

KIRIKKALE ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

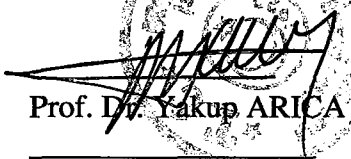
MAKİNA ANABİLİM DALI  
YÜKSEK LİSANS TEZİ

PLASTİK ENJEKSİYON MAKİNALARINDAKİ  
FAZ DÖNÜŞÜMÜNÜN İNCELENMESİ


ZÜHTÜ PEHLİVANLI

AĞUSTOS 2004

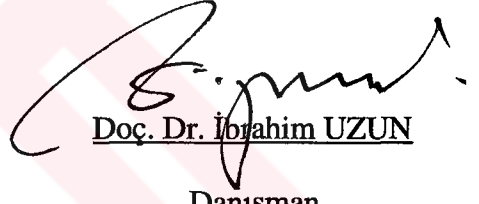
Fen Bilimleri Enstitü Müdürünün onayı.

  
Prof. Dr. Yakup ARICA  
Müdür

Bu tezin Yüksek Lisans tezi olarak Makine Anabilim Dalı standartlarına uygun olduğunu onaylarım.

  
Prof. Dr. Veli Çelik  
Anabilim Dalı Başkanı

Bu tezi okuduğumuzu ve Yüksek Lisans tezi olarak bütün gerekliliklerini yerine getirdiğini onaylarız.

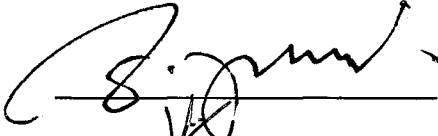
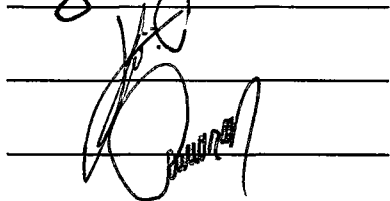
  
Doç. Dr. İbrahim UZUN  
Danışman

Jüri Üyeleri

Doç. Dr. İbrahim UZUN

Yrd. Doç. Dr. M. Hüsnü DİRİKOLU

Yrd. Doç. Dr. Necip CAMUŞCU

## ÖZET

### PLASTİK ENJEKSİYON MAKİNELERİNDEKİ FAZ DÖNÜŞÜMÜNÜN İNCELENMESİ

PEHLİVANLI, Zühtü

Kırıkkale Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

Makine Anabilim Dalı, Yüksek Lisans Tezi

Danışman : Doç. Dr. İbrahim UZUN

Ağustos 2004, 54 sayfa

Bu çalışmada, bir plastik enjeksiyon makinesi içerisinde gerçekleşen faz dönüşüm olayı incelenmiştir. Bir plastik enjeksiyon makinesi modeli üzerinde gerekli tanımlamalar yapılarak, sonlu elemanlar tabanlı bir bilgisayar programı ile plastik malzemenin erime ve katılaşma olaylarının simülasyonu yapılmıştır. Böylece malzemenin erime ve katılaşma olayı görsel olarak incelenmiş ve bu faz geçişleri sırasında sıcaklık, hız, sıvı oranı gibi değişkenlerin değişim grafikleri çıkartılarak sunulmuştur.

**Anahtar Kelimeler :** Faz dönüşümü, plastik malzeme, sonlu elemanlar yöntemi

## ABSTRACT

### THE STUDY OF PHASE CHANGE IN PLASTIC INJECTION MACHINES

PEHLİVANLI, Zühtü

Kırıkkale University

Graduate School Of Natural and Applied Sciences

Department of Machine, M. Sc. Thesis

Supervisor : Associate Professor Dr. İbrahim UZUN

August 2004, 54 pages

In this thesis study, phase change process that is formed in a plastic injection machine is studied. The simulation of melting and solidification process of plastic material is achieved by means of finite element substantial computer programme being made necessary definition over a plastic injection machine model. So melting and solidification process of material is visually studied and they are presented by finding out change graphic of variables such as temperature, velocity, liquid ratio during these phase transitions.

**Key Words :** Phase change, plastic material, finite elements method

## TEŞEKKÜR

Tezimin hazırlanması sırasında emeklerini esirgemeyen, her türlü imkanı veren, değerli hocam Doç. Dr. İbrahim UZUN Bey'e, Makine Mühendisliği Bölümündeki değerli hocalarıma ve yardımlarını esirgemeyen değerli arkadaşlarıma teşekkür ederim.



