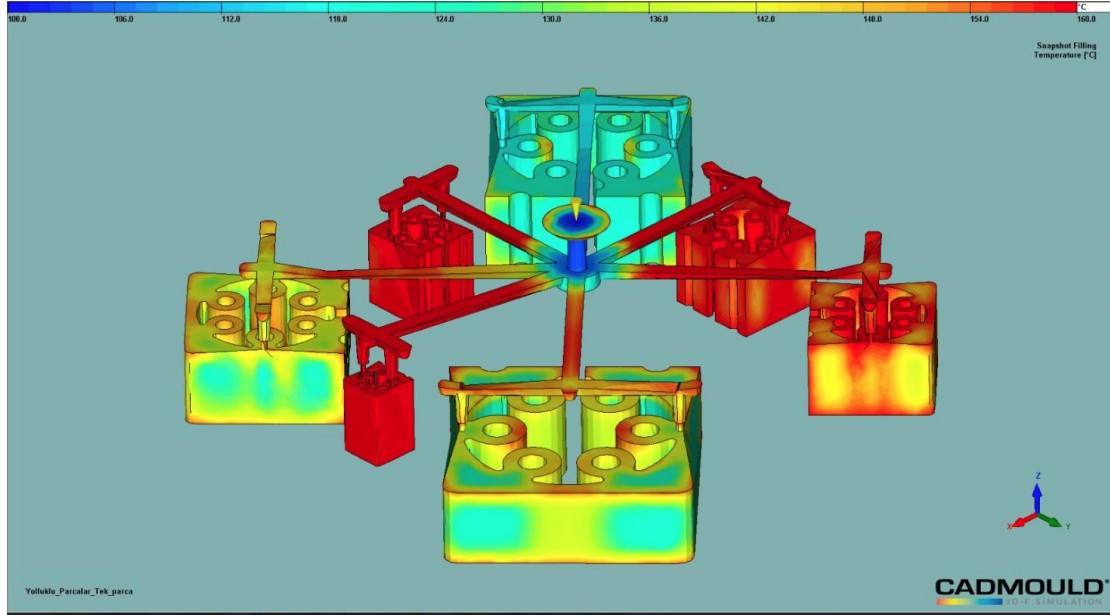
Şekil 4.13. CADMould dolum süresi

Şekil 4.14’de yer alan Cadmould dolum analiz sonucu kalıplanmış parçanın doluluk oranı gözlemlenebilmektedir.

