

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**PLASTİK BORU EKSTRÜDER KALİBRELERİNDE
ISI TRANSFERİNİN İYİLEŞTİRİLMESİ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
M. Müh. Olcay YENİCİ**

Anabilim Dalı : MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ

Programı : ISI-AKIŞKAN

OCAK 2005

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**PLASTİK BORU EKSTRÜDER KALİBRELERİNDE
ISI TRANSFERİNİN İYİLEŞTİRİLMESİ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
Mak. Müh. Olcay YENİCİ
(503021110)**

**Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 27 Aralık 2004
Tezin Savunulduğu Tarih : 24 Ocak 2005**

Tez Danışmanı: Yrd. Doç. Dr. Erhan BÖKE
Diğer Jüri Üyeleri Prof. Dr. İsmail TEKE (Y.T.Ü.)
Yrd. Doç. Dr. Yalçın URALCAN (İ. T. Ü.)

OCAK 2005

ÖNSÖZ

Bu çalışmada plastik boru ekstrüder kalibrelerinde ısı transferinin iyileştirilmesi amaçlanmıştır. Boru üretiminde kullanılmak üzere geliştirilmiş bir kalibredeki basınç kaybı bulunmuş, yüksek sıcaklıktaki plastik borunun, geliştirilen kalibre içinde ilerlerken, uygulanacak vakum basıncı parametreleri belirlenmiştir. Bu parametrelerden biri olan katılma esnasında polimer malzemenin ısı iletim katsayısının değişimi deneysel ve nümerik olarak belirlenmiştir.

Deneysel çalışmalar Dizayn Teknik Plastik Boru ve Elemanları A.Ş' nin Araştırma ve Teknoloji Geliştirme Müdürlüğü (ATGM) laboratuvarında yapılmış, nümerik çalışmalarda ATGM'de bulunan Fluent 6.0 programından faydalanılmıştır.

Bana böyle bir çalışma fırsatı veren ve çalışma süresince desteklerini esirgemeyen danışman hocam Sayın Yrd. Doç. Dr. Erhan BÖKE'ye teşekkür ederim. Ayrıca çalışma boyunca değerli görüşlerinden yararlandığım; Sayın Prof. Dr. İsmail TEKE, Dizayn Teknik Plastik Boru ve Elemanları A.Ş ATGM Müdürü Mak. Yük. Müh. Zafer GEMİCİ'ye teşekkürlerimi sunmayı borç bilirim.

Aralık 2004

Olca YENİCİ

İÇİNDEKİLER

ÖNSÖZ	ii
İÇİNDEKİLER	iii
KISALTMALAR	vi
TABLO LİSTESİ	vii
ŞEKİL LİSTESİ	viii
SEMBOL LİSTESİ	xiii
ÖZET	xvi
SUMMARY	xvii
1. GİRİŞ	1
1.1 Mevcut Kalibreler	3
2. KAYNAK ARAŞTIRMASI	7
2.1 Yüksek Sıcaklıklarda, Polipropilen (PP) Malzemenin Isı İletim Katsayısının Bulunması	8
2.1.1 Deney setinin tarifi	10
2.1.2 Deney bulguları	12
2.2 Yüksek sıcaklıklarda, Yüksek Yoğunluklu Polietilen (HDPE) Malzemenin Isı İletim Katsayısının Belirlenmesi	12
2.2.1 Isı transfer denklemleri	14
2.2.2 Deney Setinin Tarifi	16
2.2.3 Deney Bulguları	16
2.3 Disk Metodu İle Düşük Yoğunluklu Polietilen (LDPE) Malzemenin Isı İletim Katsayısının Ölçülmesi	19
2.3.1 Deney setinin tarifi	21
2.3.2 Deney numuneleri üretim yönteminin ısı iletim katsayısına olan etkisi	22
2.3.3 LDPE malzemede yoğunluğun ve malzemenin kristallik oranının ısı iletim katsayısına etkisi	24
2.3.4 Isıtma ve soğutma işlemlerinin deneysel ölçümlere etkisi	26
2.4 Yüksek Sıcaklıktaki Polimer Mukavemetinin Bulunması	29

2.4.1	Yüksek sıcaklıktaki boru malzemesinin mukavemetini etkileyen parametreler	39
3	DENEYSEL ÇALIŞMALAR	42
3.1	Kalibrenin Tanımı ve Özellikleri	42
3.1.1	Vakum basıncının ölçülmesi	49
3.2	Katılaşma Esnasında Polipropilen (PPR) Malzemenin Sıcaklık Dağılımının Belirlenmesi	51
3.2.1	Deneyde kullanılan ısıtıcı çiftlerin kalibrasyonu	53
3.2.2	Deneyde kullanılan polipropilen (PP-R) malzemesinin fiziksel özelliklerinin bulunması	56
3.2.3	Deneyin yapılışı	61
3.2.4	Deneyde ölçülen değerler	64
3.2.5	Deneyde ölçülen değerlerle yapılan hesaplamalar	65
3.2.6	Deneyde ölçülen sıcaklık değerleri	68
3.2.7	Deneyin hata analizi	70
4	SAYISAL ÇÖZÜM	72
4.1	Sayısal Çözüm Yöntemleri	72
4.1.1	Ayrı ayrı çözüm yöntemi (Segregated solver)	72
4.1.2	Birarada çözüm yöntemi (Coupled solver)	73
4.2	Çözücü Lineerleştirme (Ayrıklaştırma) Yöntemleri	73
4.2.1	Örtülü ‘Implicit’ yöntem	73
4.2.2	Açık ‘Explicit’ yöntem	73
4.3	Korunum Denklemlerinin Cebirsel Denklemlere Dönüşümü	74
4.3.1	Momentumun korunumu denkleminin lineerleştirilmesi	77
4.3.2	Süreklilik denkleminin lineerleştirilmesi	78
4.4	Enterpolasyon Yöntemleri	80
4.5	İterasyon Yapılırken Kullanılacak Düzeltme ‘URF’ (Under Relaxation Factor) Katsayısının Tanımlanması	80
4.6	SIMPLE Metodu ile Momentum, Süreklilik ve Diğer Skalerlere Ait Denklemlerin çözüm Algoritması	80
4.7	Ayrı Ayrı Çözücü ‘Segregated Solver’ için Artık ‘Residual’ Değerinin Tanımı	81
4.8	Yakınsama ve Kararlılık	82
4.9	Çözüm Algoritması	82
4.10	Sayısal Modelleme ve Sonuçlar	84
5	SONUÇ VE TARTIŞMA	92
5.1	Öneriler	96

KAYNAKLAR	98
EK-A	99
EK-B	100
EK-C	101
EK-D	103
ÖZGEÇMİŞ	106

KISALTMALAR

LDPE	:	Düşük Yoğunluklu Polietilen
LLDPE	:	Lineer Düşük Yoğunluklu Polietilen
HDPE	:	Yüksek Yoğunluklu Polietilen
PP	:	Polipropilen
PPR	:	Polipropilen Random (Rastgele)
DSC	:	Differential Scanning Calorimeter
MFI	:	Melt Flow Index (Eriyik Akış İndisi)

TABLO LİSTESİ

	<u>Sayfa No</u>
Tablo 2.1 Deneyde kullanılan polimer malzemelerinin özellikleri.....	9
Tablo 2.2 Polipropilen malzemelerin ısı iletim katsayılarının sıcaklıkla değişimi...13	13
Tablo 2.3 Deney numunelerinin üretim şartları.....	20
Tablo 2.4 LDPE malzemeden yapılan 4 numunenin özellikleri.....	20
Tablo 2.5 Isıtma ve soğutma işleminden sonra kristallik oranlarına göre değişim...26	26
Tablo 2.6 Deneyde kullanılan polimer malzemelerinin özellikleri.....	32
Tablo 3.1 Kalibrasyon esnasındaki ısı çiftlerine ait sıcaklık değerleri.....	57
Tablo 3.2 Deneyde ölçülen değerler.....	64
Tablo 3.3 Deneyde ölçülen sıcaklık değerleri.....	68
Tablo 3.4 Deneyde ölçülen değerlerin belirsizlikleri.....	70
Tablo 3.5 Deneyden ölçülen birimler yardımıyla hesaplanan değerlerdeki belirsizlik.....	71
Tablo 5.1 Deneysel ve sayısal çalışma sonuçları arasındaki farkların gösterilmesi..	94

ŞEKİL LİSTESİ

	<u>Sayfa No</u>
Şekil 1.1 : Homopolimer yapının gösterimi.....	1
Şekil 1.2 : Rastgele (random) kopolimer yapının gösterimi.....	1
Şekil 1.3 : Blok kopolimer yapının gösterimi.....	1
Şekil 1.4 : Ekstrüder teknik resmi.....	3
Şekil 1.5 : Kalibreye ait montaj kesit teknik resmi.....	3
Şekil 1.6 : d=20 mm çaplı delikli kalibre.....	4
Şekil 1.7 : d=25 mm çaplı delikli kalibre.....	4
Şekil 1.8 : Değişken çaplı kalibre.....	5
Şekil 1.9 : Kanatlı Kalibre.....	5
Şekil 2.1 : Deney seti.....	11
Şekil 2.2 : Deney seti.....	16
Şekil 2.3 : 101.3 kPa basınç altında, eriyik haldeki HDPE malzemenin içinde radyal yönde farklı noktalardaki sıcaklık dağılımının zamanla değişimi.....	17
Şekil 2.4 : 202.6 kPa basınç altında, eriyik haldeki HDPE malzemenin içinde radyal yönde farklı noktalardaki sıcaklık dağılımının zamanla değişimi.....	18
Şekil 2.5 : 303.9 kPa basınç altında, eriyik haldeki HDPE malzemenin içinde radyal yönde farklı noktalardaki sıcaklık dağılımının zamanla değişimi.....	18
Şekil 2.6 : 2532.5 kPa basınç altında, eriyik haldeki HDPE malzemenin içinde radyal yönde farklı noktalardaki sıcaklık dağılımının zamanla değişimi....	19
Şekil 2.7 : 5065 Kpa basınç altında, eriyik haldeki HDPE malzemenin içinde radyal yönde farklı noktalardaki sıcaklık dağılımının zamanla değişimi.....	19
Şekil 2.8 : Deney seti.....	23
Şekil 2.9 : LDPE malzemenin ısı iletim katsayısının sıcaklıkla değişimi.....	24
Şekil 2.10 : Kalıpla üretilmiş ve granüllü LDPE malzemenin sıcaklığa göre ısı iletim katsayısı değişimi.....	25
Şekil 2.11 : LDPE malzemenin yoğunluğunun ve kristallik oranının ısı iletim katsayısına etkisi.....	27
Şekil 2.12 : LDPE malzemede ısıtma ve soğutma işlemlerinin ısı iletim katsayısına etkisi.....	28
Şekil 2.13 : Deney seti.....	30

Şekil 2.14 : Reoten cihazıyla alınan kuvvet-hız ilişkisi.....	31
Şekil 2.15 : Yüksek dönme hızlarında tekerleklerin dönme hızlarındaki farklı ivme değerlerinin eriyik haldeki polimer iplikçiğinin dayanım değerinin salınmasına etkisi.....	32
Şekil 2.16 : HDPE1 malzeme için $F(v)$ değişimi.....	34
Şekil 2.17 : HDPE1 malzeme için $\sigma(v)$ değişimi.....	34
Şekil 2.18 : HDPE1 malzeme için $F(v)$ değerinin boyutsuz hız katsayısıyla (V) değişimi.....	35
Şekil 2.19 : HDPE1 malzeme için $\sigma(v)$ değerinin boyutsuz hız katsayısıyla (V) değişimi.....	36
Şekil 2.20 : PP malzeme için $F(v)$ değerinin boyutsuz hız katsayısıyla (V) değişimi.....	36
Şekil 2.21 : LDPE1 malzeme için $F(v)$ değerinin boyutsuz hız katsayısıyla (V) değişimi.....	37
Şekil 2.22 : HDPE1 malzeme için $F(v)$ değerinin $p=125$ bar ekstrüder basıncında boyutsuz hız katsayısıyla (V) değişimi.....	37
Şekil 2.23 : LDPE1 malzeme için $F(v)$ değerinin 190°C sıcaklıkta, farklı ekstrüder basınç ve kalıp ölçülerinde çekme hızıyla değişimi.....	38
Şekil 2.24 : LDPE1 malzeme için $F(v)$ değerinin 190°C sıcaklıkta, farklı ekstrüder basınç ve kalıp ölçülerinde boyutsuz hız katsayısıyla değişimi.....	38
Şekil 2.25 : LDPE1 malzeme için $\sigma(v)$ değerinin 190°C sıcaklıkta, farklı ekstrüder basınç ve kalıp ölçülerinde boyutsuz hız katsayısıyla değişimi.....	39
Şekil 3.1 : Yeni helisel kanallı kalibre.....	43
Şekil 3.2 : Helisel kanallı kalibrenin sol parçası.....	44
Şekil 3.3 : Helisel kanallı kalibrenin sağ parçası.....	44
Şekil 3.4 : Helisel kanallı kalibrenin sol parçasındaki helisel kanalların detayı.....	44
Şekil 3.5 : Helisel kanallı kalibrenin sağ parçasındaki helisel kanalların detayı.....	44
Şekil 3.6 : Helisel kanallı kalibrenin kesit resmi.....	45
Şekil 3.7 : Üretim esnasında kalibre içindeki boruya etki eden basınçlar.....	46
Şekil 3.8 : Deney sisteminin şematik resmi.....	47
Şekil 3.9 : Deney sisteminin resmi.....	48
Şekil 3.10 : Deneyde kullanılan pompanın resmi.....	48
Şekil 3.11 : Kalibrenin resmi.....	48
Şekil 3.12 : Basınç ölçümünün bağlantı resmi.....	49
Şekil 3.13 : Civalı manometrenin resmi.....	49
Şekil 3.14 : Civalı diferansiyel manometre.....	50
Şekil 3.15 : Deney seti.....	52
Şekil 3.16 : Deney setinin resmi.....	52

Şekil 3.17 : Deney setinin fotoğrafı.....	53
Şekil 3.18 : Isıl çiftlerin deney setine yerleştirilmesi.....	53
Şekil 3.19 : Dijital termometre.....	54
Şekil 3.20 : Dijital termometrenin kalibrasyon eğrisi.....	55
Şekil 3.21 : 1 nolu ısılcıftın kalibrasyon eğrisi.....	55
Şekil 3.22 : Hassas terazi.....	58
Şekil 3.23 : Eriyik akış indisi cihazı ile MFI değerinin bulunması.....	58
Şekil 3.24 : DSC Cihazının resmi.....	59
Şekil 3.25 : Deney malzemesi C_p değerinin sıcaklıkla değişimi.....	59
Şekil 3.26 : Deney malzemesi C_p değerinin sıcaklıkla değişimi.....	60
Şekil 3.27 : Deney malzemesi C_p değerinin sıcaklıkla değişimi.....	60
Şekil 3.28 : Deney malzemesi C_p değerinin sıcaklıkla değişimi.....	61
Şekil 3.29 : Ahşap kabın fırın içine yerleştirilmesi.....	62
Şekil 3.30 : Deney sisteminin genel görünüşü.....	63
Şekil 3.31 : Deneyde su debisini ölçme sistemi.....	63
Şekil 3.32 : Üst ve alt seviye elektrotları ile elektrotun hortuma yerleştirilmesi	65
Şekil 3.33 : Debi ölçme sistemi: kronometre, iki adet sıvı seviye kontrol rölesi (ortada), kontaktör (en sağda).....	65
Şekil 3.34 : Sıvı seviye rölesi bağlantı şeması.....	66
Şekil 3.35 : Düz borudaki basınç düşüşü ile hız arasındaki ilişki.....	66
Şekil 3.36 : Isıl çiftlerden okunan sıcaklık değerlerinin (kalibrasyon eğrilerine göre düzeltildikten sonraki) zamana göre değişimi.....	69
Şekil 4.1 : Şematik kontrol hacmi.....	75
Şekil 4.2 : Tek boyutsal çözümde düğüm noktaları.....	75
Şekil 4.3 : Kütlenin korunumu için kontrol hacmi.....	78
Şekil 4.4 : Üç boyutlu akış hücresinin şematik gösterimi.....	79
Şekil 4.5 : Deney setinin sonlu hacimlere ayrılmış hali.....	85
Şekil 4.6 : Deney numunesinin 5 saniye soğutulduktan sonraki sıcaklık dağılımı...	85
Şekil 4.7 : Deney numunesinin 5 saniye soğutulduktan sonraki sıcaklık dağılımı...	86
Şekil 4.8 : Deney numunesinin 5 saniye soğutulduktan sonra içine yerleştirilen tellerdeki sıcaklık dağılımı.....	86
Şekil 4.9 : Deney numunesinin 15 saniye soğutulduktan sonraki sıcaklık dağılımı.	87
Şekil 4.10 : Deney numunesinin 15 saniye soğutulduktan sonra içine yerleştirilen tellerdeki sıcaklık dağılımı.....	87
Şekil 4.11 : Deney numunesinin 30 saniye soğutulduktan sonraki sıcaklık dağılımı.....	88
Şekil 4.12 : Deney numunesinin 30 saniye soğutulduktan sonra içine yerleştirilen tellerdeki sıcaklık dağılımı.....	88

Şekil 4.13 : Deney numunesinin 45 saniye soğutulduktan sonraki sıcaklık dağılımı.....	89
Şekil 4.14 : Deney numunesinin 45 saniye soğutulduktan sonra içine yerleştirilen tellerdeki sıcaklık dağılımı.....	89
Şekil 4.15 : Deney numunesinin 60 saniye soğutulduktan sonraki sıcaklık dağılımı.....	90
Şekil 4.16 : Deney numunesinin 60 saniye soğutulduktan sonra içine yerleştirilen tellerdeki sıcaklık dağılımı.....	90
Şekil 4.17 : Sayısal çözümde ısı çiftlerin yerleştirildiği noktaların zamana bağlı sıcaklık dağılımı.....	91
Şekil 5.1 : Deneysel ve sayısal çalışma sonunda bulunan, 5 saniye soğutulduktan sonraki sıcaklıkların konuma bağlı değişimi.....	92
Şekil 5.2 : Deneysel ve sayısal çalışma sonunda bulunan, 600 saniye soğutulduktan sonraki sıcaklıkların konuma bağlı değişimi.....	92
Şekil 5.3 : Deneysel ve sayısal çalışma sonunda bulunan, 1200 saniye soğutulduktan sonraki sıcaklıkların konuma bağlı değişimi.....	93
Şekil 5.4 : Deneysel ve sayısal çalışma sonunda bulunan, 1800 saniye soğutulduktan sonraki sıcaklıkların konuma bağlı değişimi.....	93
Şekil 5.5 : Deneysel ve sayısal çalışmalardan elde edilen Polipropilen (PP-R) deney numunesi içinde sıcaklık dağılımının zamana bağlı değişimi.....	95
Şekil 5.6 : Polipropilen Rastgele (random) Kopolimer'in ısı iletim katsayısının sıcaklıkla değişimi.....	97
Şekil C.1 : 2 no'lu ısı çiftin kalibrasyon eğrisi.....	101
Şekil C.2 : 3 no'lu ısı çiftin kalibrasyon eğrisi.....	101
Şekil C.3 : 4 no'lu ısı çiftin kalibrasyon eğrisi.....	101
Şekil C.4 : 5 no'lu ısı çiftin kalibrasyon eğrisi.....	101
Şekil C.5 : 6 no'lu ısı çiftin kalibrasyon eğrisi.....	102
Şekil C.6 : 7 no'lu ısı çiftin kalibrasyon eğrisi.....	102
Şekil C.7 : 8 no'lu ısı çiftin kalibrasyon eğrisi.....	102
Şekil C.8 : 9 no'lu ısı çiftin kalibrasyon eğrisi.....	102
Şekil C.9 : 10 no'lu ısı çiftin kalibrasyon eğrisi.....	102
Şekil C.10 : 11 no'lu ısı çiftin kalibrasyon eğrisi.....	102
Şekil D.1 : Deney numunesinin 90 saniye soğutulduktan sonra içine yerleştirilen tellerdeki sıcaklık dağılımı.....	103
Şekil D.2 : Deney numunesinin 120 saniye soğutulduktan sonra içine yerleştirilen tellerdeki sıcaklık dağılımı.....	103
Şekil D.3 : Deney numunesinin 150 saniye soğutulduktan sonra içine yerleştirilen tellerdeki sıcaklık dağılımı.....	103

Şekil D.4 : Deney numunesinin 180 saniye soğutulduktan sonra içine yerleştirilen tellerdeki sıcaklık dağılımı.....	103
Şekil D.5 : Deney numunesinin 240 saniye soğutulduktan sonra içine yerleştirilen tellerdeki sıcaklık dağılımı.....	104
Şekil D.6 : Deney numunesinin 300 saniye soğutulduktan sonra içine yerleştirilen tellerdeki sıcaklık dağılımı.....	104
Şekil D.7 : Deney numunesinin 420 saniye soğutulduktan sonra içine yerleştirilen tellerdeki sıcaklık dağılımı.....	104
Şekil D.8 : Deney numunesinin 540 saniye soğutulduktan sonra içine yerleştirilen tellerdeki sıcaklık dağılımı.....	104
Şekil D.9 : Deney numunesinin 600 saniye soğutulduktan sonra içine yerleştirilen tellerdeki sıcaklık dağılımı.....	104
Şekil D.10 : Deney numunesinin 750 saniye soğutulduktan sonra içine yerleştirilen tellerdeki sıcaklık dağılımı.....	104
Şekil D.11 : Deney numunesinin 900 saniye soğutulduktan sonra içine yerleştirilen tellerdeki sıcaklık dağılımı.....	105
Şekil D.12 : Deney numunesinin 1200 saniye soğutulduktan sonra içine yerleştirilen tellerdeki sıcaklık dağılımı.....	105
Şekil D.13 : Deney numunesinin 1500 saniye soğutulduktan sonra içine yerleştirilen tellerdeki sıcaklık dağılımı.....	105
Şekil D.14 : Deney numunesinin 1800 saniye soğutulduktan sonra içine yerleştirilen tellerdeki sıcaklık dağılımı.....	105

SEMBOL LİSTESİ

A,B	: Kızgın tel anemometresinde nümerik çalışma sonucu bulunan gerçek sıcaklık artışının zamanın logaritması ile değişim eğrisinin eğimi
A₀	: Ekstrüder kafa kalıbının yüzey alanı
acc	: Tekerleklerin dönme hızının artışı (ivmesi)
C_p	: Polimer malzemenin özgül ısısı
C_p[*]	: Polimer malzemenin erime ısısını içeren yeni bir özgül ısı değeri (efektif özgül ısısı)
De	: Deborah sayısı
E'	: Aktivasyon enerjisi
F	: Eriyik haldeki polimerin sahip olduğu dayanım değeri
F_k(x)	: Dijital termometreye ait kalibrasyon eğrisinin fonksiyonu
F₁(x)	: 1. ısı çifti ait kalibrasyon eğrisinin fonksiyonu
F₂(x)	: 2. ısı çifti ait kalibrasyon eğrisinin fonksiyonu
F₃(x)	: 3. ısı çifti ait kalibrasyon eğrisinin fonksiyonu
F₄(x)	: 4. ısı çifti ait kalibrasyon eğrisinin fonksiyonu
F₅(x)	: 5. ısı çifti ait kalibrasyon eğrisinin fonksiyonu
F₆(x)	: 6. ısı çifti ait kalibrasyon eğrisinin fonksiyonu
F₇(x)	: 7. ısı çifti ait kalibrasyon eğrisinin fonksiyonu
F₈(x)	: 8. ısı çifti ait kalibrasyon eğrisinin fonksiyonu
F₉(x)	: 9. ısı çifti ait kalibrasyon eğrisinin fonksiyonu
F₁₀(x)	: 10. ısı çifti ait kalibrasyon eğrisinin fonksiyonu
F₁₁(x)	: 11. ısı çifti ait kalibrasyon eğrisinin fonksiyonu
F_p(x)	: Deneyde ölçülen basınç kaybından hıza geçişi sağlayan, deneysel çalışma ile bulunan fonksiyon
F_{C_{p1}}(x)	: Deney numunesi ısı kapasitesinin 273-390K sıcaklık aralığındaki değişimi
F_{C_{p2}}(x)	: Deney numunesi ısı kapasitesinin 391-428K sıcaklık aralığındaki değişimi
F_{C_{p3}}(x)	: Deney numunesi ısı kapasitesinin 429-473K sıcaklık aralığındaki değişimi
I	: Kızgın tel anemometresinde telden geçen akım miktarı
k_p	: Polimer malzemenin ısı iletim katsayısı,
k_b	: ortalama ısı iletim katsayısı

L	: Ekstrüder kafasından çıkan eriyik haldeki polimer iplikçiğinin tekerleklerle girene kadar aldığı yol
l	: Kızgın tel anemometresinde kullanılan telin uzunluğu
M	: Ortalama molar kütle
m	: Kafadan akan polimer miktarı
m_h	: PP parçasının hava ortamında bulunan kefedeki ağırlığı
q	: Geçen ısı miktarı
m_s	: PP parçasının Etanol ortamında bulunan kefedeki ağırlığı
r	: Kızgın tel anemometresinde kullanılan telin yarıçapı
R	: Silindirin yarıçapı
R_i	: Kızgın tel anemometresinde algılayıcının başlangıç sıcaklık değerlerindeki elektrik direnci
R_{st}	: Standart gaz sabiti
R_{t₀}	: Kızgın tel anemometresinde algılayıcının 0°C sıcaklık değerlerindeki elektrik direnci
Re	: Reynolds Sayısı
S	: Isı akışının gerçekleştiği yüzey
t	: zaman
T_{PP1}	: Deney numunesinin içinde çelik tablanın yüzeyinden 3,5 mm mesafedeki sıcaklık
T_{PP2}	: Deney numunesinin içinde çelik tablanın yüzeyinden 5 mm mesafedeki sıcaklık
T_{PP3}	: Deney numunesinin içinde çelik tablanın yüzeyinden 7 mm mesafedeki sıcaklık
T_{PP4}	: Deney numunesinin içinde çelik tablanın yüzeyinden 9 mm mesafedeki sıcaklık
T_{PP5}	: Deney numunesinin içinde çelik tablanın yüzeyinden 12 mm mesafedeki sıcaklık
T_{PP6}	: Deney numunesinin içinde çelik tablanın yüzeyinden 17 mm mesafedeki sıcaklık
T_{PP7}	: Deney numunesinin çelik tablanın yüzeyinden 22 mm mesafedeki sıcaklık
T_{SG}	: Çelik tablaya giren soğutma suyunun giriş sıcaklığı
T_{SÇ}	: Çelik tabladan çıkan soğutma suyunun çıkış sıcaklığı
T_{tab}	: Deney numunesinin altında, çelik tablanın yüzeyindeki sıcaklık
T_V	: Çelik tablaya gönderilen soğutma suyunu besleyen varilin içindeki buz+su karışımının sıcaklığı
V'	: Kızgın tel anemometresinde tele uygulanan gerilim farkı
V₀	: Ekstrüzyon hızı
V_s	: Eriyik halde kafadan çıkan polimer iplikçiğinin akma hızı
V_m	: Eşdeğer çekme oranı
V_r	: Bağıl çekme oranı

V	: Çekme hızı oranı
v	: Tekerleklerin dönme hızı,
v_0	: Ekstrüzyon hızı
β	: Kızgın tel anemometresinde elektrik direncinin sıcaklıkla değişim katsayısı
ε	: Kızgın tel anemometresinde bağlama tellerindeki elektrik direncinin kızgın telde gerçekleşen elektrik direncine oranı
ρ_p	: Polimer malzemenin yoğunluğu
ΔH_f	: Polimer malzemenin erime ısısı
ΔT	: İki yüzey arasındaki sıcaklık farkı
Δx	: İki yüzey arasındaki mesafe
Δh	: Deneyde ölçülen civa seviye farkı
α	: Polimer malzemenin ısı yayılma katsayısı
η	: Viskozite
σ	: Polimer iplikçiğine uygulanan çekme gerilmesi
γ	: Özgül ağırlık
θ_v	: Kızgın tel anemometre deneyinde boyutsuz sıcaklık dağılımı

PLASTİK BORU EKSTRÜDER KALİBRELERİNDE ISI TRANSFERİNİN İYİLEŞTİRİLMESİ

ÖZET

Plastik boruların ekstrüder'le üretimleri sonrasında, şekillendirme bölgesi olan ve kafa diye adlandırılan kısımdan ortalama 190°C sıcaklıkta çıkan polimer, katılaşmak üzere girdiği kalibrede yeterince soğutulamamaktadır. Bunun sebebi, kalibrelerin iç yüzeyi ile boru dış yüzeyi arasında suyun durgun olmasıdır. Ayrıca mevcut kalibrede borunun kalibre iç yüzeyine temas etmesi için kalibreler vakum tankı içine yerleştirilmektedir. Kalibrenin vakum tankı içerisinde çalıştırılması hem büyük maliyetlere sebep olmakta, hem de boruya soğuma ile orantılı bir vakum basıncı uygulanması gerekirken sabit vakum oluşturmaktadır. Vakum basıncının dengeli olarak uygulanamaması, boru üretim hızını ve borunun ölçü toleransları içinde üretilmesini olumsuz etkilemektedir.

Bu dezavantajları ortadan kaldırabilmek için dikdörtgen kesitli helisel bir kanaldan oluşan, dikdörtgen kesitin bir kenarı (uzun kenar) borunun soğutulacak olan dış yüzeyi, diğer üç kenar ise kalibrenin kendi iç (helis) kenarları olacak şekilde yeni bir kalibre geliştirilmiş, bu helisel kanallı kalibrede gerçekleşen basınç düşüşü deneysel olarak bulunmuştur.

Geliştirilen kalibre içerisinde kayarak ilerleyen yüksek sıcaklıktaki plastik boruya uygulanacak vakum basıncının değerini, katılaşma esnasında boru malzemesinin ısı iletim katsayısı, değişimi ve yüksek sıcaklıktaki boru malzemesinin mukavemet değeri etkilemektedir.

Literatür taraması sonucu yüksek sıcaklıktaki boru malzemesinin sahip olduğu mukavemet değerleri bulunmuştur. Katılaşma esnasında boru malzemesinin ısı iletim katsayısında görülen değişim, en çok kullanılan boru malzemesi olan Polipropilen (PP) için deneysel olarak belirlenmiştir. Deney setinin katı modeli çizilerek, sonlu elemanlara ayrılmıştır. Deneydeki sınır şartları nümerik analizde oluşturulmuş, uygun model ve çözüm yöntemleri seçilmiş, Fluent programı yardımıyla nümerik analiz, bilgisayar kullanılarak yapılmıştır. Nümerik analizle elde edilen bulgular, deneysel çalışmadan elde edilen bulgulara %6.3-2.8 sapma ile uyum sağlamaktadır.

DEVELOPMENT OF HEAT TRANSFER IN EXTRUSION CALIBRATOR

SUMMARY

In the pipe production process, polymer which is leaving the die at average 190°C temperature, can not be cooled enough along calibrators. Due to almost motionless velocity of water on the outer surface of pipe, large amount of heat in calibrator is transferred by conduction. In addition to this, the calibrator is put in vacuum tank to get a contact between the outer surface of pipe and the inner surface of calibrator. When the calibrator works in vacuum tank, desired vacuum pressure can not be applied to the pipe and this causes to increase the cost of production pipe. Production velocity and tolerances of the pipe dimensions are affected by unstable vacuum pressure.

In order to eliminate the mentioned disadvantages, a new calibrator model which has a helical channel with rectangular cross-section has been developed. One edge of the rectangular cross-section is the outer surface of cooled pipe and the other three edges are the inlet surfaces of the new calibrator. The pressure loss in the new calibrator was measured experimentally.

Vacuum pressure applied during the production process in the new calibrator is effected by the variation of polymer's thermal conductivity in solidification and the melt strength of the polymer.

From the literature research, the melt strength of polymers was found for different temperatures. The variation of polymer's thermal conductivity was obtained for Polypropylene which is used too much in production. Solid model of Experimental facility was drawn and split into finite elements. By using the similar boundary conditions at the experiment, appropriate models and methods were selected and numerical computations were done on the computer using fluent program. The numerical results were agreed with the experimental results within %6.3-2.8 accuracy.

1. GİRİŞ

Günümüzde plastik malzemeler inşaat, oyuncak, beyaz eşya ve otomotiv sektörlerinde yaygın şekilde kullanılmaktadır. İnşaat sektöründeki tesisatlarda, su şebekelerinde kullanılan borularda, plastik borunun payı sürekli artmaktadır. Hafiflik, ekonomiklik, korozyona uğramama, kolay montaj, ucuz işçilik, uzun ömür gibi özellikler plastik boruları tercih edilir hale getirmiştir. Bu sebeple plastik boru üretimi gün geçtikçe artmaktadır.

Plastik boru ekstrüzyonu sektörünün gelişmesiyle birlikte üretici firmalar dünya çapındaki rekabet ortamında ürünlerini daha kaliteli ve daha ucuz fiyatla pazarlayabilmek için arayış içerisine girmişlerdir.

Kimyasal yapıya bağlı olarak polimerler; homopolimer ve kopolimer olarak sınıflandırılmaktadır. Homopolimer’lerde polimer zinciri boyunca tekrar eden birim aynıdır. Diğer bir deyişle bu tür polimerler tek bir monomerden elde edilir. Kopolimer’lerde ise polimer zinciri boyunca tekrar eden birim türü birden fazladır. Yani bu polimerler iki yada daha değişik türde monomerden elde edilir. Bu monomerlerin polimer zincirindeki dizilişine göre kopolimerler birkaç türe ayrılır; Farklı türde monomerlerin polimer zincirinde rastgele dizilmesi durumunda bu polimere rastgele kopolimer (random kopolimer), polimer zinciri her bir monomerin belirli boyutlardaki polimerlerinin bloklar halinde birbirine bağlanmasıyla meydana gelen polimere blok kopolimer denir. Şekil 1.1, Şekil 1.2 ve Şekil 1.3 ’te sırası ile homopolimer, rastgele kopolimer ve blok kopolimer yapıları gösterilmiştir.

AAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAA

Şekil 1.1 Homopolimer yapının gösterimi

AAAABBAAABBBBABABAAAABBBABABBBB

Şekil 1.2 Rastgele (random) kopolimer yapının gösterimi

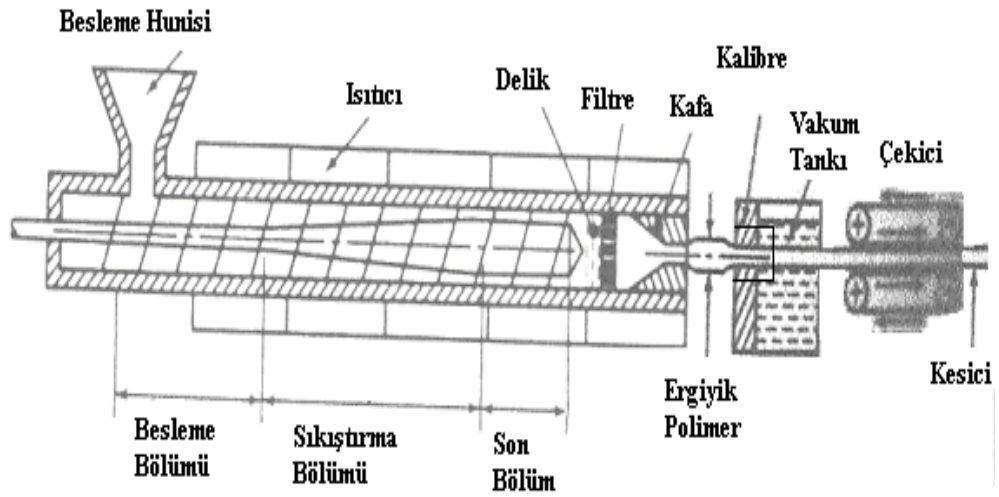
AAAABBBBAAABBBBBBBBAAAABBBBBBBB

Şekil 1.3 Blok kopolimer yapının gösterimi

Ekstrüzyon yöntemini kullanan üretim araçları genelde standart olup kullanılacak malzemenin özelliğine göre değişik yapılar gösterebilirler. Ekstrüzyon işlemini gerçekleştiren makineye ekstrüder adı verilir. Şekil 1.4'te görülen ekstrüdere polimer, besleme hunisinden verilir ve iç kısımda besleme hattından helisel bir yol izleyerek kafa kısmının sonuna kadar ilerler. Bu esnada besleme hattından hemen sonra sıkıştırma bölümüne gelen polimerin, burada kesit daralmasının etkisiyle tanecikleri sıkışır, sürtünerek ısınır ve yumuşar. Isıtıcıların da yardımıyla sıcaklığı daha da artan polimer sabit ve dar kesitli son kısma gelerek burada yüksek viskoz gerilmelerle ısınır ve üzerinde çok sayıda küçük çapta (3mm) delikleri olan filtre kısmına gelir. Burada erimemiş veya içinde yabancı maddeler olan polimer filtre edilir. Filtre edilen polimer kafa kısmında yüksek basıncın etkisiyle sıcak hamur olarak çıkar ve vakum tankı girişindeki kalibreye girer. Vakumun etkisiyle kalibrenin iç kısmındaki yuvarlak yüzeyine sıkı bir şekilde temas eden polimer suyla soğutmanın da etkisiyle tam boru şeklini kalibrede alır. Buradan da su soğutma bölgelerinden geçirilerek kesme kısmına gönderilen boru belirli boylarda kesilmek suretiyle üretim tamamlanır.

Bu çalışmada, plastik boru ekstrüder'lerin kafa kısmından 190–220°C sıcaklıkta çıkan polimerin katılaşmak üzere girdiği kalibredeki soğutmanın daha verimli, daha düşük maliyetli ve daha hızlı bir şekilde yapılması hedeflenmiştir.

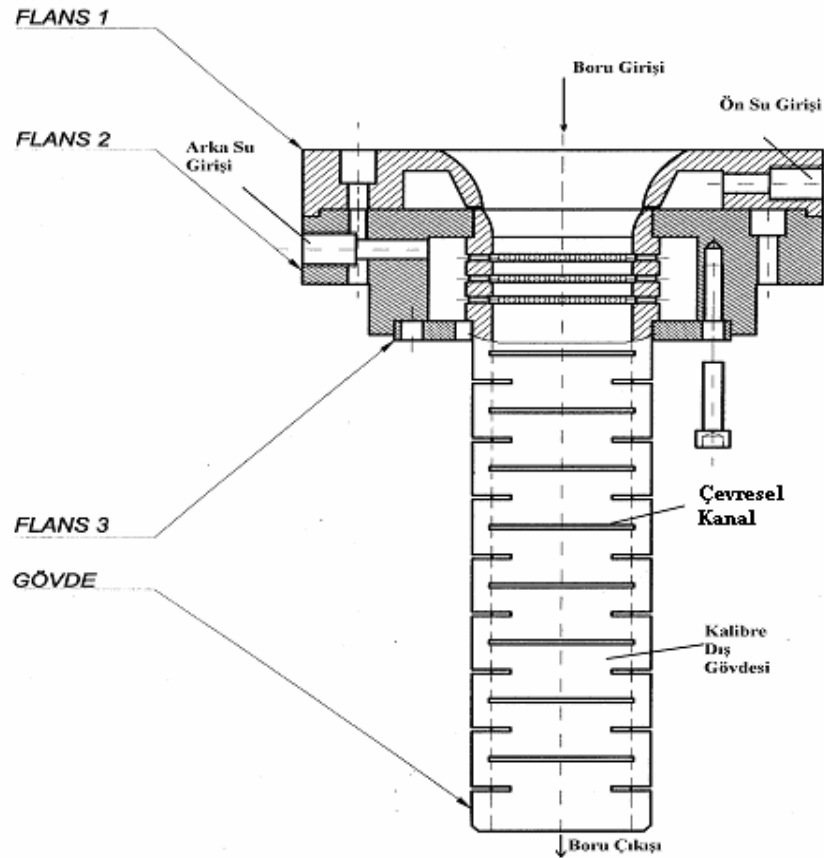
Mevcut kalibrelerde ısı transferinin düşük olması nedeniyle üretim hızı da düşük olmaktadır. Bu da birim üretim için işçilik, enerji ve amortisman maliyetlerinin artmasına, makinelerin daha çok yıpranmasına sebep olmaktadır. Maliyetin düşürülmesi için kalibredeki ısı transferinin iyileştirilerek üretim hızının artırılması gerekmektedir. Üretimde kullanılan mevcut kalibrelerin Şekil 1.5'teki teknik resimde görüldüğü gibi üzerlerinde radyal kanallar ve ayrıca ön tarafında küçük dairesel delikler vardır. Küçük yuvarlak deliklere su arka su girişinden (Şekil 1.5) verilmekte ve buradan kalibrenin iç kısmından yatay olarak ilerlemekte olan sıcak plastik boru üzerine akıtılmaktadır. Arka kısımda ise radyal kanallara vakum tankı içindeki mevcut su girerek boru üzerinde soğutma yapmaktadır. Fakat bu yöntem iyi bir soğutma yöntemi değildir. Çünkü suyun boru dış yüzeyi etrafında neredeyse durgun bir vaziyette bulunuyor olması, taşınım ile transfer olan ısı miktarının düşük olmasına, ısı geçişinin daha çok iletimle gerçekleşmesine sebep olmaktadır. Isı transferinin iyileşmesi su sıcaklığına ve boru yüzeyindeki taşınım katsayısına bağlıdır.