## SİMGELER DİZİNİ

$\bar{M}$	Molekül Ağırlığı
$M_m$	Monomerin moleküler ağırlığı
$n$	Polimerizasyon derecesi
$a$	Orantı katsayısı
$\tau$	Kayma gerilimi
$\dot{\gamma}$	Kayma hızı
$L$	Uzunluk boyu
$D$	Silindirin çapı
$E$	Isısal hareket enerjisi
$\sigma$	Spesifik serbest enerji
$\alpha$	Isı taşınım katsayısı
$\Delta H$	Entalpi değişimi
$\Delta S$	Entropi değişimi
$\Delta H_m$	Erime entalpisi
$\Delta S_m$	Erime entropisi
$T_m^0$	Erime sıcaklığı
$d_{kr}$	Kristal yoğunluğudur.
$l$	Katlanma büyüklüğü
$T$	Sıcaklık
$T_g$	Camsılaşıma sıcaklığı
$T_m$	Erime sıcaklığı

$T_{\text{kati}}$	Katı sıcaklığı
$T_{\text{sıvı}}$	Sıvı sıcaklığı
$P$	Basınç
$h$	Entalpi
$h_{\text{ref}}$	Referans entalpisi
$c_p$	Sabit basınçtaki özgül ısı
$T_{\text{ref}}$	Referans sıcaklığı
$\beta$	Sıvı oranı
$L_g$	Faz geçiş entalpisi
$\dot{m}$	Kütleli debi
$\rho$	Yoğunluk
$Ste$	Stefan Sayısı
$\theta$	Boyutsuz sıcaklık

#### **KISALTMALAR**

PVC	Polivinil klorür
PE	Polietilen
PS	Polistiren
ABS	Akrilonitril-butadien-stiren
SAN	Stiren-akrilonitril

## ŞEKİLLER DİZİNİ

### ŞEKİL

2.1.	Bir Zincirin Oluşturulması .....	6
2.2.	Karbon Atomlarının Çift Bağ Oluşturması .....	7
2.3.	Karbon Atomlarının Düzenlenmesi .....	8
2.4.	Polietilen Zincirinin Tamamlanmış Gösterimi .....	8
2.5.	Ekstruder .....	17
2.6.	Baskılı Kalıplama .....	19
2.7.	Transfer Kalıplama .....	20
2.8.	Enjeksiyonla Kalıplama .....	21
2.9.	Hacim Değişimi Verilerine Göre Polietilenin Erime Eğrisi .....	30
2.10.	Kristal Kauçuğun Erime Sıcaklığının Sıcaklık İle Değişimi .....	30
3.1.	Kullanılan enjeksiyon modeli .....	36
3.2.	Kararlı durumdaki sıcaklık kontur grafiği (K) .....	37
3.3.	Kararlı durumdaki hız kontur grafiği (m/s) .....	38
3.4.	Kararlı durumdaki sıvı oranının değişim kontur grafiği .....	39
3.5.	Kararlı durumdaki entalpi kontur grafiği (j/kg) .....	40
3.6.	Sıcaklığın zamana bağlı değişim grafikleri.....	41
3.7.	Erime olayının zamana bağlı değişim grafikleri .....	44
4.1.	Hızın kanalı boyunca değişim grafiği .....	47
4.2.	Sıcaklığın kanal boyunca değişim grafiği .....	48
4.3.	Sıvı Oranının kanal boyunca değişim grafiği .....	49
4.4.	Entalpinin kanal boyunca değişim grafiği .....	50



4.5.	Hızın kanal içerisindeki değişim grafiği (m/s) .....	51
4.6.	Kütleli debinin kanal boyunca değişim grafiği (kg/s) .....	51



## ÇİZELGELER DİZİNİ

### ÇİZELGE

2.1.	Termoset Termoplastik ve Çeşitleri .....	10
2.2.	Bazı Polimerlerin Termodinamik Parametreleri .....	32



# İÇİNDEKİLER

ÖZET.....	i
ABSTRACT.....	ii
TEŞEKKÜR.....	iii
SİMGELER DİZİNİ.....	iv
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	vi
ÇİZELGELER DİZİNİ.....	viii
İÇİNDEKİLER.....	ix
1. GİRİŞ.....	1
2. MATERYAL VE YÖNTEM .....	5
2.1. Polimerler.....	5
2.2. Polimerlerin Kimyasal Yapısı.....	5
2.3. Polimerlerin Sınıflandırılması.....	9
2.3.1. Termoplastikler.....	11
2.3.2. Termoset Plastikler.....	11
2.4. Plastiklerin Özellikleri.....	12
2.4.1. Mekanik Özellikler .....	12
2.4.2. Isıl Özellikler.....	14
2.4.3. Elektriksel Özellikler.....	15
2.4.4. Kimyasal Özellikler.....	15
2.5. Plastik İşleme Yöntemleri.....	16
2.5.1. Ekstruzyon .....	16
2.5.2. Kalıplama.....	18
2.5.2.1.Baskılı Kalıplama.....	18