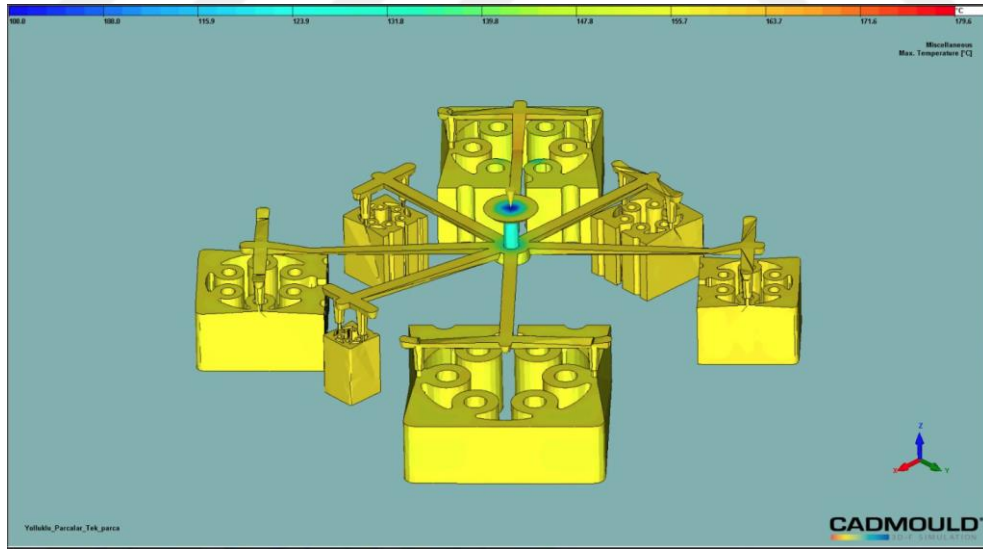


Şekil 4.14. Cadmould analiz süre

Şekil 4.15’ da dolum sonundaki ve dolumun herhangi bir aşamasındaki mamul sıcaklıkları tespit edilebilmektedir. Bu sıcaklık tespitleri kalıp tasarım aşamasında yolluk tasarımları açısından büyük önem taşımaktadır. Şekil 4.16’da maksimum sıcaklığa ait analiz sonucu yer almaktadır.



Şekil 4.15. CADMould sıcaklık analiz sonucu



Şekil 4.16. CADMould maksimum sıcaklık analiz sonucu

4.5. Analiz Sonuçları Karşılaştırma

Analiz verilerinden sonuçların kontrolü için Tekno Kauçuk makine parkurunda yer alan Maplan marka enjeksiyon presinde deneme üretimleri yapılmıştır. Bu üretimlerde

makine ayarı simülasyon çalışma ayarlarıyla aynı şekilde yapılmıştır. Yapılan üretim sonucunda, kauçuk enjeksiyon kalıplama sürecinin dolum ve kürleşme aşamalarını doğru bir şekilde modellemenin mümkün olduğunu göstermektedir. Tablo 4.28’da deneme üretimi sonucunda alınan değerlerin simülasyon sonuçları ile karşılaştırılması gösterilmektedir.

Tablo 4.28. Simülasyon ve deneysel sonuçlar

	Simülasyon Sonuçları	Deneysel Sonuçları
Dolum (s)	61,008	62
Basınç kontrollü dolum (%)	99	99.8
Sıcaklık Duvarı (°C)	160	160
Isıtma ısıtma (°C)	204	204

Bu analizler sonucunda reoloji modelinin doğru kullanıldığı ve reolojik karakterizasyon test cihazının doğru veriler topladığı görülmektedir. Verilen veriler ışığında imal edilmiş olan boru askı Şekil 4.15, Şekil 4.16 ve Şekil 4.17’de lastiği gözükmektedir. Girelen parametreler ile imal edilen boru askı lastiğinin tamamen dolu şekilde imal edildiği gözlenmektedir.



Şekil 4.17. Boru askı lastiği izometrik görünüş



Şekil 4.18. Boru askı lastiği önden görünüş



Şekil 4.19. Boru askı lastiği yandan görünüş

Hesaplamalar, deneysel sonuçlarla iyi bir uyum içindedir ve güvenilir bir şekilde malzeme viskozitesi ve kür kinetiği hakkında bilgi, sağlam tahminler için önemli bir rol oynamaktadır. Bu sayede geniş çaplı malzeme kütüphanesi oluşturularak üretim kapasitesi artar, üretim maliyetleri düşer. Bunlara ek olarak kalıp revizyon maliyetleri düşürülebilir.

5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu tez çalışması, reolojik karakterizasyon test cihazlarının geliştirilmesi ve elde edilen sonuçların Cadmould programında analiz edilmesi üzerine odaklanmıştır. Bu yöntemlerin entegrasyonu, işleme süreçlerine önemli katkılar sağlamakta ve süreç optimizasyonu, malzeme seçimi ve kalıp tasarımı açısından değerli bilgiler sunmaktadır.

Geliştirilen yeni tasarımla beraber cihazın içeriği vida kovan mekanizması ile kauçuk enjeksiyon prosesine yakın şartlarda reolojik karakterizasyon yapılmaktadır.

Gelecekteki araştırmalar, reolojik test cihazlarının ve Cadmould programının daha ileri entegrasyonunu ve işleme süreçlerine uygulanmasını inceleyebilir. Ayrıca, yeni malzemeler, işleme teknikleri ve analiz yöntemleri geliştirildikçe, bu bilgiler süreç optimizasyonu ve kalıp tasarımının iyileştirilmesi için kullanılabilir. Bu sayede, üretim süreçlerinin verimliliği ve ürün kalitesi sürekli olarak artırılabilir. Kalıplardaki dolum problemlerinin önüne geçerek revizyon maliyetlerinin önüne geçecektir.