Şekil 1.4 Ekstrüder teknik resmi

1.1 Mevcut Kalibreler

Şekil 1.5’te mevcut kalibrelere ait teknik resim, Şekil 1.6 ve Şekil 1.7’de ise mevcut kalibrelerin fotoğrafları yer almaktadır.



Şekil 1.5 Kalibreye ait montaj kesit teknik resmi

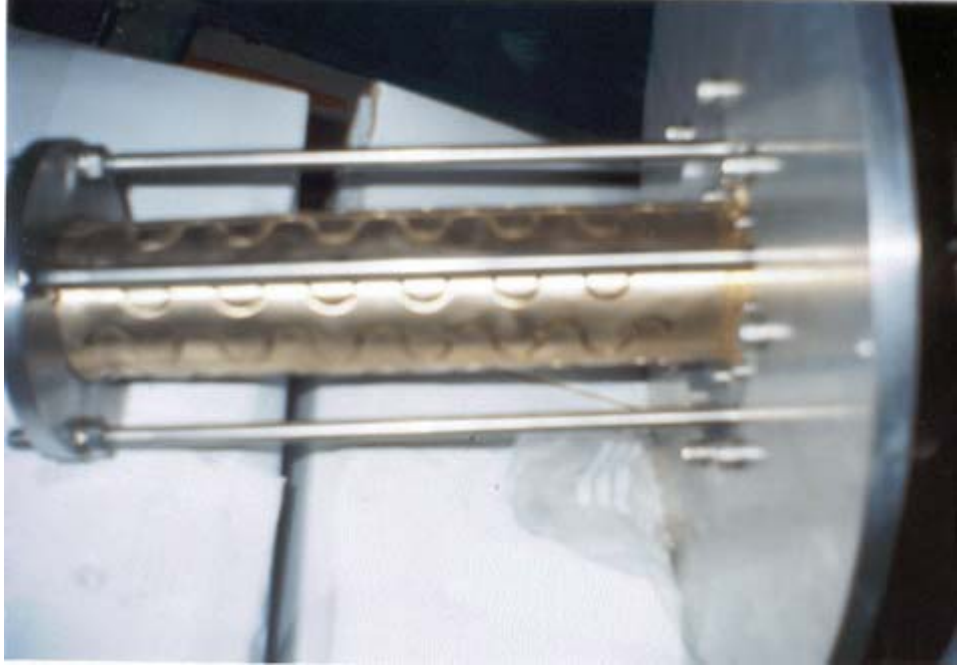
Şekil 1.8’de görülen değişken çaplı kalibrede dış çap ayarı yapılabilse de ısı transferi açısından yeterli değildir. Bu kalibrede de boru dış yüzeyini saran su hemen hemen durgun halde olup taşınım ile ısı geçişi oldukça düşüktür. Şekil 1.9’da kanatlı bir kalibre görülmektedir.



Şekil 1.6 d=20 mm çaplı delikli kalibre



Şekil 1.7 d=25 mm çaplı delikli kalibre



Şekil 1.8 Değişken çaplı kalibre



Şekil 1.9 Kanatlı Kalibre

Mevcut kalibreler, borunun kalibre iç yüzeyine tam teması için vakum tankı içine yerleştirilmektedir. Kalibrenin vakum tankı içerisinde çalıştırılması hem büyük maliyetlere sebep olmakta, hem de boruya dengeli bir vakum basıncı uygulanmasını engellemektedir. Vakum basıncının dengeli olarak uygulanamaması, boru üretim hızını ve borunun ölçü toleransları içinde üretilmesini etkiler. Bu yüzden boruya kalibre içerisinde uygulanacak vakum basıncı dağılımı çok önemlidir.

Kalibre içerisinde ilerleyen yüksek sıcaklıktaki plastik boruya uygulanacak vakum basıncı iki parametreye bağlıdır;

1-) Yüksek sıcaklıktaki boru malzemesinin ısı iletim katsayısı

2-) Yüksek sıcaklıkta boru malzemesinin sahip olduğu mukavemet değeri

Boru malzemesine ait bu iki bilgi elde edilip, değerlendirilip uygulandığı bir kalibrede boru üretim hızı, mevcut üretim hızlarından daha yüksek değere çıkacaktır.

Tezin konusu; bu iki önemli parametrenin, en çok kullanılan plastik boru malzemeleri için araştırılmasıdır.

2. KAYNAK ARAŞTIRMASI

Polipropilen (PP), yüksek yoğunluklu Polietilen (HDPE) ve düşük yoğunluklu Polietilen (LDPE) boru üretiminde en çok kullanılan polimerlerdir. Bu malzemelerin işlenmesinde malzeme ısı iletim katsayısının sıcaklıkla değişimi önemlidir. Çünkü polimer işleme sistemlerinde malzeme eriyik haline getirildikten sonra şekillendirilir, sonrada soğutularak katılaştırılır. Boru üretiminde üretim hızını malzemeye şekil verildikten sonraki soğutma işlemi belirler. Soğuma işlemindeki en önemli parametreler, malzemenin ısı iletim katsayısı ve sahip olduğu iç enerjisidir. Polimer malzemenin eriyik halde ısı iletim katsayısı 10^{-1} W/mK civarındadır. Katı yada eriyik halde bulunan polimer malzemenin ısı iletim katsayısı, malzemenin molekül yapısına, kristalleşme oranına, moleküllerin deforme olmasına ve malzemenin fiziksel özelliklerine bağlıdır.

Eriyik haldeki polimer malzemenin ısı iletim katsayısının ölçülmesinde sıcak tel metodu, sıcak plaka metodu, disk metodu ve DSC (diferansiyel kalorimetre ölçümü) metodu kullanılır. Bahsedilen tüm yöntemlerde, deneyler esnasında ısı köprüsü oluşması, ortama olan ısı kayıpları, sıcaklıkların hassas bir şekilde ölçülmesi gibi sorunlarla karşılaşılır. Bu sorunlar deney sonucunda bulunan ısı iletim katsayısı değerini etkiler.

Kline (1961), çalışmaları sonunda eriyik haldeki polimer malzemede moleküllerin hareket etme kabiliyetlerinden yola çıkarak ısı iletim katsayısının polimerin camı geçiş ve erime sıcaklığına bağlı olduğu sonucuna ulaşmıştır.

Sheldon ve Lane (1965), silindirik hücre tekniğini kullanarak, Fourier yasasına dayanan, zamandan bağımsız olarak polimerin amorf ve kristal bölgelerinde, ısı iletim katsayısındaki değişimleri 15-98°C sıcaklık aralığında incelemişlerdir. Isı iletim katsayısının polimerdeki kristallik oranına ve içerdiği katkı maddelerine bağlı olduğunu düşünmüşlerdir.

Fuller ve Fricke (1971), Yue ve diğ.'nin yapmış olduğu tespite katılmışlardır. Eksantrik silindir hücre metodunu kullanarak deneyler yapmışlar, deneyler sonucunda polimer malzemede, moleküller arasındaki bağlar ne kadar karmaşık

(kompleks) olursa malzemenin ısı iletim katsayısının o kadar düşük olduğu sonucuna varmışlardır. Ayrıca silindirik hücre metodunda radyal yöndeki ısı transferinin ısı iletim katsayısının bulunmasında önemli bir etkisi olduğunu görmüşlerdir.

Underwood ve Taylor (1978), sıcak tel metodunu kullanarak farklı polimerler için ısı iletim katsayısının zamana göre değişimini deneysel olarak bulmuşlardır. Farklı ısı çift tipleri kullanıldığında farklı sonuçlar elde etmişlerdir.

Lobo ve Cohen (1990), aynı metodu (sıcak tel) kullanarak farklı polimerlerin ısı iletim katsayılarını 23-200°C sıcaklık aralığında bulmuşlardır. Erime ve camsı geçiş sıcaklıkları dışında, polimerde kristallik oranı arttıkça, ısı iletim katsayısının arttığını gözlemlemişlerdir. Erime ve camsı geçiş sıcaklıklarında, polimerdeki kristallik oranı değiştikçe ısı iletim katsayısında büyük değişimler gözlenmemiştir.

Yue ve diğ. (1994), eriyik haldeki düşük yoğunluklu polietilen (LDPE) malzeme kullanarak disk metodu yardımı ile 130-240°C sıcaklık aralığında deneyler yapmıştır. Deneylerin sonunda, 130-240°C sıcaklık aralığında, sıcaklık değeri arttıkça malzemenin (LDPE) ısı iletim katsayısında az da olsa bir artış olduğunu gözlemlemiştir. Bu durumu sıcaklık arttıkça moleküllerin hareket edebilme kabiliyetinin artmasına bağlamıştır.

Polimer malzemenin ısı iletim katsayısını 25-250°C sıcaklık aralığında inceleyen bir çok çalışma literatürde mevcuttur. Ancak 300°C sıcaklık üzerinde malzemenin ısı iletim katsayısındaki değişimleri inceleyen çok az çalışma vardır.

Yüksek sıcaklıklardaki polimer malzemenin sahip olduğu mukavemet değeri, boruyu istenen toleransta üretmek için gerekli vakum basıncının değerini bulmak için gereklidir. Bu konuda yapılan literatür taramasında, 1970'li yıllarda teorik çalışmalar sonucu elde edilmiş çok az bilgiye ulaşılmıştır.

2.1 Yüksek Sıcaklıklarda, Polipropilen (PP) Malzemenin Isı İletim Katsayısının Bulunması

Zhang ve Fujii (2003), fiziksel özellikleri Tablo 2.1'de verilen 3 ayrı tip Polipropilen malzemenin ısı iletim katsayısını, 20-250°C sıcaklık aralığında, atmosferik basınçta deneysel olarak bulmuşlardır. Kızgın tel anemometresi yöntemini kullanmışlardır. Bu yöntemde 10mm uzunluğundaki tel, bir algılayıcı gibi çalıştırılmıştır. Çok miktarda deney numunesi kullanılmamıştır. Deney sonunda yapılan belirsizlik analizinde hata payı % 3 - % 6 aralığında hesaplanmıştır.

Tablo 2.1 Deneyde kullanılan polimer malzemelerinin özellikleri

No	Deney numunesi	Malzemenin Eriyik akış değeri (MFI) g/10 dak.
1	Polipropilen Homopolimer	0.5
2	Polipropilen Blok kopolimer	0.7
3	Polipropilen Rastgele (random) Kopolimer	1.2

Bu yöntemde zamana bağlı olarak iki boyutlu, nümerik bir ısı transferi analizi yapılmıştır [14]. Deneyde kullanılan tel ile aynı ölçülerde (boy ve çap) bir telden gerçekleşen ısı transferi incelenmiştir. Nümerik analiz sonunda bulunan boyutsuz sıcaklık dağılımı $\theta_v = ((T - T_i) / (q_v r^2 / k))$, Fourier sayısının $F_0 = (\alpha t) / r^2$ logaritmasının küçük kareler yöntemi ile bulunan A ve B gibi iki katsayı ile çarpılmasıyla elde edilen bir sayıya eşitlenmiştir.

$$\theta_v = A \ln F_0 + B \quad (2.1)$$

Deneyde kullanılan telin sıcaklık artışı, zamanın logaritmasının küçük kareler yöntemi kullanılarak bulunan a ve b gibi iki katsayı ile çarpılmasıyla elde edilen bir sayıya eşitlenmiştir.

$$T_v = a \ln t + b \quad (2.2)$$

$T_v \rightarrow$ Teldeki başlangıç sıcaklığından sonra (T_i) gerçekleşen sıcaklık artışı

$$T_v = \frac{q_v r^2}{k} A \ln t + \frac{q_v r^2}{k} \left(A \ln \frac{\alpha}{r^2} + B \right) \quad (2.3)$$

Kızgın tel anemometresi yönteminde malzemenin ısı iletim katsayısı (k) ve

difüzyon (α) katsayıları (2.4) ve (2.5) eşitliklerde gösterilmiştir;

$$k = \frac{V' I A}{\pi l \alpha} \quad (2.4)$$

$$\alpha = r^2 \exp\left(\frac{b}{a} - \frac{B}{A}\right) \quad (2.5)$$

$r \rightarrow$ Kullanılan telin yarıçapı (mm)

$l \rightarrow$ Kullanılan telin uzunluğu (mm)

$V' \rightarrow$ Tele uygulanan gerilim farkı (mV)

$I \rightarrow$ Telden geçen akım miktarı (mA)

$a, b \rightarrow$ Gerçek sıcaklık artışının zamanın logaritması ile değişim eğrisinin eğimi

$A, B \rightarrow$ Nümerik çalışma sonucu bulunan gerçek sıcaklık artışının zamanın logaritması ile değişim eğrisinin eğimi

A ve B değerleri, deneyde kullanılan telin ölçülerine, telin ısı iletim ve difüzyon katsayılarına ve deney numunesinin ısı iletim ve difüzyon katsayılarına bağlı olduğu görülmüştür. (2.4) ve (2.5) numaralı eşitliklerden deneyden yapılan hata payı hesaplanmış ;

$$\frac{\delta k}{k} = \left\{ \left(\frac{\delta V'}{V'} \right)^2 + \left(\frac{\delta I}{I} \right)^2 + \left(\frac{\delta l}{l} \right)^2 + \left(\frac{\delta A}{A} \right)^2 + \left(\frac{\delta a}{a} \right)^2 \right\}^{\frac{1}{2}} \quad (2.6)$$

$$\frac{\delta \alpha}{\alpha} = \left\{ \left(\frac{2\delta r}{r} \right)^2 + \left[\delta \left(\frac{B}{A} \right) \right]^2 + \left[\delta \left(\frac{b}{a} \right) \right]^2 \right\}^{\frac{1}{2}} \quad (2.7)$$

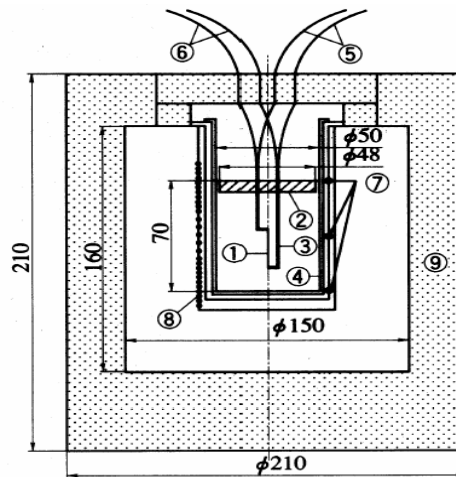
Deneyde gerçekleşen hata payı (2.6) ve (2.7) numaralı eşitlikler kullanılarak % 3 - % 6 olarak bulunmuştur [14].

2.1.1 Deney setinin tarifi

Deney seti Şekil 2.1'de gösterilmiştir. 8.7 mm uzunluğunda, 5.10 μ m çapında platinden yapılmış kızgın tel (1), 1.5 mm çapındaki platin bağlama tellerine (3) kaynak edilmiştir. 1.5 mm platin bağlama telleri seramik bir parçaya (2) bağlanmış olup kızgın tele uygulanan gerilim (5) bu bağlama telleri tarafından sağlanmıştır.

Kızgın tel 800°C sıcaklığına kadar ısıtılmış ve 200-400°C sıcaklık aralığında elektrik direncinin sıcaklıkla değişim katsayısı (β) kalibre edilmiştir. Kalibre edilmiş tel, ultrasonik temizleyiciler yardımı ile temizlendikten sonra deney numunesinin içerisine yerleştirilmiş ve tel ısıtmaya başlanmıştır [14]. Başlangıçta eriyik haldeki deney numunesi içerisinde hava kabarcıkları oluşmuş, kabarcıkların zamanla eriyik haldeki polimerin içine dağıldıkları görülmüştür. Kaldırma kuvvetlerinin etkisiyle kabarcıklar yukarıya doğru çıkmıştır. Üç saat geçtikten sonra tüm kabarcıklar kaybolmuş ve eriyik haldeki polimerde transparan bir görünüm elde edilmiştir. Eriyik haldeki deney numunesinin içerisinde homojen ve sabit bir sıcaklık dağılımı elde edildiği anda, eriyik haldeki polimerin sıcaklığı kızgın tel tarafından

$$T_i = \frac{1}{\beta} \left(\frac{R_i}{R_{t_0}} - 1 \right) \text{ olarak ölçülmüştür [14].}$$



- (1) Kızgın tel anemometresi
- (2) Seramik parça
- (3) Bağlama telleri
- (4) Cam kap
- (5) Gerilim farkı uygulanan tel
- (6) Akının geçtiği tel
- (7) Isıl çift
- (8) Elektrik ocağı
- (9) İzolasyon malzemesi

R_i, R_{t_0} algılayıcının 0°C ve başlangıç sıcaklık değerlerindeki elektrik direncidir.

Ancak kızgın telde gerçekleşen sıcaklık artışı bağlama tellerinde görülmemiştir. Bunun sebebi de sahip oldukları yüksek ısı kapasiteleridir. Böylece, kızgın telden beklenen sıcaklık artışı;

$$T_v = \frac{1}{\beta} \left(\frac{R_t(t) - \varepsilon R_i}{(1 - \varepsilon) R_{t_0}} - 1 \right) - T_i \quad (2.8)$$

$\varepsilon \rightarrow$ Bağlama tellerindeki elektrik direncinin kızgın telde gerçekleşen elektrik direncine oranı

2.1.2 Deney bulguları

İlk olarak kalibre edilmiş kızgın tel anemometresi, saf su ve Toluen'in bilinen ısı iletim katsayısı ve ısı difüzyon katsayısı kullanılarak kontrol edilmiştir [14]. Bu işlemi yerçekimi kuvvetleri altında doğal taşınımın gerçekleşmediği şartlarda ($F_0 < 200$) yapılmıştır. 1. tip polimer malzemesi ile 5 adet ölçüm yapılmış ve bunların ortalaması alınmıştır. Tablo 2.1'de gösterilen 3 tip Polipropilen malzemelerinin ısı iletim katsayılarının sıcaklıkla değişimi Tablo 2.2'de gösterilmiştir.

2.2 Yüksek sıcaklıklarda, Yüksek Yoğunluklu Polietilen (HDPE) Malzemenin Isı İletim Katsayısının Belirlenmesi

Woo ve diğ. (1995), toz haldeki yüksek yoğunluklu polietilen (HDPE) malzemenin ısı özelliklerini deneysel ve teorik çalışmalarla belirlemişlerdir. Malzemenin ısı özellikleri ile ısı iletim katsayısı (k_p), yoğunluğu (ρ_p), özgül ısı (C_p) ve erime ısı (ΔH_f) ifade edilmiştir.

Malzemenin ısı yayılma katsayısı;

$$\alpha = \frac{k_p}{\rho_p \cdot C_p} \quad (2.9)$$

şeklinde tanımlanmıştır. Genel olarak ekstrüzyon probleminde, malzemenin eriyik haldeki ısı yayılma katsayısı sabit alınır. Bununla birlikte ısı yayılma katsayısı, sıcaklığın ve basıncın fonksiyonudur. Bu ikisi arasında sıcaklık daha etkilidir.

Tablo 2.2 Polipropilen malzemelerin ısı iletim katsayılarının sıcaklıkla değişimi

Polipropilen Rastgele (random) kopolimer		Polipropilen Homopolimer		Polipropilen Blok Kopolimer	
Sıcaklık (°C)	Isı iletim katsayısı $W.m^{-1}K^{-1}$	Sıcaklık (°C)	Isı iletim katsayısı $W.m^{-1}K^{-1}$	Sıcaklık (°C)	Isı iletim katsayısı $W.m^{-1}K^{-1}$
37	0.248	40	0.248	44	0.241
48	0.240	60	0.243	62	0.237
74	0.224	80	0.238	82	0.231
103	0.203	90	0.230	93	0.224
115	0.193	100	0.226	103	0.221
127	0.171	109	0.224	113	0.218
139	0.137	120	0.218	124	0.209
149	0.136	132	0.209	135	0.204
160	0.136	143	0.188	146	0.189
171	0.136	151	0.134	155	0.146
183	0.133	161	0.130	166	0.136
194	0.134	171	0.130	175	0.135
205	0.132	181	0.130	185	0.134

Polimer malzemelerde özellikle hal değişimi esnasında, sıcaklık değişimiyle beraber yoğunluk değişimi de görülür. Malzemenin erime sıcaklığına kadar (135°C) sıcaklık arttıkça yoğunlukta artar. Erime sıcaklığının üzerinde lineer bir değişim gösterir. Basıncın etkisi, sıcaklığın etkisine göre oldukça küçüktür. Literatürde yoğunluğun sıcaklığın bir fonksiyonu olduğunu gösteren korelasyonlar aşağıda gösterilmiştir ;

$$\frac{1}{\rho_p} = 1.05 \exp(0.00136T) \quad (T \leq 135^\circ C) \quad (2.10)$$

$$\frac{1}{\rho_p} = 1.14 + 0.0009T \quad (T > 135^\circ\text{C}) \quad (2.11)$$

($T \rightarrow ^\circ\text{C}$, $\rho_p \rightarrow \text{g}/\text{cm}^3$)

HDPE malzemenin özgül ısı (C_p), erime ısısı (ΔH_f) ve erime sıcaklığı (T_M), ASTM D3417-83, D3418-82 standartlarına göre DSC cihazı kullanılarak bulunmuştur [12]. Ölçümler sonunda HDPE malzemenin erime ısısı $202(\pm 4)$ J/g, erime sıcaklığı $135(\pm 5)^\circ\text{C}$, ısı kapasitesi $50\text{-}200^\circ\text{C}$ sıcaklık aralığında sabite yakın olup $2.25(\text{J}/\text{g}^\circ\text{C})$ olarak bulunmuştur. Erime ısını içeren yeni bir özgül ısı (efektif özgül ısı C_p^*) tanımlanmıştır. DSC cihazından alınan bilgiler sonunda efektif ısı değeri için bir eğri uydurulmuştur. Eğrinin denklemi ;

$$C_p^* = 2.25 \left[1.0 + 5.5 \exp(-a(T - 135))^2 \right] \quad (2.12)$$

$$a = 0.005 \quad (T \leq 135^\circ\text{C}) \quad (C_p^* \rightarrow \text{J}/\text{g}^\circ\text{C}, T \rightarrow ^\circ\text{C})$$

$$a = 0.05 \quad (T > 135^\circ\text{C})$$

Kamal (1989), HDPE malzemenin ısı iletim katsayısını 4 farklı malzeme tipi için bulmuştur. Rauwendaal (1986), ısı iletim katsayısını yoğunluğun ve sıcaklık bir fonksiyonu olarak bulmuştur.

$$k_p = 0.17 \times 10^{-2} + 5 \times 10^{-2} (\rho_p - 0.90) - 1 \times 10^{-5} T \quad (T \leq 135^\circ\text{C}) \quad (2.13)$$

$$k_p = 0.25 \times 10^{-2} \quad (T > 135^\circ\text{C}) \quad (2.14)$$

($k_p \rightarrow \text{W}/\text{cm}^\circ\text{C}$, $T \rightarrow ^\circ\text{C}$, $\rho_p \rightarrow \text{g}/\text{cm}^3$)

HDPE malzemenin ısı iletim katsayısı, katı halden erime sıcaklığına kadar sıcaklık arttıkça azalır. Erime sıcaklığının üzerinde sabite yakındır.

2.2.1 Isı transfer denklemleri

Deneyler, silindirik koordinatlarda 1 boyutlu ısı transferi esasına göre yapılmıştır. Taşınım ve radyasyonla ısı transferleri ihmal edilmiştir. Deney seti Şekil 2.2'de

gösterilmiştir [12].

$$\rho_p C_p \frac{dT}{dt} = \frac{1}{r} \frac{d}{dr} \left(k_b r \frac{dT}{dr} \right) + \Delta H_f \quad (2.15)$$

$$r = 0 \Rightarrow \frac{dT}{dr} = 0$$

$$r = R \Rightarrow T = T_{\text{yüzey}}$$

$$t = 0 \Rightarrow T = T_0$$

$$T \rightarrow \text{Sıcaklık } (^{\circ}\text{C})$$

$$t \rightarrow \text{zaman (s)}$$

$$k_b \rightarrow \text{ortalama ısı iletim katsayısı (W/cm}^{\circ}\text{C)}$$

$$r \rightarrow \text{Radyal yöndeki koordinat (cm)}$$

$$R \rightarrow \text{Silindirin yarıçapı (cm)}$$

Radyal yönde ısı iletim katsayısındaki değişimler küçük olduğundan (2.15) no'lu eşitlik aşağıdaki hale getirilmiştir ;

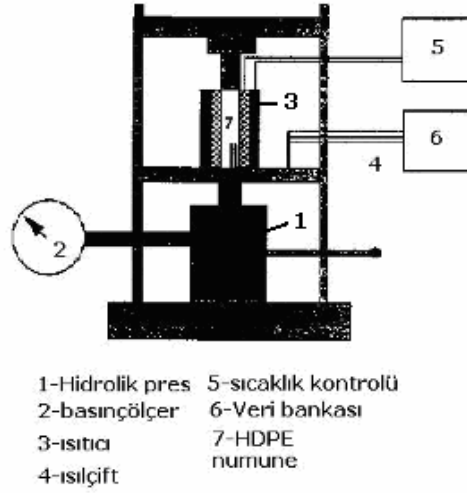
$$\frac{dT}{dt} = \alpha \left[\frac{1}{r} \frac{d}{dr} + \frac{d^2 T}{dr^2} \right] + \frac{\Delta H_f}{\rho C_p} \quad (2.16)$$

Malzemenin erime ısısı, sadece erime bölgesinde belirli bir değere sahip olduğu görülmüştür [12]. Bu durum süreksizliğe sebep olmuştur. Buna karşı efektif özgül ısısı (C_p^*) isimli bir yaklaşım kullanılır. Bu yaklaşım (2.12) no'lu eşitlikteki efektif ısı yayılma katsayısını da içermiştir [12].

$$\frac{dT}{dt} = \alpha^* \left[\frac{1}{r} \frac{d}{dr} + \frac{d^2 T}{dr^2} \right] \quad (2.17)$$

$$\alpha^* = \frac{k_b}{\rho_p C_p^*} \quad (2.18)$$

Polimerin efektif özgül ısısı (C_p^*), 1°C sıcaklık artışı için gerekli erime ısını içermiştir. Deneyler 200°C sıcaklığında bir yüzey sıcaklığı kullanılarak yapılmıştır.



Şekil 2.2 Deney seti

2.2.2 Deney Setinin Tarifi

Deneyde kullanılan HDPE malzemenin yoğunluğu (ρ_p) 0.95 g/cm^3 olarak ölçülmüştür. Aynı malzemenin eriyik akışı indisi değeri, 0.27'dir. Malzeme Novacor firması tarafından tedarik edilmiştir [12]. Deney setinde kullanılan alüminyum silindirik kabın dış çapı 75 mm, iç çapı 50 mm olup 150 mm uzunluğundadır. Eriyik haldeki HDPE malzemenin duvarla temas ettiği yerdeki sıcaklık, duvara gömülmüş olarak bulunan ısıl çiftlerle ölçülmüştür. Eriyik malzemenin içine, altta yer almak kaydıyla radyal yönde eşit uzaklıklarda 4 adet T tipi ısıl çift yerleştirilmiştir [12]. Sıcaklık değerleri bir bilgisayar kullanılarak kaydedilmiştir [12]. Metal duvarlara çok yakın halde bulunan polimer malzemenin sıcaklığı duvar sıcaklığı olarak kabul edilmiştir. HDPE malzeme toz halde oda sıcaklığında deney setinin içine yerleştirilmiş ve basınca maruz bırakılmıştır. HDPE malzeme istenen sıcaklıklara kadar ısıtılmıştır [12].

2.2.3 Deney Bulguları

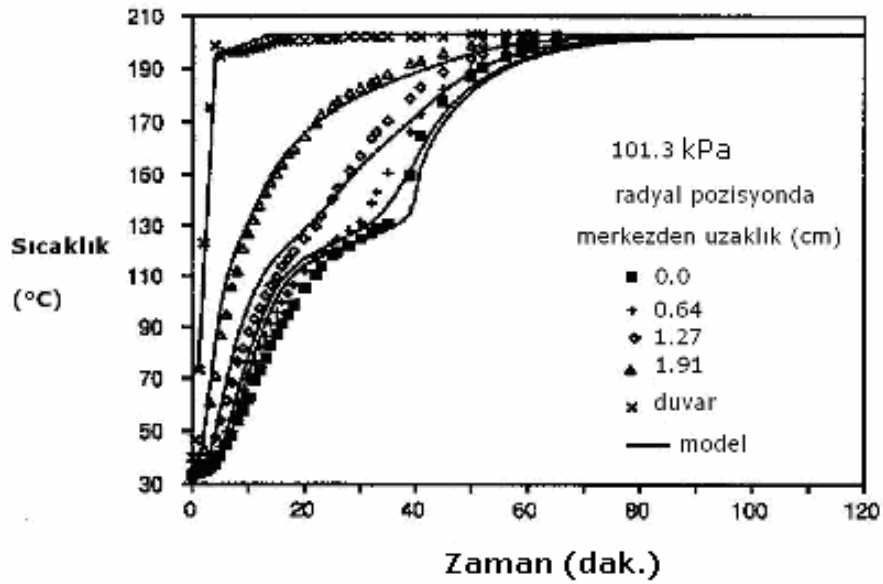
(2.17) numaralı eşitlik nümerik olarak çözüldüğünde HDPE malzemenin ısı iletim katsayısı için aşağıdaki korelasyon elde edilmiştir [12];

$$k_p = 5.665 \times 10^{-2} - 0.870 \times 10^{-2} \ln(T + 273.15) \quad (T \leq 135^\circ\text{C})$$

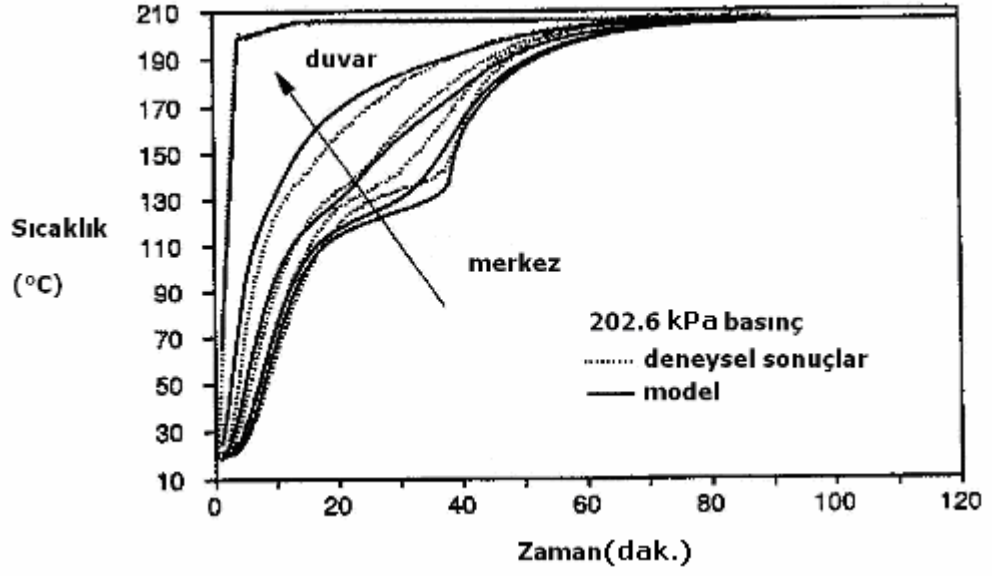
$$k_p = 0.435 \times 10^{-2} \quad (T > 135^\circ\text{C})$$

$$(k_p \rightarrow W/cm^{\circ}C) \quad (2.19)$$

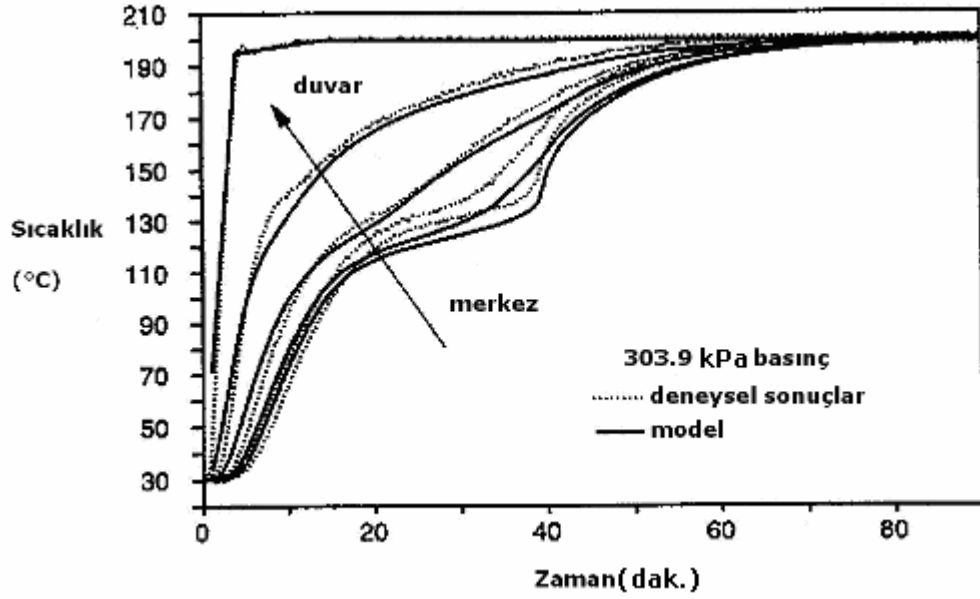
Bulunan korelasyon, (2.13) ve (2.14) numaralı eşitlikten farklıdır. Deney sadece tek tip HDPE malzeme için yapılmıştır. Bu yüzden korelasyonda malzemenin yoğunluğu yer almamıştır. Korelasyondan elde edilen sonuçlar ile deneyden elde edilen veriler, farklı basınç değerlerinde sıcaklığın zamanla değişimi şeklinde gösterilmiştir (Şekil 2.3, 2.4, 2.5, 2.6, 2.7). 5065 Kpa basınç değerinde modelden elde edilen sonuçlarla deneyden bulunan veriler arasında bir miktar sapma gözlenmiştir [12]. Bunun sebebi HDPE malzemenin orta bölgelerinde taşınım ile ısı transferinin etkileri olabilir. Ayrıca HDPE malzeme içerisindeki ısı çiftlerinin, yüksek basıncın etkisiyle radyal yönde yer değiştirmesi söz konusudur [12].



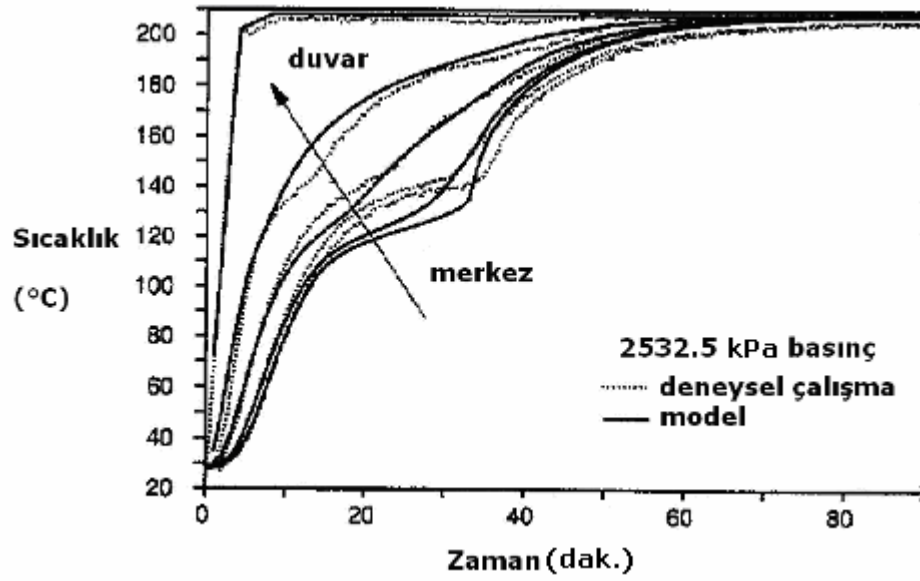
Şekil 2.3 101.3 kPa basınç altında, eriyik haldeki HDPE malzemenin içinde radyal yönde farklı noktalardaki sıcaklık dağılımının zamanla değişimi.



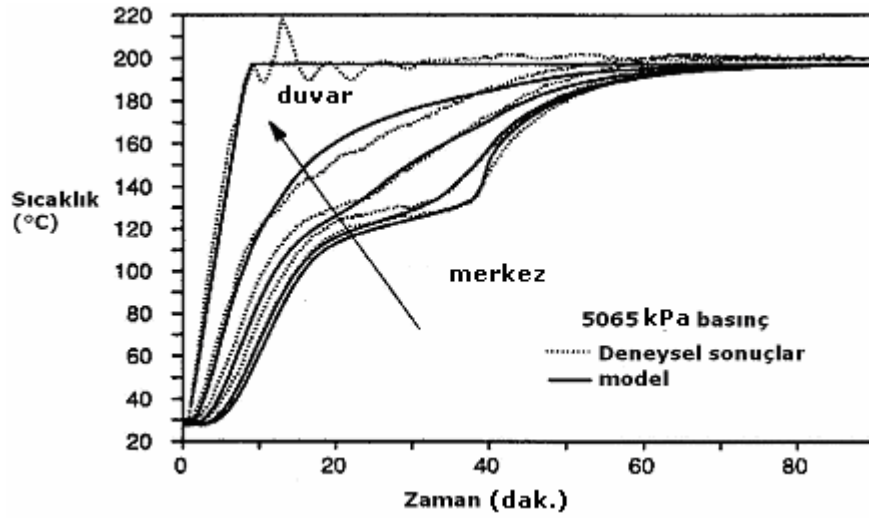
Şekil 2.4 202.6 kPa basınç altında, eriyik haldeki HDPE malzemenin içinde radyal yönde farklı noktalardaki sıcaklık dağılımının zamanla değişimi



Şekil 2.5 303.9 kPa basınç altında, eriyik haldeki HDPE malzemenin içinde radyal yönde farklı noktalardaki sıcaklık dağılımının zamanla değişimi



Şekil 2.6 2532.5 kPa basınç altında, eriyik haldeki HDPE malzemenin içinde radyal yönde farklı noktalardaki sıcaklık dağılımının zamanla değişimi



Şekil 2.7 5065 Kpa basınç altında, eriyik haldeki HDPE malzemenin içinde radyal yönde farklı noktalardaki sıcaklık dağılımının zamanla değişimi.

2.3 Disk Metodu İle Düşük Yoğunluklu Polietilen (LDPE) Malzemenin Isı İletim Katsayısının Ölçülmesi

Sombatsompop ve Wood (1997), düşük yoğunluklu polietilen (LDPE) malzemenin ısı iletim katsayısını deneysel olarak bulmuşlardır. Deney numuneleri 70mm çapında, 1mm kalınlığında diskler olup kalıpla üretilmişlerdir. Numunelere üretim esnasında

uygulanan basınç değerleri numune malzemelerine DSC testi yapılarak bulunmuştur. Polimerin DSC bilgileri Tablo 2.3'te gösterilmiştir.