2.5.2.2. Transfer Kalıplama.....	19
2.5.2.3. Enjeksiyonla Kalıplama.....	20
2.5.2.4. Şişirmeyle Kalıplama.....	22
2.5.2.5. Döner Kalıplama.....	23
2.5.3. Kaplama.....	24
2.5.4. Döküm.....	24
2.5.5. Haddelme.....	25
2.6. Plastiklerin Fiziksel Hal Değişimleri.....	25
2.6.1. Giriş.....	25
2.6.2. Faz Geçişleri.....	27
2.6.3. Kristallenme ve Camsı Geçiş.....	27
2.6.4. Kristallenme ve Erime Termodinamiği.....	29
3. ARAŞTIRMA BULGULARI.....	33
3.1. Faz Geçişinde Genel Denklemler.....	33
3.2. Sınır Tabaka Denklemlerinin Boyutsuzlaştırılması.....	34
3.2.1. Süreklilik Denkleminin Boyutsuzlaştırılması.....	34
3.2.2. Enerji Denkleminin Boyutsuzlaştırılması.....	35
3.3. Çalışılan Model ve Sınır Şartları.....	35
3.4. Kullanılan Malzeme ve Özellikleri.....	36
3.5. Yapılan Çözümler.....	37
3.5.1. Zamana Bağlı Sıcaklık Çözümleri.....	40
3.5.2. Zamana Bağlı Faz Dönüşüm Grafikleri.....	43
4. TARTIŞMA VE SONUÇ.....	46
KAYNAKLAR.....	53

## 1. GİRİŞ

Plastik malzemeler özellikle gelişen teknoloji ile birlikte daha çok kullanım alanı bulmuş ve hayatımızın bir çok noktasında vazgeçilmez bir malzeme olarak kullanılmaya başlamıştır. Plastik malzemelerin erimesi ve katılaşması çok çabuk olmaktadır. Plastiklerin aşırı ısıtılması ve beklemesi neticesinde malzemede yanmalar meydana gelir ve malzeme özelliğini kaybeder.

Plastiklerin eritilmesi ve katılaşması kontrol altında tutulması gereken önemli bir özelliktir. Ayrıca katılaşmaları sırasındaki zaman, sıcaklık, basınç, yoğunluk gibi birçok özellik de elde edilmek istenen ürünün özelliklerini etkileyen önemli faktörlerdir

Plastik malzemelerde faz dönüşümü, ürün özelliklerini belirlemede ve takip etme noktasında önem arz etmektedir. Faz dönüşümü özellikle metallerde çok önemli bir konu olması nedeniyle bir çok araştırma yapılmıştır. Plastik malzemelerinde giderek artan bir kullanım alanına sahip olmaları, plastiklerin faz dönüşümlerinin de incelenmesi gerekli olan bir araştırma konusu olduğunu göstermektedir. Malzemelerin faz dönüşümleri, faz dönüşüm modellemeleri, faz geçiş olayının ısı analizleri ile ilgili bir çok çalışma yapılmıştır.

S. Sato, K. Oka, A. Murakami<sup>[1]</sup> laminer akış alanındaki eriyen polimerlerin ısı aktarım hareketini inceleyerek ısı aktarım katsayılarını araştırmıştır. Farklı polimerler için ısı aktarım katsayılarını elde etmiştir.

H. Chen, U. Sundararaj, K. Nandakumar<sup>[2]</sup> polimerlerin erimesi sırasındaki ısı aktarımının deneysel ve simülasyon çalışmalarını yaparak karşılaştırmıştır. Üç

boyutlu simülasyonda çıkan sonuçları, deney için  $\alpha$  'yı (ısı taşınım katsayısı) hesaplamada kullanarak sabit konveksiyon varsayımının uygun olmadığını kanıtlamıştır.

M. E. Ganaoui, A. Lamazouade, P. Bantoux, D. Morvan<sup>[3]</sup> katı sıvı faz değişimi koşulları altındaki sıvı akışının oransal çözümlemesini ve faz değişimi sırasındaki zamana bağlı ısı yayılımını incelemiştir.

R.W.Lewis, K.Ravindran<sup>[4]</sup> metal dökümün sonlu eleman simülasyonu hakkında bir çalışma yapmıştır. Sonlu elemanlar algoritmalarını, kalıp doldurma aşamasından, oluşacak şeklin tahminine kadar tüm döküm işlemine uygulamıştır. Sıvı akışı bulunan ısı iletim denkleminde dayalı katılaşma analizinin yada ısı gerilme analizinin birleşimine özel bir ağırlık vererek hazırladığı çalışmada, sayısal modellerin hacimlerini göstermek için bazı sonuçlar sunmuştur.

S. K. Das<sup>[5]</sup> sürekli döküm işlemi süresince (katılaşma öncesi) katı-sıvı çakışma noktasının profilini belirlemek için birleşme metoduna dayalı sayısal bir çalışma yapmıştır.

Belete Kiflie ve Dr-Ing. Demiss Alemu<sup>[6]</sup> sürekli döküm işleminin termik analizini ele almıştır. Araştırmalarında sürekli döküm işleminin tek ve iki boyutlu ısı aktarım analizleri tartışılmıştır. Çelik profil ve blokların sürekli döküm işleminde iki faz arasındaki geçiş noktalarını bir adım önceden tespit etmek için matematiksel modeller oluşturulmuş ve deneylerle bu matematiksel modelin ne kadar doğru olduğu tespit edilmeye çalışılmıştır. Sonuç olarak ise tasarlanan algoritmanın, belli bir ısıda meydana gelen safha değişikliğindeki hem hareketsiz hem hareket eden katılaşma problemlerinin analizi için kullanılabileceği sonucunu ortaya koymuştur.