Bu deneylerin sonucunda NR ve NBR testlerindeki sapmalar incelendiğinde kullanılan matematiksel modelin doğruluğu gözlenmektedir. BR ve EPDM karışım sonuçlarındaki sapmalar yüksek çıkmaktadır. Düzeltme faktörü değiştirilek veya model değiştirilek ilerdeki çalışmalarda araştırılması tavsiye edilir.

Silindir tahriğinin servo motor ile yapılması sonucunda değişken hız ve basınçlardaki değişim hassas bir şekilde ölçülebilmektedir. Bu sayede hassas yük aralıklarında çalışılabilmektedir. Buna istinaden makinenin maliyeti artmıştır. Ayrıca karışımın elle beslenmesi yerine vida mekanizmasından beslenmesiyle endüstriyel üretim tesislerinde kullanılabilirliği artırılmıştır.

Yapılan deneylerin sonucunda NR ve NBR karışımları üzerinde yapılan denemelerde CAE analiz sonucu ile gerçek kalıp dolum sonucu arasındaki dolum yüzdeleri arasındaki yüzdesel sapmalar %5'in altında çıkmıştır. Çıkan sonuçlar oluşturulan matematiksel modelin ve cihazın ölçüm doğruluğunu göstermektedir. BR ve EPDM karışımları kalıp dolum yüzdesel sapmaları %5'ten yüksek çıkmıştır. Bu karışımlar için düzeltme faktörü veya model değiştirilebilir ilerdeki çalışmalarda araştırılması tavsiye edilir.

KAYNAKLAR

- Agrawal, R., & Pandey, R. (2015). Application of The Arrhenius Equation to The Thermal Decomposition of Biomass. *Bioresource Technology*, 540-544.
- Aklonis, J. H., MacKnight, W. J., Shen, M., & Mason, W. P. (1973). Introduction to Polymer Viscoelasticity. *Physics Today*, 26(5). <https://doi.org/10.1063/1.3128055>
- Ariff, Z. M., Ariffin, A., Jikan, S. S., & Rahim, N. A. A. (2012). Rheological Behaviour of Polypropylene Through Extrusion and Capillary Rheometry. *In Polypropylene*, 29-49.
- Arrhenius, S. (1889). Über die Reaktionsgeschwindigkeit bei der Inversion von Rohrzucker durch Säuren. *Zeitschrift für Physikalische Chemie*, 4(1), 226-248.
- ASTM International (2009). *ASTM D412-16 "Standard Test Methods for Vulcanized Rubber and Thermoplastic Elastomers—Tension"*. West Conshohocken, PA; ASTM International. Annual Book of ASTM Standards. West Conshohocken.
- ASTM International (2012). *ASTM D5289-12 Standard Test Method for Rubber Property — Vulcanization Using Rotorless Cure Meters*. Annual Book of ASTM Standards, 95(C). West Conshohocken.
- ASTM International (2014). *ASTM D575-91 Standard Test Methods for Rubber Properties in Compression*. *Astm*, 91(Reapproved 2012). West Conshohocken.
- ASTM International (2019). *ASTM D2084 Standard Test Method for Rubber Property—Vulcanization Using Oscillating Disk Cure Meter*. West Conshohocken.
- ASTM International. (2012). *ASTM D4065 - Standard Practice for Plastics : Dynamic Mechanical Properties : Determination and Report of Procedures*. Annual Book of ASTM Standards, i. West Conshohocken.
- Bagley, R. L., & Torvik, P. J. (1983). A Theoretical Basis for the Application of Fractional Calculus to Viscoelasticity. *Journal of Rheology*, 27(3). <https://doi.org/10.1122/1.549724>
- Barnes, H. A. (1999). The Yield Gerilmes—A Review or ‘*παντα ρει*’—Everything Flows. *Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics*, 81(1-2), 133-178.
- Barnes, H. A., Hutton, J. F., & Walters, K. (1989). *An introduction to rheology* (Vol. 3). Elsevier. In Elsevier.
- Brostow, W., & Hagg Lobland, H. E. (2008). Predicting wear from mechanical properties of thermoplastic polymers. *Polymer Engineering and Science*, 48(10). <https://doi.org/10.1002/pen.21045>