Tablo 2.3 Deney numunelerinin üretim şartları

Polimer	Yoğunluk (g/cm ³)	T_g ya da T_m (°C)	Numunelerin üretim şartları	
			Sıcaklık (°C)	Basınç (kPa)
LDPE	0.91	112	150	5000

Tablo 2.3'teki LDPE için 4 ayrı tip numune seçilmiş olup, her bir numunenin yoğunluğu ve kristalite oranı tablo 2.4'te gösterilmiştir [10]. Malzemenin kristallik oranı geniş açılı bir X-ray cihazı kullanılarak bulunmuştur. Tablolarda verilen yoğunluk değeri için hassasiyet $\pm$ % 2.5, kristalite oranı için $\pm$ % 3'tür.

Şekil 2.8'de deney seti gösterilmiştir [10]. A, B, C ve D diskleri bakırdan yapılmıştır. Plaka şeklindeki alüminyum ısıtıcı, A ve B disklerinin arasına yerleştirilmiştir. Isıtıcının harcadığı toplam enerji, enerji giriş cihazı ile sıcaklık ölçümü yapılarak kontrol edilmiştir [10].

Tablo 2.4 LDPE malzemedan yapılan 4 numunenin özellikleri

Numune ismi	Kristalleşme zamanı (dak.)	23 °C 'de yoğunluğu	Kristalite oranı (%)
A	0	0.911	34.0
B	120	0.918	40.2
C	240	0.925	44.0
D	360	0.929	46.9

Eriyik haldeki polimer malzemenin ısı iletim katsayısının ölçülmesi esnasında, deney numuneleri ile temasta olan noktalar, ısı iletim katsayısı 1.45 W/m°C olan seramik malzemedan yapılmıştır. Ayrıca cihazda 10mm çapında, 100mm uzunluğunda 3 adet çubuk kullanılmıştır. Deney numuneleri B diski ile C diski arasına yerleştirilmiştir [10]. Her bir bakır diskin sıcaklığı ve ortamın sıcaklığı 3 adet platin sensör kullanılarak ölçülmüş ve kaydedilmiştir. Sıcaklık ölçümündeki hassasiyet $\pm$ % 2'dir. Deneyler esnasında taşınım ile ısı transferini engellemek için vakumlu bir ortam oluşturulmuştur [10].

2.3.1 Deney setinin tarifi

İki adet deney numunesi, Şekil 2.8’de görülen B ve C diskleri arasına yerleştirilmiştir. Deney seti, vakumlu bir fırının içinde konulmuştur ve bir vakum pompası yardımıyla 20 mmHg değerinde vakum oluşturulmuştur. Sistemdeki ısıtıcı çalıştırılmış, bakır diskler üzerine yerleştirilen ısılıçiftler yardımı ile numuneler istenilen sıcaklığa ulaşıncaya kadar sisteme ısı verilmiştir [10]. Bu esnada ısıtıcının çektiği güç kaydedilmiştir. Deney sonunda numune değiştirildiğinde deney setinin stabilize olması için bir süre beklemek gerekmiştir.

Isı iletim katsayısı, zamandan bağımsız olarak Fourier yasasına göre;

$$q = k_p \cdot S \cdot \frac{\Delta T}{\Delta x} \quad (2.20)$$

Bu çalışmada ısı iletim katsayısı zamandan bağımsız olarak bir ısıtıcı yardımı ile geniş yüzeylerde enerji eşitlenmesi kullanılmıştır [10].

Bu durumda ;

$$q = V'' I' = \sum E_i A_i \quad (2.21)$$

$V'' \rightarrow$ Deney setindeki gerilim farkı (V)

$I' \rightarrow$ ısıtıcıdan ölçülen akım (A)

Kullanılan hesaplama yöntemi, deney numunesi sıcaklığının, B ve C diskleri sıcaklıklarının ortalaması prensibine dayanır.

$$\frac{E_{pr} A_{pr}}{2} + E_{pc} A_{pc} = \frac{(k_r \cdot S_r \cdot T_r) + (k_p \cdot S_p \cdot T_p)}{\Delta x} \quad (2.22)$$

Deney numunesinin bulunduğu yada bulunmadığı zamandan bağımsız durumda, ısıtıcı aşağıdaki eşitlikleri sırasıyla kullanmıştır [10].

$$I'_0 V'_0 = E_a A_a + E_x A_x + E_b A_b + E_r A_r + E_c A_c \quad (2.23)$$

$$I'_p V'_p = E_{pa} A_{pa} + E_{px} A_{px} + E_{pb} A_{pb} + E_{pr} A_{pr} + E_{pc} A_{pc} \quad (2.24)$$

$$E = c \left[\frac{T}{100} \right]^4 \quad (2.25)$$

$E_i \rightarrow$ Bakır malzemenin ısı radyasyonu, $A_i \rightarrow$ İndise ait yüzey alanı (m^2)

Yukarıdaki denklemde a,b,c indisleri bakır diskleri, x ısıtıcıyı seramik halkayı ve r indisi polimer malzemeyi göstermiştir.

(2.22), (2.23) ve (2.24) no'lu eşitlikler kullanılarak polimer malzemedan yapılmış deney numunesinin ısı iletim katsayı ifadesi elde edilmiştir [10].

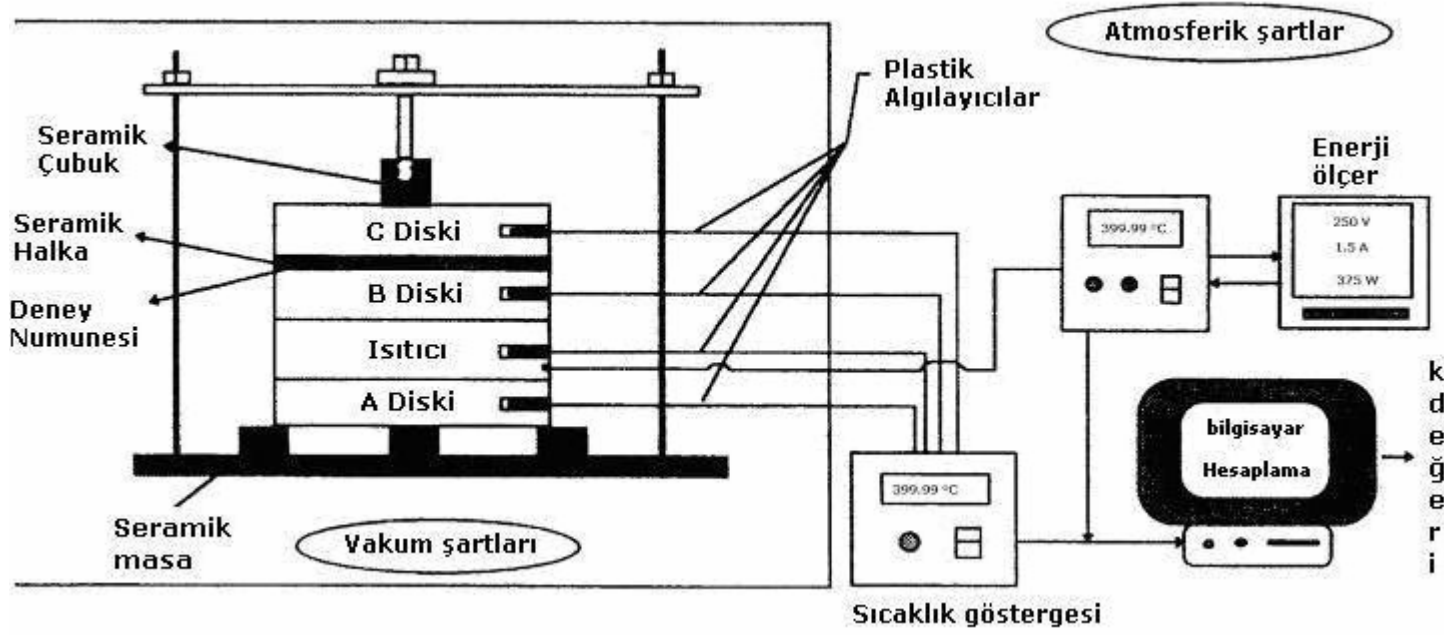
$$k_p = \frac{\Delta x}{2.S_p} \left[\frac{\frac{I'_p V''_p - (E_{pa}A_{pa} + E_{px}A_{px} + E_{pb}A_{pb} + E_{pr}A_{pr}) + E_{pc}A_{pc}}{T_p}}{\frac{(I'_0 V_0 - (E_aA_a + E_xA_x + E_bA_b) + E_cA_c)}{T_r}} \right] \quad (2.26)$$

$S_p \rightarrow$ Deneyde kullanılan polimerin yüzey alanı (m^2)

Şekil 2.9'da LDPE malzemenin ısı iletim katsayısının sıcaklıkla değişimi gösterilmiştir.

2.3.2 Deney numuneleri üretim yönteminin ısı iletim katsayısına olan etkisi

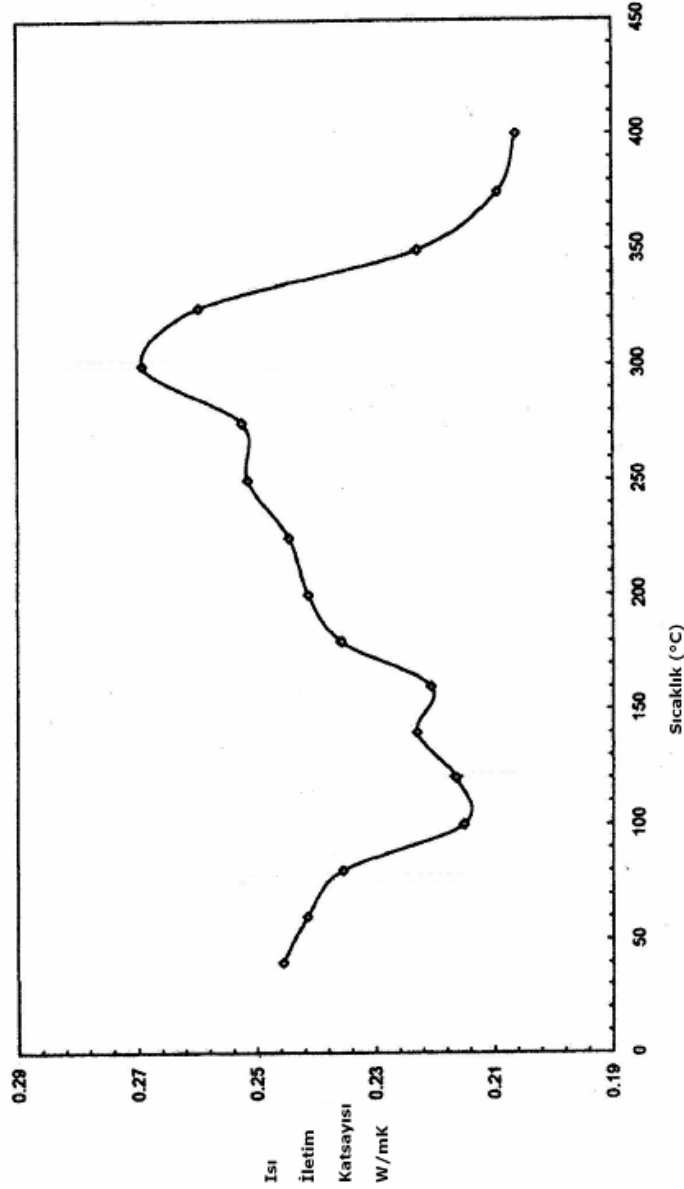
LDPE numuneler ile bakır diskler arasındaki temas, deney sonunda bulunan ısı iletim katsayısı değerini etkilemiştir [10]. Bu durumu çözmek amacıyla LDPE malzemedan yapılmış iki deney numunesi kullanılmıştır. Bunlardan birisi plaka şeklinde olup kalıpta üretilmiştir. Diğer granül formundadır. Bu iki numunenin sonuçları Şekil 2.10'da gösterilmiştir. Kalıp ile üretilmiş numunenin ısı iletim katsayısı değerleri granül haldeki numuneden 40-120°C sıcaklık aralığında % 11, 120°C'den yüksek sıcaklıklarda % 2 fazladır. Granül haldeki numunede, temas yüzeyinde bir azalma olmuştur. Isı iletim katsayısındaki düşüşün sebebi budur. LDPE 120°C sıcaklığı geçtikten sonra erimeye başlamıştır [10]. Eriyik haldeki iki numunenin ısı iletim katsayıları arasında % 2 gibi çok küçük bir fark olduğu görülmüştür.



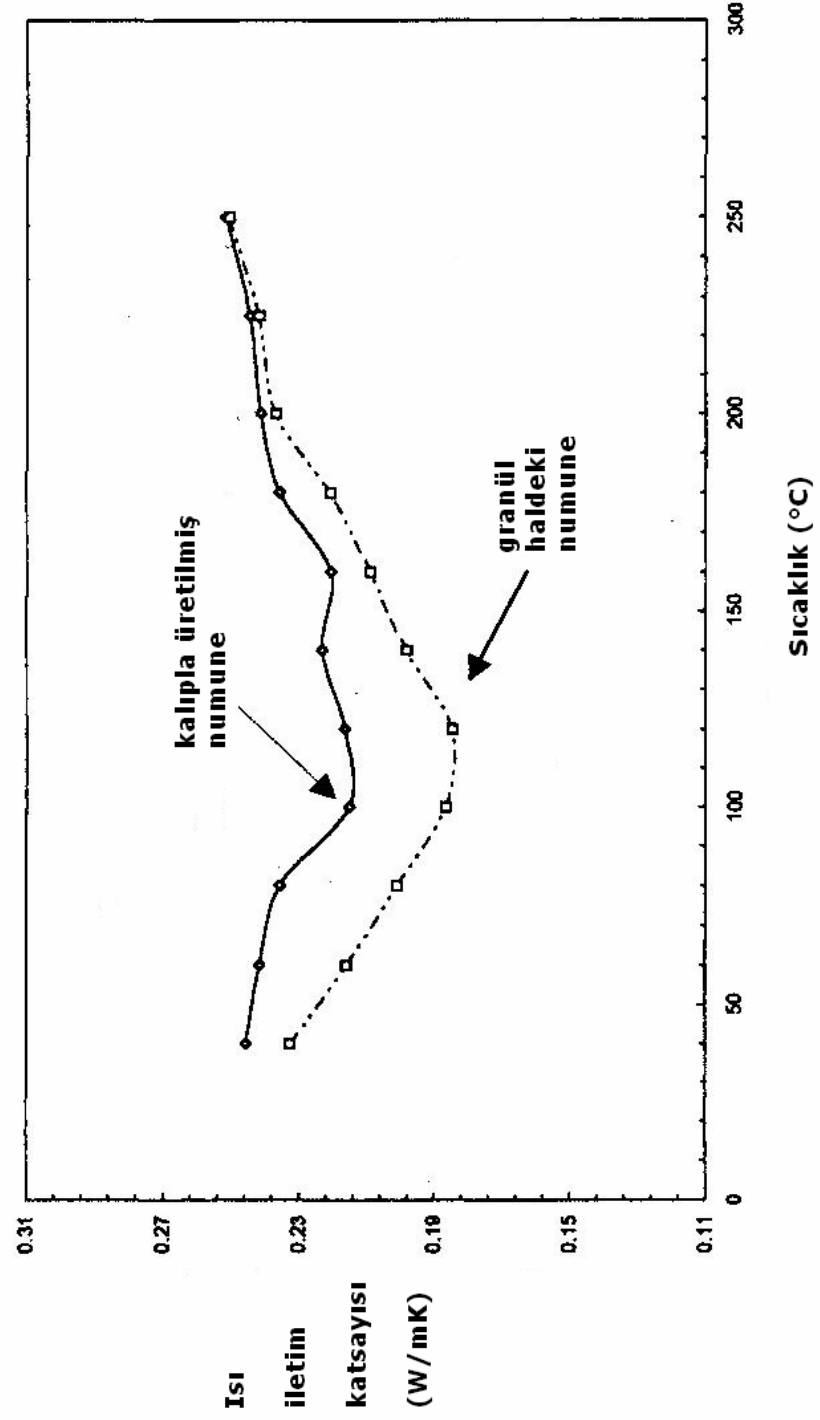
Şekil 2.8 Deney seti

2.3.3 LDPE malzemede yoğunluğun ve malzemenin kristallik oranının ısı iletim katsayısına etkisi

Farklı yoğunluklara ve kristallik oranlarına sahip dört deney numunesinin ısı iletim katsayıları, 40-250°C sıcaklık aralığında Şekil 2.11’de gösterilmiştir [10]. 40°C sıcaklıkta dört numunenin ısı iletim katsayıları birbirine çok yakın olduğu görülmüştür. Aynı durum 140°C sıcaklıkta dört numunenin eriyik olduğu durumda da geçerli olup, ısı iletim katsayıları birbirine çok yakın olduğu tespit edilmiştir. Bu yüzden kristallik oranının ısı iletim katsayısına etkisini belirlemek zor olduğu düşünülmüştür [10].



Şekil 2.9 LDPE malzemenin ısı iletim katsayısının sıcaklıkla değişimi



Şekil 2.10 Kalıpla üretilmiş ve granüllü LDPE malzemenin sıcaklığa göre ısı iletim katsayısı değişimi

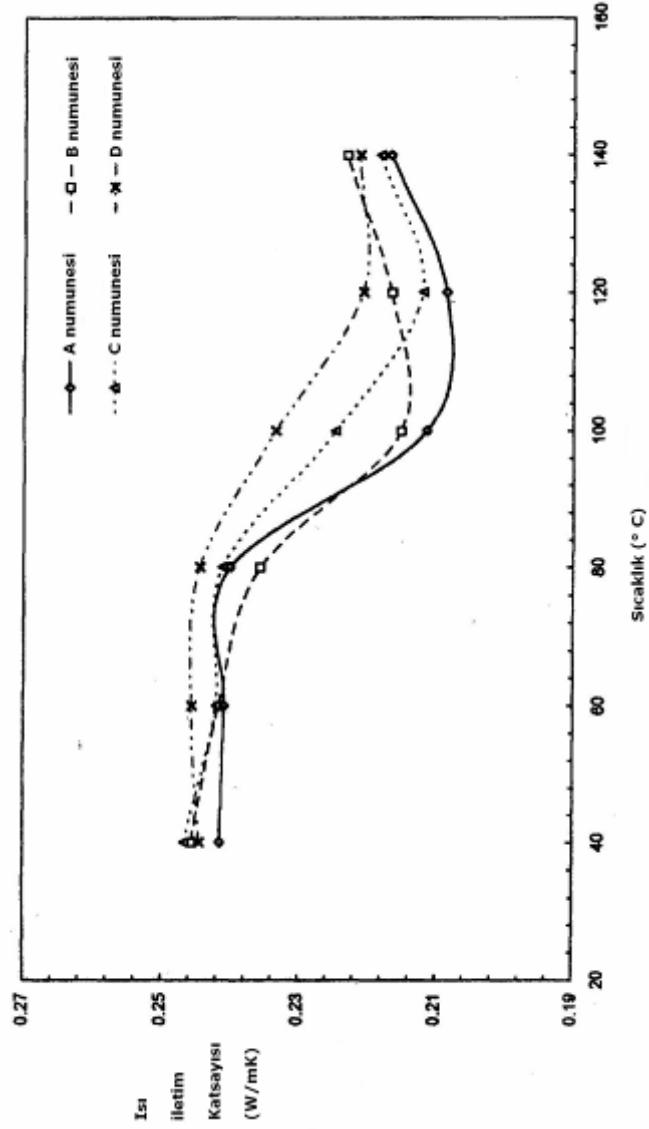
2.3.4 Isıtma ve soğutma işlemlerinin deneysel ölçümlere etkisi

Genel olarak polimerin işlenmesi, malzemenin ısıtılması, malzemeye istenen ürünün şeklinin verilmesi ve soğutma işlemlerini içerir. Üretilen yeni ürünün fiziksel özellikleri, malzemeye proses esnasında uygulanan ısı işlemlerle doğrudan bağlantılıdır [10]. Şekil 2.12’de aynı deney numunesinin üç ayrı durumunda ısı iletim katsayısının değişimi gösterilmiştir. Başlangıçta numune 100°C’den 225°C’ye kadar ısıtılmış, daha sonra 100°C’ye kadar soğutulmuştur. Son olarak tekrar 250°C’ye kadar ısıtılmıştır. Üç durumda da sonuçlar farklılık göstermiştir [10]. Bu farklılığın iki sebebe dayandığı düşünülmüştür. Öncelikle numuneler soğutulurken kendi sahip olduğu kristallik oranından daha fazla bir orana sahipmiş gibi davranmışlardır. Önceki bölümde kristallik oranının ısı iletim katsayısı üzerinde düşük bir oranda etkisi olduğu söylenmişti. Ancak bu durum malzemenin yavaş soğuması esnasında geçerli olduğu görüşmüştür. Burada soğuma hızının etkili bir parametre olduğuna karar verilmiştir [10]. Diğer bir nedende başlangıçtaki deney numunelerinin bakır diskler ile iyi bir temas yapabilmesi için az bir miktarda kalın yapılmış olmasıdır. LDPE numune ısıtıldıkça erimiş ve belirli bir oranda genişlemiştir. Soğuma işlemi esnasında eriyik malzeme büzüldükçe numunenin kalınlığı azalmıştır. Bu durum ısı iletim katsayısında küçük bir artışa sebep olmuştur [10]. Tablo 2.5’te numuneye ait kristallik oranları ısıtma ve soğutma işlemlerinden önce ve sonra WAXS metodu kullanılarak ölçülmüştür. Isıtma ve soğutma işleminden sonra numunedeki kristallik oranı, başlangıçtaki ısıtma işlemi esnasındaki kristallik oranından büyük olduğu görülmüştür [10].

40-400°C sıcaklık aralığında LDPE malzemenin ısı iletim katsayısının değişimi 0.209-0.269 W/m°C

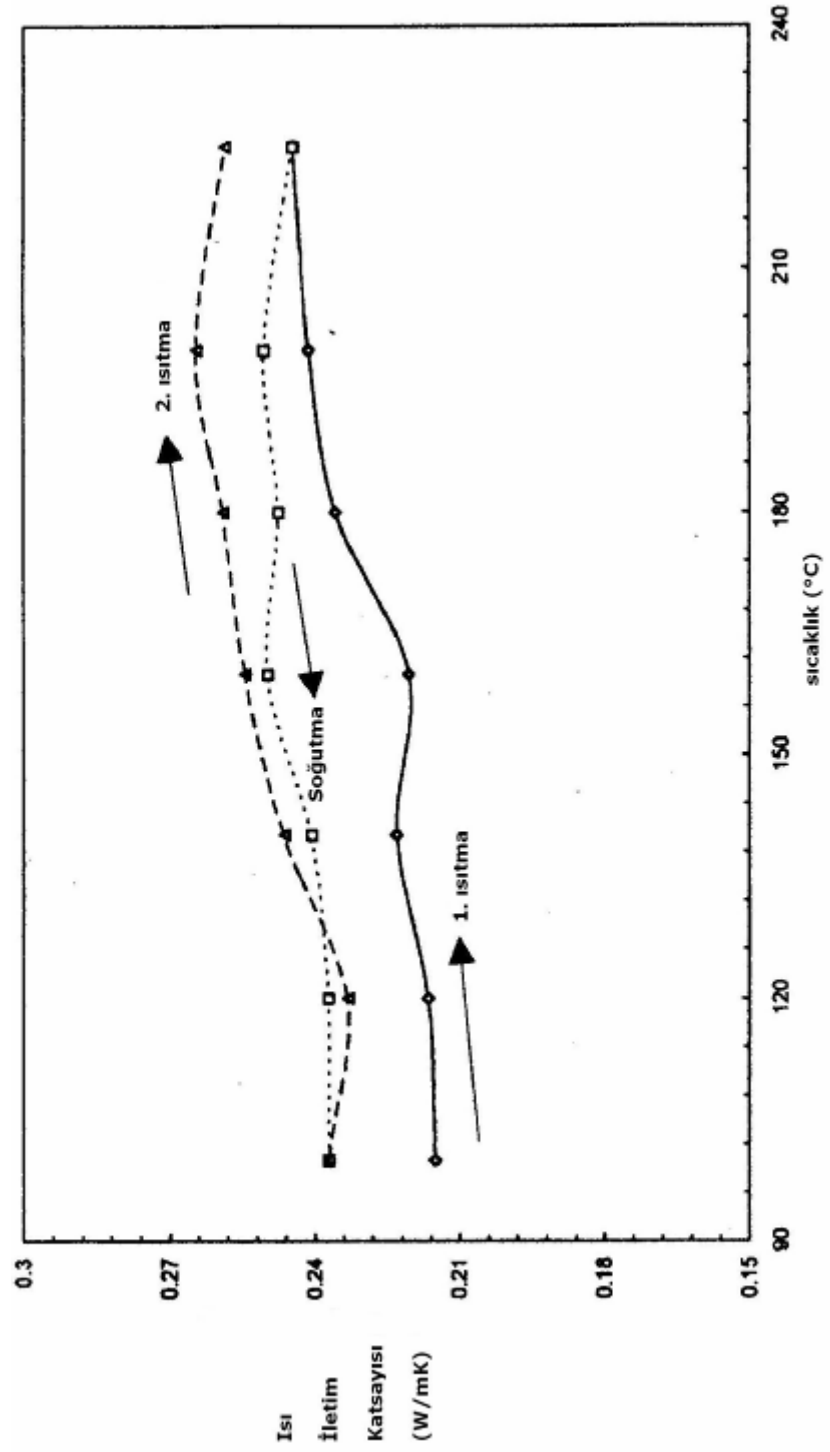
Tablo 2.5 Isıtma ve soğutma işleminden sonra kristallik oranlarına göre değişim

Deney Numunesi	Kristallik oranı (%)
Ölçümden önceki	34.0
Ölçümden sonraki (ısıtma ve soğutma işleminden sonra)	44.8



Şekil 2.11 LDPE malzemenin yoğunluğunun ve kristallik oranının ısı iletim katsayısına etkisi

Polimer malzemelerin ısı iletim katsayıları, malzemenin yoğunluğu, kristallik oranı ve molekül yapısı ile ilişkili olduğu görülmüştür. Bu durumda açıkça görülmektedir ki yüksek sıcaklıktaki polimer malzemenin ısı iletim katsayısı malzemenin fiziksel özellikleri ile ilişkilidir. Bu yüzden öncelikle Polipropilen (PP-R) malzemenin fiziksel özelliklerinin deneysel olarak bulunmasına, daha sonra da bir deney seti kurularak yüksek sıcaklıktaki Polipropilen (PP-R) malzemesinin ısı iletim katsayısının deneysel olarak bulunmasının en doğru yol olduğuna karar verilmiştir.



Şekil 2.12 LDPE malzemede ısıtma ve soğutma işlemlerinin ısı iletim katsayısına etkisi

2.4 Yüksek Sıcaklıktaki Polimer Mukavemetinin Bulunması

Eriyik haldeki polimer mukavemetini ölçmek amacıyla, Meissner firması tarafından bir reometre geliştirilmiş olup bu cihaza reoten denilmiştir. Bernnat (2001), reoten cihazını kullanarak farklı sıcaklıklardaki polimer malzemelerinin dayanım değerlerini deneysel olarak bulmuştur. Cihazın çalışma prensibi 2 döner tekerlek yardımıyla, eriyik polimer numunesinin belirlenen bir hızda aşağıya doru çekilmesinden ibarettir. Bu çekme işlemi eriyik haldeki polimer numunede uzama deformasyonuna yol açar.

Reoten cihazı ile yapılan deneylerle eriyik haldeki polimer malzemenin uzama altındaki karakteri bulunmuştur [1]. Bu bilgi, şişirme kalıbı, enjeksiyon kalıbı, sıcak şekil verme ve ekstrüzyon gibi farklı polimer işleme yöntemlerinde kullanılır. Ölçümler cihaz yardımıyla deneysel olarak hızlı ve kolay bir şekilde yüksek hassasiyette yapılır.

Deney setinde vida çapı 25 mm, vida uzunluğu 500mm olan bir ekstrüder kullanılmıştır. Ekstrüderin çıkışına (kafasına), çapı 8mm olan bir kanal yerleştirilmiştir. Kanalin sonunda da çapı 2mm olan bir kalıp konulmuştur [1]. Deney esnasında çapı 2 mm olan kalıptan akan polimer miktarının zamanla değişimi % 1'den çok azdır. Bu yüzden ölçümlerin zamandan bağımsız olarak yapıldığı kabul edilmiştir. Deney seti, Şekil 2.13'te gösterilmiştir. Buna göre ;

$$v_0 = \frac{\dot{m}}{\rho A_0} \quad (2.27)$$

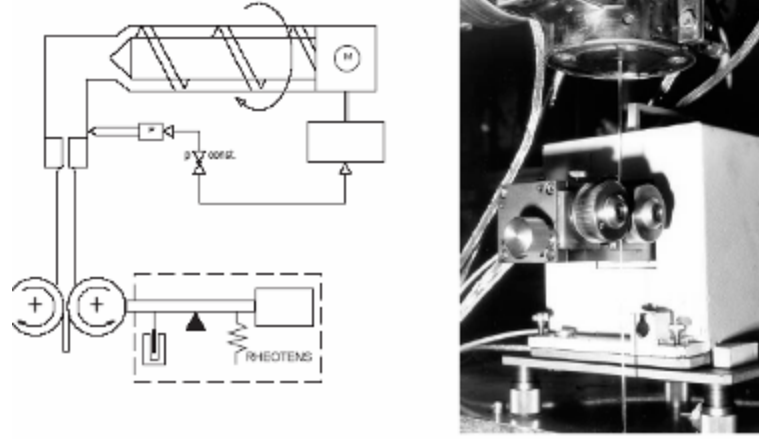
$\dot{m} \rightarrow$ Kafadan akan polimer miktarı (g/dak.)

$v_0 \rightarrow$ Ekstrüzyon hızı (mm/s)

$\rho \rightarrow$ Eriyik polimerin yoğunluğu (g/cm³)

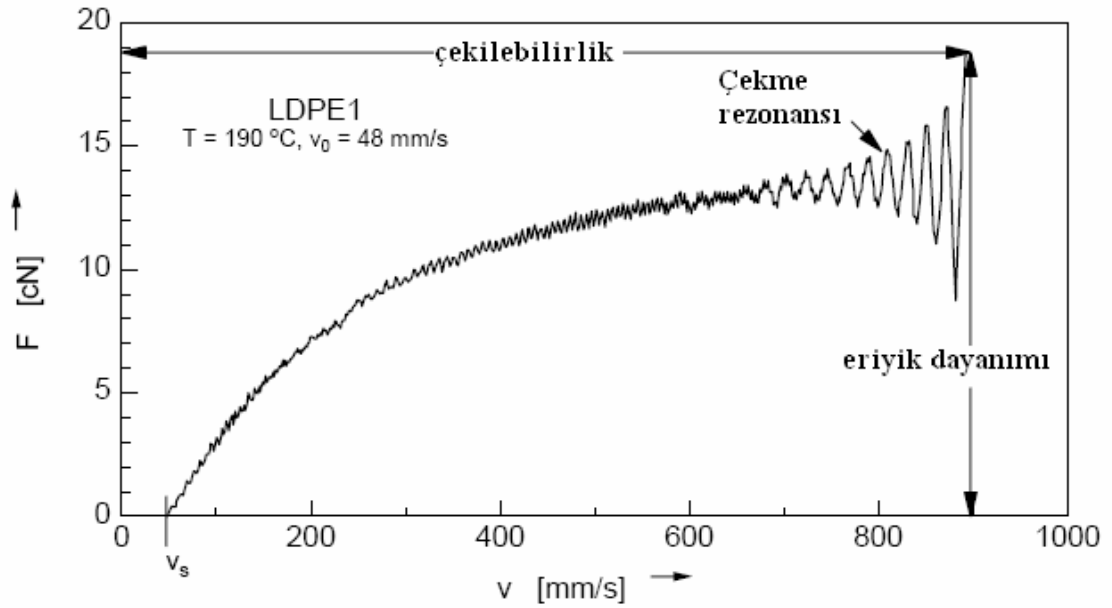
$A_0 \rightarrow$ Kafa kalıbının yüzey alanı (mm²)

$\dot{m}$, ekstrüder çıkışındaki kafadan akan malzeme miktarının en az iki dakika aralıklarla tartılması ile bulunur.



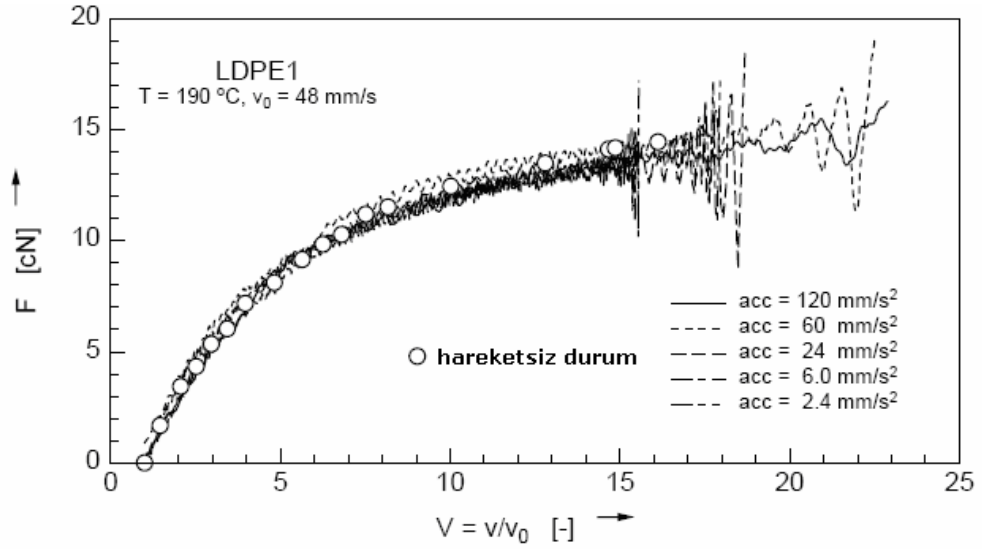
Şekil 2.13 Deney seti

Eriyik haldeki polimer iplikçiği ekstrüder ile kafadan çıkışta sürekli olarak üretilmiş ve döner tekerleklerle gelene kadar belirli bir L boyunca ilerletilmiştir. Deney esnasında tekerlekler, düşük bir ivme değerine sahip V hızıyla dönmüştür [1]. Polimer iplikçiği tekerleklerin arasına girdiğinde aşağı yönde bir çekme kuvvetinin etkisine girmiştir. Eriyik haldeki polimer iplikçiğinin çekme kuvvetine karşı gösterdiği direnç, sabit tekerleğin üzerine yerleştirilmiş bir kol yardımıyla ölçülmüştür. Deneyin sonunda, eriyik haldeki polimer iplikçiğinin çekme kuvvetine karşı gösterdiği direnç, döner tekerleklerin dönme hızına bağlı olarak bulunmuştur. Tekerleklerin dönme hızı, polimer iplikçiğinin çekme hızı olarak adlandırılmıştır. Deneyin başında tekerleklerin dönme hızı, eriyik halde kafadan çıkan polimer iplikçiğinin akma hızına V_s eşit alınmıştır. Polimer malzemesi kafadan çıkışta bir şişme gösterirse V_s hızı ekstrüzyon hızından (V_0) küçük demektir. Eriyik haldeki polimer iplikçiğinin uzamaya karşı gösterdiği direnci ölçen kol, iplikçiğin tekerlekler arasına girdiği, ancak uzamanın gerçekleşmediği durumda kalibre edilmiştir [1]. Deney esnasında tekerleklerin dönme hızı, düşük bir ivme değeriyle arttıkça polimer iplikçiğinin aşağı doğru çekilme hızı da artmıştır. Sabit tekerlek üzerindeki kol tarafından ölçülen kuvvet değerleri polimer iplikçiği kopana kadar kaydedilmiştir. Polimer iplikçiğinde kopmanın gerçekleştiği anda ölçülen kuvvet değeri polimerin eriyik haldeki dayanımı, hız değeri ise polimerin çekilebilirliği diye adlandırılmıştır [1]. Şekil 2.14’te belirtilen terimler eğri üzerinde gösterilmiştir.



Şekil 2.14 Reoten cihazıyla alınan kuvvet-hız ilişkisi

Yüksek çekme hızlarında malzemenin dayanım değeri salınım yapmaya başlamıştır. Bu etkiye çekme rezonans'ı denmiştir. Tekerleklerin dönme hızının artışına (ivmesine) (acc) bağlı olarak yüksek çekme hızında eriyik polimer iplikçığının dayanım değerinin salınma karakteri değişmektedir. Şekil 2.15'te farklı çekme hızlarına bağlı olarak eriyik haldeki polimer iplikçığının dayanımının salınma karakterleri gösterilmiştir. Düşük ivme değerleri polimerin maksimum çekilebilirliğinin azalmasına ve deney süresinin artmasına sebep olurken yüksek ivme değerleri de çekilebilirliğin artmasına ve deney süresinin kışalmasına neden olmuştur [1]. Yapılan deneylerde ortalama bir değer olan $acc = 24 \text{ mm/s}^2$ alınmıştır. Deneylerde kullanılan kafanın çapı en az 2 mm, kafadan çıkan eriyik haldeki polimer iplikçığının tekerleklere girene kadar aldığı yol (L) 150 mm küçük, ekstrüzyon hızı V_0 , 50 mm/s'den yüksek alındığında, tekerlekler arasına girmeden önce polimer iplikçığının soğumasını engellemek için bir ısı çemberinin kullanılmasına gerek duyulmamıştır. Deneylerde kullanılan malzeme tipleri ve malzemelerin özellikleri Tablo 2.6'da gösterilmiştir.