A. Fasano<sup>[7]</sup> polimer işlemindeki matematiksel modelini ele alarak ayrıntıdan uzak bir şekilde faz değişimi ve polimerizasyon işlemlerini incelemiştir.

A.E. Huespe, A. Cardona, V. Fachinotti<sup>[8]</sup> sürekli döküm işlemini termomekanik modelini incelemiştir. Bu çalışmalarında eriyik haldeki çelik malzemenin kalıptan geçişi ve katılaşması olayını içeren bir sistem üzerinde çalışmalar yapmışlar ve bu sistemin ısı analizini çıkarmışlar ve incelemiştir.

A. Fic, A.J. Nowak, R. Bialecki<sup>[9]</sup> çelik ve çelik alaşımlarının sürekli döküm prosesindeki ısı transferi analizini yapmıştır. Kalıp ve çelik malzemedan oluşan bir sistemde faz geçiş olayını incelemiş ve malzemenin sıcaklık değişimini grafiksel olarak çıkarmıştır. Ayrıca malzeme ve kalıp arasındaki sıcaklık etkileşiminin ısı analizini yapmıştır.

D.Y. Sheng, Lage Jonsson<sup>[10]</sup> sürekli döküm işleminde yolluktaki sıvı çeliğin ısı özelliklerinin değişmesinin akış üzerindeki ne gibi etkilere yol açtığını incelemiştir. Sonuç olarak sıvı çelik akışının; karışık konveksiyonun bileşimi tarafından kontrol edildiği sonucuna varmıştır.

N. Sombatsompop, D. Choniyom, A.K. Wood<sup>[11]</sup>, erimiş polimerdeki soğuma işlemi sırasında ısı değişimi başlıklı çalışmalarında; soğuma işlemi süresince oluşmuş çeşitli erimiş polimerlerdeki ısının eğimi, farklı bir ısı algılayıcısıyla birleştirilmiş olan bir soğuma ceketi cihazı kullanarak incelemiştir. Isı eğimleri; polimerlerin kristalleşme ısısı, erime ısısı ve polimer ile orta soğuma arasındaki sıcaklık geçişi tarafından etkilenmiş gibi görünüyordu. Sonuçları sonradan, teorik olarak oluşmuş veri ile kıyaslamışlardır ve doğal teorik model, borunun merkezindeki deneysel verileriyle güzel bir kıyaslama oluşturduğunu fakat kesinlik diğer radyal durumlarda daha sınırlı olduğu sonucuna varmışlardır.

T. Demirel<sup>[12]</sup> plastik ekstruderlerinde ki malzeme akışı üzerine bir çalışma yapmıştır. Çalışmasında bir plastik malzemenin plastik ekstruderlerdeki akış modellerini çıkartarak eriyik hale gelen malzemenin akış sırasındaki hareketin incelemiştir. Aynı zamanda çalışmasında malzemeyi ekstrude etmek için gerekli parametrelerin neler olduğunu incelemiş ve bunlar hakkında grafikler ortaya koymuştur.

Belirtilen çalışmalar ışığında bir plastik enjeksiyon makinesindeki faz dönüşüm işleminin ısı analizi sonlu eleman esaslı bir bilgisayar programı kullanılarak yapılmıştır.

Seçilen bir plastik malzemenin bir plastik enjeksiyon makinesi içerisindeki akış hareketi, katıdan sıvıya geçişi ve bu faz dönüşümü sırasındaki ısı değişim olayları sonlu eleman esaslı bir bilgisayar programı kullanılarak modellenmiş ve sınır koşulları tanımlanarak çözümlenmeler yapılmıştır. Tasarlanan model üzerinde yapılan çözümlenmeler ile bir plastik malzemenin faz dönüşüm sırasında oluşan sıcaklık, katı sıvı oranı, hız ve entalpi değerlerinin zamana bağlı akış için çözümlenmeleri yapılarak faz dönüşüm olayı şekillerle ve grafiklerle ortaya konmuştur.