- Cardinaels, R., van Puyvelde, P., & Moldenaers, P. (2007). Evaluation and comparison of routes to obtain pressure coefficients from high-pressure capillary rheometry data. *Rheologica Acta*, 46(4). <https://doi.org/10.1007/s00397-006-0148-5>
- Carreau, P. J. (1972). Rheological equations from molecular network theories. *Trans soc rheol*, 16(1). <https://doi.org/10.1122/1.549276>
- Cengel, Y. A. | J. M. C. (2020). *Fluid Mechanics: Fundamentals And Applications, SI 4th Edition*. Foreign Affairs, 91(5).
- Cheneler, D. (2019). Colloidal Suspension Rheology (J. Mewis, N. J. Wagner). *Applied Rheology*, 22(1). <https://doi.org/10.1515/arh-2012-0001>
- Ciesielski, A. (1996). *The Basic Rubber Compound. Introduction to Rubber Technology*, 69(3).
- Cogswell, F. N. (1991). Melt Rheology and its Role in Plastic Processing: Theory and Applications. *Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics*, 39(3). [https://doi.org/10.1016/0377-0257\(91\)80025-f](https://doi.org/10.1016/0377-0257(91)80025-f)
- Diethelm, K. (2010). The analysis of fractional differential equations: An application-oriented exposition using differential operators of caputo type. *Lecture Notes in Mathematics*.
- Erman, B., Mark, J. E., & Roland, C. M. (Ed.). (2013). *The Science and Technology of Rubber* (4th edition). Elsevier Academic Press.
- Fazli, A., & Rodrigue, D. (2020). Waste rubber recycling: A review on the evolution and properties of thermoplastic elastomers. In *Materials* (Vol. 13, Issue 3). <https://doi.org/10.3390/ma13030782>
- Ferry, J. D. (1980). *Viscoelastic Properties of Polymers*. John Wiley & Sons. New Jersey.
- Filip, Petr & Hausnerova, Berenika & Hnátková, Eva. (2020). Continuous Rheological Description of Highly Filled Polymer Melts for Material Extrusion. *Applied Materials Today*. 20. 100754. [10.1016/j.apmt.2020.100754](https://doi.org/10.1016/j.apmt.2020.100754).)
- Findley, W. N., & Davis, F. A. (2013). *Creep and Relaxation of Nonlinear Viscoelastic Materials*. Courier Corporation. Massachusetts.
- Fox, R. W., & McDonald, A. T. (1994). Introduction to Fluid Mechanics. *European Journal of Engineering Education*, 19(4). <https://doi.org/10.1080/03043799408928334>
- Graf, H. J. (2018). Operating window in injection molding with nine experiments. *Rubber World*, 259(3).