Şekil 2.15 Yüksek dönme hızlarında tekerleklerin dönme hızlarındaki farklı ivme değerlerinin eriyik haldeki polimer iplikçiğinin dayanım değerinin salınmasına etkisi

Tablo 2.6 Deneyde kullanılan polimer malzemelerinin özellikleri

Deneyde kullanılan Malzeme	Kısa kodu	Eriyik akış İndisi (g/10dak.)	η_0 (Pas)	$\rho_{23^\circ\text{C}}$ (kg/m ³)	T_M (°C)
Polipropilen	PP1	2.4	24600	910	163
Polipropilen	PP2	3.9	23700	909	162
Yüksek yoğunluklu	HDPE1	0.98	275000	958	131
Yüksek yoğunluklu	HDPE2	1.15	71700	957	131
Düşük yoğunluklu Polietilen	LDPE1	1.46	17000	919	108
Düşük yoğunluklu Polietilen	LDPE2	0.25	72400	926	114

Şekil 2.16’da 95 bar ekstrüzyon basıncında, farklı sıcaklıklarda eriyik haldeki polimerin dayanım değerleri $F(v)$ gösterilmiştir. Şekil 2.16’daki değerlerden yola çıkarak eriyik polimerin dayanımı, gerilme değeri olarak (2.28)’deki eşitlik

yardımla bulunur. Bulunan gerilme değeri Şekil 2.17’de gösterilmiştir.

$$\sigma = \frac{F}{A} = \frac{FV}{A_0} \quad (2.28)$$

$A \rightarrow$ Eriyik polimer iplikçığının tekerlekler arasından çıkıştaki yüzey alanı (mm^2)

$A_0 \rightarrow$ Ekstrüder kafa kalıbının yüzey alanı (mm^2)

$V \rightarrow$ Çekme hızı oranı (mm/s)

$$V = \frac{v}{v_0} \quad (2.29)$$

Yarı kristal polimerler için arrhenius eşitliği kullanılarak a_T adlı bir katsayı tanımlanmıştır [1] ;

$$a_T = \exp \left[\frac{E'}{R_{st}} \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_{ref}} \right) \right] \quad (2.30)$$

$E' \rightarrow$ Aktivasyon enerjisi (kJ/mol)

$R_{st} \rightarrow$ Standart gaz sabiti (J/molK)

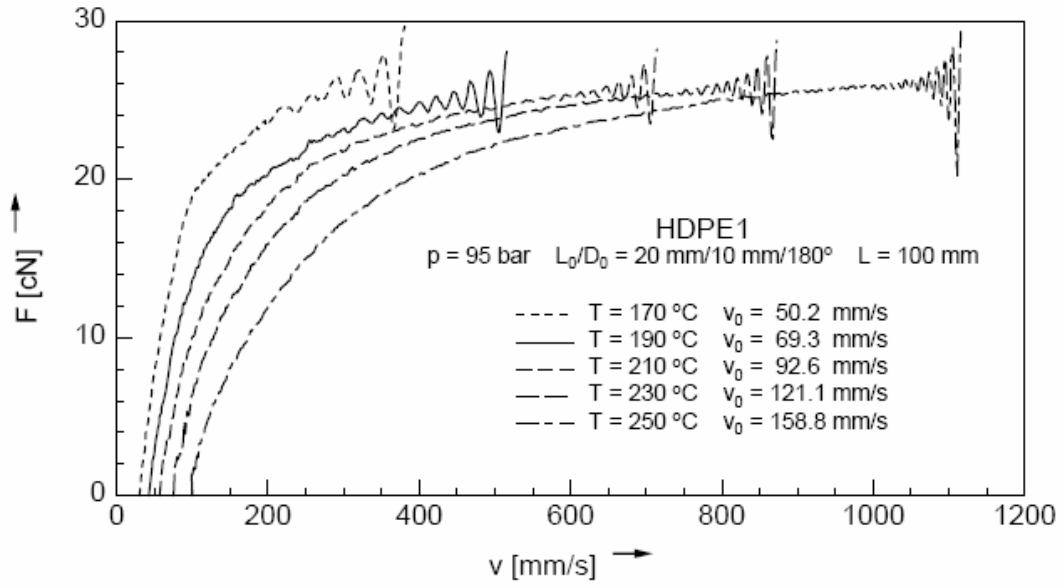
$T, T_{ref} \rightarrow$ Sıcaklık değeri (K)

Farklı bir sıcaklıkta, ekstrüder basıncının değişmediği bir durumda ekstrüder hızı aşağıdaki bağıntıdan bulunmuştur [1] ;

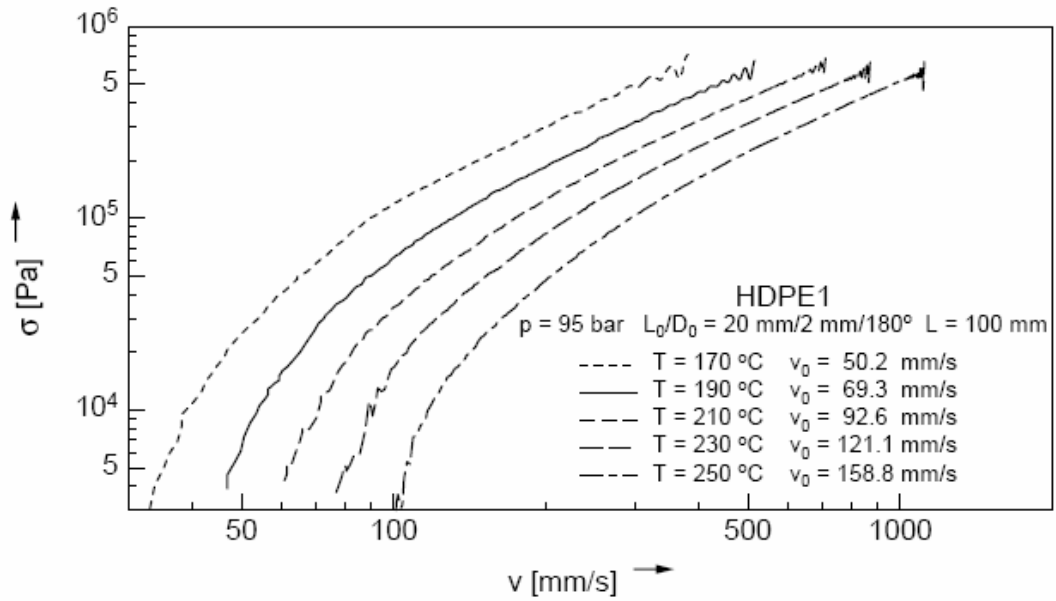
$$V_0(T) = a_T^{-1} V_0(T_{ref}) \quad (2.31)$$

Şekil 2.16’da görülen eriyik haldeki polimerin dayanım değeriindeki değişimler, sıcaklık farklılıklarından çok ekstrüder çıkış hızından kaynaklanmıştır [1]. Bu etkiyi ortadan kaldırmak için eriyik dayanımın sıcaklıkla değişimini boyutsuz bir hız katsayısına bağlı olarak göstermek gerekmiştir.

$$V = \frac{v}{v_0} \quad (2.32)$$



Şekil 2.16 HDPE1 malzeme için $F(v)$ değişimi

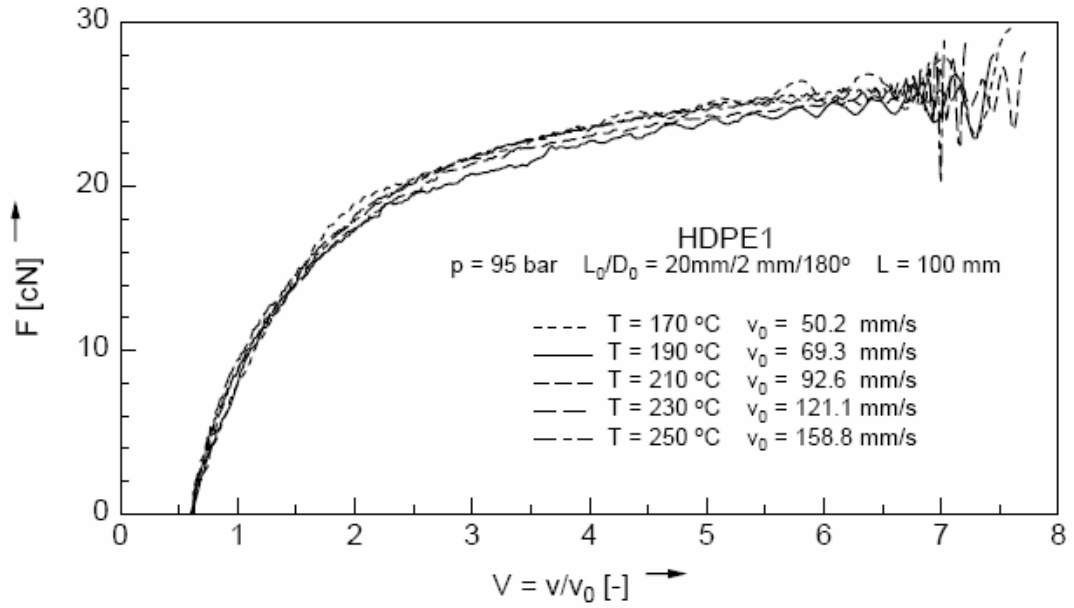


Şekil 2.17 HDPE1 malzeme için $\sigma(v)$ değişimi

$v \rightarrow$ Tekerleklerin dönme hızı (mm/s)

$v_0 \rightarrow$ Ekstrüzyon hızı (mm/s)

Şekil 2.18'de $F(v)$ değerinin boyutsuz hız katsayısıyla (V), Şekil 2.19'da $\sigma(v)$ değerinin boyutsuz hız katsayısıyla (V) değişimi gösterilmiştir.

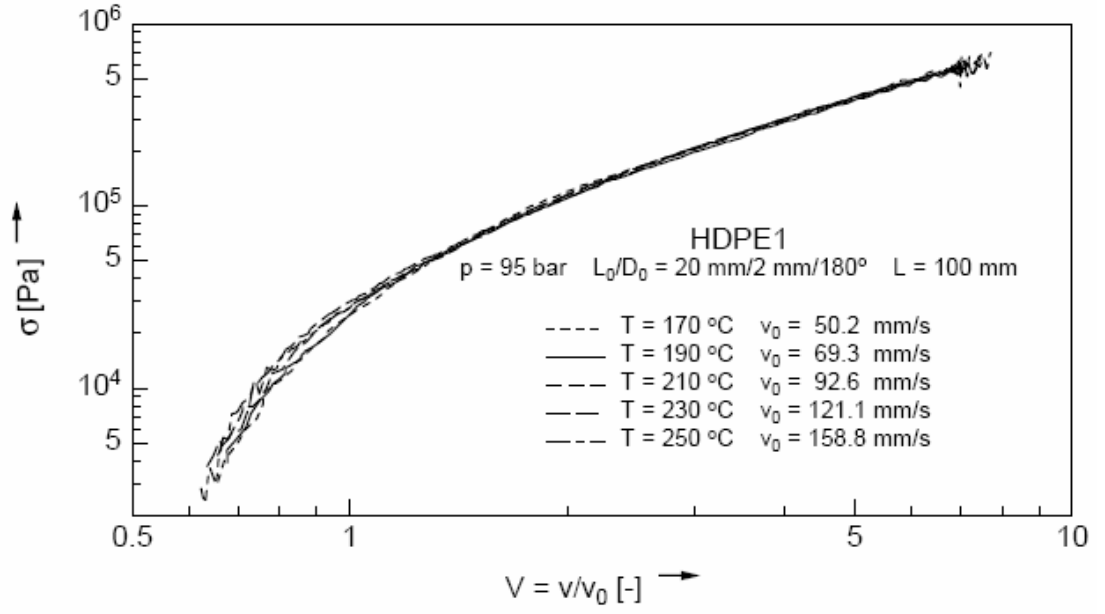


Şekil 2.18 HDPE1 malzeme için $F(v)$ değerinin boyutsuz hız katsayısıyla (V) değişimi

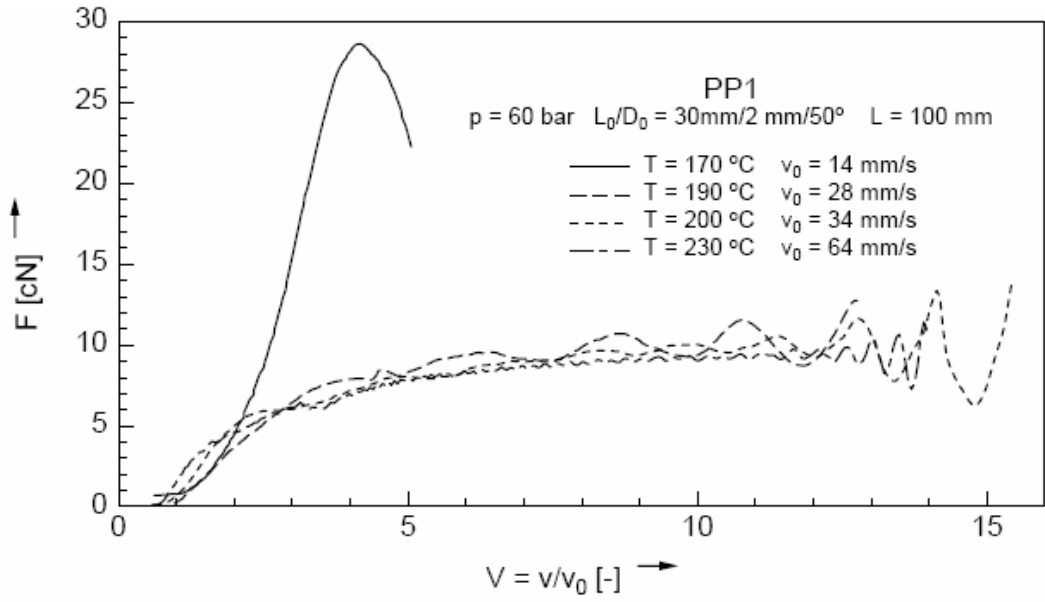
Aynı sonuçlar PP1 malzeme içinde Şekil 2.20’de, LDPE1 malzeme için Şekil 2.21’de gösterilmiştir.

Şekil 2.18’de HDPE1 malzemenin eriyik haldeki dayanımının sıcaklıkla değişimi, 95 bar ekstrüder çıkış basıncında gösterilmiştir [1]. Aynı malzemenin eriyik haldeki dayanımının sıcaklıkla değişimi 125 bar ekstrüder basıncında Şekil 2.22’de gösterilmiştir. 125 bar ekstrüder basıncında 170°C’deki eriyik polimerin dayanımı, daha yüksek sıcaklıklardaki dayanım değerlerinden daha büyük olduğu görülmüştür [1]. Bununla birlikte 170°C’de ekstrüder kafasından akan eriyik polimer miktarı, 190°C’deki eriyik polimer miktarından fazla olduğu anlaşılmıştır.

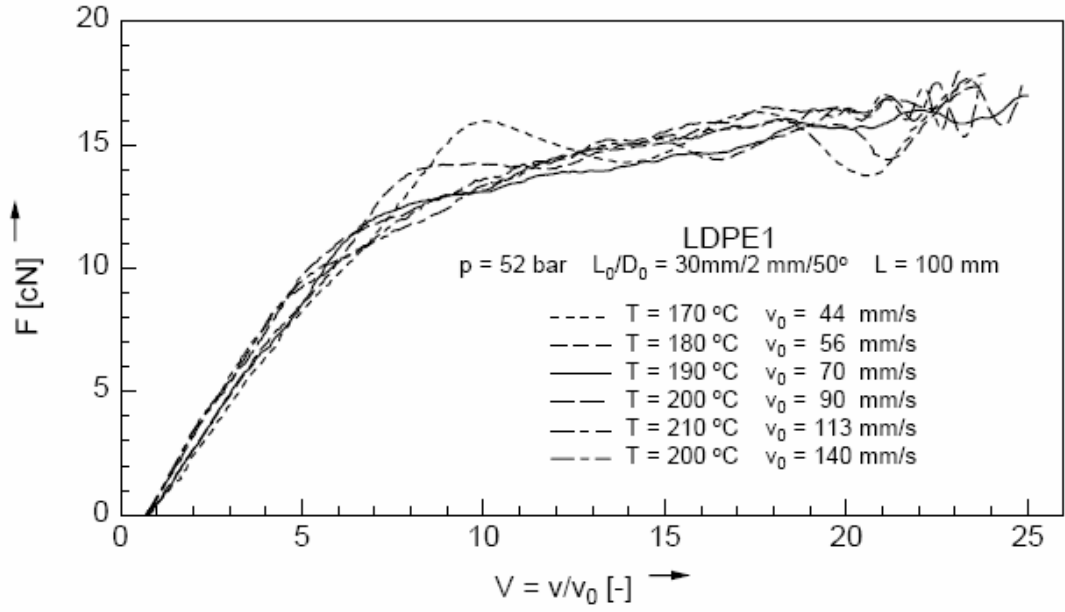
Yapılan ölçümler esnasında sabit bir sıcaklık ve ekstrüder basıncında, ekstrüderden çıkan eriyik polimer miktarı arttığında, ölçülen eriyik dayanım değerinde değişimler görülmüştür [1]. Bu durumun eriyik polimerin ekstrüder kafasından çıkıştaki 2mm çaplı kalıbın içinden geçerken gerçekleşen kayma gerilmesiyle ilgili olduğuna karar verilmiştir. Bu konuyla ilgili olarak literatürde yapılan çalışmalar mevcuttur.



Şekil 2.19 HDPE1 malzeme için $\sigma(v)$ değerinin boyutsuz hız katsayısıyla (V) değişimi

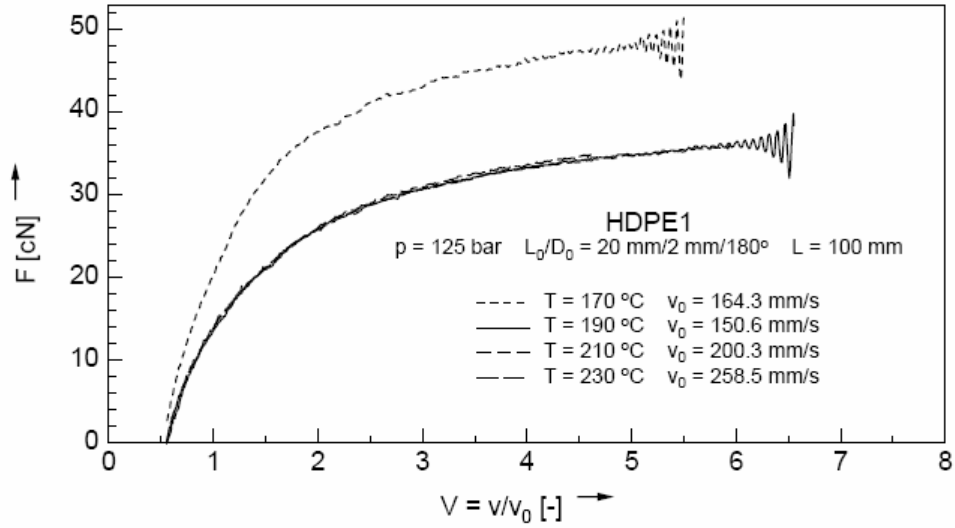


Şekil 2.20 PP malzeme için $F(v)$ değerinin boyutsuz hız katsayısıyla (V) değişimi

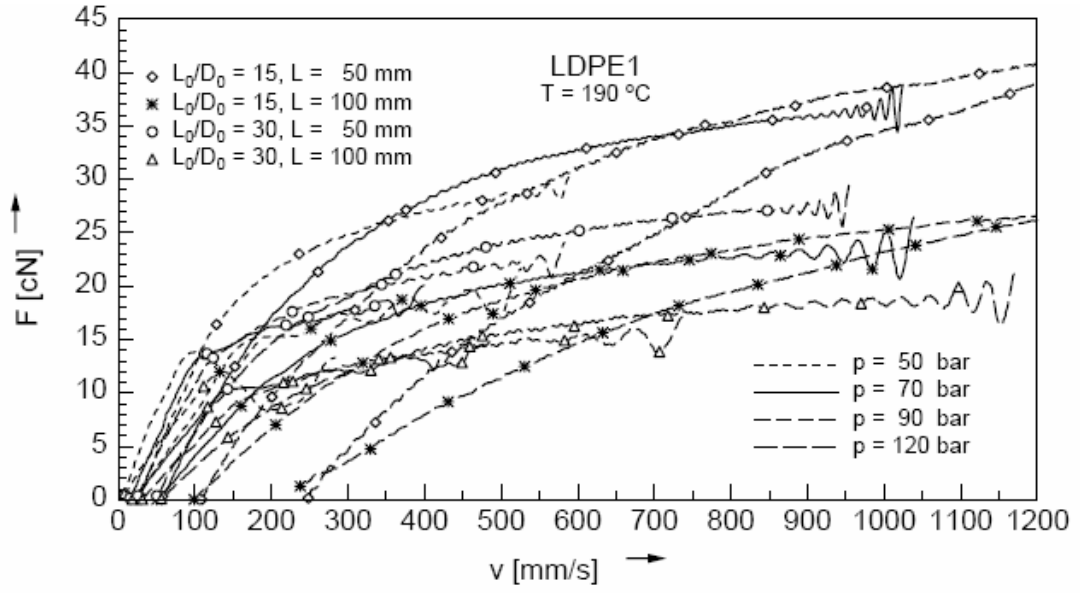


Şekil 2.21 LDPE1 malzeme için $F(v)$ değerinin boyutsuz hız katsayısıyla (V) değişimi

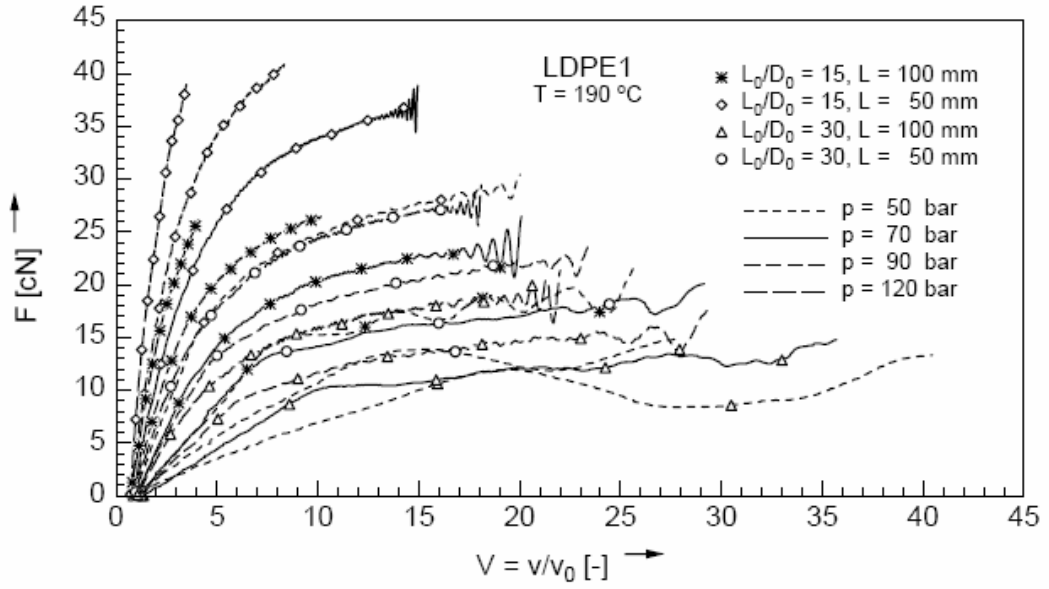
LDPE1 malzeme için farklı ekstrüder kalıp çapları ve boyları için 190°C sıcaklıkta değişik ekstrüder basınçlarında eriyik dayanımı, Şekil 2.23, 2.24 ve 2.25'te gösterilmiştir.



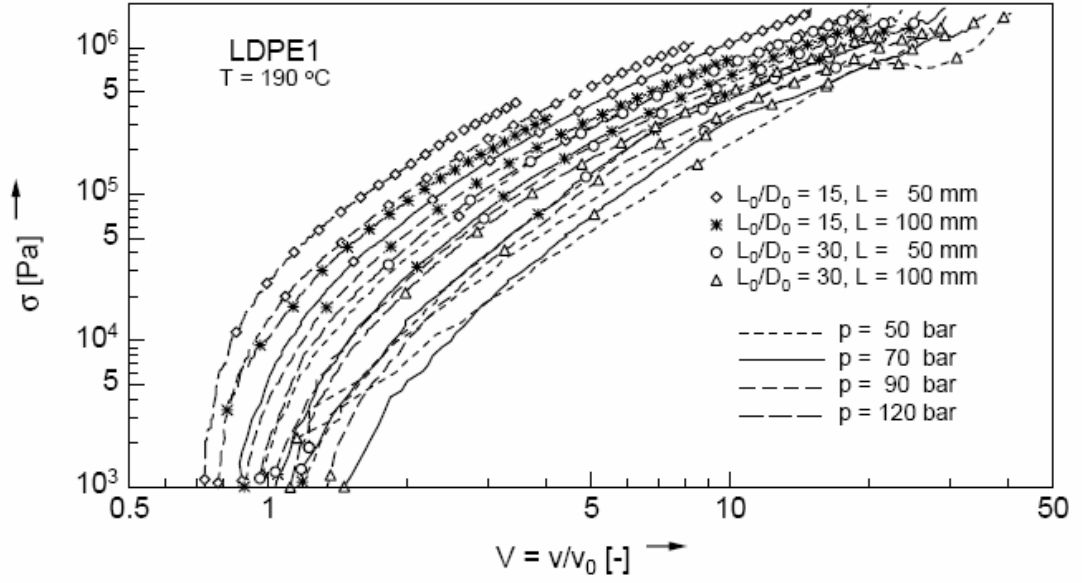
Şekil 2.22 HDPE1 malzeme için $F(v)$ değerinin $p=125$ bar ekstrüder basıncında boyutsuz hız katsayısıyla (V) değişimi



Şekil 2.23 LDPE1 malzeme için $F(v)$ değerinin 190°C sıcaklıkta, farklı ekstrüder basınç ve kalıp ölçülerinde çekme hızıyla değişimi



Şekil 2.24 LDPE1 malzeme için $F(v)$ değerinin 190°C sıcaklıkta, farklı ekstrüder basınç ve kalıp ölçülerinde boyutsuz hız katsayısıyla değişimi



Şekil 2.25 LDPE1 malzeme için $\sigma(v)$ değerinin 190 °C sıcaklıkta, farklı ekstrüder basınç ve kalıp ölçülerinde boyutsuz hız katsayısıyla değişimi

2.4.1 Yüksek sıcaklıktaki boru malzemesinin mukavemetini etkileyen parametreler

Şekil 2.23'te görüldüğü üzere eriyik haldeki polimerin dayanımının, ekstrüder kafasının geometrisine, ekstrüder çıkış basıncına (p), ekstrüzyon hızına (v_0), tekerleklerin polimer iplikçliğini çekme hızına (v), Erime sıcaklığına (T) bağlı olduğu görülmüştür [1]. Diğer bir deyişle;

$F=F(\text{polimer, geometri, proses, çalışma şartları})$

Polimer iplikçğine etki eden yerçekimi kuvveti, atalet kuvveti, havanın sürüklenme direnci, yüzey çekme kuvveti gibi etkiler ihmal edilmiştir. Eriyik haldeki polimer iplikçğine, tekerleklerin sonunda etki eden çekme kuvveti $\sigma = \sigma(L)$, sadece polimerin reolojik özellikleriyle ilgilidir. Bu gerilmenin sadece Deborah sayısının bir fonksiyonu olduğu kabul edilmiştir;

$$\sigma = \sigma(De) \quad (2.33)$$

$De \rightarrow$ Deborah sayısı

$$De = \frac{t_m}{t_{pz}} \quad (2.34)$$

$t_m \rightarrow$ Karakteristik malzeme zamanı (s), referans bir gecikme değeri alınır.

$t_{pz} \rightarrow$ Karakteristik proses zamanı (s), polimer iplikçiğinin tekerlekler yardımıyla eğrildiği zaman

$$t_{pz} = \frac{L}{v}$$
$$De = \frac{t_m}{t_{pz}} = \frac{t_m}{L/v} \quad (2.35)$$

(2.35) nolu eşitlik boyutsuzlaştırılırsa Deborah sayısı ;

$$De = \frac{t_m (v/v_0)}{L/v_0} = \frac{V}{(L/v_0 t_m)} \quad (2.36)$$
$$V_m = L/(v_0 t_m)$$

$V_m \rightarrow$ Eşdeğer çekme oranı

$$De = \frac{V}{V_m} \quad (2.37)$$

(2.37) nolu eşitlik, (2.33) nolu eşitlikte yerine konursa;

$$\sigma = \sigma \left(\frac{V}{V_m} \right) = \sigma(V_r) \quad (2.38)$$

$$V_r = \frac{V}{V_m} \quad (2.39)$$

$V_r \rightarrow$ bağıl çekme oranı

Bu durumda eriyik haldeki polimer iplikçiğine etkiyen çekme gerilmesinin değişimi, bağıl çekme oranına (V_r) göre, erime sıcaklığı, kalıp geometrisi, iplikçiğin eğrilme uzunluğu gibi parametrelere bağlı olmaksızın bir eğri olarak çizilmiştir [1].

Polimer iplikçiğine etki eden çekme kuvveti, iplikçiğe etki eden gerilme (σ) ile iplikçiğin kesit alanı ($A(L)$) çarpılarak bulunmuştur.

$$A(L) = \frac{A_0}{V}$$

$A_0 \rightarrow$ Ekstrüder kafasının kesit alanı (mm^2)

$$F = \frac{\sigma A_0}{V} \quad (2.40)$$

$$V_m F(V) = \frac{\sigma(V_r) A_0}{V_r} = F_r(V_r) \quad (2.41)$$

Plastik boru üretiminde, boru malzemesine göre, kalibrede uygulananak vakum basıncını belirlemek için malzemenin yüksek sıcaklıktaki mukavemet değeri, şekiller ve belirtilen parametreler kullanılarak belirlenebilir.

3 DENEYSEL ÇALIŞMALAR

Mevcut kalibrelerde taşınım ile olan ısı geçişi oldukça düşüktür. Bunun sebebi yüksek sıcaklıktaki boruyu soğutmada kullanılan suyun hemen hemen durgun halde olmasıdır. Taşınım ile gerçekleşen ısı transferini artırmak amacıyla; boru ile temasta olan su hızlarını artırmak için bir kenarı plastik borunun dış yüzeyi olan kare veya dikdörtgen kesitli helisel kanalları bulunan bir kalibre modeli üzerinde çalışılmıştır. Kaya (2002), tarafından yapılan “Plastik boru ekstrüder kalibrelerinde ısı transferinin incelenmesi” konulu doktora tezinde bir kenarı (plastik boru) sabit hızda hareket eden diğer üç kenarı hareketsiz kare veya dikdörtgen kesitli helisel kanallarda türbülanslı akışta ısı transferi incelenmiştir.

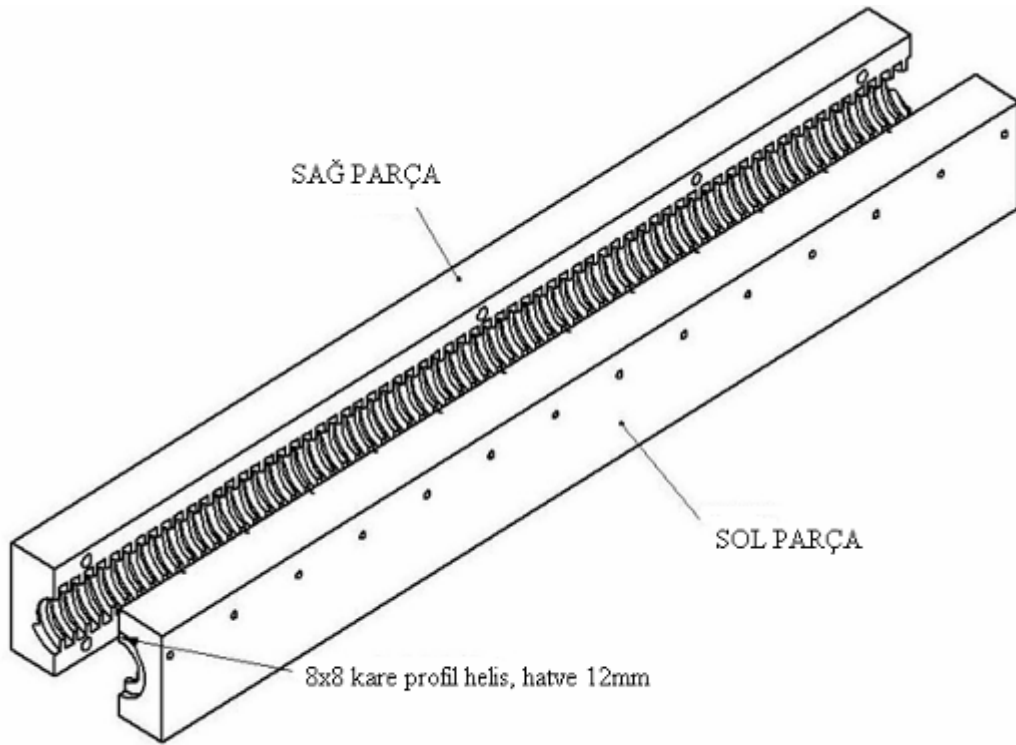
3.1 Kalibrenin Tanımı ve Özellikleri

Kalibrede gerçekleşen soğutmayı iyileştirmeye yönelik olarak plastik boru dış yüzeyine temas eden soğutma suyunun akış hızı artırılarak taşınım ısı transferini artıran yeni bir kalibre modeli geliştirilmiştir. Yeni kalibre, dikdörtgen kesitli helisel bir kanal olup dikdörtgen kesitin bir kenarı (uzun kenar) borunun soğutulacak olan dış yüzeyi, diğer üç kenar ise kalibrenin kendi iç (helis) kenarlarıdır. Yeni helisel kanallı kalibreye ait resimler Şekil 3.1, 3.2, 3.3, 3.4, 3.5 ve 3.6’da gösterilmiştir.

Kalibre, pirinç malzemeden imal edilmiştir. Sağ ve sol olmak üzere 2 parçadan oluşmaktadır. Her iki parçanın üzerinde delikler bulunmaktadır. Kalibre sağ ve sol parçasının giriş tarafındaki ilk iki delik, vakum emişi ile soğutma suyunun kalibredeki helisel kanallara girmesini sağlar. Vakum emişi, kalibre sağ ve sol parçası üzerinde bulunan son iki delikten gerçekleşir. Deliklerin çıkışı, bir vakum pompasının emiş tarafına bağlanmıştır. Kalibre sağ ve sol parçasının üzerindeki diğer delikler, soğutma suyunun kanallar arasında aktarılması sonucunda helisel kanallarda dolaşan soğutma suyu basınç dağılımının ayarlanmasında kullanılır.

Plastik boru üretimi esnasında soğutma suyu kalibre sağ ve sol parçasının ilk deliklerinden vakum emişi ile girer. Kalibreye giren su burada sıcak polimer (boru)

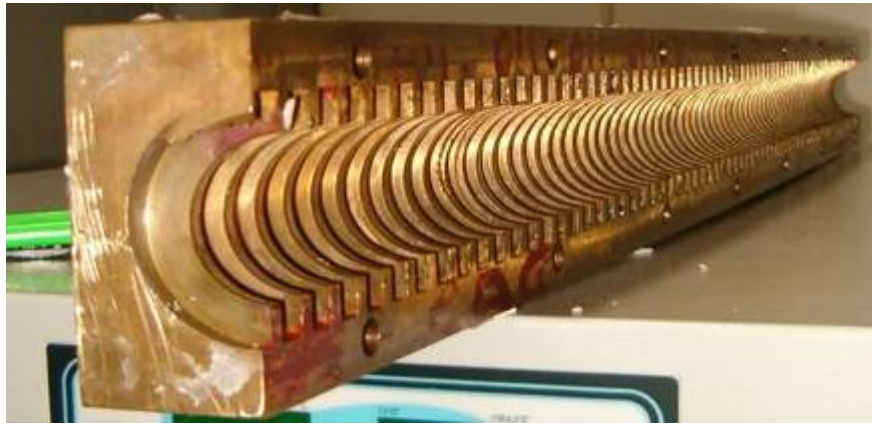
ile karşılaşır ve boru dış yüzeyi etrafında helisel bir yol izleyerek kalibrenin arka kısmındaki delikten vakum pompası yardımıyla çıkar. Vakumun, kalibrenin ön kısmında küçük olması ve arka kısma doğru ilerledikçe sürtünmenin etkisiyle miktarının artması bu kalibrenin önemli avantajlarından birisidir. Çünkü ön taraftan kalibreye 200°C’de giren polimer yumuşaktır, yumuşak polimerin kalibre iç yüzeyine tam temasını sağlayabilmek için az kuvvete (vakuma) ihtiyaç vardır, boru soğudukça (arkaya ilerledikçe) katılaşacağından, borunun kalibre iç yüzeyine teması için gereken kuvvet miktarı dolayısıyla basınç artacaktır. Bu nedenle kalibrenin arka kısmında daha fazla, ön kısmında daha az vakuma ihtiyaç duyulacaktır. Ayrıca bu kalibre geometrisi ile soğutma suyuna, plastik boru dış yüzeyi etrafında helisel bir yol izleme ve hızlanma imkanı verildiğinden eski kalibrelerde su ile boru dış yüzeyi arasındaki durgun ortamdan oluşan düşük ısı transferi şartları ortadan kaldırılmış, ısı transferinde büyük iyileşmeler sağlanmıştır.



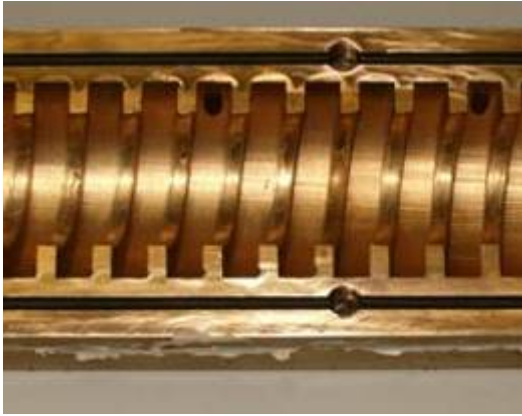
Şekil 3.1 Yeni helisel kanallı kalibre



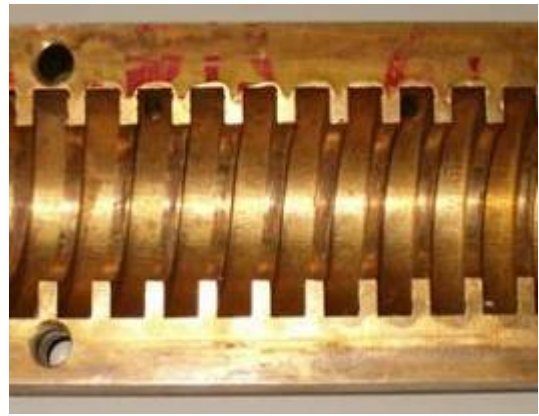
Şekil 3.2 Helisel kanallı kalibrenin sol parçası



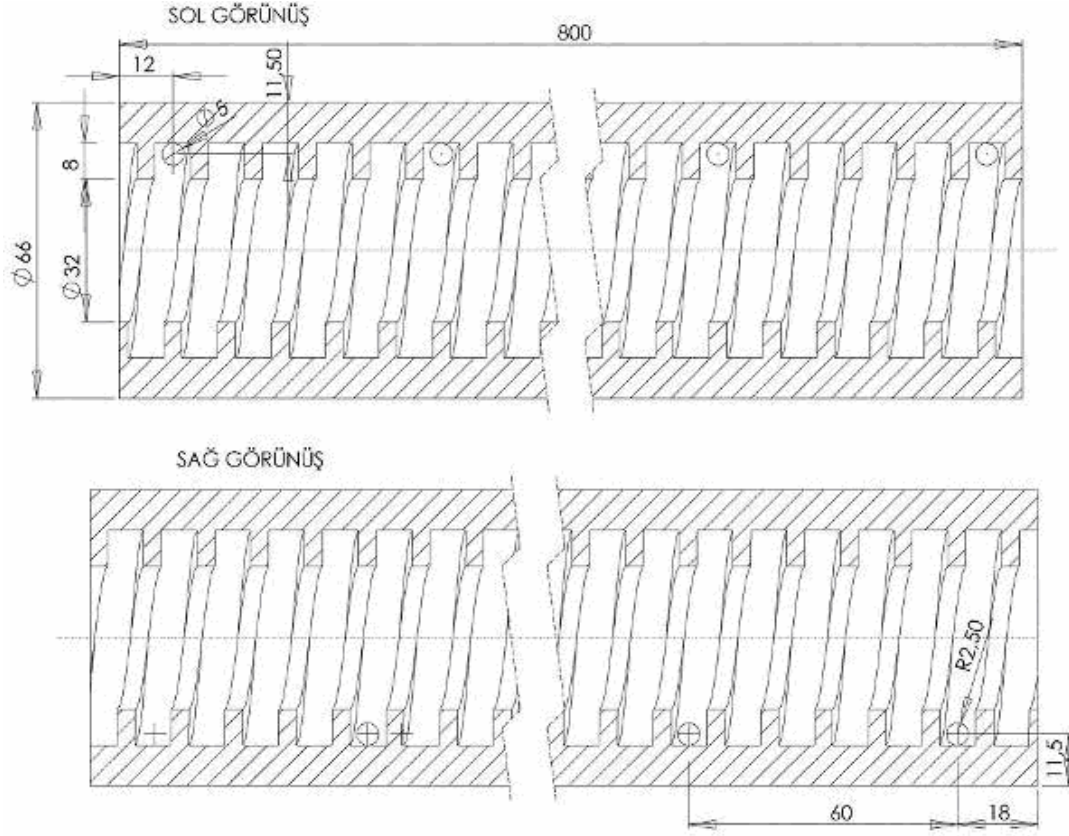
Şekil 3.3 Helisel kanallı kalibrenin sağ parçası



Şekil 3.4 Helisel kanallı kalibrenin sol parçasındaki
helisel kanalların detayı

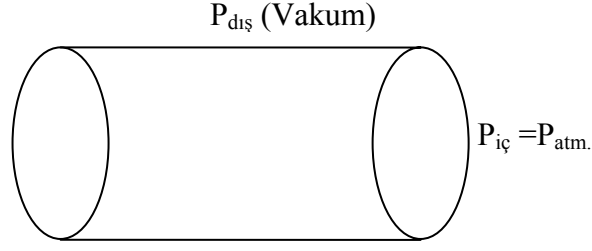


Şekil 3.5 Helisel kanallı kalibrenin sağ parçasındaki
helisel kanalların detayı



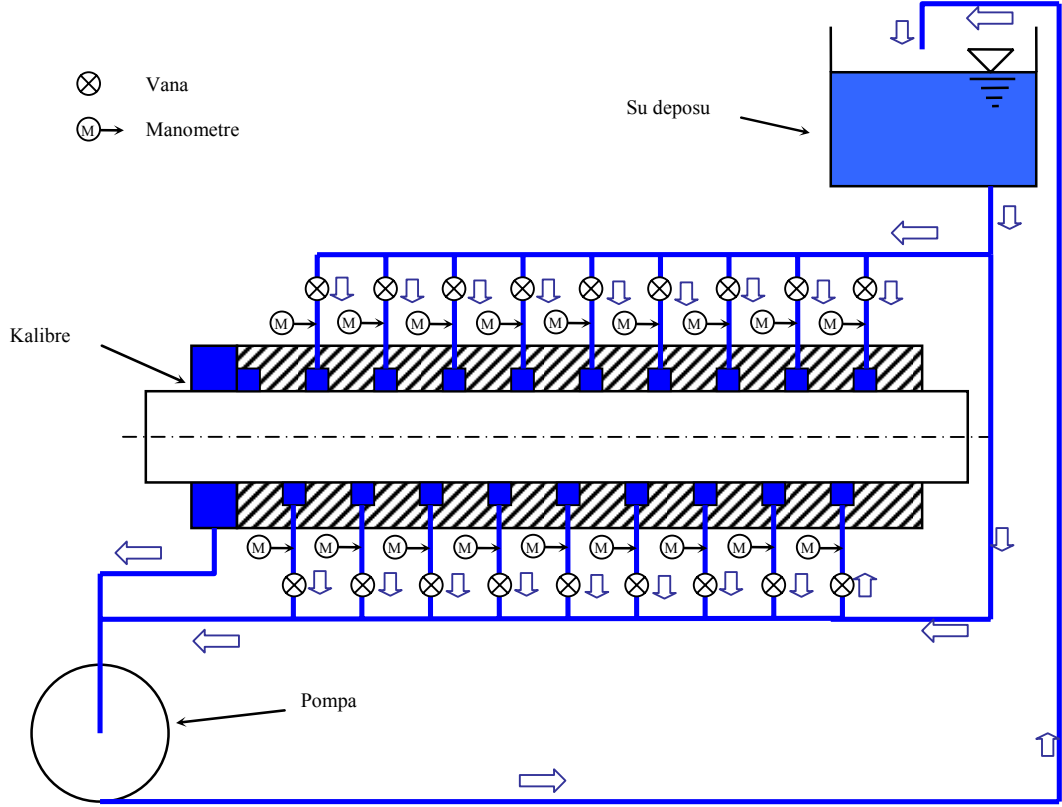
Şekil 3.6 Helisel kanallı kalibrenin kesit resmi

Aşağıdaki Şekil 3.7’den görüleceği gibi kalibre içerisinde ilerleyen boruya, kalibrenin ön tarafından atmosferik basınçta ve belirli bir debide verilen su, kalibrenin arka kısmındaki su çıkış deliklerinden yüksek miktardaki vakumun etkisiyle emilir, suyun kalibreye girmesiyle birlikte boru dış yüzeyi etrafında helisel bir yol izler ve bu esnada basıncı da helis eksenı boyunca düşer (atmosferik basınçtan vakum basıncına). Eğer kalibre girişinde vakum miktarı fazla olursa 200°C’deki yumuşak polimer yüksek vakumun etkisi ile kalibre yüzeylerine (kalibre içindeki helisel kanallara) mekanik olarak bağlanıp kopar, basıncın atmosferik basınca yakın olması durumunda ise soğuyan borunun çapı küçülecek ve soğutma suyu helisel kanalın dışına çıkarak kalibrenin ön tarafından veya boru dış yüzeyi üzerinde kısa devre yaparak arka taraftan çıkacak, boru dış yüzeyi üzerinde küçük benekler oluşacaktır ki bu da üreticilerin istemediği bir durumdur. Ayrıca boru kalibreye temas etmediğinden çap toleransı da uygun olmayacaktır. Bu sebeple kalibre girişindeki basınç atmosferik basınca yakın olmalıdır.