## 2. MATERYAL VE YÖNTEM

### 2.1 Polimerler

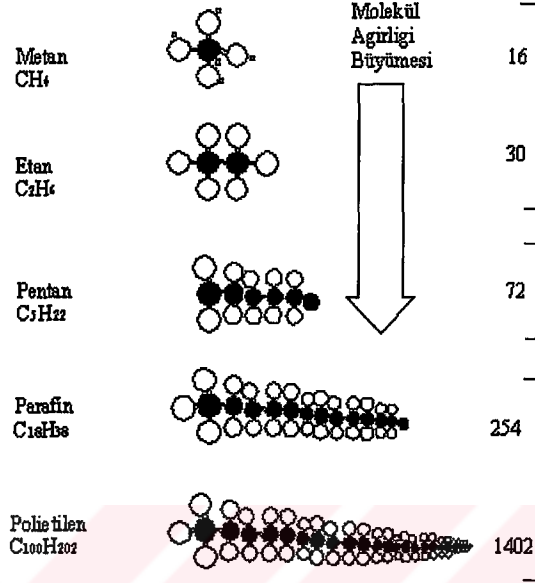
Polimerler, monomer denilen kimyasal ünitelerden meydana gelen, yüksek molekül ağırlığına ve zincir şeklinde bir yapıya sahip sentetik malzemelerdir. Bir monomer polimerizasyon yoluyla başka monomer molekülleri ile birleşerek tekrarlanan ünitelerden oluşan çok uzun zincir şeklinde bir makromolekül meydana getirmektedir. Böylece çeşitli monomerler veya monomer kombinasyonu kullanılarak çeşitli tipte plastikler elde edilmektedir.

### 2.2 Polimerlerin Kimyasal Yapısı

Kimyasal bakımdan plastikler, herhangi bir polimer gibi başka elementlerin atomları ile bağlanmış karbon atomlarından meydana gelmektedir. Plastikleri imal etmek için bilinen 100'den fazla elementlerden 8'i kullanılmaktadır. Bunlar karbon , hidrojen, azot, oksijen, flor, silisyum, kükürt ve klordur. Bu elementlerin çeşitli yöntemlere göre birleşmesi makromolekül adını taşıyan çok büyük ve kompleks moleküller meydana getirmektedir.

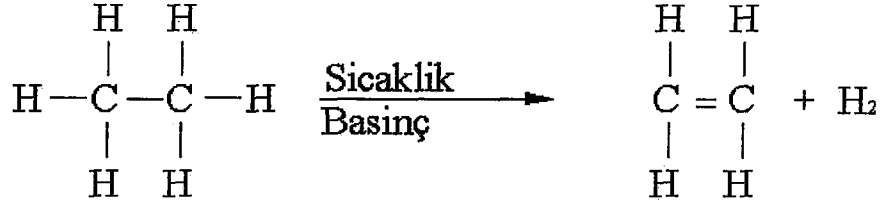
İlke olarak bir plastik malzemenin elde edilmesini açıklamak için, doğal gazın ana bileşeni olan metan ( $CH_4$ ) ele alınsın. Burada karbonun tüm enerji bağlarının doymuş olması nedeniyle bileşik stabil bir bileşiktir. Bu moleküle karbon atomu ve buna ait hidrojen atomu ilave edildikçe daha ağır bir molekül elde edilir. Molekül ağırlığı arttıkça gaz niteliğini kaybeder ve sıvı halini alır. Bu şekilde moleküle  $CH_2$  ilavesine devam edilmesiyle daha ağır sıvılar elde edilir ve belli bir ağırlıkta molekül katı halini alır. Bu yöntemle çok yüksek moleküler ağırlıklı plastikler üretilmektedir.

Şekil 2.1’de molekül ağırlığının büyümesiyle karbon bileşiklerinin gaz halinden katı haline geçişi gösterilmiştir.



Şekil 2.1. Bir zincirin oluşturulması

$CH_2$  grubu kararlı bir bileşik değildir, dolayısıyla kolay bir şekilde ilave edilemezler. Bu nedenle pratikte bu grupların yerine monomer denilen kimyasal bileşikler kullanılır. Bir monomerin elde edilişi şu şekilde açıklanabilir. Örneğin kimyasal formülü ( $CH_3 - CH_3$ ) olan etan molekülü ele alınsın. Bu monomer elektronların yeniden tertiplenmesi ile karbon atomları arasında çift bağ ( $CH_2 = CH_2$ ) oluşur. (Şekil 2.2). Bu şekilde karbon atomunun dört enerji bağı doymuş olur ve etilen monomeri denilen sabit bir ünite elde edilir.



Etan Gaz

Etilen Monomer + Hidrojen

Şekil 2.2. Karbon atomlarının çift bağ oluşturması

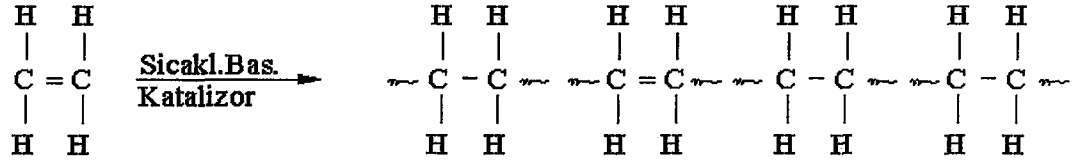
Monomerlerden polimerizasyon yoluyla plastikler elde edilir. İçerisinde belirli katalizörlerinde bulunduğu bir reaktöre konan polimerler basınç ve sıcaklığın etkisi altında tutulurlar. Bu ortamda karbon atomlarının çift bağları yine karbon atomlarının her iki tarafında birer serbest bağ oluşturmakla karbon atomları arasındaki çift bağ tek bağa dönüşür (Şekil 2.3). Serbest bağlar başka monomerlerin serbest bağları ile bağlanır ve zincir şeklinde kararlı bir bileşik meydana gelir. Monomerlerin devamlı olarak bağlanması ile zincir büyür ve serbest uçlar hidrojen atomlarına rastlayınca reaksiyon durur ve zincir tamamlanır (Şekil 2.4), bu zincir esasen tek bir moleküldür. Bu şekilde monomerlerden polimerizasyon yoluyla elde edilen malzemelere polimer denilir. Polimer zincirini oluşturan monomerlerin sayısı büyük önem taşımaktadır. Polimerizasyon derecesi olarak bilinen bu sayı  $DP = n$  ile ifade edilirse, polimerin kimyasal formülü, örneğin etilen monomerlerinden ( $\text{CH}_2 = \text{CH}_2$ ) elde edilen polietilen