- Hadinata, C., Gabriel, C., Ruellman, M., & Laun, H. M. (2005). Comparison Of Shear-Induced Crystallization Behavior of Pb-1 Samples With Different Molecular Weight Distribution. *Journal of Rheology*, 49(1). <https://doi.org/10.1122/1.1835342>
- Hayes, R. A. (1986). New Look At Measurements Of Network Density. *Rubber Chemistry and Technology*, 59(1). <https://doi.org/10.5254/1.3538181>
- Heo, Young-Jung. (2015). A review: Role of Interfacial Adhesion Between Carbon Blacks and Elastomeric Materials. *Carbon Letters*. 18. 1-10. [10.5714/CL.2016.18.001](https://doi.org/10.5714/CL.2016.18.001).
- Hofman, W., & Adams, M. (1994). Rubber Technology Handbook. *Tribology International*, 27(5). [https://doi.org/10.1016/0301-679x\(94\)90032-9](https://doi.org/10.1016/0301-679x(94)90032-9)
- Katun, Md. N. (1996). Non-Sulphur Vulcanization Of Rubber- A Brief Overview. *Jurnal Teknologi*. <https://doi.org/10.11113/jt.v25.1004>
- Krause, S. (2000). Polymer Chemistry: An Introduction, 3rd Edition. *Journal of Chemical Education*, 77(1). <https://doi.org/10.1021/ed077p35>
- Li, S., Zhang, J., Ren, Z., Li, X., & Zhao, J. (2019). Investigation of The Viscoelastic Properties of Polyurethane Foam Based on Carreau Model. *Polymer Testing*, 80, 106040
- Liu, J. P., Zhang, X. F., Zhang, W. C., Lv, K. H., Bai, Y. R., Wang, J. T., Sun, J. S. (2022). Carbon Nanotube Enhanced Water-Based Drilling Fluid for High Temperature and High Salinity Deep Resource Development. *Petroleum Science*, 19(2), 916-926.
- Lu, C., & Qin, Q. (2019). Characterizing the Dynamic Shear Rheological Properties of Carbopol Hydrogels. *Journal of Applied Polymer Science*, 136(9), 47031.
- M. R. Kamal, M. S. Islam, and M. Hasan (2021). A Comprehensive Review on The Recent Progress of Rubber Nanocomposites with Graphene and Its Derivatives, *Polymer Testing*, vol. 93, pp. 106929, 2021.
- Macosko, C. W. (1996). Rheology: Principles, Measurements and Applications. *In Powder Technology (Vol. 86, Issue 3)*.
- Malkin, A. Y., & Isayev, A. I. (2022). *Rheology: Concepts, Methods, and Applications, Fourth Edition*. <https://doi.org/10.1016/C2021-0-00517-4>
- Mark, J. E., Erman, B., & Roland, C. M. (2013). *The Science and Technology of Rubber, Fourth Edition*. <https://doi.org/10.1016/C2011-0-05820-9>
- Maxwell, J.C. (1867) On the Dynamical Theory of Gases. *Philosophical Transactions of the Royal Society*, 157, 49-88. <http://dx.doi.org/10.1098/rstl.1867.0004>

- MEB (2011). *Kimya Teknolojisi Sentetik Kauçuk Özellikleri ve Testleri*. Ankara.
- Mitsoulis, Evan & Battisti, Markus & Neunhäuserer, Andreas & Perko, Leonhard & Friesenbichler, Walter & Ansari, Mahmoud & Hatzikiriakos, Savvas. (2017). Flow Behaviour of Rubber in Capillary and Injection Moulding Dies. *Plastics, Rubber and Composites*. 46. 1-9. 10.1080/14658011.2017.1298207.
- Mittal, V., Lomovtsev, A. A., & Petrovic, Z. S. (2007). Effect of flow instabilities on Rheological Behavior of High-Impact Polystyrene Melts: Use of the Carreau model. *Polymer Engineering & Science*, 47(3), 307-315.
- Moller, M., & Matyjaszewski, K. (2012). Polymer Science: A Comprehensive Reference, Macromolecular Architecture and Soft Nano-Objects. *Muller AHE, Wooly KL (eds)*, 6, 104-105.
- N. N. Eisa and W. F. Al-Masry (2007). Characterization of NBR/EPDM Blends Prepared by Mechanical Mixing," *Journal of Applied Polymer Science*, vol. 105, no. 2, pp. 770-777.
- Nishino, T., Uchida, A., Masuda, T., Inoue, K., & Tsubokawa, N. (2018). Characterization of Elastomeric Properties of Natural Rubber by Dynamic Viscoelastic Measurement. *Journal of Elastomers and Plastics*, 50(6), 497-510.
- Ongun, A., Karakaya, İ., Güçlü, G., & Özkoç, G. (2017). Effect of Composition on The Rheological Properties of Natural Rubber Compounds. *Journal of Elastomers and Plastics*, 49(5), 427-441.
- Osswald, T. A., Turng, L. S., & Gramann, P. J. (2008). *Injection Molding Handbook*. Hanser Verlag.
- Önder A.E. (2008) Kılcal Reometrenin Otomatik Kontrol Sisteminin Tasarlanması ve Hesaplama Programının Yazılması. Yüksek Lisans Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 0037268.
- Özge Y. (2019). Sıcaklık Dayanım Performansı Geliştirilmiş EPDM Esaslı Malzeme Geliştirilmesi. Yüksek Lisans Tezi, Kocaeli Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Kocaeli, 546357.
- Papadopoulou, E., Nikolaidis, A., Anastasiou, E., & Tsoukleris, D. S. (2020). Dynamic Shear Rheology and Thixotropy of Cement Pastes Modified with Carbon Nanotubes. *Cement and Concrete Research*, 128, 105970.
- Pate, K.L. and Katta, R.R. (2016). Mechanical Properties and Morphology of Polybutadiene Nanocomposites. *Journal of Nanomaterials*, 1-10.
- Piccarolo, S., Poulouse, A. M., & Luzio, A. (2012). Influence of Plasticizers Suggests Role of Topology in Polymer Solidification at High Cooling Rates. *Journal of Applied Polymer Science*, 125(6), 4233-4242.