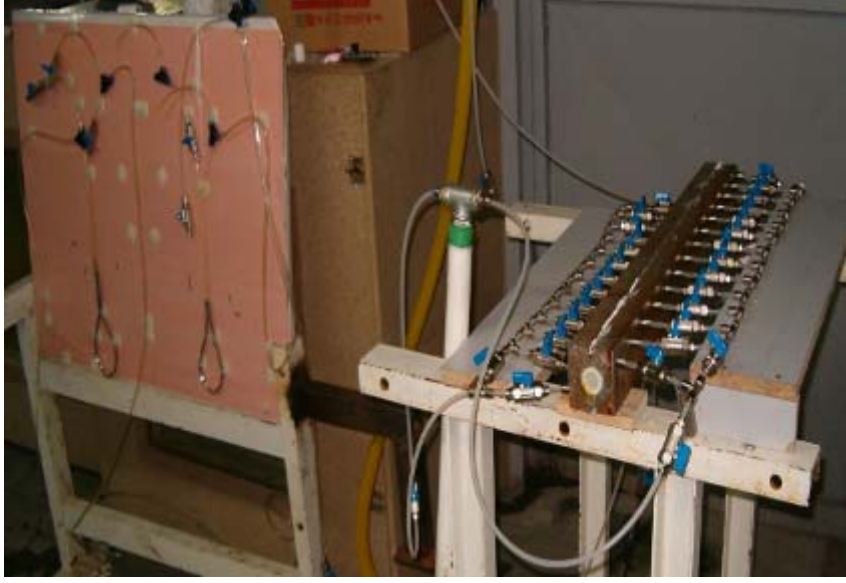
Şekil 3.7 Üretim esnasında kalibre içindeki boruya etki eden basınçlar

Yeni geliştirilen kalibrenin sağ ve sol parçası üzerindeki delikler, kalibrenin helisel kanalları içerisinde dolaşan soğutma suyu debisinin ayarlanmasında kullanılır. Bu sayede kalibre içinde istenen basınç dağılımının sağlanacağı düşünülmüştür. Bu düşünce, helisel kanallı kalibre'nin en önemli avantajlarından birisidir. Basınç dağılımının, soğutma suyunun helisel kanallar arasında, vanalar yardımıyla birbirine aktararak sağlanıp sağlanamayacağını görmek ve kalibredeki basınç düşüşünü ölçmek için bir deney tesisatı kurulmuştur. Kurulan deney tesisatı ile yeni kalibrede elde edilebilen basınç düşüşünün mevcut kalibrelerin vakum tankı içinde çalıştığı vakum değerine yakın olup olmadığı bulunacaktır. Kurulan deney setinin şematik resmi Şekil 3.8'de gösterilmiştir. Deney düzeneği helisel kalibre, kazan, debi metreler, basınç ölçer, fark basınç ölçerleri, devir daim pompası, vanalar ve hortumlardan müteşekkildir. Kalibrenin içerisine Ø32 mm Polipropilen-random (PP-R) boru sıkı şekilde yerleştirilmiştir. Ayrıca kalibrenin birleşme yüzeylerine sızdırmazlığın sağlanması için silikonda sürülmüştür. Üst kısımdaki vanalar aracılığıyla sisteme su girişi yapılırken aşağıdaki vanalar aracılığıyla sistemden su çekilebilmektedir. Bu şekilde kanal boyunca debi değiştirilerek farklı basınç düşüşleri sağlanmıştır. Mevcut kalibrelerde vakum tankındaki maksimum vakum miktarı 300 mmHg dır. Bu değer kalibre çıkışında yakalanacak şekilde basınç dağılımı kalibre boyunca ayarlanmaya çalışılmıştır.



Şekil 3.8 Deney sisteminin şematik resmi

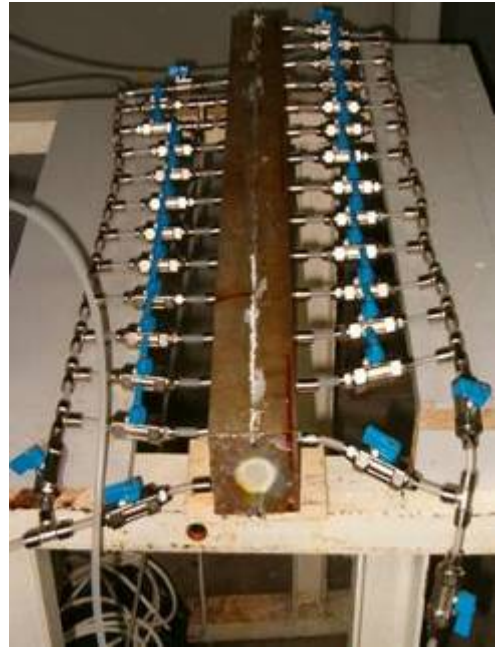
Deney, Dizayn Teknik firmasının laboratuvarında gerçekleştirilmiştir. Laboratuvar tavanına bir adet su deposu yerleştirilmiştir. Soğutma suyunun helisel kanallarda akışı vakum pompası tarafından gerçekleştirilir. Debisi 1 m³/h olan, 30 mSS basma yüksekliğine sahip pompa kullanılmıştır. Soğutma suyunun helisel kanallar arasında aktarımı 6 mm çaplı plastik borular kullanılarak sağlanmıştır. Bu çapa uygun hızlı bağlantı sağlayacak vanalar ve T bağlantıları alınmıştır. Deney setinin resimleri Şekil 3.9, 3.10 ve 3.11’de gösterilmiştir. Basınç ölçümünde civalı diferansiyel manometre kullanılmıştır (Şekil 3.12, 3.13). Hız ölçümü ölçekli bir kap kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Deneyde yeni kalibredeki basınç düşüşleri, civalı diferansiyel manometredeki seviye farkı okunarak ölçülmüştür.



Şekil 3.9 Deney sisteminin resmi



Şekil 3.10 Deneyde kullanılan pompanın resmi



Şekil 3.11 Kalibrenin resmi



Şekil 3.12 Basınç ölçümünün bağlantı resmi



Şekil 3.13 Civalı manometrenin resmi

3.1.1 Vakum basıncının ölçülmesi

Deneyde kullanılan civalı diferansiyel manometre, en basit haliyle Şekil 3.14'te gösterilmiştir. Manometredeki P_1 ile P_2 arasındaki basınç farkı, aynı sıvı içerisinde aynı hizadaki statik basınçlar eşit olduğundan şekilde gösterilen iki noktadaki basınç birbirine eşit ve P kadardır.

P basıncını P_1 ve basınçları cinsinden ayrı ayrı yazacak olursak;

$$P = P_1 - \gamma_{su} \cdot h + \gamma_{su} \cdot \Delta h = P_2 - \gamma_{su} \cdot h + \gamma_{civa} \cdot \Delta h$$

Buradan,

$$P_1 - P_2 = (\gamma_{civa} - \gamma_{su}) \Delta h \quad (3.1)$$

İki nokta arasındaki statik basınç farkı bulunmuş olur. Ancak burada basınç farkı basınç birimine sahiptir. Statik basıncı uzunluk boyutunda ifade edecek olursak;

$$\frac{P_1 - P_2}{\gamma_{su}} = \frac{\gamma_{civa} - \gamma_{su}}{\gamma_{su}} \Delta h = \frac{(\rho_{civa} \cdot g - \rho_{su} \cdot g)}{\rho_{su} \cdot g} \Delta h = \frac{\rho_{civa} - \rho_{su}}{\rho_{su}} \Delta h$$

olur.

Burada;

$\rho_{\text{civa}} = 13600 \text{ kg/m}^3$ (20°C sıcaklık ve 1 atm basınç altında)

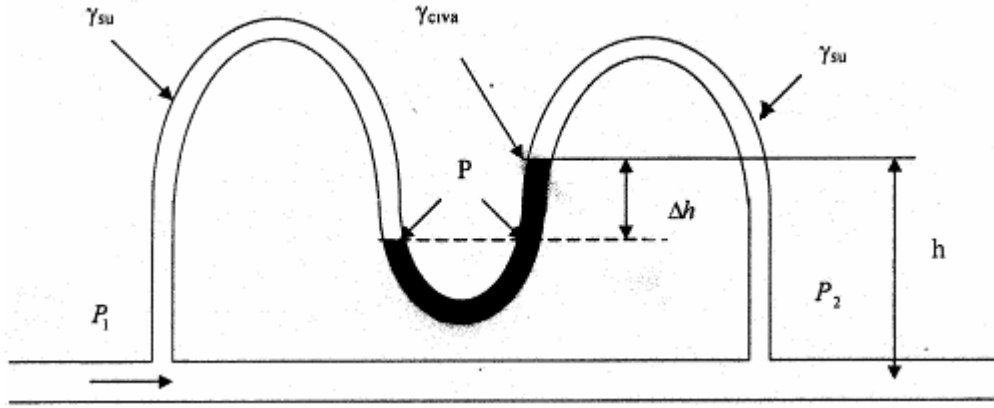
$\rho_{\text{su}} = 1000 \text{ kg/m}^3$

Δh : civa seviyeleri arasındaki fark [mSS]

Bu değerler yerine yazılır, Δh değerinin birimi mm olarak alınırsa formül,

$$\frac{P_1 - P_2}{\gamma_{\text{su}}} = \frac{13600 - 1000}{1000} 10^{-3} \cdot \Delta h = 12.6 \cdot 10^{-3} \Delta h [\text{mSS}] \quad (3.2)$$

şeklini alır. Bu iki noktanın seviyeleri aynı ve suyun akış hızı bu iki noktada eşit ise (3.2)'deki ifade basınç düşüşünü verir. Öyleyse;



Şekil 3.14 Civalı diferansiyel manometre

$$H_{\text{kayıp1-2}} = \frac{P_1 - P_2}{\gamma_{\text{su}}} = 12.6 \cdot 10^{-3} \cdot \Delta h [\text{mSS}] \quad (3.3)$$

Burada Δh , milimetre (mm) olarak civa'nın seviye farkıdır. Kalibredeki hız ölçümü, ölçekli kap kullanılıp, 5 kez debi ölçümü yapılarak bulunmuştur.

Yapılan deneylerde kalibrenin tamamındaki basınç düşüş değeri, 0.714 m/s hız değerinde 290 mmHg olarak ölçülmüştür. Kalibrenin farklı bölgelerinde yapılan basınç ölçümleri sonucu, bir tur helisteki basınç düşüşünün tam artmadığı gözlenmiştir. Bu ise soğutma suyunun helisel kanalların boru yüzeyine temas eden kısımlarından kısmen sızmasından kaynaklanmaktadır. Sızmanın nedeni, kalibre içine yerleştirdiğimiz borunu katı olmasındandır. Üretim esnasında plastik boru, kalibrenin içine 200°C'de girecek ve kalibrede uygulanan vakum basıncı sebebiyle kalibrenin çeperlerine tam oturacağı için soğutma suyunun helisel kanallardan sızma

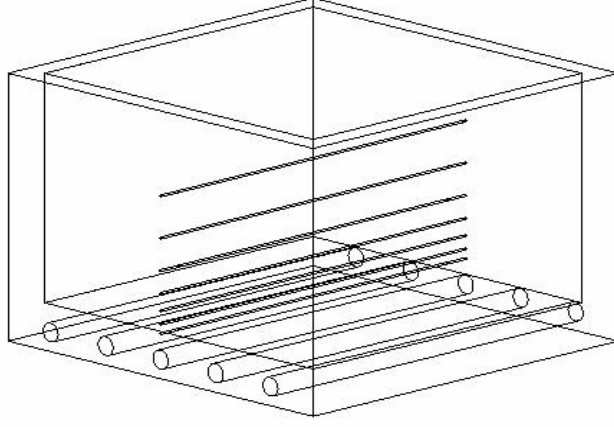
problemi olmayacaktır.

Geliştirilen kalibrede, mevcut kalibrelerde kullanılan vakum tankındaki maksimum vakum miktarı 300 mmHg değeri elde edilmiştir. Bu değer kalibre çıkışında yakalanacak şekilde basınç dağılımı kalibre boyunca ayarlanabilmektedir. Uygulanacak basınç dağılımı ile yüksek sıcaklıktaki borunun, kalibrenin içindeki helisel kanalların iç yüzeylerine tam teması sağlanacaktır. Bu basınç dağılımını bulabilmek için kalibre içerisinde, boruda radyal ve eksenel yönde sıcaklık dağılımının bilinmesi gerekir. Bu bilgi elde edildikten sonra boruya sahip olduğu sıcaklıktaki mukavemet değerine uygun olarak bir vakum basınç dağılımı uygulanacaktır. .

3.2 Katılaşma Esnasında Polipropilen (PPR) Malzemenin Sıcaklık Dağılımının Belirlenmesi

Bu aşamada, katılaşma esnasında boru üretiminde kullanılan Polipropilen (PP-R) malzeme içindeki sıcaklık dağılımı deneysel olarak belirlenecektir. Bunun için bir deney tesisatı tasarlanarak imal ettirilmiştir. Deney tesisatında kullanılan ekipmanlar, 3.15, 3.16 ve 3.17 no'lu Şekillerde gösterilmiştir. Ahşap malzemedan yapılmış bir kap içerisine Polipropilen (PP) konuldu. İçerisine belirli aralıklarla teller yerleştirilmiş, ahşap (gürgen) malzemedan yapılmış bir kasa kullanıldı. Ahşap malzeme, ısı iletim katsayısı düşük olduğu için tercih edilmiştir. Bu kabın içine yerleştirilen tellerin üzerine sıcaklık ölçmede kullanılan ısı çifti yerleştirildi. Kullanılan telin çapı 0.25 mm olup malzemesi çeliktir. Telin malzemesi seçilirken 250°C'ye kadar sehim yapmaması göz önünde bulundurulmuştur. Deneyde kullanılmak üzere T tipi ısı çifti seçilmiştir. Isıl çifti, Omega firmasından temin edilmiş olup kalınlığı 0.25 mm'dir. Ahşap kasanın altına çelikten bir tabla yerleştirildi. tablanın altında su geçmesi için beş adet kanal mevcuttur. Daha sonra kap, 200°C' ye kadar ısıtılmak üzere fırına yerleştirildi. Plastik malzemenin içinde homojen sıcaklık dağılımına ulaşıldıktan sonra kap fırından çıkarıldı. Kanalların giriş ve çıkışlarındaki su sıcaklığı ısı çifti yardımıyla ölçüldü. Suyun debisi ise, tabladaki kanalların çıkışına yerleştirilen bir plastik borudaki basınç kaybının, civalı diferansiyel manometre kullanarak ölçülmesi suretiyle bulundu. Kabın çevresinden ve üstünden ısı transferi olmaması için, taş yününden imal edilmiş bir ceket kabın üzerine yerleştirildi. Plastik malzemenin katılaşması esnasındaki ısı iletim katsayısı

değişimi, kabın içinden ısıt çift yardımıyla ölçülen sıcaklık değerleri yardımıyla bulunmuştur.



Şekil 3.15 Deney seti



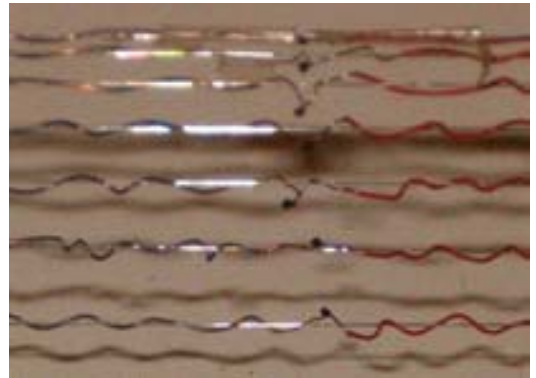
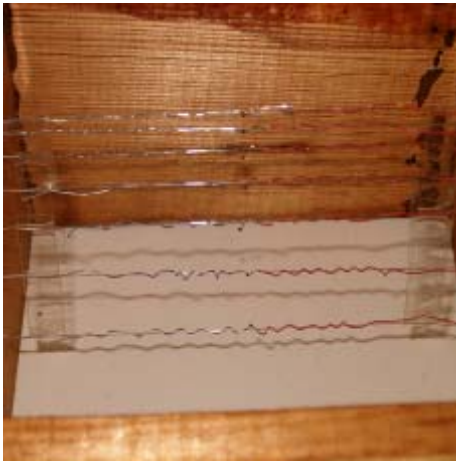
Şekil 3.16 Deney setinin resmi



Şekil 3.17 Deney setinin fotoğrafı

3.2.1 Deneyde kullanılan ısı çiftlerinin kalibrasyonu

Deneyde, ısı çifti yardımıyla plastik malzemenin içerisinde, 7 ayrı noktadan sıcaklık ölçümü yapılmıştır. Isıl çiftlerin malzemenin içine yerleştirilmesinin detayı Şekil 3.18’de gösterilmiştir. Isıl çiftlerin kalibrasyonunda, Omega firmasından alınan HH506R tipi dijital termometre kullanılmıştır (Şekil 3.19). Dijital termometrenin 2 girişi vardır ve 2 adet K tipi probu mevcuttur. Dijital termometre, Netes Mühendislik ve Dış Ticaret Ltd. Şti. firmasının kalibrasyon laboratuvarında kalibre edilmiştir. Dijital termometreye ait kalibrasyon sertifikası ve kalibrasyon değerleri Ek A ve Ek B’de gösterilmiştir.



Şekil 3.18 Isıl çiftlerin deney setine yerleştirilmesi

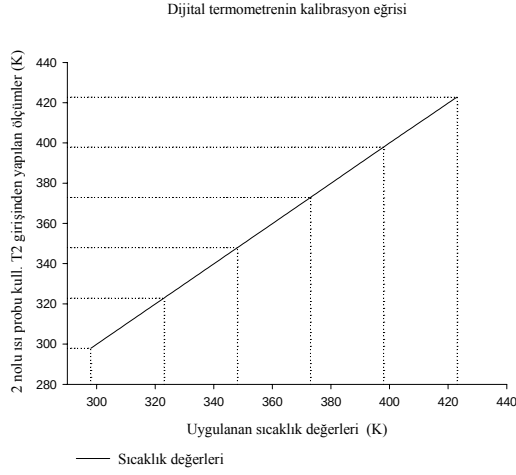


Şekil 3.19 Dijital termometre

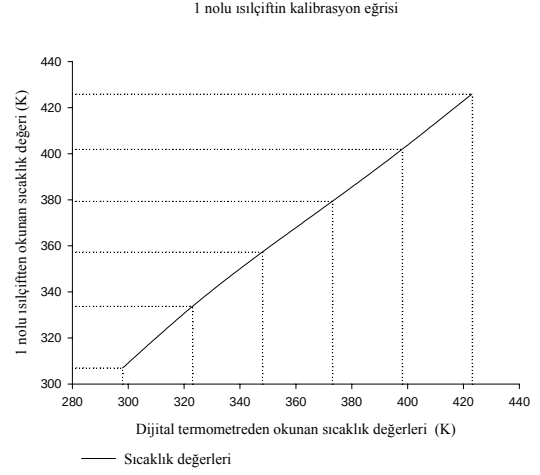
Isıl çiftlerin kalibrasyonunda, yüksek sıcaklıklarda kaynaması sebebiyle Transcal N tipi termal yağ kullanılmıştır. Omega firmasından alınan 0.25 mm kalınlığındaki T tipi ısıl çiftler, bir transformatör yardımıyla düşük bir gerilim farkının (17 V) oluşturulup, uçlarının civa kullanılarak kaynak edilmesiyle imal edilmiştir. Yapılan ısıl çiftler, Dizayn Teknik Plastik Boru San. A.Ş firmasının Araştırma ve Teknoloji Geliştirme Bölümü tarafından geliştirilen bir bilgi toplayıcı program yardımıyla sıcaklıkların ölçülmesinde kullanılmıştır. Kalibrasyon işlemi, dijital termometre ve bu program yardımıyla yapılmıştır. Öncelikle kalibrasyon sertifikasındaki değerler kullanılarak Sigmaplot programı yardımıyla 2 nolu probun kalibrasyon eğrisi çizilmiştir (Ek B. Şekil 3.20). Aynı program kullanılarak bu eğriye 3. dereceden bir fonksiyon uydurulmuştur. Daha sonra ısıl çiftler Transcal N termal yağından oluşan bir havuza yatay olarak aynı konumda olacak şekilde daldırılmışlardır. Isı iletim yağı, kalibrasyon sertifikasında yer alan sıcaklık değerlerine kadar dijital termometrenin 2 nolu probundan ölçümler alınarak LPG ocağı yardımıyla kullanılarak ısıtılmıştır. Bu esnada her bir ısıl çiftin gösterdiği sıcaklık değeri eş zamanlı olarak kaydedilmiştir (Tablo 3.1).

Dijital termometreye ait olan kalibrasyon eğrisine, aşağıdaki 3. dereceden fonksiyon Sigmaplot yardımıyla uydurulmuştur;

$$F_k(T) = 30.2927 + 0.737127T + 0.000751924T^2 - (7.1111E - 7)T^3 \quad (3.4)$$



Şekil 3.20 Dijital termometrenin kalibrasyon eğrisi



Şekil 3.21 1 nolu ısı çiftinin kalibrasyon eğrisi

1. ısıl çifte ait kalibrasyon eğrisi Şekil 3.21’de gösterilmiş olup diğer ısıl çiftlere ait kalibrasyon eğrileri Ek C’de verilmiştir. Bu eğrilere Sigmaplot programı yardımıyla 3. dereceden fonksiyonlar uydurulmuştur (3.5, 3.6, 3.7, 3.8, 3.9, 3.10, 3.11, 3.12, 3.13, 3.14, 3.15).

$$F_1(T) = -(837.215) + 8.08632T - 0.0194793T^2 + (1.75467E - 5)T^3 \quad (3.5)$$

$$F_2(T) = -514.58 + 5.27748T - 0.0115352T^2 + (1.01748E - 5)T^3 \quad (3.6)$$

$$F_3(T) = -927.347 + 8.83388T - 0.0216026T^2 + (1.95496E - 5)T^3 \quad (3.7)$$

$$F_4(T) = 86.0688 + 0.678788T - 0.000170994T^2 + (1.12E - 6)T^3 \quad (3.8)$$

$$F_5(T) = -263.431 + 3.10935T - 0.00538511T^2 + (4.43852E - 6)T^3 \quad (3.9)$$

$$F_6(T) = -604.94 + 6.12471T - 0.0143566T^2 + (1.33333E - 5)T^3 \quad (3.10)$$

$$F_7(T) = 498.534 + 5.3652T + 0.0126873T^2 - (1.22133E - 6)T^3 \quad (3.11)$$

$$F_8(T) = 355.722 - 1.46349T + 0.00563929T^2 - (4.21333E - 6)T^3 \quad (3.12)$$

$$F_9(T) = 504.986 - 3.32359T + 0.0123066T^2 - (1.15812E - 5)T^3 \quad (3.13)$$

$$F_{10}(T) = 783.15 - 5.93328T + 0.0202959T^2 - (1.95664E - 5)T^3 \quad (3.14)$$

$$F_{11}(T) = 657.328 - 4.6027T + 0.0159053T^2 - (1.49674E - 5)T^3 \quad (3.15)$$

Kalibre edilen yedi adet ısıtıcı çift, kabın içerisine döşenmiştir (Şekil 3.18). Daha sonra deneyde kullanılacak Polipropilen (PP-R) malzeme, granül halde kabın içine dökülür. Ancak, önceden deneyde kullanılan Polipropilen (PP) malzemenin fiziksel özellikleri bulunmalıdır.

3.2.2 Deneyde kullanılan polipropilen (PP-R) malzemesinin fiziksel özelliklerinin bulunması

Deneyde kullanılan malzeme Basell firmasının ürettiği Polipropilen rastgele (random) kopolimer (PP-R) malzemedir. PP malzemenin yoğunluğu, eriyik akış indisi ve özgül ısı Dizayn Teknik firmasının laboratuvarındaki cihazlar yardımıyla deneysel olarak bulunmuştur. PP malzemenin yoğunluğu Şekil 3.22’de görülen terazi yardımıyla bulunmuştur.

Eriyik akış indisi işleminden geçen PP malzeme soğumaya bırakılır. Soğumuş PP malzemenin bir parçası şekilde görülen terazinin hava ve etanol ortamındaki kefelerine ayrı ayrı konularak tartılır. Alınan sonuçlar (3.16) numaralı denklemde yerine konulur.

$m_h \rightarrow$ PP parçasının hava ortamında bulunan kefedeki ağırlığı (g)

$m_s \rightarrow$ PP parçasının Etanol ortamında bulunan kefedeki ağırlığı (g)

$\rho_0 \rightarrow$ Terazide kullanılan Etanol’ün yoğunluğu (g/cm^3)

$\rho \rightarrow$ Deneyde kullanılacak PP malzemesinin yoğunluğu (g/cm^3)

$$\left. \begin{array}{l} m_h = 0.0420 \text{ g} \\ m_s = 0.0052 \text{ g} \\ \rho_0 = 0.7880 \text{ g}/\text{cm}^3 \end{array} \right\} \rho = \left(\frac{m_h}{m_h - m_s} \right) \rho_0 = \left(\frac{0.0420}{0.0420 - 0.0052} \right) 0.788 \quad (3.16)$$

$$\rho = 0.899 \text{ (g}/\text{cm}^3 \text{)}$$

Tablo 3.1 Kalibrasyon esnasındaki ısıt çiftlere ait sıcaklık değerleri

Dij.termometrede okunan sıcaklık değeri (K)	1 nolu ısıt çift'ten okunan sıcaklık değeri (K)	2 nolu ısıt çift'ten okunan sıcaklık değeri (K)	3 nolu ısıt çift'ten okunan sıcaklık değeri (K)	4 nolu ısıt çift'ten okunan sıcaklık değeri (K)	5 nolu ısıt çift'ten okunan sıcaklık değeri (K)	6 nolu ısıt çift'ten okunan sıcaklık değeri (K)	7 nolu ısıt çift'ten okunan sıcaklık değeri (K)	8 nolu ısıt çift'ten okunan sıcaklık değeri (K)	9 nolu ısıt çift'ten okunan sıcaklık değeri (K)	10 nolu ısıtçift'ten okunan sıcaklık değeri (K)	11 nolu ısıtçift'ten okunan sıcaklık değeri (K)
298.0	307.0	302.9	304.1	302.8	302.3	298.1	296.8	302.0	300.9	302.0	302.0
323.0	333.7	329.6	331.0	325.2	328.8	324.8	322.4	329.4	326.2	326.7	326.7
348.0	357.3	353.4	354.6	348.6	353.4	349.7	346.2	351.5	349.7	350.2	350.2
373.0	379.3	377.4	376.6	373.7	377.1	374.0	372.2	376.2	376.5	376.5	376.5
398.0	401.8	399.9	399.1	399.6	401.1	399.1	396.4	400.6	401.8	401.7	401.7
423.0	425.9	423.9	423.6	427.4	424.1	426.1	425.3	426.8	424.4	423.3	423.3

Malzemenin eriyik akış indisi değeri, Şekil 3.23'te gösterilen cihaz yardımı ile ISO 1133 standardına uygun olarak yapılmıştır. 230°C'ye ısıtılan MFI cihazının içine PP malzeme konulur. Malzeme konulduktan sonra üzerine 2.16 kg yük yerleştirilir. 10 dakika süre tutulur. 10 dakika süresi dolduktan sonra, malzemenin akma işlemi kesilir, kesilen malzeme soğumaya bırakılır. Malzeme soğuduktan sonra tartılır. Deneyde kullanılacak PP malzemesinin eriyik akış indisi değeri 0.2904 g/10 dak. olarak bulunmuştur.



Şekil 3.22 Hassas terazi



Şekil 3.23 Eriyik akış indisi cihazı ile MFI değerinin bulunması

MFI = 0.2904 g/10 dak.

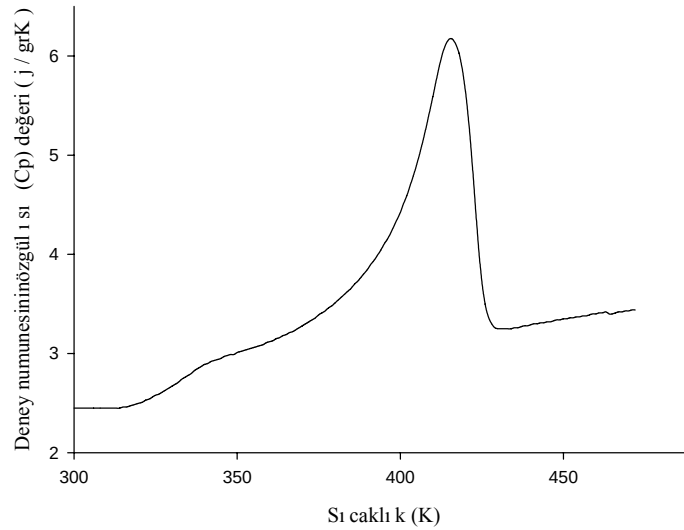
Deney (PP) malzemenin özgül ısı değerinin sıcaklıkla değişimi, Sem laboratuvar cihazları San. Tic. Ltd. Şti. firması tarafından sağlanan bir program yardımıyla, Şekil 3.24'te gösterilen DSC cihazının kullanılmasıyla bulunmuştur. PP malzemenin ısı kapasitesinin sıcaklıkla değişim eğrisi Şekil 3.25'te gösterilmiştir. Malzemenin özgül ısı (C_p) , deney sonunda yapılacak sayısal analizde kullanılacaktır. Malzemenin özgül ısısının sıcaklıkla değişim eğrisi sayısal analizde kullanılması için 3 ayrı bölgeye ayrılmış ve her bir bölgedeki özgül ısı değişimine SigmaPlot programı yardımı ile eğriler uydurulmuştur.



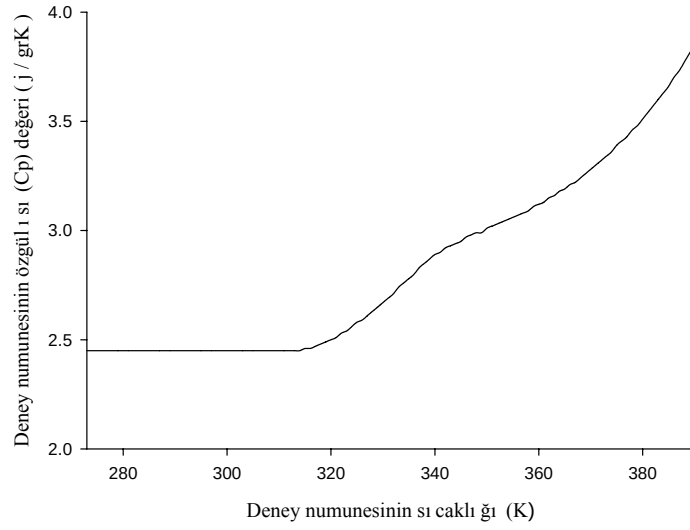
Şekil 3.24 DSC Cihazının resmi

273-390 K sıcaklıkları arasında, deney numunesi özgül ısı değişimi Şekil 3.26'da gösterilmiştir. Bu eğriye aşağıdaki fonksiyon Sigmaplot yardımıyla uydurulmuştur ;

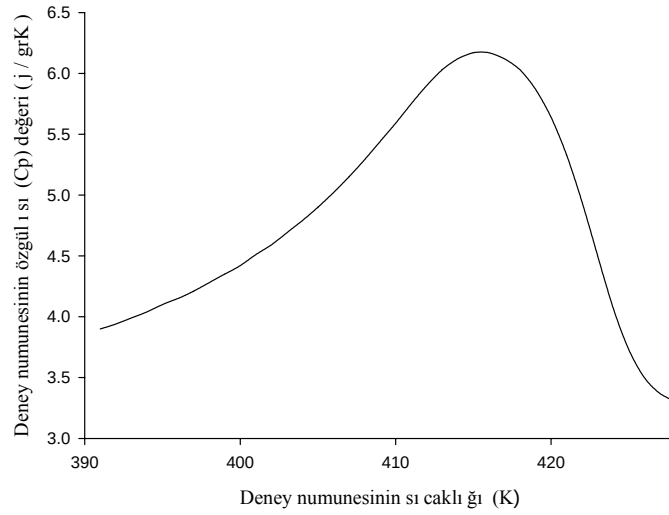
$$F_{C_{pl}}(T) = -153.565 + 1.33019T - 0.00380512T^2 + (3.66444E-6)T^3 - (2.46659E-14)T^4 - (6.55321E-7)T^5 - (2.86513E-20)T^6 + (9.34156E-22)T^7 \quad (3.17)$$



Şekil 3.25 Deney malzemesi C_p değerinin sıcaklıkla değişimi



Şekil 3.26 Deney malzemesi C_p değerinin sıcaklıkla değişimi



Şekil 3.27 Deney malzemesi C_p değerinin sıcaklıkla değişimi

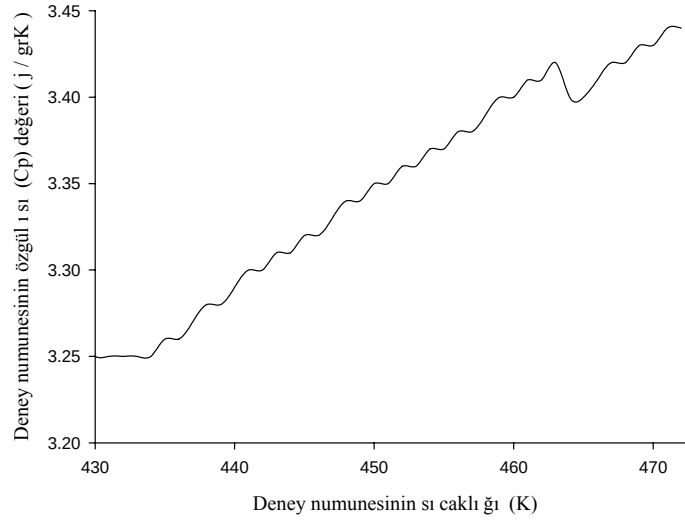
390-428 K sıcaklıkları arasında, deney numunesi özgül ısı değişimi Şekil 3.27’de gösterilmiştir. Bu eğriye aşağıdaki fonksiyon Sigmaplot yardımıyla uydurulmuştur ;

$$F_{C_{p2}}(T) = 27530.2 - 204.536T - 0.506278T^2 - (0.000417435)T^3 - (7.6962E-16)T^4 - (1.50702E-18)T^5 - (7.64311E-22)T^6 + (1.3695E-23)T^7 \quad (3.18)$$

429-473 K sıcaklıkları arasında, deney numunesi özgül ısı değişimi Şekil 3.28’de gösterilmiştir.

Bu eğriye aşağıdaki fonksiyon Sigmaplot yardımıyla uydurulmuştur ;

$$F_{C_{p3}}(T) = 268.792 - 1.78918T + 0.00400656T^2 - (2.981E - 6)T^3 - (8.58847E - 17)T^4 - (1.6242E - 19)T^5 - (2.67634E - 23)T^6 + (1.64449E - 24)T^7 \quad (3.19)$$



Şekil 3.28 Deney malzemesi C_p değerinin sıcaklıkla değişimi

(3.17), (3.18), ve (3.19) numaralı denklemler sayısal analiz yapılırken malzemenin özgül ısı değerleri olarak kullanılacaktır.

3.2.3 Deneyin yapılışı

İçerisine belirli aralıklarla 7 adet çelik tel yerleştirilmiş, bu tellere T tipi ısıl çiftlerin bağlandığı ahşap (gürgen) malzemeden yapılmış bir kasaya, tüm fiziksel özellikleri belirlenen deney malzemesi (PP) granül olarak konulmuştur. Çelik tablanın deney numunesiyle temas ettiği yüzeye de bir adet ısıl çift yerleştirilmiştir. Ahşap kasanın altına çelikten bir tabla yerleştirilmiş olup, tablanın altında su geçmesi için 10 mm çapında beş adet kanal mevcuttur. Deney numunesi konulduktan sonra ahşap kap, 200°C'ye kadar ısıtılmak üzere fırına yerleştirilmiştir (Şekil 3.29). Bu esnada ısıl çiftlerden bilgisayara bağlı veri toplama kartı yardımıyla deney numunesinin içinden sıcaklık değerleri okunmuştur.



Şekil 3.29 Ahşap kabın fırın içine yerleştirilmesi

Deney numunesinin içinde homojen sıcaklık dağılımına 16 saat sonra ulaşılmıştır. 200°C sıcaklığa ulaşmış eriyik haldeki deney numunesinin bulunduğu kaba, fırından çıkarıldıktan sonra, kabın çevresinden ve üstünden ısı transferini minimuma indirmek için, taş yününden imal edilmiş bir ceket, kabın altına ve üstüne yerleştirilmiştir (Şekil 3.30). Tablanın altındaki kanalların giriş tarafına bir ucu pompada olan bir hortum, çıkış tarafına ise bir ucu basınç düşüş ölçümü yapılacak boruda olan diğer bir hortum, hızlı bağlantı parçaları (quick coupling) kullanılarak bağlanmıştır (Şekil 3.30). Pompa tarafından basılan suyun debisi, tablanın çıkışına yerleştirilen bir plastik borudaki basınç kaybının, civa kullanarak ölçülmesi suretiyle bulunmuştur (Şekil 3.31). Bu iki hortuma, çelik tablaya bağlantı noktalarına yakın olacak şekilde birer tane ısı çifti yerleştirilmiştir. Pompanın emiş yaptığı varilin içinde sıcaklığı 6-6.5°C olan buz ve su karışımı vardır. Pompanın varilden suya emiş uyguladığı kesite küçük buz parçalarının pompaya girişini engellemek için bir filtre konulmuştur. Eriyik halde bulunan deney numunesi çelik tablanın altındaki kanallardan su dolaştırmak suretiyle katılaşmaya başlamıştır. Bu esnada deney numunesinin içine yerleştirilen ısı çiftler kullanılarak sıcaklık ölçümü yapılmıştır. Kaydedilen sıcaklık değerleri kalibrasyon eğrileri kullanılarak değerlendirilmiştir.