ve zincir molekülünün ağırlığı

$$\bar{M} = nM_n = DP \times M_m \quad (2.2)$$

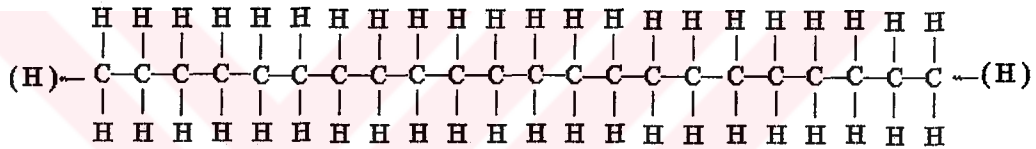
şeklinde yazılır; burada  $M_m$  monomerin moleküler ağırlığıdır. Polimerin molekül ağırlığı aynı zamanda polimer zincirinin uzunluğunu da ifade etmektedir.



Etilen Monomer

Çift bağın yeniden tertiplenmesi

Şekil 2.3. Karbon atomlarının düzenlenmesi



Polietilen Monomer

Şekil 2.4. Polietilen zincirinin tamamlanmış gösterimi

Polimerizasyon sırasında birbirinden bağımsız olan milyonlarca polimer zinciri mevcut polimerler bitinceye kadar aynı anda uzunluğu doğrultusunda büyür. Zincirin uzunluğu plastik malzemenin özelliklerini ve teknolojisinin önemli ölçüde etkiler. Zincir uzunluğunun büyümesiyle plastiğin tokluğu, sürtünme mukavemeti, ergime sıcaklığı, ergime viskozitesi büyür ancak teknoloji daha zordur. Plastiği oluşturan tüm zincirler aynı uzunlukta imal edilemez. Dolayısıyla polimerin molekül ağırlığı esasen tüm zincirlerin ortalama molekül ağırlığıdır. Ancak aynı molekül ağırlığında zincirlerin uzunluk farklarına bağlı olarak daha dar veya daha geniş bir istatistik dağılım karşı gelebilir. Dar bir dağılım çok daha düzgün özellikler verir, ancak geniş bir dağılıma sahip olan polimerlerin teknolojisi daha kolaydır.<sup>[18]</sup>

## 2.3 Polimerlerin Sınıflandırılması

Polimerler kimyasal özelliklerine, fiziksel özelliklerine, yapılarına, kullanım alanlarına ve işleme yöntemlerine göre çeşitli gruplara ayrılırlar. Bu sınıflandırma aşağıdaki gibidir;

### 1- Kimyasal Esasa Göre

- a) Organik
- b) İnorganik

### 2- Yapı Esas Göre

- a) Homopolimer
- b) Kopolimer

### c) Terpolimer

### 3- İşleme Esasa Göre

- a) Termoplastik
- b) Termoset

### 4- Kullanma Alanına Göre

- a) Plastikler
- b) Fiberler
- c) Kaplamalar
- d) Yapıştırıcılar

### 5- Fiziksel Esasa Göre

- a) Amorf
- b) Kristalin
- c) Kısmi kristalin

Polimerlerin sınıflandırılmasında en çok kullanılan esas işleme yöntemlerine göre yapılan sınıflandırmadır. Buna göre polimerler;

1- Termoplastikler

2- Termosetler

olmak üzere iki ana gruba ayrılırlar. Termoplastik ve termoset plastik çeşitleri

Çizelge 2.1'de görülmektedir ;

<b><u>Termoplastikler</u></b>	<b><u>Termosetler</u></b>
Asetal	Alkitler
Akrilik	Alil
Floroplastikler	Aminoplaslar
Poliamidler	Fenolikler
Poliäten	Epoksiler
Polipropilen	Dialiftalat
Polistiren	Poliester
Polikarbonat	Melamin
Polifenilen eter	Poliüretan
Polifenilen sülfid	
Poliimidler	
Polisülfon	
Polivinil klorür	
Selülozikler	

Çizelge 2.1. Termoset ve Termoplastik Çeşitleri

### **2.3.1 Termoplastikler**

Isı ve basıncın etkisi altında yumuşayan, akan, bu durum altında herhangi bir şekil alabilen ve soğutuldukları zaman aldıkları şekli koruyan plastiklerdir. Termoplastikler bu şekillendirme sırasında hiçbir kimyasal değişikliğe uğramazlar. Ayrıca tekrar ısıtıldıklarında tekrar yumuşayabilen ve soğutulduklarında tekrar sertleşebilen malzemelerdir. Bunun yanında uygun çözücüler vasıtasıyla çözünebilirler ve bu şekilde kalıplanarak çeşitli şekiller alabilirler. Termoplastikler grubunu oluşturan en önemli plastikler akrilikler, naylon, polistiren, polietilen, selülozikler ve vinillerdir.