- Rana, S., Srivastava, A., & Banthia, A. K. (2018). Improving the Mechanical Properties of Natural Rubber-Based Composites Using Nanofillers and Microfillers. *Rubber Chemistry and Technology*, 91(2), 240-261
- Rudolph, N., & Osswald, T. (2015). Polymer Rheology: Fundamentals and Applications. In *Angewandte Chemie International Edition*, 6(11), 951–952. (Issue 1).
- S. Thomas and S. Thomas (1998). The Use of Vulcanization Curves in The Optimization of Natural Rubber Vulcanization, *Journal of Applied Polymer Science*.
- Saçak, M. (1998). *Polimer Kimyasına Giriş*. AÜ FF Döner Sermaya İşletmesi Yayınları, 50.
- Savran, H. Ö. (2001). *Elastomer Teknolojisi I. Kauçuk Derneği Yayınları*. İstanbul, 93-99.
- Smitthipong, W., & Koonsaeng, N. (2017). Dynamic Shear Rheology of Natural Rubber Nanocomposites. *Journal of Applied Polymer Science*, 134(32), 45016.
- Sommer, J. (2014). Troubleshooting Rubber Problems. In *Troubleshooting Rubber Problems*. <https://doi.org/10.3139/9781569905548.fm>
- Sun, X., & Isayev, A. I. (2009). Cure Kinetics Study of Unfilled and Carbon Black Filled Synthetic Isoprene Rubber. *Rubber Chemistry and Technology*, 82(2), 149-169.
- Syrjälä, Seppo & Aho, Johanna. (2012). Capillary Rheometry of Polymer Melts — Simulation and Experiment. *Korea-Australia Rheology Journal*. 24. 10.1007/s13367-012-0029-7.
- Tan B. (2020). Çevresel Koşulların Kaçuk Malzemelerin Yay Rijitliğine VE Yorulma Davranışlarına Olan Etkilerinin Deneysel Olarak İncelenmesi. Yüksek Lisans Tezi, Kocaeli Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Kocaeli, 619087.
- Trujillo, J. J., Scalas, E., Diethelm, K., & Baleanu, D. (2016). Fractional Calculus: Models and Numerical Methods (Vol. 5). *World Scientific*.
- URL-1: <https://www.snexplores.org/article/explainer-what-are-polymers/>, (Ziyaret Tarihi: 13 Kasım 2022)
- URL-2: <http://sahinkaucuk.net/index.html/>, (Ziyaret Tarihi: 13 Kasım 2022)
- URL-3: <https://www.americanlaboratory.com/914-Application-Notes/176837-Time-Efficient-Execution-of-Rheological-Tests-in-Oscillation-With-an-Easy-to-Use-Quality-Control-Rheometer/> (Ziyaret Tarihi: 13 Kasım 2022)