Şekil 3.30 Deney sisteminin genel görünüşü



Şekil 3.31 Deneyde su debisini ölçme sistemi

3.2.4 Deneyde ölçülen değerler

Deneyde ölçülen değerlerin tümü, Tablo 3.2’de gösterilmiştir.

Tablo 3.2 Deneyde ölçülen değerler

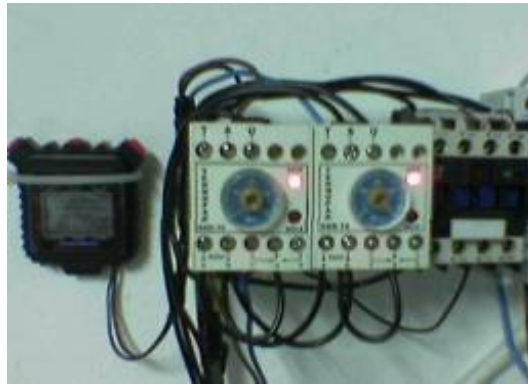
Sembol	Isıl çiftin kullanıldığı konum	Kullanılan ısıl çift no
T_{PP1}	Deney numunesinin içinde, çelik tablanın yüzeyinden 3.5 mm mesafede	1
T_{PP2}	Deney numunesinin içinde, çelik tablanın yüzeyinden 5 mm mesafede	2
T_{PP3}	Deney numunesinin içinde, çelik tablanın yüzeyinden 7 mm mesafede	3
T_{PP4}	Deney numunesinin içinde çelik tablanın yüzeyinden 9 mm mesafede	4
T_{PP5}	Deney numunesinin içinde, çelik tablanın yüzeyinden 12 mm mesafede	6
T_{PP6}	Deney numunesinin içinde, çelik tablanın yüzeyinden 17 mm mesafede	7
T_{PP7}	Deney numunesinin çelik tablanın yüzeyinden 22 mm mesafede	8
T_{SG}	Çelik tablaya giren soğutma suyunun giriş sıcaklığı	9
$T_{SÇ}$	Çelik tabladan çıkan soğutma suyunun çıkış sıcaklığı	5
T_V	Çelik tablaya gönderilen soğutma suyunu besleyen varilin içindeki buz+su	10
T_{tab}	Deney numunesinin altında, çelik tablanın yüzeyindeki sıcaklık	11
ΔH	Cıva seviye farkı	-----

3.2.5 Deneyde ölçülen değerlerle yapılan hesaplamalar

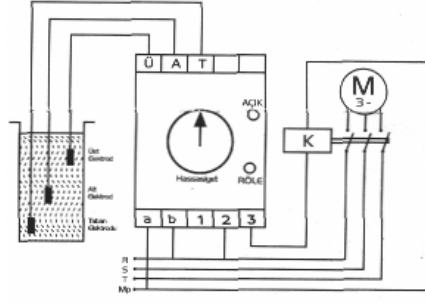
Soğutma suyunun debisi, düz borudaki basınç düşüşü bulunarak hesaplanmıştır. Ölçümlerde Ø25 mm çapında Polipropilen'den üretilmiş düz boru kullanılmıştır. Öncelikle düz borunun değişik hız değerlerindeki basınç düşüşü ölçülmüştür. Bu işlemlerde üç adet sıvı seviye rölesi kullanılmıştır (Şekil 3.32). Sıvı seviye rölesinin bağlantı şekli Şekil 3.33 ve 3.34'te gösterilmiştir. Sıvı seviye röleleri kullanılarak iki adet elektrot arasındaki suyun ağırlığı tartılarak bulunmuştur. Sıvı seviye elektrotları ile ölçüm yaparken önemli bir nokta daha vardır ki oda pompa çalışmaya başladığı anda kararlı, düzenli rejime girene kadar belirli bir sürenin geçmesinin gerektiğidir. Bu nedenle ölçüme başlanmadan önce, pompanın rejime girebilmesi için pompa çalıştırılmadan önce su seviyesi alt seviye elektrotundan bir miktar aşağıda olacak şekilde ayarlanmıştır.



Şekil 3.32 Üst ve alt seviye elektrotları ile elektrotun hortuma yerleştirilmesi

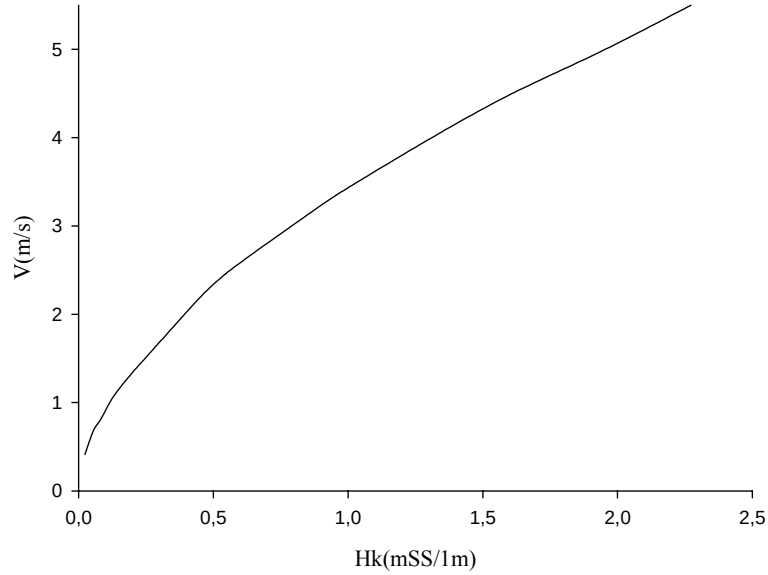


Şekil 3.33 Debi ölçme sistemi: kronometre, iki adet sıvı seviye kontrol rölesi (ortada), kontaktör (en sağda)



Şekil 3.34 Sıvı seviye rölesi bağlantı şeması

Düz borunun basınç düşüşü farklı hızlar için ölçülmüştür. Elde edilen değerlerden bir eğri çizilmiş (Şekil 3.35), bu eğriye sigmaplot programı kullanılarak bir fonksiyon uydurulmuştur ;



Şekil 3.35 Düz borudaki basınç düşüşü ile hız arasındaki ilişki

$$F_p(H_K) = 0.267141 + 7.4718(H_K) - 15.9082(H_K)^2 + 28.5997(H_K)^3 - 30.929(H_K)^4 + 18.8638(H_K)^5 - 5.95871(H_K)^6 + 0.75535(H_K)^7 \quad (3.20)$$

Bu denklem kullanılarak deneyde ölçülen civa seviye farkı (ΔH), 1 metre düz borudaki basınç düşüşü değerine (3.2) nolu eşitlik kullanılarak dönüştürüldükten sonra Ø25mm boruda akan soğutma suyunun hızı bulunmuştur. Bu hız değerinden soğutma suyunun debisine geçilmiştir.

Deneyde (ΔH) mmHg seviye farkı 10 mm olarak okunmuştur. (3.2) numaralı

denklem kullanılırsa;

$$H_k = \frac{P_1 - P_2}{\gamma_{su}} = \frac{13600 - 1000}{1000} 10^{-3} \Delta h = 12.6 10^{-3} \Delta h \text{ mSS}$$

$$H_k = 0.126 \text{ mSS}$$

Bu basınç kaybı değeri $F_p(x)$ fonksiyonunda yerine konulduğunda Ø25mm borudaki akış hızı (V) 1.006 m/s olarak bulunur. Buradan deneydeki soğutma suyunun debisi;

Ø 25 mm Polipropilen borunun iç çapı 16.6 mm

$$\dot{m} = \left(\frac{\pi (0.0166)^2}{4} \right) 1.006 = 2.1772 10^{-4} \text{ m}^3/\text{s} \quad (3.21)$$

Çelik tablanın altında bulunan 5 adet 10 mm çapındaki kanalda soğutma suyunun akış hızı;

$$2.1772 10^{-4} = 5 \left(\frac{\pi (0.01)^2}{4} \right) v \Rightarrow v = 0.554 \text{ m/s}$$

$$Re = \frac{0.554(0.01)}{1.422 \cdot 10^{-6}} \Rightarrow Re = 3895.92 \quad (3.22)$$

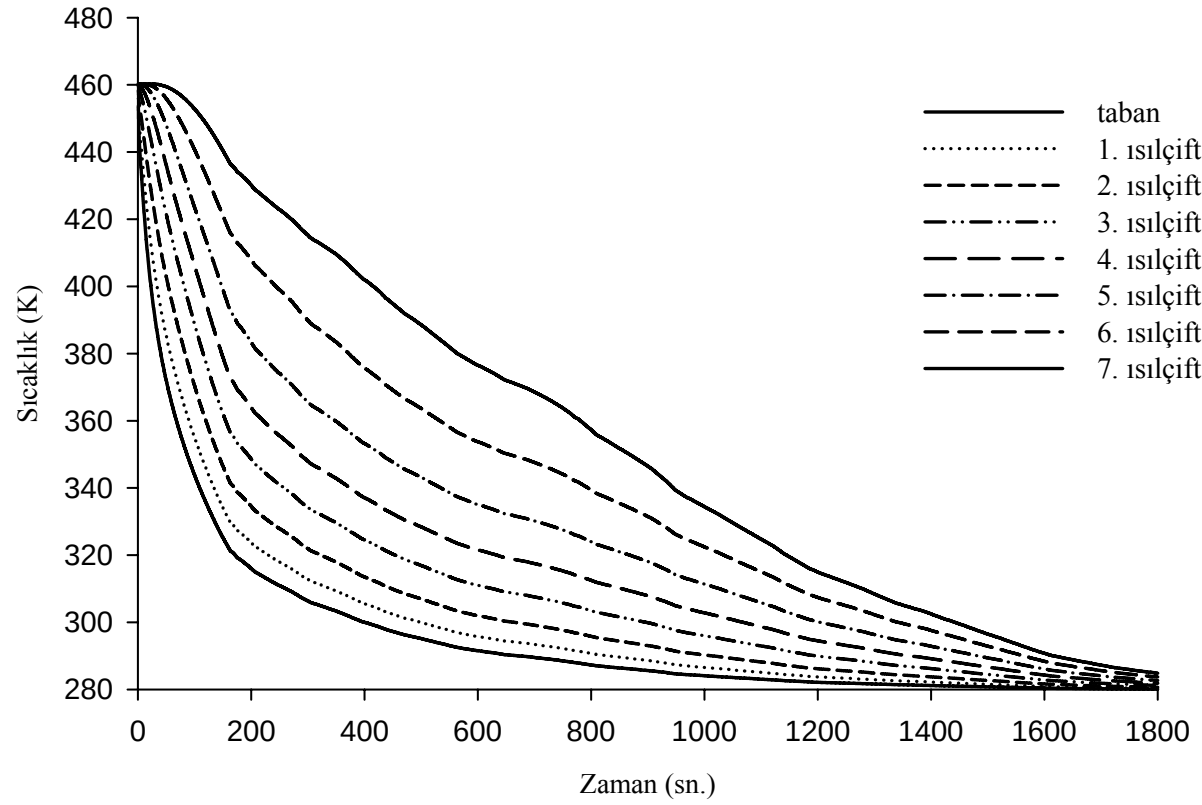
Çelik tablanın altındaki 5 adet 10 mm çapındaki kanalda akış geçiş bölgesindedir. Bu durum, sayısal analizde göz önünde bulundurulacaktır. Sayısal analizde türbülanslı akışın çözdürülmesi gereklidir.

Isıl çiftlerden okunan sıcaklık değerlerinin kalibrasyon eğrilerinde düzeltildikten sonraki değerinin zamanla değişimi Şekil 3.36'te gösterilmiştir.

3.2.6 Deneyde ölçülen sıcaklık değerleri

Tablo 3.3 Deneyde ölçülen sıcaklık değerleri

Zaman (sn)	T _{tab} (K)	T _{PP1} (K)	T _{PP2} (K)	T _{PP3} (K)	T _{PP4} (K)	T _{PP5} (K)	T _{PP6} (K)	T _{PP7} (K)	T _{SÇ} (K)	T _V (K)
5	436.9	443.5	451.6	457.2	459.3	460.1	460.2	460.2	293.6	279.8
15	413.9	424.9	438.7	450.4	456.4	459.2	460.1	460.2	291.0	279.8
30	391.1	404.3	421.4	437.9	448.7	455.7	459.1	460.2	289.2	279.8
45	376.1	389.4	407.0	425.4	439.4	450.2	456.9	459.7	288.0	279.9
60	365.1	378.1	395.6	414.4	429.8	443.4	453.6	458.6	287.1	279.9
90	348.4	360.2	376.2	395.0	412.0	428.6	444.3	454.7	285.7	279.9
120	335.8	346.0	360.1	377.5	395.2	414.0	433.2	448.5	284.7	280.0
150	325.2	334.2	346.6	362.3	379.0	399.1	421.2	440.5	283.9	280.0
180	318.7	326.8	338.0	352.6	368.4	388.1	412.1	433.5	283.3	280.0
210	314.7	322.2	332.8	346.6	361.8	381.0	405.8	428.3	282.8	279.9
240	311.8	318.9	329.0	342.3	357.0	375.7	400.6	424.2	282.4	280.0
270	309.2	316.0	325.6	338.4	352.7	371.0	395.8	420.1	282.1	279.9
300	306.3	312.8	321.9	334.2	348.0	365.6	389.9	415.3	281.9	280.0
360	302.6	308.6	317.0	328.6	341.7	358.5	381.9	408.1	280.7	280.0
480	295.9	300.8	308.0	318.1	329.8	344.8	365.7	390.9	280.4	280.0
600	291.5	295.7	301.9	311.0	321.5	335.0	353.7	376.5	280.7	280.9
750	288.5	292.2	297.6	305.7	315.2	327.5	344.0	363.7	280.0	280.0
900	285.6	288.6	293.0	299.8	307.9	318.1	331.5	346.5	280.5	280.0
1050	283.5	285.8	289.2	294.4	300.7	308.6	318.7	329.6	280.4	280.0
1200	282.1	283.7	286.1	289.9	294.4	300.1	307.4	314.9	280.3	279.9
1350	281.3	282.5	284.2	286.9	290.2	294.4	299.6	305.1	280.2	280.0
1500	280.7	281.5	282.6	284.4	286.6	289.4	292.8	296.5	280.4	280.0
1650	280.3	280.7	281.3	282.2	283.4	284.9	286.8	288.8	280.2	280.1
1800	280.1	280.3	280.6	281.2	281.8	282.6	283.7	284.8	280.1	279.9



Şekil 3.36 Isıl çiftlerden okunan sıcaklık değerlerinin (kalibrasyon eğrilerine göre düzeltildikten sonraki) zamana göre değişimi

3.2.7 Deneyin hata analizi

Kurulu bir deney düzeneğinden bir takım ölçümler yapılarak n adet ($x_1, x_2, \dots, x_n$) bağımsız değişkene bağlı olan R değeri hesaplanacak olsun. R değerindeki belirsizlik w_R , diğer değişkenlerdeki belirsizlikler ise sırasıyla $w_1, w_2, w_3, \dots, w_n$ olsun buna göre w_R değeri;

$$w_R = \left[\left(\frac{\partial R}{\partial x_1} w_1 \right)^2 + \left(\frac{\partial R}{\partial x_2} w_2 \right)^2 + \left(\frac{\partial R}{\partial x_3} w_3 \right)^2 + \dots + \left(\frac{\partial R}{\partial x_n} w_n \right)^2 \right]^{1/2} \quad (3.23)$$

formülünden hesaplanır.

Örneğin deneyde debi ölçülecek olsun.

$$\text{Debi} = \dot{m} = m / t \quad (3.24)$$

$$w_{\dot{m}} = \left(\left(\frac{\partial \dot{m}}{\partial m} w_m \right)^2 + \left(\frac{\partial \dot{m}}{\partial t} w_t \right)^2 \right)^{1/2} = \left((w_m / t)^2 + \left(-\frac{m}{t^2} w_t \right)^2 \right)^{1/2} \quad (3.25)$$

$$\% w_{\dot{m}} = \frac{w_{\dot{m}}}{\dot{m}} * 100 \quad (3.26)$$

Aşağıdaki Tablo 3.4'te deneyde kullanılan ölçüm aletlerinin belirsizlik değerleri verilmiştir. Buna göre deneylerde ölçülen ve hesaplanan değerlerin hata analizi (belirsizlik değerleri) Tablo3.5'te verilmiştir.

Tablo 3.4 Deneyde ölçülen değerlerin belirsizlikleri

Ölçülen Değer	Ölçüm Aletindeki Belirsizlik
Sıcaklık	$\pm 0.1^\circ\text{C}$
Basınç	$\pm 0.5 \text{ mm Hg}$
Zaman	$\pm 1 \text{ s}$
Kütle	$\pm 2 \cdot 10^{-2} \text{ mg}$
Uzunluk	$\pm 0.5 \text{ mm}$

Tablo 3.5 Deneyden ölçülen birimler yardımıyla hesaplanan değerlerdeki belirsizlik

Hesaplanan Değer	% Hata	Hesaplanan Değer	% Hata
$T_{pp1}, T_{pp2}, T_{pp3}, T_{pp4}$ K	≈ 1.2	$\dot{m}$ kg/s	≈ 1.3
$T_{pp5}, T_{pp6}, T_{pp7}, T_{pp8}$ K	≈ 1.2	V m/s	≈ 1.6
$T_{pp9}, T_{pp10}, T_{pp11}$ K	≈ 1.2	ρ kg/m ³	≈ 1.8
C_p J/gK	≈ 0.5	MFI g/10 dk.	≈ 0.2

4 SAYISAL ÇÖZÜM

4.1 Sayısal Çözüm Yöntemleri

4.1.1 Ayır ayrı çözüm yöntemi (Segregated solver)

Süreklilik, enerji ve momentum denklemlerini ardarda (ayrı ayrı) çözer. Daha çok sıkıştırılamaz ve su gibi çok az sıkıştırılabilen akışkanların bulunduğu ortamlarda tercih edilir [2].

İlgili denklemlerin non-lineer ve birbirine bağlı (coupled) olmasından dolayı çözüm için gerekli bir takım iterasyonlar, yakınsak çözüm elde edinceye kadar yapılır. Her iterasyon aşağıdaki basamaklardan oluşur;

1. Akışkan fiziksel özellikleri, bir önceki iterasyondan elde edilen sıcaklık dağılımları yardımıyla yeniden hesaplanarak belirlenir. Eğer hesaba yeni başlanıyor ise akışkanın giriş sıcaklığındaki özellikleri hesaplanır [2].
2. Sırasıyla x, y, z yönlerindeki u,v,w hız değerlerine ait momentum denklemlerinin herbiri, hız dağılımının güncelleştirilmesi için, o anki basınç (P) ve yüzey kütle akısı (F) değerleri yardımıyla çözülür.
3. İkinci basamakta elde edilen hız değerleri, süreklilik denklemini sağlamıyorsa (yerel olarak) bir 'Poisson' tipi basınç düzeltmesi denklemi, süreklilik ve lineerize edilmiş momentum denklemlerinden türetilir. Bu basınç düzeltme denklemi; hız ve basınç dağılımları için gerekli düzeltmeleri elde etmek ve kütleli debinin, süreklilik denklemini sağlaması için çözülür.
4. Türbülans, enerji, kütle ve radyasyonla ilgili denklemler, daha evvelden güncelleştirilen değişkenlere ait değerler yardımıyla çözülür.
5. Denklemlerin çözümünün yakınsayıp yakınsamadığı kontrol edilir. Eğer yakınsama varsa hesaplama işlemleri (iterasyon) durdurulur, yoksa başa dönülüp iterasyona devam edilir [2].

4.1.2 Birarada çözüm yöntemi (Coupled solver)

Süreklilik, momentum, uygun olması durumunda enerji, kütle transferi denklemleri ile eş zamanlı çözülür. Ek bir takım skalar denklemler ardarda çözülür (segregated). Kolay sıkıştırılabilir akışlara, daha çok uygulanan, eş zamanlı enerji, momentum ve süreklilik denklemlerini çözer. İlgili denklemlerin non-lineer olmasından dolayı bir takım iterasyonlar yakınsak sonuç elde edilmeden önce yapılmalıdır [2]. Her bir iterasyon aşağıdaki basamaklardan oluşur;

1. Akışkan özellikleri o anki çözüme göre güncelleştirilir. Başlangıçta ise giriş değerleri kullanılır.
2. Süreklilik, momentum, enerji ve kütle denklemleri eş zamanlı çözülür.
3. Türbülans, radyasyon gibi skalar denklemler daha evvelden güncelleştirilen değişkenlere ait değerler yardımıyla çözülür.
4. Denklem kümelerindeki yakınsamanın olup olmadığı kontrol edilir. Yakınsama varsa iterasyon durdurulur, yoksa tekrar başa dönülür ve iterasyonlara devam edilir.

4.2 Çözücü Lineerleştirme (Ayrıklaştırma) Yöntemleri

Her iki segregated ve coupled çözüm yönteminde, farklı non-lineer denklemler her hücre için bağımlı değişkene ait denklemler sistemi oluşturmak üzere lineerleştirilirler [2]. Sonuçta bulunan lineer sistem, güncelleştirilmiş akış alanı elde etmek için çözülür.

Bu denklemlerin lineerleştirilmesi bağımlı değişkene göre örtülü ‘Implicit’ veya açık ‘Explicit’ olarak gerçekleştirilir.

4.2.1 Örtülü ‘Implicit’ yöntem

Verilen bir değişkenin, her hücredeki bilinmeyen değerinin; komşu hücrelere ait bilinen ve bilinmeyen değerleri kullanılarak hesap edilmesi yöntemidir. Bununla birlikte her bir bilinmeyen değere ait, sistemde birden fazla denklem ortaya çıkar ve bu denklemler bilinmeyenleri tespit edebilmek için eş zamanlı çözülür [2].

4.2.2 Açık ‘Explicit’ yöntem

Verilen bir değişkenin, her hücredeki bilinmeyen değerinin sadece bilinen değerler yardımıyla bulunmasıdır. Her bir bilinmeyen, sistemde sadece bir tek denklemde yer alacağından her hücredeki bilinmeyen değerlere ait denklemler bilinmeyen değer

bulunabilmesi için her biri bir an içerisinde çözülür [2].

‘Segregated Solution’ ayrık çözüm metodu sadece örtülü ‘Implicit’ yöntemiyle lineerize (ayrıklaştırılır) edilir.

Özetle, ‘Segregated Solver’ tek bir değişken dağılımını (örneğin P için), tüm hücreleri aynı anda dikkate alarak çözer. Daha sonra diğer değişkene ait sıcaklık (T) dağılımını aynı anda tüm hücreleri ele alarak çözer. Daha sonra diğer bir değişkeni de aynı şekilde çözerek devam eder [2].

‘Coupled Solver’ da ise her iki (Implicit ve Explicit) yöntem kullanılabilir. Sadece Türbülans, Radyasyon gibi ek skaler denklemler örtülü ‘Implicit’ olarak ‘Segregated Solver’ yöntemi ile çözülür. Diğer ‘Coupled Solver’ yöntemiyle çözülmesi istenen denklemler bu yöntem ile çözülür [2].

‘Coupled Implicit’ yaklaşımı, tüm değişkenleri (P,u,v,w,T) tüm hücrelerde aynı anda çözer.

‘Coupled Explicit’ yaklaşımı tüm değişkenleri (P,u,v,w,T) bir hücrede bir anda çözer.

Biz çözümümüzde akışımız sıkıştırılamaz ve düşük hızda olduğundan segregated çözümü seçiyoruz. ‘Segregated Solver’ seçildiğinde denklemler sadece örtülü olarak lineerleştirilebildiğinden ‘Implicit’ metodu seçilir.

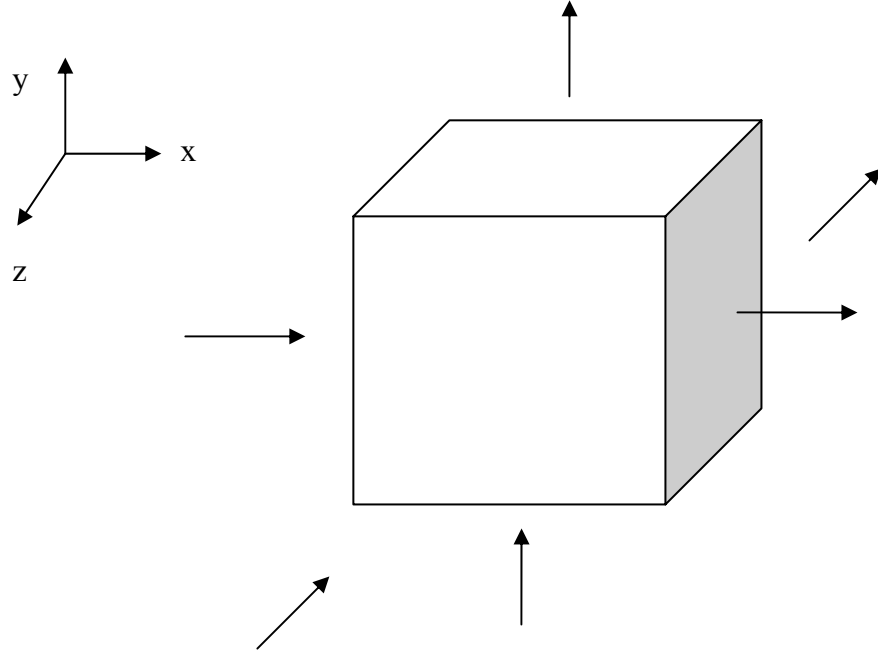
4.3 Korunum Denklemlerinin Cebirsel Denklemlere Dönüşümü

FLUENT kontrol hacim formülasyonunu kullanarak denklemleri, nümerik olarak çözülebilen cebirsel denklemlere dönüştürür. Bu teknik ilgili denklemleri her bir kontrol hacminde integre ederek toplam kontrol hacmindeki her bir değişkenin korunduğu (örn:kütlenin) farklı denklemler oluşturmak suretiyle çözüme ulaşır.

Cebirsel denkleme dönüşüm işlemi, taşınan ϕ (kütle için 1, momentum için hız vektörü, enerji için ise toplam enerjidir) skaler değerinin kararlı halde korunumu denklemi yardımıyla gerçekleştirilir. Belirli bir kontrol hacmi için;

$$\oint \rho \phi \vec{v} \cdot d\vec{A} = \iiint_V \Gamma_\phi \nabla \phi \cdot d\vec{A} + \int_V S_\phi dV \quad (4.1)$$

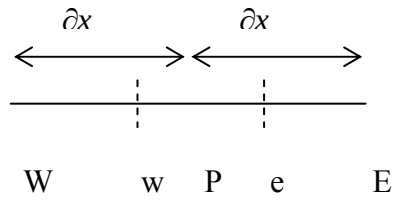
Yukarıdaki (4.1) korunum denkleminde Γ_ϕ difüzyon katsayısı olup, birim hacim için üretim olmaksızın ($S_\phi=0$) yeniden yazılacak olursa;



Şekil 4.1 Şematik kontrol hacmi

$$\frac{\partial}{\partial x}(\rho u \phi) = \frac{\partial}{\partial x} \left(\Gamma \frac{\partial \phi}{\partial x} \right) \quad (4.2)$$

Bu denklem tek boyutlu olarak ele alınırsa, e-w sınırları arasında ;



Şekil 4.2 Tek boyutlu çözümde düğüm noktaları

$$(\rho u \phi)_e - (\rho u \phi)_w = \left(\Gamma \frac{\partial \phi}{\partial x} \right)_e - \left(\Gamma \frac{\partial \phi}{\partial x} \right)_w \quad (4.3)$$

yazılabilir.

$$\phi_e = \frac{1}{2}(\phi_E + \phi_P) \quad \phi_w = \frac{1}{2}(\phi_W + \phi_P) \quad (4.4)$$

Bunlar yukarıdaki denklemde yerine koyulursa ;

$$\frac{1}{2}(\phi_E + \phi_P)(\rho u)_e - \frac{1}{2}(\phi_W + \phi_P)(\rho u)_w = \Gamma_e \frac{(\phi_E - \phi_P)}{(\partial x)_e} - \Gamma_w \frac{(\phi_P - \phi_W)}{(\partial x)_w} \quad (4.5)$$

elde edilir. Düğüm noktalarında bağımlı değişkenin değerleri cinsinden denklem,

$$a_P \phi_P = a_E \phi_E + a_W \phi_W \quad (4.6)$$

şeklini alır. Burada

$$a_E = \frac{\Gamma_e}{(\partial x)_e} - \frac{1}{2}(\rho u)_e \quad (4.7)$$

$$a_W = \frac{\Gamma_w}{(\partial x)_w} - \frac{1}{2}(\rho u)_w \quad (4.8)$$

$$a_P = \frac{\Gamma_e}{(\partial x)_e} + \frac{\Gamma_w}{(\partial x)_w} + (\rho u)_e - (\rho u)_w = a_E + a_W + F_e - F_w \quad (4.9)$$

anlamındadır.

Kütlesel akı ;

$$F = \rho u \quad (4.10)$$

Süreklilik denkleminden $F_e - F_w = 0$ olduğundan $a_P = a_E + a_W$ şeklinde yazılabilir.

Üretimi de dikkate alarak genelleme yapılırsa (nb:komşu düğüm noktası):

$$a_P \phi_P = \sum_{nb} a_{nb} \phi_{nb} + b \quad (4.11)$$

Üç boyutlu durum için ise

$$a_P \phi_P = a_E \phi_E + a_W \phi_W + a_N \phi_N + a_S \phi_S + a_T \phi_T + a_B \phi_B + b \quad (4.12)$$

Bu denklemin geçerli olabilmesi için, dört ana kuralın sağlanması gerekir.

1. Bir yüzey iki ayrı hacme ait bir yüzey ise bu yüzeyden olan akı iki hacim için de lineer denklemlerde (korunum) aynı gösterilmelidir.
2. a_P ve a_{nb} değerleri daima pozitif olmalıdır.
3. $\bar{S} = S_C + S_P T_P$ üretim ifadesindeki S_P değeri daima sıfırdan küçük veya sıfıra eşit olmalıdır.

4. $a_p = \sum a_{nb}$ eşitliği daima sağlanmalıdır. Yani bağımlı değişken ϕ , örneğin T sıcaklık değeri c kadar artırılrsa da diferansiyel denklemi sağlamalıdır.

4.3.1 Momentumun korunumu denkleminin lineerleştirilmesi

Momentumun i yönündeki korunumu denklemini birim hacim için ;

$$\frac{\partial(\rho u_i)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_i u_j)}{\partial x_j} = -\frac{\partial P}{\partial x_i} + \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j} + \rho g_i + \bar{F}_i \quad (4.13)$$

Burada τ_{ij} kayma gerilmesi;

$$\tau_{ij} = \mu \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} \mu \frac{\partial u_k}{\partial x_k} \quad (4.14)$$

Yerçekimi ihmal edilir ve sürekli rejimde tüm hacim için momentum denklemini ;

$$\oint \rho v v dA = -\oint P I dA + \oint \tau dA + \oint \bar{F} dV \quad (4.15)$$

Yukarıdaki momentum denklemindeki son terim (gözenekli ortam, faz değişimi etkileri gibi) ihmal edilerek lineerleştirme işlemi bölüm 4.3'te anlatıldığı gibi gerçekleştirilirse;

$$\oint \rho v v dA = -\oint P I dA + \oint \Gamma_\phi \nabla v \cdot dA \quad (4.16)$$

$$a_e u_e = \sum a_{nb} u_{nb} + b + (P_p - P_e) A_e \quad (4.17)$$

Gerçek basıncı P ile, tahmini basıncı P^* ile ve basınç düzeltmesini P' ile gösterirsek

$$P = P^* + P' \quad (4.18)$$

Hız ise aşağıdaki gibi gösterilir;

$$u = u^* + u' \quad (4.19)$$

$$a_e (u_e^* + u_e') = \sum a_{nb} (u_{nb}^* + u_{nb}') + \bar{b} + ((P_p^* + P_p') - (P_e^* + P_e')) A_e \quad (4.20)$$

$$\bar{b} = S_C + a_p^0 \phi^0 = 0 \text{ (üretim yok ve kararlı rejim)} \quad (4.21)$$

$$a_e u'_e = \sum a_{nb} u'_{nb} + (P'_p - P'_E) A_e \quad (4.22)$$

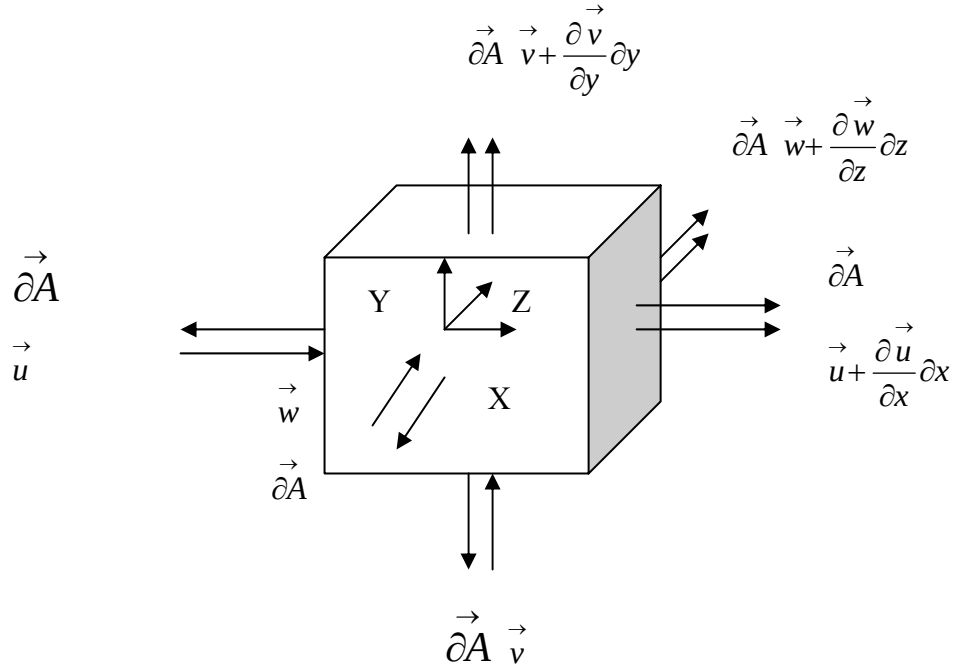
Burada $\sum a_{nb} u'_{nb}$ terimini ihmal edersek

$$a_e u'_e = (P'_p - P'_E) A_e \rightarrow u'_e = \frac{A_e}{a_e} (P'_p - P'_E) = d_e (P'_p - P'_E) \quad (4.23)$$

$$d_e = \frac{A_e}{a_e} \quad (4.24)$$

$$u_e = u_e^* + d_e (P'_p - P'_E) \quad (4.25)$$

4.3.2 Süreklilik denkleminin lineerleştirilmesi



Şekil 4.3 Kütlenin korunumu için kontrol hacmi

$$\sum_f^{N_{yüzey}} J_f = 0 \rightarrow J_f = \rho V_n A_f \rightarrow \sum_f^{N_{yüzey}} \rho V_n A_f = 0 \quad (4.26)$$

$$J_f = \rho u A_f \quad (4.27)$$

$$u = u^* + u' \rightarrow J_f = \rho u^* A_f + \rho u' A_f \quad (4.28)$$

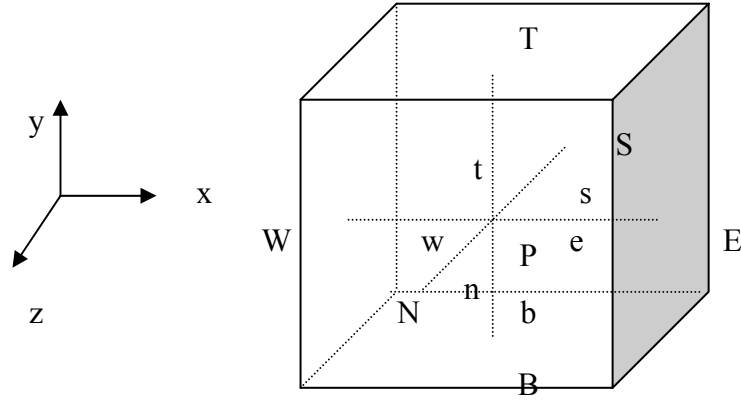
SIMPLE metodunu uygularsak;

$$u' = d_f (P'_P - P'_E) \rightarrow J_f = J^* + d_f (P'_P - P'_E) \quad (4.29)$$

$$J_f = J^* + J' \quad (4.30)$$

$$d_f = \frac{\rho A_f^2}{a_P} \quad (4.31)$$

Üç Boyutlu Akış İçin



Şekil 4.4 Üç boyutlu akış hücresinin şematik gösterimi

$$\frac{(\rho_P - \rho_P^0) dx dy dz}{dt} + [(\rho u)_e - (\rho u)_w] dy dz + [(\rho v)_n - (\rho v)_s] dx dz + [(\rho w)_t - (\rho w)_b] dx dy = 0 \quad (4.32)$$

$u = u^* + u' = u^* + d_e (P'_P - P'_E)$ denklemde yerine konursa;

$$a_P P'_P = a_E P'_E + a_W P'_W + a_S P'_S + a_T P'_T + a_B P'_B + b \quad (4.33)$$

$$b = \frac{(\rho_P^0 - \rho_P) dx dy dz}{dt} + [(\rho u^*)_w - (\rho u^*)_e] dy dz + [(\rho v^*)_s - (\rho v^*)_n] dx dz + [(\rho w^*)_b - (\rho w^*)_t] dy dx \quad (4.34)$$

$$a_E = \rho_e d_e \Delta y \Delta z \quad (4.35)$$

4.4 Enterpolasyon Yöntemleri

FLUENT herbir hücre merkezi için farklı skaler ϕ değerleri kaydeder. Yüzeye ait ϕ_f değerleri denklem (4.11) için gereklidir. Bu değer merkez değerlerinden enterpolasyon edilerek bulunur.

Enterpolasyonun anlamı ϕ_f değerinin, hücrenin normal yöndeki komşu hücrelerindeki değerlerden faydalanılarak bulunmasıdır.

Dört çeşit enterpolasyon yöntemi vardır:

1. Birinci dereceden ‘First Order’ enterpolasyon yöntemi
2. Üssel ‘Power Law’ enterpolasyon yöntemi
3. İkinci dereceden ‘Second Order’ enterpolasyon yöntemi
4. Hızlı ‘Quick’ enterpolasyon yöntemi

Bu çalışmada birinci dereceden enterpolasyon yöntemi tercih edilmiştir.

4.5 İterasyon Yapılırken Kullanılacak Düzeltme ‘URF’ (Under Relaxation Factor) Katsayısının Tanımlanması

Denklemlerin non lineerliğinden dolayı ϕ değişimi kontrol edilmelidir. Bu da ‘URF’ ile olur.

$$\phi = \phi_{eski} + \alpha \Delta\phi \quad (4.36)$$

$$\Delta\phi = \phi \text{ değerindeki hesaplanan değişim miktarı} \quad (4.37)$$

$$u = \alpha u^* + u' \quad (4.38)$$

$$P = P^* + \alpha P' \quad (4.39)$$

4.6 SIMPLE Metodu ile Momentum, Süreklilik ve Diğer Skalerlere Ait Denklemlerin çözüm Algoritması

1. Öncelikle tahmini basınç P^* değerleri belirlenir .
2. Bu tahmini P^* dağılımına göre $a_P u_P^* = a_{nb} u_{nb}^* + (P_P^* - P_E^*)$ denkleminde tahmini hız u^*, v^*, w^* (üç boyutlu akış için) değerleri bulunur.
3. Bulunan u^*, v^*, w^* değerleri ile süreklilik denklemindeki (denklem 4.33) P' basınç düzeltme değerleri hesaplanır.

$$4. \quad P = P^* + \alpha P' \quad (4.40)$$

Denklem (4.40)'tan gerçek P değeri hesaplanır.

$$5. \quad u_e = \alpha u_e^* + d_e (P_p' - P_E') \quad (4.41)$$

Denklem (4.41)'den u,v,w gerçek hız değerleri hesaplanır.