Mühendislik uygulamalarında en çok kullanılan termoplastikler ise polietilen, polipropilen ve polivinil klorür (PVC) dir. Bu plastikler genellikle elektriksel ve kimyasal özellikleri kullanım açısından uygun, sürtünme katsayıları düşük ve kolay işlenebilen plastikleridir.

### **2.3.2 Termoset Plastikler**

Isı işlemiyle yalnız bir defa şekil alabilen plastiklerdir, tekrar ısıtılmakla şekillendirilemezler. Isı ve basınç muamelesinden sonra katı, sert ve plastik olmayan bir madde elde edilir. Ayrıca bu plastikler çözünmezler. Termosetler polikondensasyon reaksiyonu ile elde edilirler ve genellikle çapraz bağlı bir yapıya sahiptirler. Termosetlerde polimerizasyon işlemi, malzemeyi ihtiva eden monomerlerin bir araya getirdiği reaktörlerde başlar ve kalıplama işlemi sırasında biter.

## 2.4 Plastiklerin Özellikleri

### 2.4.1 Mekanik Özellikler

Polimerik malzemeler, yapılarına işleme tekniklerine ve kullanıldıkları çevre koşullarına göre değişen mekanik özellikler gösterirler. Polimerik bir malzemede beklenenlerin başında, kullanılacağı yere göre belli sertlik ve sağlamlık olması ve mekanik özelliklerini istenilen süre koruyabilmesi gelir. Polimerlerin mekanik özelliklerini belirtmek üzere çeşitli parametreler tanımlanmış ve bu parametrelerin ölçüldüğü testler geliştirilmiştir.

Genel olarak polimerik malzemenin mekanik özellikleri deyince, dış kuvvetlerin etkisiyle ortaya çıkan, uzama, akma, kopma vb gibi deformasyonlar akla gelir. Polimerik malzemelerin en önemli özelliği bu deformasyonların sıcaklık ve zamana bağımlılığıdır. Dört ana değişken, kuvvet – deformasyon - sıcaklık - zaman arasındaki ilişkiler son derece karmaşıktır. Burada polimerlerin mekanik özelliklerinin tanımlanması için bu dört ana değişken arasındaki ilişkiler çok basitleştirilmiş bir şekilde sunulmuştur.

**Elastik Deformasyon :** Bir malzemeye bir dış kuvvet uygulandığı zaman malzemenin şekil ve boyut değiştirerek cevap verir. Eğer uygulanan kuvvet kaldırıldığında malzeme ilk haline dönüyorsa bu deformasyon “ideal elastik deformasyon” olarak tanımlanır. Bu deformasyon, moleküler düzeyde bir molekülün atomları arasındaki bağların gerilmesi ve bağ açılarının değişmesi sonucu görülen bir deformasyondur.

Bir malzemenin geometrik durumundaki değişme “gerinim”, malzeme içinde, dış kuvvetleri dengelemek için oluşan tepkide “gerilim” olarak adlandırılır.



Viskoz Deformasyon : Viskoz (tersinmez) deformasyon akış halini ifade eder. Burada uygulanan kuvvetin etkisi ile yapıdaki moleküller birbiri üzerinden kayarak tersinmez olarak yer değiştirirler, akarlar. İdeal viskoz deformasyon, Newtonsu akışkanların akışı için kullanılan Newton'un 1.Kanunu ile ifade edilebilir. Buna göre, kayma gerilimi kayma hızı ile aşağıda verildiği gibi doğru orantılıdır.

$$\tau = a \times \dot{\gamma} \quad (2.3)$$

Burada orantı katsayısı (sabit) akışa direnci, başka bir ifade ile akmazlığı gösteren viskozitedir.

Gevşeme ve Sürünme : Daha öncede söz edildiği gibi polimerik malzemelerin mekanik özellikleri zamana bağımlı olarak değişir. Gerilim – gerinim eğrilerinden malzemelerin sertlik ve sağlamlığının zamanla değişimi belirlenemez. Zamana bağlı davranışın incelenmesi için gevşeme ve sürünme testleri uygulanır.

Yorulma : Tüm materyallerde olduğu gibi polimerlerden üretilen malzemeler, fabrikasyon işlemi nedeniyle yapı içinde hatalar içerirler. Bu malzemeler salınımlar halinde değişen gerilim veya gerinim altında kalınca, mikroskobik hatalardan başlayan deformasyon zamanla büyüyüp yayılır ve sonunda malzeme yorulur, kopar. Bu tür yorulma “çatlak yürümesi” olarak adlandırılır. Metallerde yorulma genellikle bu türdür.