- URL-4: <https://www.ektrontek.com/moving-die-rheometer-ekt-2003s.html#gsc.tab=0/>, (Ziyaret Tarihi: 10 Aralık 2022)
- URL-5: <https://vatanlar.wordpress.com/2011/12/29/reometre-rheometer-nedir/>, (Ziyaret Tarihi: 13 Mart 2022) (Ziyaret Tarihi: 10 Aralık 2022)
- URL-6: http://bilsenbesergil.blogspot.com/p/3_16.html/, (Ziyaret Tarihi: 10 Aralık 2022)
- URL-7: https://depo.btu.edu.tr/dosyalar/kimyamuh/Dosyalar/KBM0308%20Kimya%20M%C3%BChendisli%C4%9Fi%20Laboratuvar%C4%B1_%20II_Reoloji.pdf/, (Ziyaret Tarihi: 10 Aralık 2022)
- URL-8: <https://www.goettfert.com/products/capillary-rheometer/>, (Ziyaret Tarihi: 13 Aralık 2022)
- URL-9: <https://ogreniyo.com/molekul/>, (Ziyaret Tarihi: 13 Mart 2022)
- URL-10: <https://kalkanbilimsel.com/cannon-viskozite-olcum-tupleri.html/>, (Ziyaret Tarihi: 9 Aralık 2022)
- URL-11: <https://www.arifmalyer.com.tr/urun/brookfield-dv3t-viskozimetre-rheometre/>, (Ziyaret Tarihi: 10 Aralık 2022)
- URL-12: <https://silo.tips/download/bias-multi-servo-pres-ile-rakiplerinizden-bir-adm-nde-olun/>, (Ziyaret Tarihi: 10 Ocak 2023)
- URL-13: <https://www.elektrikport.com/teknik-kutuphane/basinc-sensoru-nedir-cesitleri-nelerdir/22081#ad-image-0/>, (Ziyaret Tarihi: 10 Ocak 2023)
- URL-14: https://kistler.cdn.celum.cloud/SAPCommerce_Download_original/000-952e.pdf/, (Ziyaret Tarihi: 13 Ocak 2023)
- URL-15: https://www.adlinktech.com/Products/Data_Acquisition/USBDAQ/USB-1901_1902_1903/, (Ziyaret Tarihi: 13 Ocak 2023)

White, F. M. (2011). *Fluid Mechanics*. McGraw-Hill Education. New York.

Williams, M. L., Landel, R. F., & Ferry, J. D. (1955). The Temperature Dependence of Relaxation Mechanisms in Amorphous Polymers and Other Glass-Forming Liquids. *Journal of the American Chemical Society*, 77(14), 3701-3707.

Yashin, V. V., & Isayev, A. I. (1999). A Model for Rubber Degradation Under Ultrasonic Treatment: Part I. Acoustic Cavitation in Viscoelastic Solid. *Rubber Chemistry and Technology*, 72(4), 741-757.

KİŞİSEL YAYIN VE ESERLER

Çakır H., Sınmazçelik T., Development of A Rheological Characterization Test System, *5th International Conference On Natural And Applied Science And Engineering*, Nevşehir-Türkiye, 26-28 Mayıs 2023



ÖZGEÇMİŞ

Lise öğrenimini Dinar Anadolu Öğretmen Lisesinde tamamladı.2013 yılında girdiği Kocaeli Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Makine Mühendisliği Bölümü'nden 2020 yılında mezun olmuştur. 2021 yılında Kocaeli Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı'nda başladığı yüksek lisans eğitimine halen devam etmektedir. 2016 yılında başladığı Tekno Kauçuk firmasında farklı pozisyonlarda çalışmış son olarak Proses Geliştirme Mühendisi olarak 2023 yılında firmadan ayrılmıştır. 2023 yılında başladığı Yılmaz Makine firmasında Ar-Ge mühendisi olarak görevine halen devam etmektedir.