6. Eğer türbülanslı akış söz konusu ise hesaplanan u,v,w yardımıyla türbülans denklemleri çözülür.

7. Sıcaklık, konsantrasyon, kimyasal, radyasyon, gibi diğer ϕ skalerlere ait denklemler de yukarıda bulunan değerler kullanılarak aynı yöntemle çözülür.

8. Eğer akışkan özellikleri sıcaklığa bağlı olarak değişim gösteriyor ise bulunan sıcaklık dağılımına göre akışkan özellikleri de güncelleştirilir.

9. Yakınsama olup olmadığını anlamak için R artık değerleri hesaplanır ve bulunan R değeri kritik R artık değerinden küçük ise yakınsama gerçekleşmiştir iterasyon durdurulur, büyük ise iterasyona yakınsama gerçekleşinceye kadar devam edilir. Bir sonraki iterasyona başlarken en son hesaplamış olduğumuz P değerini başlayacağımız iterasyon için P^* değeri olarak kabul edip tekrar aynı işlemlere 2 nolu sıradan itibaren yakınsama oluncaya kadar devam edilir.

4.7 Ayır Ayır Çözücü 'Segregated Solver' için Artık 'Residual' Değerinin Tanımı

Bir P hücresindeki ϕ değerinin korunumu :

$$a_p \phi_p = \sum a_n \phi_{nb} + b \quad (4.42)$$

$$S = S_c + S_p \phi \quad (4.43)$$

$$a_p = \sum_{nb} a_{nb} - S_p \quad (4.44)$$

(4.42) denklemindeki eşitliğin sağlanması gerekir, ancak iterasyon esnasında ilgili denklemin sağ ve sol tarafında farklı değerler elde edilebilir ve bu iki taraf arasındaki farkın tüm P hücreleri boyunca olan toplam değerine ϕ değişkeninin artık R^ϕ değeri adı verilir.

$$R^{\phi} = \sum_{P_{hücreleri}} \left| \sum_{nb} a_{nb} \phi_{nb} + b - a_p \phi_p \right| \quad (4.45)$$

Bu formüldeki artık ‘Residual’ değeri ile yakınsamanın olup olmadığını anlamak zordur, çünkü bir boyutsuzlaştırma yapılmamıştır.

FLUENT programında boyutsuz artık değeri ‘Residual’ aşağıdaki şekilde bulunur;

$$R^{\phi} = \frac{\sum_{P_{hücreleri}} \left| \sum_{nb} a_{nb} \phi_{nb} + b - a_p \phi_p \right|}{\sum_{P_{hücreleri}} |a_p \phi_p|} \quad (4.46)$$

Momentum denklemlerinde paydadaki $a_p \phi_p$ yerine $a_p v_p$ gelir. v_p P hücresindeki hız değeridir.

Süreklilik denklemi için net kütle üretimi değeri:

$$R^c = \sum_{P_{hücreleri}} |P_{Hücresinin\ net\ Kütlesi\ Üretimi}| \quad (4.47)$$

Süreklilik denklemi için boyutsuz artık değeri :

$$\frac{R^c_{N.iterasyon}}{R^c_{5.iterasyon}} \quad (4.48)$$

Paydadaki değer ilk beş iterasyondaki en büyük mutlak değer olarak artık (R^{ϕ}).

4.8 Yakınsama ve Kararlılık

Türbülanslı modellerde Residual 50 veya daha fazla iterasyon sonucu düşmeye devam ediyorsa o zaman yakınsama oluyor demektir.

Boyutsuz R değeri üçte birine düşüyse iyidir. Bu her zaman geçerli olmayabilir (Kötü başlangıç değerlerinde)

4.9 Çözüm Algoritması

1) Daha önceden Gambit çizim programında modellenen sonlu parçalara bölünmüş teknik resim Fluent programına ‘Export’ komutu ile aktarılır ve

FILE → READ → CASE komutu ile bu model fluent programına tanımlanır.

2) GRID → CHECK komutu ile tanımlanan bu model bir takım geometrik kontrollerden geçirilir.

3) GRID → SCALE komutu ile boyutlar mm biriminde ayarlanır.

4) SMOOTH →SWAP komutu ile daha önceden yapılmış olan küçük parçalara ayırma işleminde gerekli olan modifikasyonlar yapılır.

5) DEFINE → MODELS → SOLVER→ SEGREGATED IMPLICIT SOLVER → UNSTEADY → 2ND-ORDER IMPLICIT çözüm yöntemi olarak seçilir.

6) DEFINE → MODELS → ENERGY komutu ile enerjinin korunumu denklemlerinin nümerik olarak çözülebilmesi sağlanır.

7) DEFINE → MODELS → VISCOUS → STANDART K-EPSILON ($k-\epsilon$)

komutu ile türbülanslı akış için çözüm modeli olan standart k-epsilon metodu seçilir.

8) DEFINE → MATERIALS komutu ile Deney numunesi (PP), çelik tabla ve kullanılan sıvının (su), fiziksel özellikleri tanımlanır. Deney numunesinin fiziksel özellikleri bölüm3'te (3.13), (3.14), (3.15) ve (3.16) eşitlikleri deneysel olarak bulunmuştur.Çeliğin ve soğutma suyunun fiziksel özellikleri programda mevcuttur. Bu simülasyon esnasında suyun fiziksel özelliklerinin sıcaklığa bağlı olarak değişmediği durumu için çözüm yapılacaktır.

9) DEFINE → OPERATING CONDITIONS panelinde çevre şartları için basıncı $P=101325$ Pa, $g = 0$ kabulü yapılacaktır.

10) DEFINE → BOUNDARY CONDITIONS

a) Wall 1→ PP_duvar, Adyabatik $q=0$ W/m² izoleli, Eriyik haldeki deney numunesinin temasta olduğu ahşap kasanın iç kısmı,

b) Wall 2→ Tabla_duvar : Adyabatik $q=0$ W/m² izoleli, Çelik tablanın deney numunesi ile temas etmeyen tüm yüzeyleri

c)Velocity Inlet: Su girişi, Magnitude Normal to Boundary, $V= 0,554$ m/s, su giriş sıcaklığı

$T_{su}=280$ K,

d)Out Flow: Su çıkışı

e) Fluid: Su

f) Solid : Deney numunesi (PP)

g) Solid : Çelik tabla (Çelik)

11) SOLVE → CONTROLS → SOLUTION komutu ile 'Under-relaxation factors' (URF) değerlerini, 'Discretization' yöntemlerini, 'Upwind Scheme ' değerlerini

giriyoruz.

URF : Pressure = 0.3, Momentum = 0.7, Energy =0.8, Türbülans Dissipation Rate = 0.8, Viscosity = 1, Density =1, Body Forces = 1

Discretization: Pressure: STANDARD, Momentum: First Order, Pressure-Velocity Coupling : SIMPLE, Energy First Order, Turbulence Dissipation Rate : First Order

12) SOLVE → MONITORS → RESIDUAL komutundan ‘Plot’ seçeneğini işaretlenerek iterasyon esnasında yakınsamanın gerçekleşip gerçekleşmediğini Residuals-Iteration grafiği çizdirilerek anlaşılabılır.

13) FILE → WRITE → AUTOSAVE → ‘Autosave frequency’ 1 seçeneği işaretlenerek analizde her saniyede bir sonuçların kaydedilmesi sağlanır.

14) FILE → WRITE → CASE komutu ile şu ana kadar girilen tüm değerler kaydedilir.

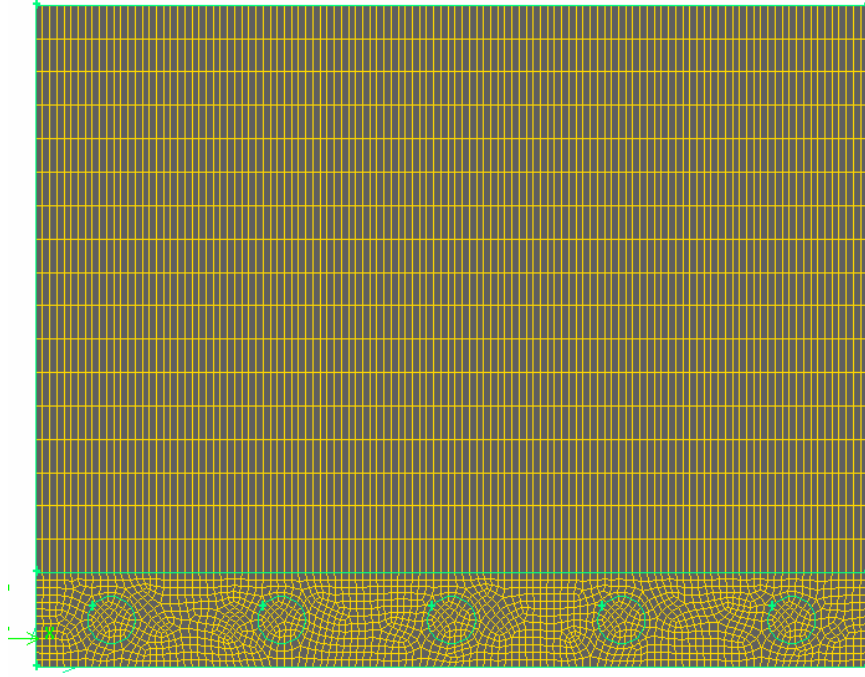
15) SOLVE → INITIALIZE → INITIALIZE komutu ile ‘Compute From’ dan ‘All Zones’ seçeneği işaretlenir. Çözüme başlamak için sınır şartları T=473 K

16) SOLVE → MONITORS → SURFACE komutu ile ‘Plot’ ‘Write’ seçenekleri işaretlenir. Deneyde ısı çiftlerin yerleştirildiği 7 nokta seçilir.

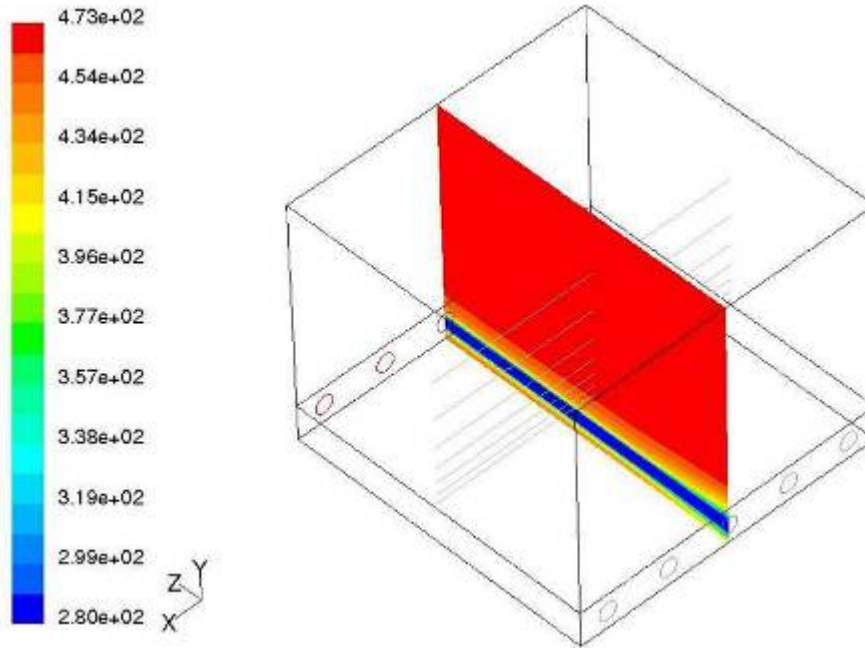
17) SOLVE → ITERATE komutu ile ‘ Time Step Size ’ 1 , ‘Number of Time Step’ 1800, ‘Time Stepping Method’ Adaptive seçeneği işaretlenir. ‘ITERATE’ komutuna basılarak iterasyona (çözüme) başlarız.

4.10 Sayısal Modelleme ve Sonuçlar

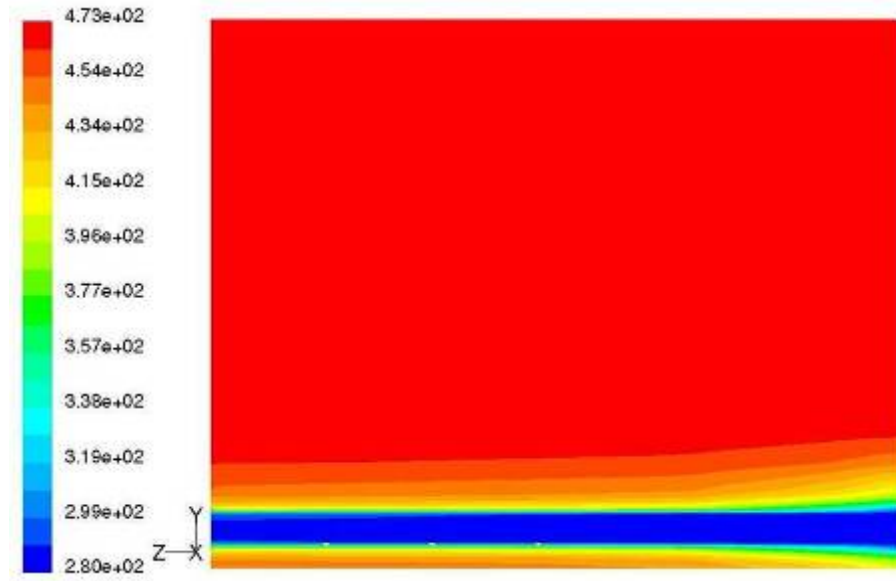
Deney setinin katı modeli Gambit’te çizilmiş, sonlu hacimlere de yine aynı programda ayrılmıştır. Deneyde kullanılan numune 250632 nod kullanılarak 232713 sonlu hacime ayrılmıştır. Aynı şekilde bir adet 10mm çapında, 176mm boyundaki soğutma suyu hacmi, 7316 nod kullanılarak 5850 sonlu hacime ayrılmış, çelik tablada 194228 nod kullanılarak 171405 sonlu hacime ayrılmıştır (Şekil 4.5). Deney seti fırından çıkarıldıktan 5 saniye sonraki sıcaklık değerleri Şekil 4.6 ve Şekil 4.7’de gösterilmiştir. Sıcaklık dağılımının rahat görünebilmesi için bir ara düzlem FLUENT programı yardımıyla oluşturulmuştur (Şekil 4.6, 4.7).



Şekil 4.5 Deney setinin sonlu hacimlere ayrılmış hali

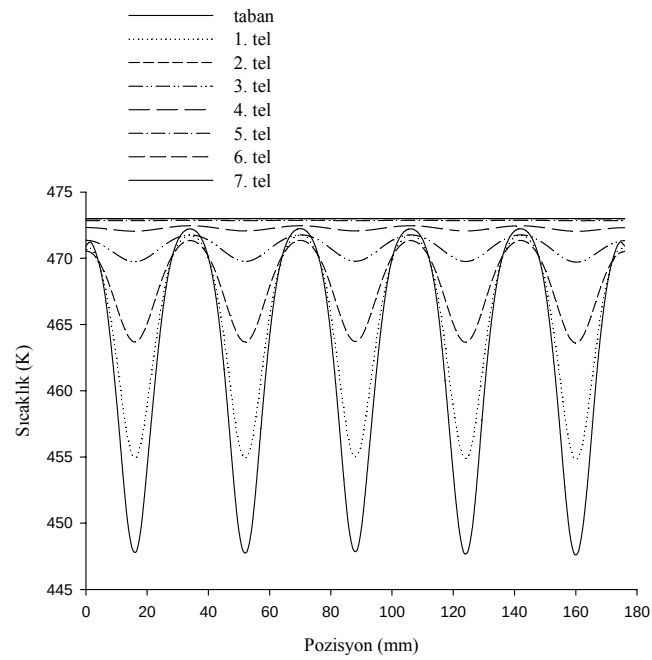


Şekil 4.6 Deney numunesinin 5 saniye soğutulduktan sonraki sıcaklık dağılımı



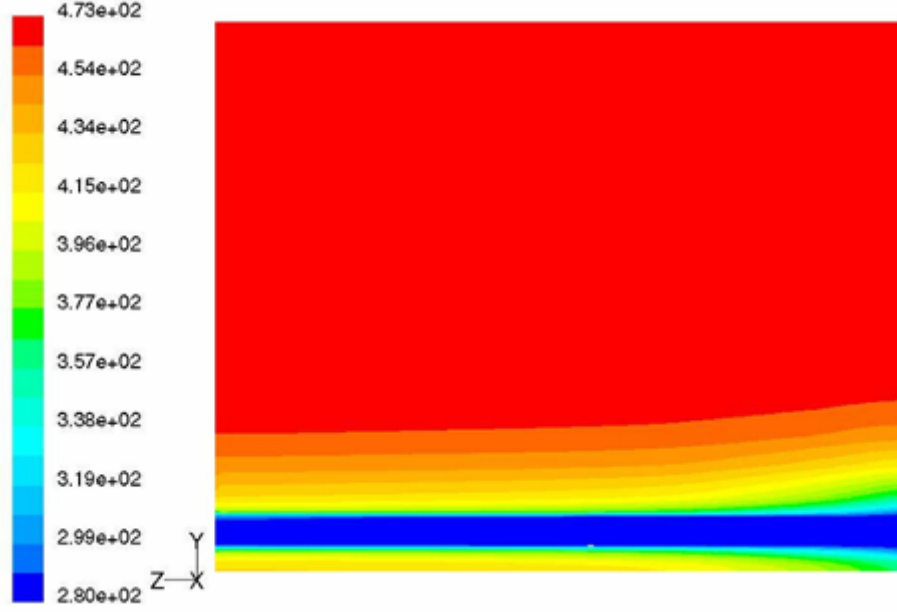
Şekil 4.7 Deney numunesinin 5 saniye soğutulduktan sonraki sıcaklık dağılımı

Deney numunesi beş saniye soğutulduktan sonra içine yerleştirilen ısı çiftlerindeki sıcaklık dağılımı da Şekil 4.8’de gösterilmiştir.

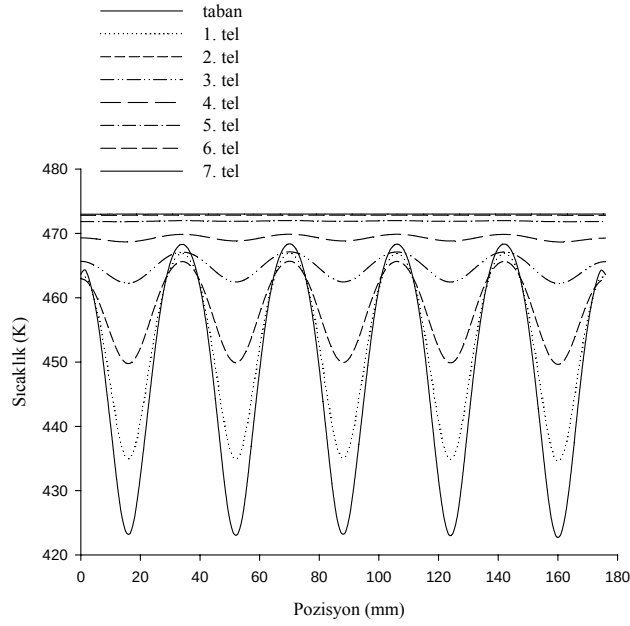


Şekil 4.8 Deney numunesinin 5 saniye soğutulduktan sonra içine yerleştirilen tellerdeki sıcaklık dağılımı

Deney numunesi soğutulmaya başladıktan sonra 15. saniyedeki sıcaklık dağılımı Şekil 4.9, ısı çiftlerindeki sıcaklık dağılımı da Şekil 4.10’da gösterilmiştir.

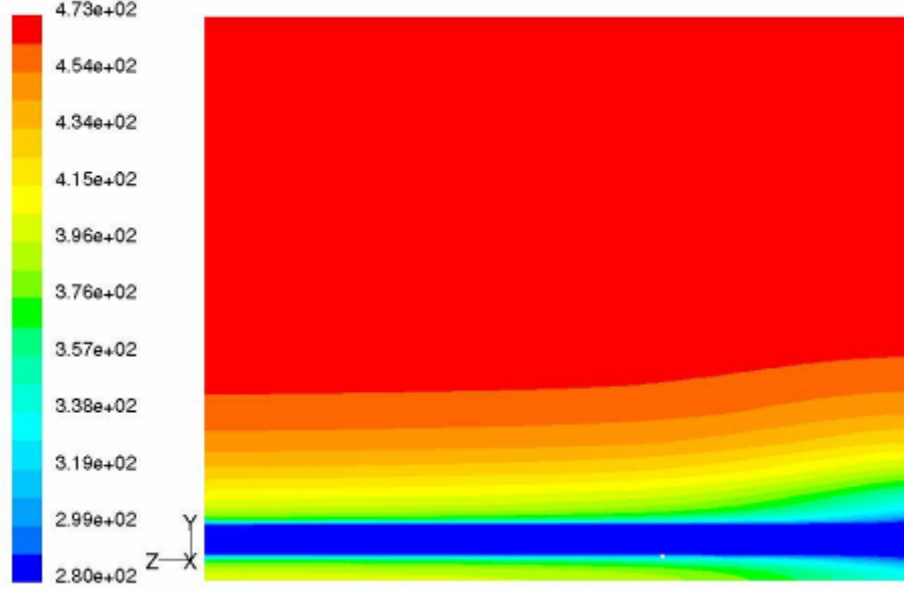


Şekil 4.9 Deney numunesinin 15 saniye soğutulduktan sonraki sıcaklık dağılımı

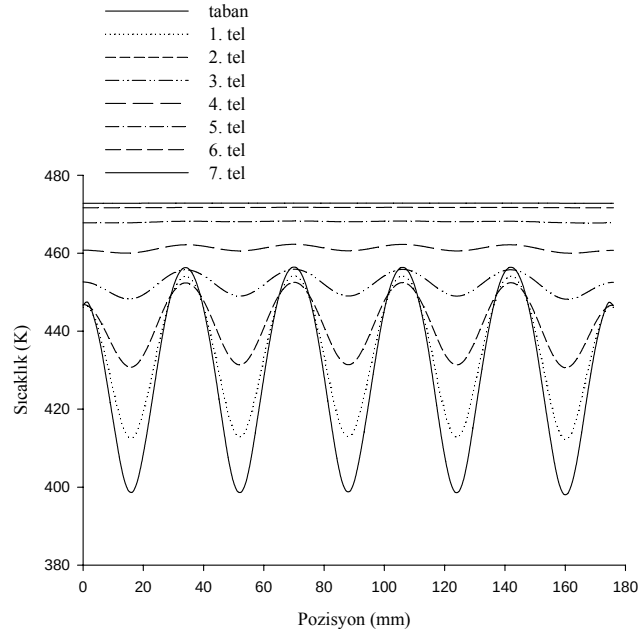


Şekil 4.10 Deney numunesinin 15 saniye soğutulduktan sonra içine yerleştirilen tellerdeki sıcaklık dağılımı

Deney numunesi soğutulmaya başladıktan sonra 30. saniyedeki sıcaklık dağılımı Şekil 4.11, ısı çiftlerindeki sıcaklık dağılımı da Şekil 4.12’de gösterilmiştir.



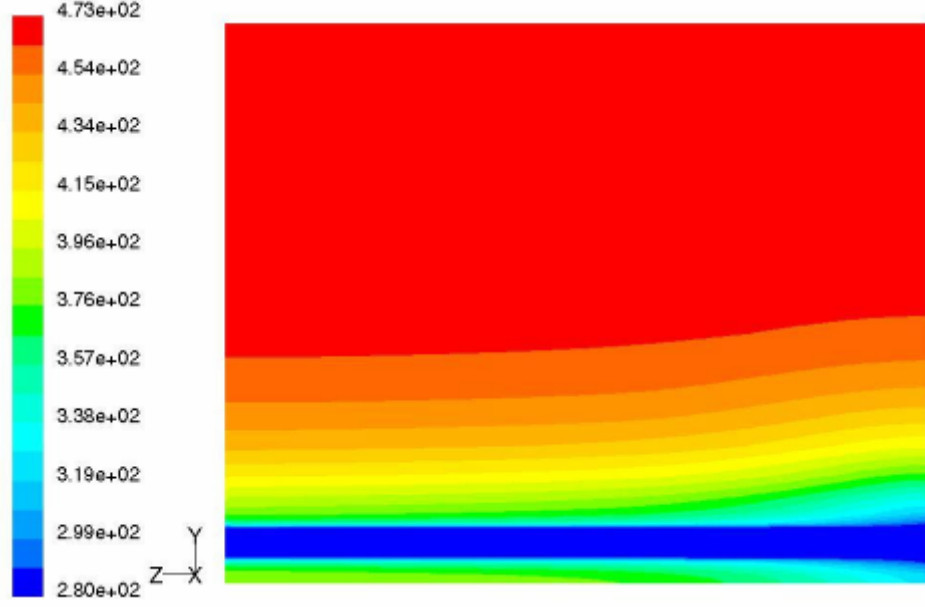
Şekil 4.11 Deney numunesinin 30 saniye soğutulduktan sonraki sıcaklık dağılımı



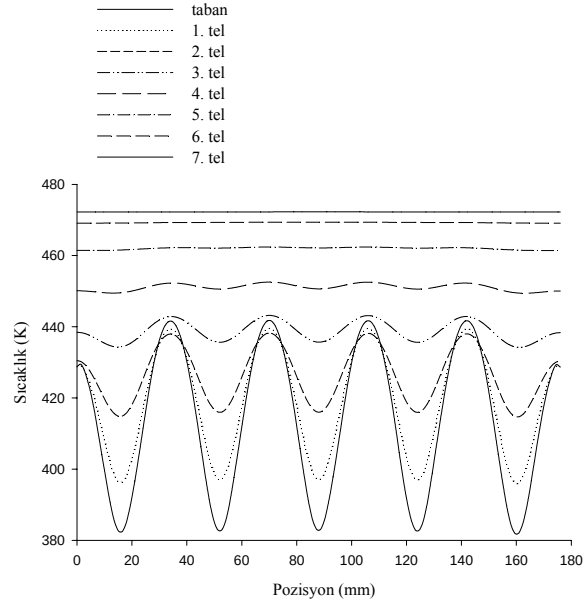
Şekil 4.12 Deney numunesinin 30 saniye soğutulduktan sonra içine yerleştirilen tellerdeki sıcaklık dağılımı

Deney numunesi soğutulmaya başladıktan sonra 45. saniyedeki sıcaklık dağılımı

Şekil 4.13, ısı çiftlerindeki sıcaklık dağılımı da Şekil 4.14'te gösterilmiştir.

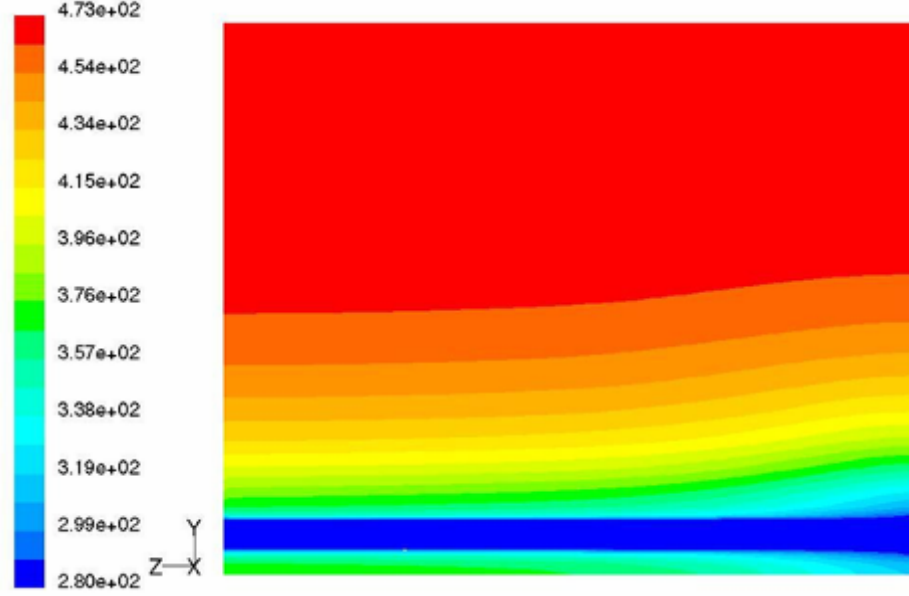


Şekil 4.13 Deney numunesinin 45 saniye soğutulduktan sonraki sıcaklık dağılımı

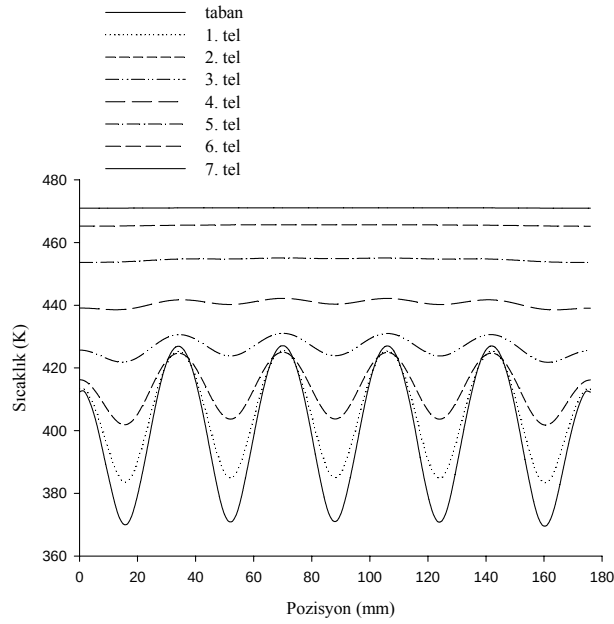


Şekil 4.14 Deney numunesinin 45 saniye soğutulduktan sonra içine yerleştirilen tellerdeki sıcaklık dağılımı

Deney numunesi soğutulmaya başladıktan sonra 60. saniyedeki sıcaklık dağılımı Şekil 4.15, ısı çiftlerindeki sıcaklık dağılımı da Şekil 4.16'da gösterilmiştir.



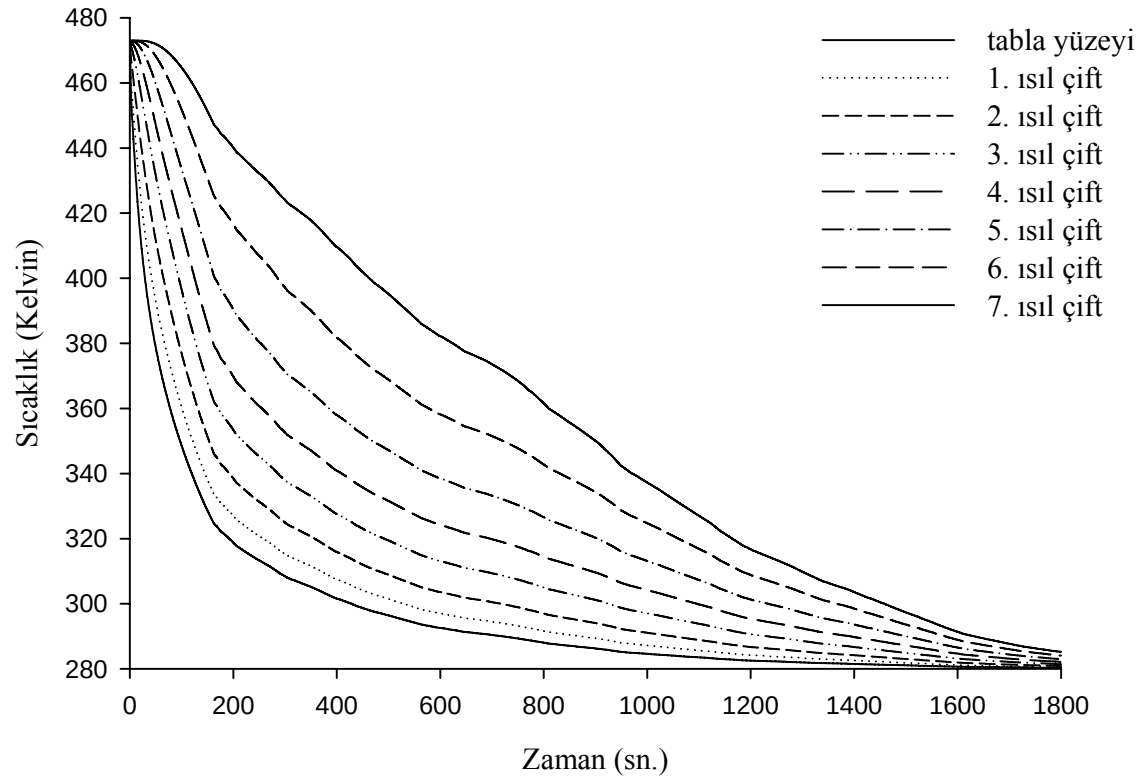
Şekil 4.15 Deney numunesinin 60 saniye soğutulduktan sonraki sıcaklık dağılımı



Şekil 4.16 Deney numunesinin 60 saniye soğutulduktan sonra içine yerleştirilen tellerdeki sıcaklık dağılımı

Deney numunesi soğutulmaya başladıktan sonra 90., 120., 150., 180., 240., 300., 420., 540., 600., 750., 900., 1200., 1500., ve 1800., saniyelerdede ısı çiftlerindeki sıcaklık dağılımı Ek D’de gösterilmiştir.

Yapılan deneyde ısı çiftlerinin ucu, tellerin orta noktalarına yerleştirilmiştir. Sayısal analiz sonucunda tüm ısı çiftlerinin yerleştirildiği noktaların zamana bağlı sıcaklık değişimi Şekil 4.17’de gösterilmiştir.

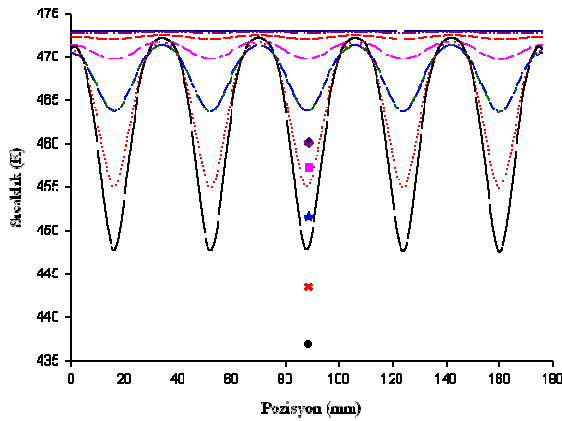


Şekil 4.17 Sayısal çözümde ısı çiftlerinin yerleştirildiği noktaların zamana bağlı sıcaklık dağılımı

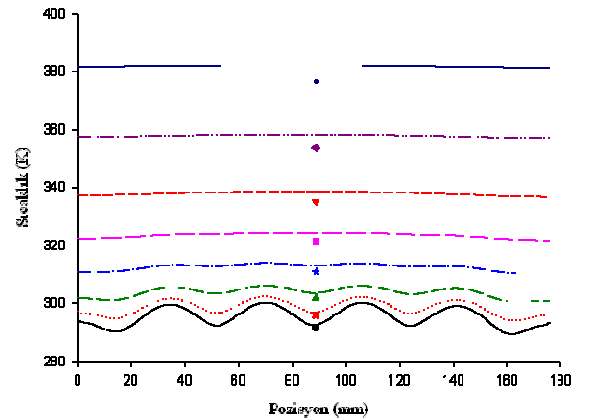
5 SONUÇ VE TARTIŞMA

1.) Boru üretiminde kullanılan mevcut kalibreler, 300 mmHg değerindeki bir vakum tankı ile kullanılırlar. Geliştirilen helisel kanallı kalibrede basınç düşüşü, 0.714 m/s hız değerinde 290 mmHg olarak deneysel olarak ölçülmüştür. Bu durumda geliştirilen helisel kanallı kalibrenin çalışması esnasında vakum tankına ihtiyaç yoktur. Kalibrenin farklı bölgelerinde yapılan basınç ölçümleri sonucu, bir tur helisteki basınç düşüşünün lineer olarak artmadığı görülmüştür. Bu ise soğutma suyunun helisel kanalların boru yüzeyine temas eden kısımlarından kısmen sızmasından kaynaklanmıştır. Sızmanın nedeni, kalibre içine yerleştirdiğimiz borunun katı olmasıdır. Üretim esnasında plastik boru, kalibrenin içine 200°C’de girecek ve kalibrede uygulanan vakum basıncı sebebiyle kalibrenin çeperlerine tam oturacağı için soğutma suyunun helisel kanallardan sızma problemi olmayacaktır.

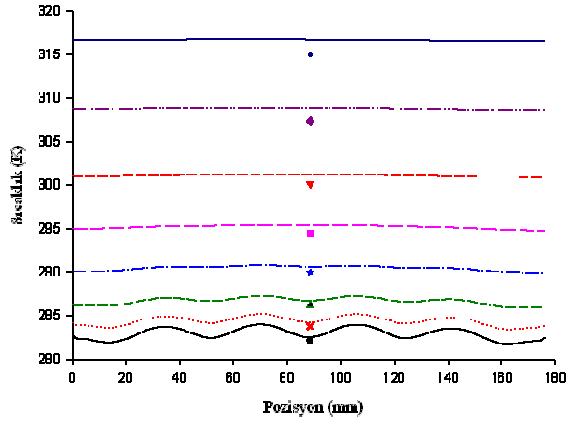
2.) Polipropilen (PP-R) malzemede deneysel çalışma ve sayısal analiz sonunda elde edilen sıcaklık dağılımları karşılaştırılacak, sıcaklık dağılımlarının uyumlu olması durumunda sayısal analizde kullanılan ısı iletim katsayısı alınacaktır. Deneysel ve sayısal çalışma sonucunda bulunan sıcaklık değerlerinin, pozisyona göre değişimi Şekil 5.1, 5.2, 5.3, 5.4’te gösterilmiştir.



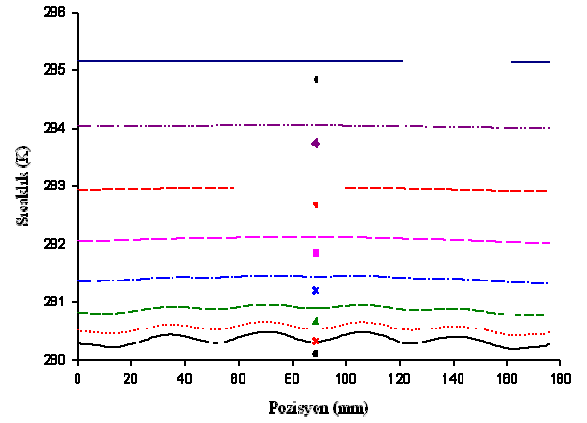
Şekil 5.1 Deneysel ve sayısal çalışma sonunda bulunan, 5 saniye soğutulduktan sonraki sıcaklıkların konuma bağlı değişimi



Şekil 5.2 Deneysel ve sayısal çalışma sonunda bulunan, 600 saniye soğutulduktan sonraki sıcaklıkların konuma bağlı değişimi



Şekil 5.3 Deneysel ve sayısal çalışma sonunda bulunan, 1200 saniye soğutulduktan sonraki sıcaklıkların konuma bağlı değişimi



Şekil 5.4 Deneysel ve sayısal çalışma sonunda bulunan, 1800 saniye soğutulduktan sonraki sıcaklıkların konuma bağlı değişimi

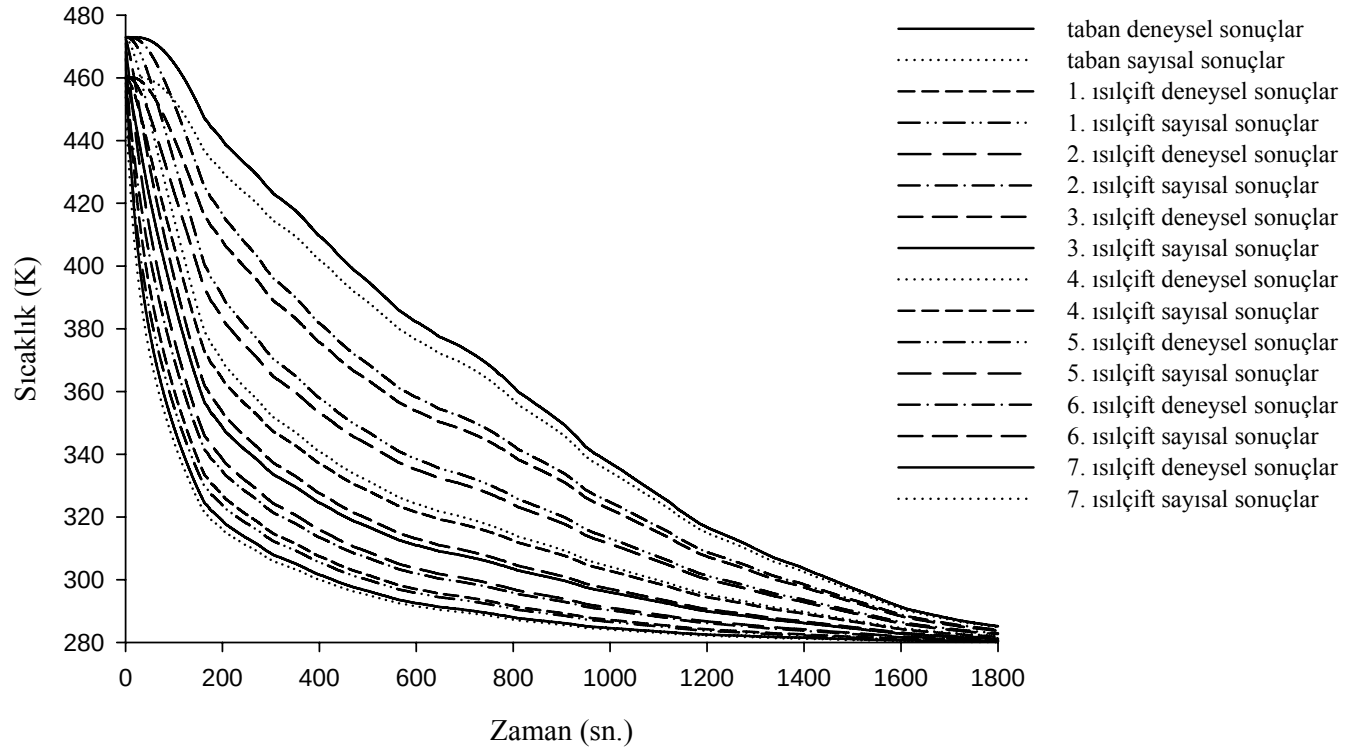
Şekil 5.5'te deneysel ve sayısal çalışma sonunda bulunan sıcaklık değerlerinin zamana bağlı değişimi gösterilmiştir.

Sayısal çözümde kullanılan model, algoritma ve yöntemlerle gerçeğe (deneylere) yaklaşık % 6.3-2.8 farkla elde edilmiştir. Deneysel çalışma sonunda elde edilen sıcaklık değerleri ile sayısal çalışma sonunda bulunan sıcaklık değerleri Tablo 5.1'de gösterilmiştir. Bu sonuca göre deneydeki sınır şartları ile sayısal yöntemde seçilen sınır şartlarının uygun olduğu görülmüştür.

Bu durumda sayısal analizde kullanılan, Zhang ve Motoo (2003) tarafından yapılan çalışmadaki Polipropilen Random Kopolimer (PP-R) ısı iletim katsayısının sıcaklıkla değişiminin başlangıç değeri olarak seçilmesinin doğru olduğu düşünülmüştür. Ancak Zhang ve Motoo (2003) tarafından yapılan çalışmada Polipropilen Random Kopolimer (PP-R) malzemenin ısı iletim katsayısının sıcaklıkla değişimi tablo halinde verilmiştir. Bu değerlere Table Curve 2D programı kullanılarak bir fonksiyon uydurulmuştur. Fluent programında sayısal analiz çözülürken bu fonksiyon kullanılmıştır.

Tablo 5.1 Deneysel ve sayısal çalışma sonuçları arasındaki farkların gösterilmesi

Zaman (s)	T_{tab} (K)			T_{pp1} (K)			T_{pp2} (K)			T_{pp3} (K)		
	Den.	Say.	% Fark	Den.	Say.	% Fark	Den.	Say.	% Fark	Den.	Say.	% Fark
5	436.9	448.0	-2.54	443.5	455.1	-2.62	451.6	463.7	-2.68	457.2	469.7	-2.73
300	306.3	308.4	-0.69	312.8	315.2	-0.77	321.9	324.9	-0.93	334.2	337.9	-1.11
600	291.5	292.5	-0.34	295.7	297.0	-0.44	301.9	303.5	-0.53	311	313	-0.64
900	285.6	286.2	-0.21	288.6	289.3	-0.24	293	294	-0.34	299.8	301.1	-0.43
1200	282.1	282.5	-0.14	283.7	284.1	-0.14	286.1	286.7	-0.21	289.9	290.6	-0.24
1500	280.7	281.0	-0.11	281.5	281.8	-0.11	282.6	283	-0.14	284.4	284.8	-0.14
1800	280.1	280.3	-0.07	280.3	280.5	-0.07	280.6	280.8	-0.07	281.2	281.4	-0.07
Zaman (s)	T_{pp4} (K)			T_{pp5} (K)			T_{pp6} (K)			T_{pp7} (K)		
	Den.	Say.	% Fark	Den.	Say.	% Fark	Den.	Say.	% Fark	Den.	Say.	% Fark
5	459.3	472.1	-2.78	460.1	472.8	-2.77	460.2	473.0	-2.78	460.2	473.0	-2.78
300	348	352.6	-1.32	365.6	371.3	-1.56	389.9	397.1	-1.85	415.3	424.0	-2.10
600	321.5	324.2	-0.84	335	338.5	-1.04	353.7	358.2	-1.26	376.5	382.2	-1.51
900	307.9	309.6	-0.55	318.1	320.3	-0.68	331.5	334.3	-0.86	346.5	350.0	-1.02
1200	294.4	295.4	-0.33	300.1	301.3	-0.40	307.4	308.8	-0.46	314.9	316.7	-0.58
1500	286.6	287.1	-0.19	289.4	290.0	-0.20	292.8	293.6	-0.27	296.5	297.3	-0.28
1800	281.8	282.1	-0.11	282.6	283.0	-0.13	283.7	284.1	-0.12	284.8	285.2	-0.13



Şekil 5.5 DeneySEL ve sayısal çalışmalardan elde edilen Polipropilen (PP-R) deney numunesi içinde sıcaklık dağılımının zamana bağlı değişimi

Sayısal analizde kullanılan ısı iletim katsayısının sıcaklıkla değişim fonksiyonu ;

$$k = 0.1344 + \frac{\left[0.1311 \left(\frac{(T - 238.8033 + 211.1657a)}{211.1657} \right)^{0.1158} \cdot \left(1 - \frac{(T - 238.8033 + 211.1657a)}{211.1657} \right)^{0.5296} \right]}{(a^{0.1158} \cdot b^{0.5296})}$$

$300K \leq T \leq 473K$
 $b = 0.8205$
 $a = 0.1795$
 $b = 0.8205$
 $k \rightarrow W/mK$
 $T \rightarrow \text{Kelvin}$

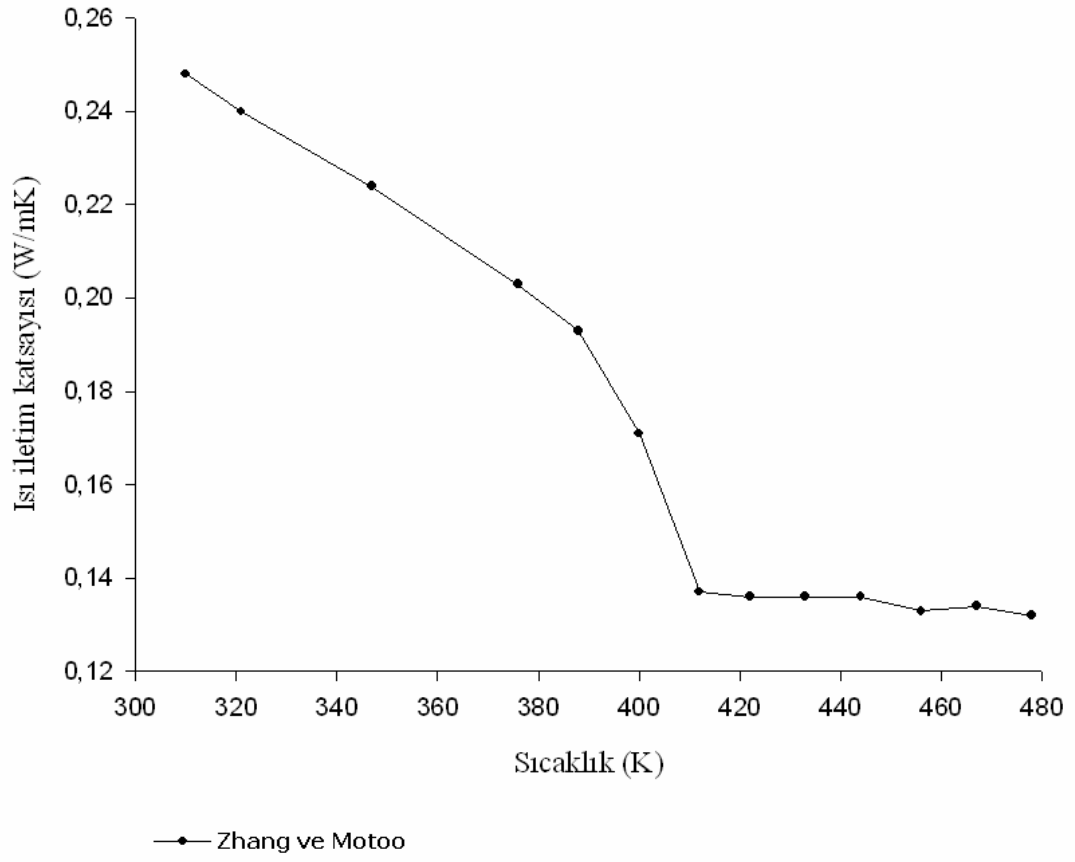
(5.1)

Şekil 5.6’da ısı iletim katsayısının sıcaklıkla değişimi gösterilmiştir.

5.1 Öneriler

Plastik boru üretiminde kullanılan Polipropilen (PP-R) malzemenin katılaşma esnasında sıcaklık dağılımı deneysel ve sayısal olarak bulunmuştur. Sayısal analizde kullanılan model ve çözüm yöntemleri sonucunda bulunan sıcaklık dağılımı ile deneyde ölçülen malzemedeki sıcaklık dağılımı arasında % 6.3-2.8’lik bir sapma vardır. Bu farkı ortadan kaldırmak için sadece deneysel çalışma sonucu elde edilen bilgilerin kullanıldığı, PP-R malzemenin katılaşma esnasında ısı iletim katsayısını hesaplayan bir bilgisayar kodu yazılabilir. Aynı deney seti ve bilgisayar kodu kullanılarak HDPE, LDPE, gibi diğer polimer malzemelerin katılaşma esnasında ısı iletim katsayısının sıcaklıkla değişimi de belirlenebilir. Plastik malzemelere ait gerilme sıcaklık ilişkisi kullanılarak kalibre boyunca uygulanması gereken ideal vakum değerleri, malzemenin cinsi, boru basınç grubu, boru üretim hızı, soğutma suyu sıcaklığı, kalibreye giriş sıcaklığı ve boru yüzeyindeki taşınım katsayısına bağlı olarak belirlenebilir.

Polipropilen Rastgele (Random) Kopolimer



Şekil 5.6 Polipropilen Rastgele (random) Kopolimer'in ısı iletim katsayısının sıcaklıkla değişimi

KAYNAKLAR

- [1] **Bernnat, A.**, 2001. Polymer melt rheology and rheoten test, *Doktora Tezi*, Stuttgart Üniversitesi Plastik Enstitüsü, Stuttgart.
- [2] **Fluent User's Guide**, 1998. Fluent incorporated Centerra Resource park, Lebanon
- [3] **Fuller, T. R. and Fricke., A. L.**, 1971. Thermal conductivity of polymer melts., *J. Appl. Poly. Sci.*, **15**, 1729
- [4] **Kamal, M. R., Tan, V. and Kashani, F.**, 1989. *Adv. Polym. Technol.*, **3**, 89
- [5] **Kaya, O.**, 2002. Plastik boru ekstrüder kalibrelerinde ısı transferinin iyileştirilmesi, *Doktora Tezi*, Yıldız Teknik Üniversitesi Fen bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- [6] **Kline, D. E.**, 1961. Thermal conductivity studies of polymers., *J. Appl. Poly. Sci.*, **6**, 441
- [7] **Lobo, H. and Cohen, C.**, 1990. Measurement of thermal conductivity pf polymer melts by the line-source method., *Polymer Engineering and Science*, **30(2)**, 65
- [8] **Rauwendaal, C.**, 1986. *Poymer Extrusion*, **4**, 390
- [9] **Sheldon, R. P. and Lane, S. K.**, 1965, Thermal conductivity of polymers 2: polyethylene., *Polymer*, **6**, 205-212
- [10] **Sombatsompop, N. and Wood, A. K.**, 1997. Measurument of thermal conductivity of polymers using improved Lee's disc apparatus., *Polymer Testing*, **16**, 203-223
- [11] **Underwood, W. M. and Taylor, J. R.**, 1978. The thermal conductivity of several plastics determined by an improved line-source apparatus., *Polymer Engineering and Science*, **18(7)**, 558
- [12] **Woo, M. W., Wong, P., Tang, Y., Triacca, V., Gloor, P. E., Hrymak, A. N. and Hamielec, A. E.**, 1995. Melting behavior and thermal properties of high density polyethylene., *Poly. Eng. and Sci.*, **35(2)**, 151-156
- [13] **Yue, M. Z., Wood, A. K. and El-Rafey, E.**, 1994. Thermophysical characterization of polyethylene., *J. Appl. Poly. Sci.*, **55**, 105
- [14] **Zhang, X. and Motoo., F.**, 2003. Measurement of thermal conductivity and thermal diffusivity of polymer., *Poly. Eng. and Sci.*, **43(11)**, 1755-64

EK-A

Netes Mühendislik ve Dış Tic. Ltd.Şti. alınan kalibrasyon belgesi

NETES MÜHENDİSLİK VE DİŞ TİC. LTD. ŞTİ.
KALİBRASYON LABORATUVARI

KALİBRASYON SERTİFİKASI

CALIBRATION CERTIFICATE

KALİBRASYON ETİKETİ
Calibration Mark

E4061171

NETES
KALİBRASYON
LABORATUVARI

Jun-2004

Cihaz : TERMOMETRE
Equipment
İmalatçı : Omega Eng
Manufacturer

Model Numarası : HH506R
Model Number

Seri Numarası : 03000871
Serial Number

Demirbaş Numarası :
Code No

Müşteri Kodu / İstek No : K1130 / 040601
Cust. Code / Order No.

Cihaz Sahibi : DİZAYN TEKNİK PLASTİK
Customer BORU VE ELEMANLARI
SANAYİ VE TİCARET A.Ş.
Hacımköy Yolu San.Bir 1.
Bölge 4.Cad.No:23
Büyükdöğmece/İSTANBUL

Kalibrasyon Tarihi : 17.06.2004
Date of Calibration

Sertifika Sayfa Sayısı : 4
Total Page

Bu kalibrasyon sertifikası,
TS EN 17025 (Kalibrasyon Laboratuvarlarının
Yeterliliği için Genel Şartlar) standardında
belirtilen yükümlülükler çerçevesinde tanzim
edilmiştir.

Bu kalibrasyon sertifikası Uluslararası Birimler
Sistemine (SI) uygun olarak gerçekleştirilmiş
olan Ulusal Ölçü Standartlarına izlenebilirliği
belgeler.

Ölçüm sonuçları, genişletilmiş ölçüm
belirsizlikleri ve kalibrasyon metodları müteakip
sayfalarda verilmiştir ve bu sayfalar sertifikanın
tamamlayıcı kısmıdır.

This calibration certificate is prepared according to
the TS EN 17025 standard (General Requirements
for the Competence of Testing and Calibration
Laboratories).

This Calibration certificate document the
traceability to national standards, which realize the
unit of measurement according to the International
System of Units (SI).

The measurement, the uncertainties with confidence
probability and calibration methods are given on the
following pages and are part of the certificate.

Bu sertifika, laboratuvarın yazılı izni olmadan kısmen kopyalanıp çoğaltılamaz.
This certificate shall not be reproduced other than in full except with the permission of the laboratory.
İmzasız ve mühürlü kalibrasyon sertifikaları geçersizdir.
Calibration certificates without signature and seal are not valid.

Mühür
Seal



Tarih
Date
17.06.2004

Onay
Approved By
Hüseyin DENİZ

Kalibrasyonu Yapan
Person in charge
T.SIVKA

NETES Müh. Ve Dış Tic. Ltd. Şti.
Telefon : (216)340 50 50pbx. Fax : (216)340 51 51

Koşuyolu Caddesi No:124

İnternet: http://www.netes.com.tr e-mail: kalibrasyon@netes.com.tr

Koşuyolu-Kadıköy 34718 İSTANBUL

NKL-F-002

Sayfa No / Page Nr. 1 / 4

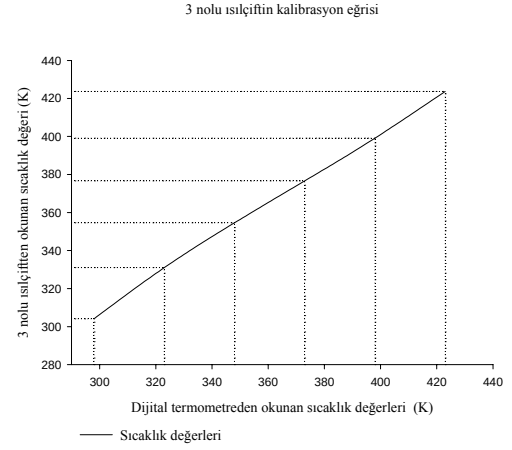
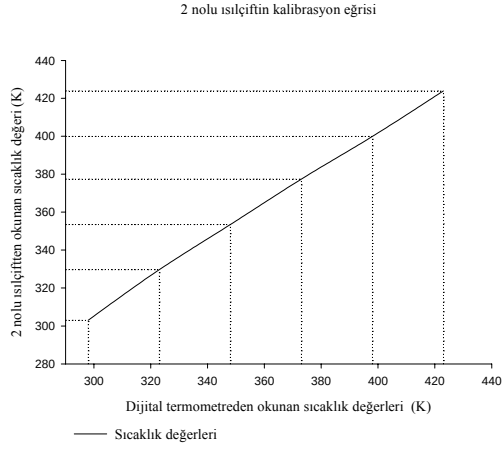
EK-B

Netes Mühendislik ve Dış Tic. Ltd.Şti. tarafından yapılan kalibrasyon işleminde dijital termometreye ait kalibrasyon değerleri

NETES MÜHENDİSLİK VE DİŞ TİC. LTD. ŞTİ. KALİBRASYON LABORATUVARI				
KALİBRASYON SERTİFİKASI <i>Calibration Certificate</i>				
E4061171				
NETES KALİBRASYON LABORATUVARI				
Jun-2004				
Fonksiyon Test Noktası <i>Function/Test points Name</i>	Uygulanan Değer <i>Applied Value</i>	Okunan Değer <i>Indicated Value</i>	Hata <i>Error</i>	Ölçüm Belirsizliği <i>Measurement Uncertainty</i>
Temperature				
0.0 °F	-0.30 °F	0.0 °F	0.3 °F	0.34 °F
32.0 °F	31.60 °F	32.0 °F	0.4 °F	0.34 °F
77.0 °F	76.60 °F	77.0 °F	0.4 °F	0.34 °F
212.0 °F	211.50 °F	212.0 °F	0.5 °F	0.34 °F
2498.0 °F	2497.70 °F	2498.0 °F	0.3 °F	0.49 °F
1 nolu ısı probu kullanılarak T1 girişinden yapılan ölçümler				
25.0 °C	25,0 °C	24,8 °C	-0,2 °C	0,1 °C
50.0 °C	50,0 °C	49,8 °C	-0,2 °C	0,1 °C
75.0 °C	75,0 °C	74,8 °C	-0,2 °C	0,1 °C
100.0 °C	100,0 °C	99,8 °C	-0,2 °C	0,1 °C
125.0 °C	125,0 °C	124,8 °C	-0,2 °C	0,1 °C
150.0 °C	150,0 °C	149,7 °C	-0,3 °C	0,1 °C
2 nolu ısı probu kullanılarak T2 girişinden yapılan ölçümler				
25.0 °C	25,0 °C	24,9 °C	-0,1 °C	0,1 °C
50.0 °C	50,0 °C	49,9 °C	-0,1 °C	0,1 °C
75.0 °C	75,0 °C	74,9 °C	-0,1 °C	0,1 °C
100.0 °C	100,0 °C	99,9 °C	-0,1 °C	0,1 °C
125.0 °C	125,0 °C	125,0 °C	0,0 °C	0,1 °C
150.0 °C	150,0 °C	149,8 °C	-0,2 °C	0,1 °C

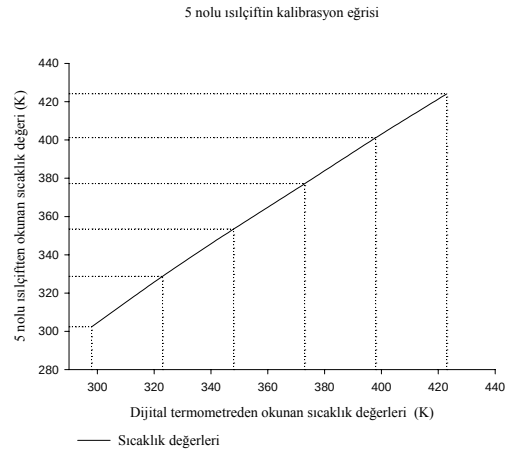
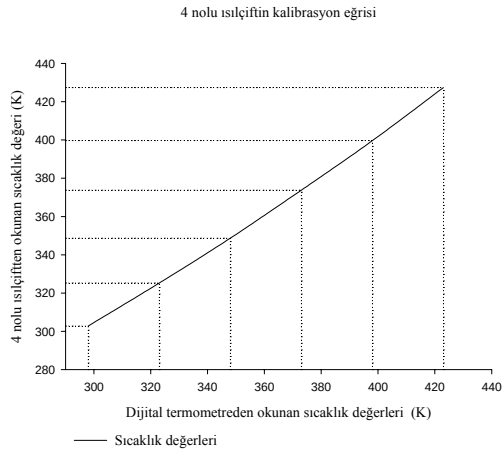
EK-C

Deneyde kullanılan ısıl çiftlere ait kalibrasyon eğrileri



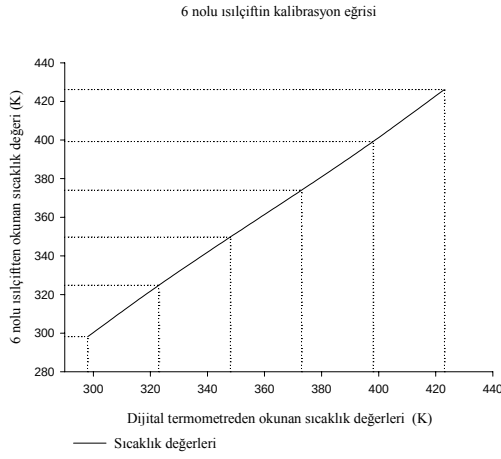
Şekil C.1 2 no'lu ısıl çiftin kalibrasyon eğrisi

Şekil C.2 3 no'lu ısıl çiftin kalibrasyon eğrisi

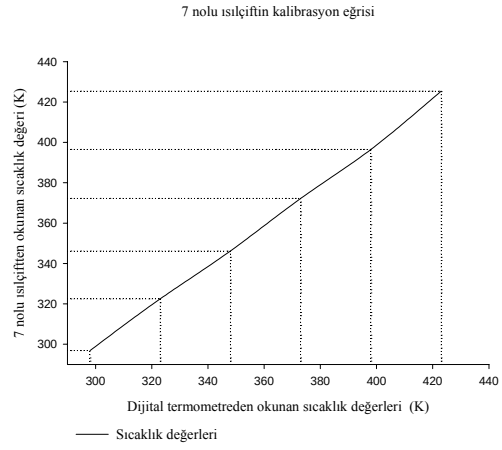


Şekil C.3 4 no'lu ısıl çiftin kalibrasyon eğrisi

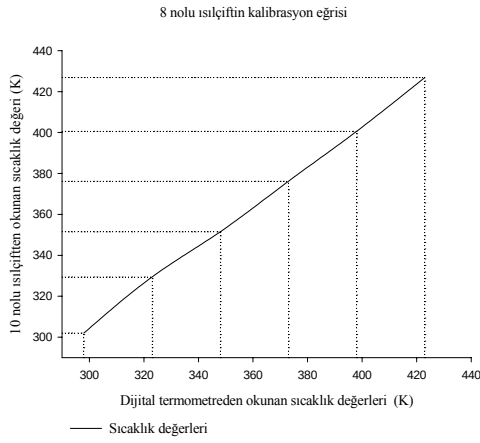
Şekil C.4 5 no'lu ısıl çiftin kalibrasyon eğrisi



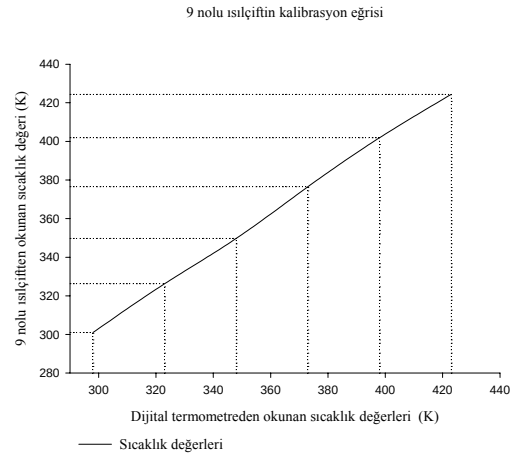
Şekil C.5 6 no'lu ısı çiftinin kalibrasyon eğrisi



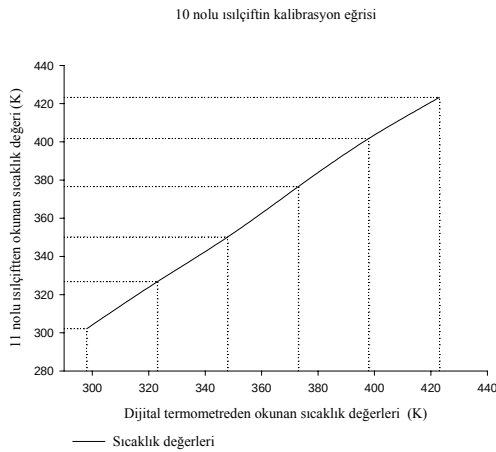
Şekil C.6 7 no'lu ısı çiftinin kalibrasyon eğrisi



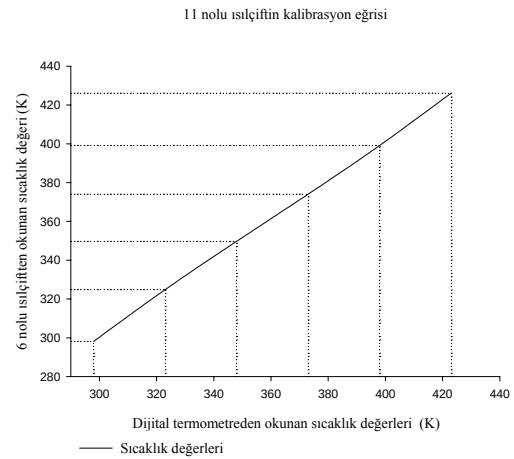
Şekil C.7 8 no'lu ısı çiftinin kalibrasyon eğrisi



Şekil C.8 9 no'lu ısı çiftinin kalibrasyon eğrisi



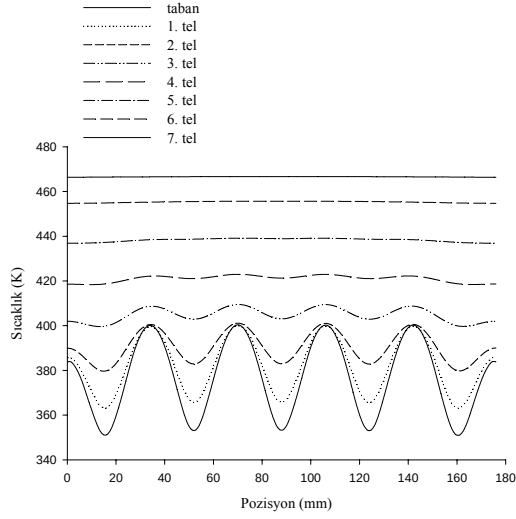
Şekil C.9 10 no'lu ısı çiftinin kalibrasyon eğrisi



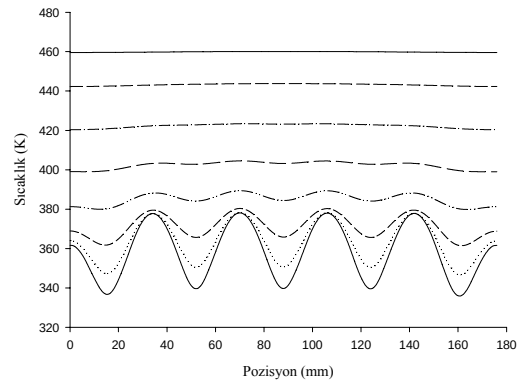
Şekil C.10 11 no'lu ısı çiftinin kalibrasyon eğrisi

EK-D

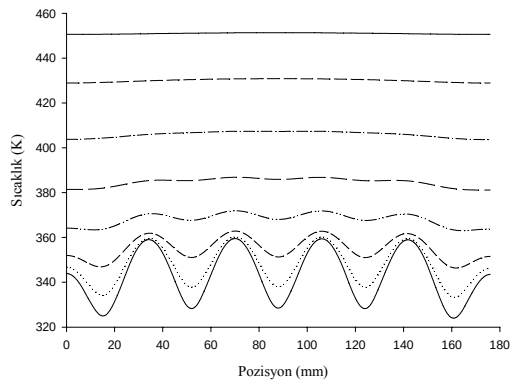
Sayısal analiz sonuçları



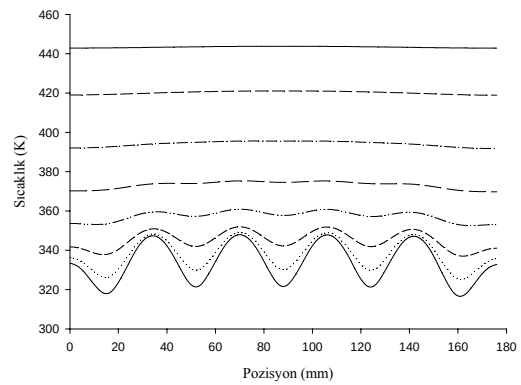
Şekil D.1 Deney numunesinin 90 saniye soğutulduktan sonra içine yerleştirilen tellerdeki sıcaklık dağılımı



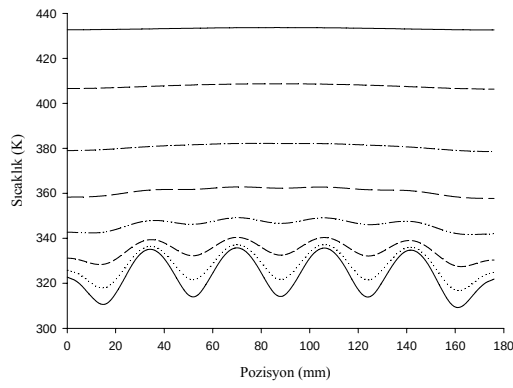
Şekil D.2 Deney numunesinin 120 saniye soğutulduktan sonra içine yerleştirilen tellerdeki sıcaklık dağılımı



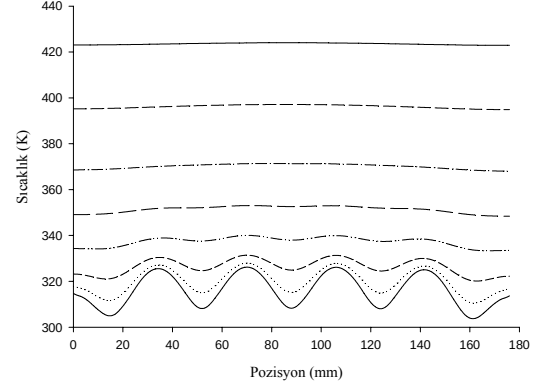
Şekil D.3 Deney numunesinin 150 saniye soğutulduktan sonra içine yerleştirilen tellerdeki sıcaklık dağılımı



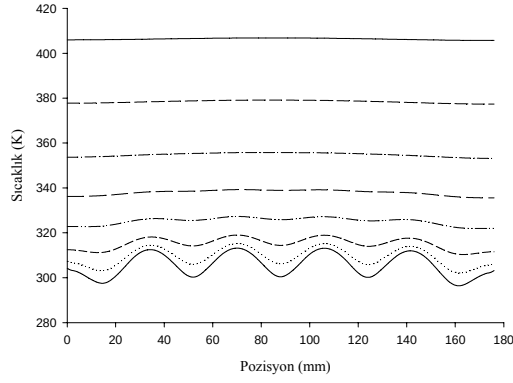
Şekil D.4 Deney numunesinin 180 saniye soğutulduktan sonra içine yerleştirilen tellerdeki sıcaklık dağılımı



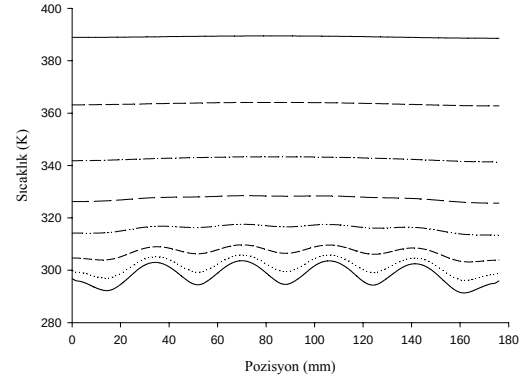
Şekil D.5 Deney numunesinin 240 saniye soğutulduktan sonra içine yerleştirilen tellerdeki sıcaklık dağılımı



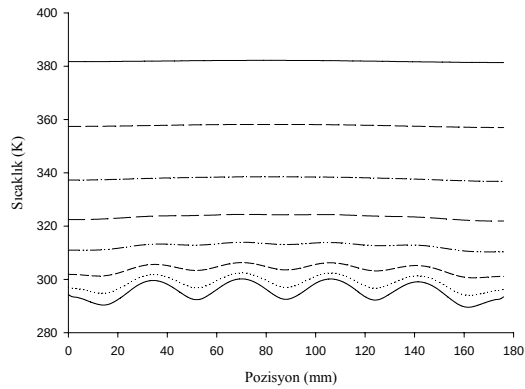
Şekil D.6 Deney numunesinin 300 saniye soğutulduktan sonra içine yerleştirilen tellerdeki sıcaklık dağılımı



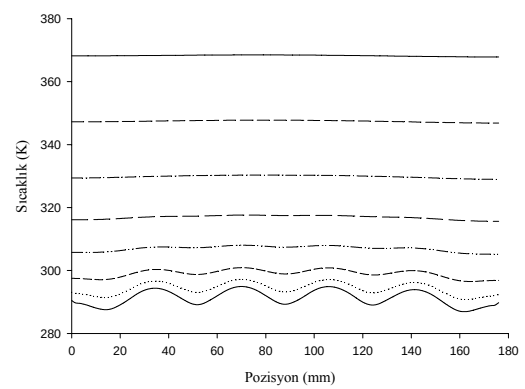
Şekil D.7 Deney numunesinin 420 saniye soğutulduktan sonra içine yerleştirilen tellerdeki sıcaklık dağılımı



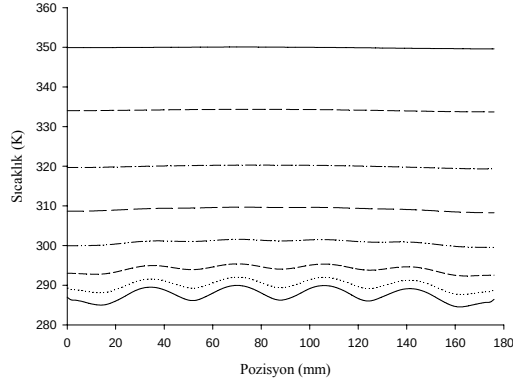
Şekil D.8 Deney numunesinin 540 saniye soğutulduktan sonra içine yerleştirilen tellerdeki sıcaklık dağılımı



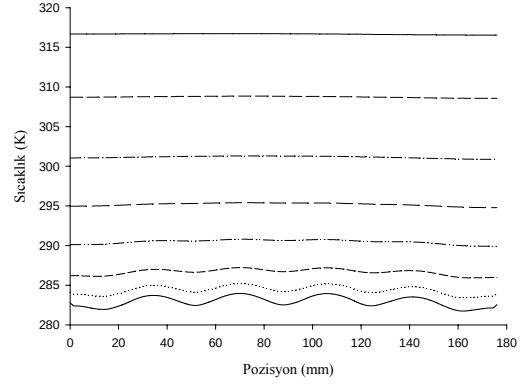
Şekil D.9 Deney numunesinin 600 saniye soğutulduktan sonra içine yerleştirilen tellerdeki sıcaklık dağılımı



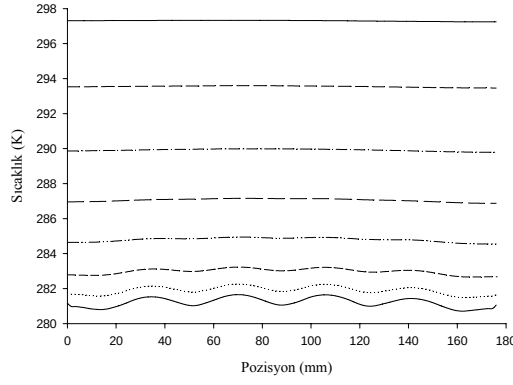
Şekil D.10 Deney numunesinin 750 saniye soğutulduktan sonra içine yerleştirilen tellerdeki sıcaklık dağılımı



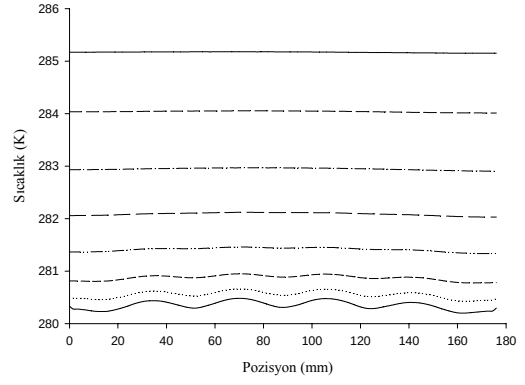
Şekil D.11 Deney numunesinin 900 saniye soğutulduktan sonra içine yerleştirilen tellerdeki sıcaklık dağılımı



Şekil D.12 Deney numunesinin 1200 saniye soğutulduktan sonra içine yerleştirilen tellerdeki sıcaklık dağılımı



Şekil D.13 Deney numunesinin 1500 saniye soğutulduktan sonra içine yerleştirilen tellerdeki sıcaklık dağılımı



Şekil D.14 Deney numunesinin 1800 saniye soğutulduktan sonra içine yerleştirilen tellerdeki sıcaklık dağılımı

ÖZGEÇMİŞ

Olca YENİCİ, 1978 yılında Tekirdağ'da doğmuştur. İlköğrenimini Yenimahalle İlköğretim Okulu'nda, ortaöğrenimini İnşa Lisesi'nde yapmıştır. Lise öğrenimini Avcılar Anadolu Meslek Lisesi Makine Bölümü'nde bitirmiş, 1997 yılında Yıldız Teknik Üniversitesi Makine Fakültesi Makine Mühendisliği Bölümü'ne girmiştir. 2002 yılında Yıldız Teknik Üniversitesi'nden mezun olmuştur. Aynı yıl İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü'nde Makine Mühendisliği Enerji Programında yüksek lisans eğitime başlamıştır. Halen yüksek lisans programına devam etmekte ve Dizayn Teknik Plastik Boru ve Elemanları A.Ş. Araştırma ve Teknoloji Geliştirme Müdürlüğünde Makine Mühendisi olarak çalışmaktadır.