Polimerik malzemelerde çatlak yürümesi yanı sıra “ısııl yorulma” da önemli bir yorulma şeklidir. Polimerik malzemelerdeki bu fark viskoelastik olmalarından kaynaklanır.

## 2.4.2 Isıl Özellikler

**Isıl İletkenlik :** Polimerlerin ısı özelliklerinin en önemlisi ısı iletkenlikleridir. Polimerlerin ısı iletkenlikleri metallerinkinin yaklaşık yüzde biri civarındadırlar. Polimerlerin ısı iletkenliklerinin düşük olması kullanım sırasında oluşacak termal yüklemeler nedeniyle ısı yorulmalar oluşur. Isı yorulmaların azaltılması amacıyla ısı iletimini artırıcı katkı maddeleri ilave edilir. Bu katkı maddeleri genellikle alüminyum, bakır gibi metal tozları veya çeşitli fiberlerdir. Bu yöntemle polimerlerin ısı iletkenlik değerleri 10 kat veya daha fazla arttırılabilmektedir.

**Isıl Genleşme Katsayısı :** Polimerleri diğer malzemelerden ayıran bir başka özelliğe ısı genleşme değeridir. Bu değer polimer malzemelerin işlenmesinde problem teşkil eden bir değerdir. Metallerle oranla çok büyüktür ve  $2 - 20 \times 10^{-5} \text{ C}^{-1}$  arasında değişmektedir. Isı genleşme değerinin yüksek oluşu özellikle kalıp üretiminde çekme nedeniyle ciddi sorunlara yol açar bunun ısı genleşme katsayılarının yüksek oluşundan sıcak geçme gibi bazı uygulamalarda faydalanılmaktadır.

Polimerlerin ısı genleşme değerleri yapılarına inorganik dolgu maddeleri ilave edilerek önemli oranda azaltılmaktadır. Polimerin kristallik yüzdesinin ve çapraz bağ yoğunluğunun artmasıyla ısı genleşme katsayısı azalır.

**Isıl Direnç :** Polimerik malzemelerin ısı dirençleri, emniyetle, uzun süre kullanılacakları sıcaklıkla ifade edilebilir. Birçok polimerik malzeme, özellikle yüksek sıcaklıklarda ısı olarak yaşlanırlar, başka bir ifadeyle hem fiziksel görünüşlerini kaybederler, hem de mekanik dayanıklılıkları önemli oranda düşer.

Isıl Kapasitesi : Polimerlerin ısı kapasiteleri, genellikle  $0,4 \pm 0,1 \text{ cal / g. } ^\circ\text{C}$  civarındadır. Polimerlerin ısı kapasiteleri, bileşenlerin ısı kapasitelerinden hesaplanır. Isı kapasitesi ısı genleşme katsayısı gibi, polimerlerin ısı geçiş bölgelerinde farklı değerlerdedir.<sup>[19]</sup>

### 2.4.3 Elektriksel Özellikler

Hemen hemen tüm yüksek moleküler ağırlıklı polimerler elektriksel yalıtım özelliğine sahiptirler, başka bir ifadeyle dielektriktirler. Bu özellikleri nedeniyle elektrik ve elektronik endüstrisinde yaygın olarak kullanılırlar.

Polimerlerin elektriksel iletkenliklerini belirtmek üzere “hacim elektrik direnç” terimi kullanılır ki bu, 1 cm kalınlığında  $1 \text{ cm}^2$  yüzey alanında bir malzemenin ohm olarak direncini ifade eder. Polimerlerin elektrik dirençleri  $10^{12}$  ile  $10^{18}$  arasında değişir. Genellikle bu değerler polimerlerin camsı geçiş sıcaklığının altında, camsı durumdayken gösterdikleri direnç değerleridir. Sıcaklığın artmasıyla elektriksel iletkenlik üstel bir şekilde artar. Camsı geçiş sıcaklığının üzerinde, polimerik zincirler önemli bir hareketlilik kazanır. Dolayısıyla, serbest iyonlar bu yapı içerisinde çok daha kolaylıkla iletilebilirler, başka bir ifadeyle kauçuğumsu bölgede düşük elektrik direnci gözlenir.

### 2.4.4 Kimyasal Özellikler

Polimerlerin kimyasal ataklara karşı duyarlılıkları metallere oranla daha azdır. Örneğin demir paslanır, alüminyum atmosferik korozyona uğrar ancak nem polimerler üzerinde herhangi bir etki oluşturmazlar. Polimerler zayıf asit ve tuzların

sulu çözeltilerinden etkilenmezler ve bu nedenle bazı polimerik malzemeler asit depolama kabı imalatında kullanılırlar.

Kimyasal çevre tek başına polimerlerde bir bozunma yapamaz ancak gerilmenin etkisi ile birlikte meydana gelirse bozunma oluşabilir. Örneğin gerilme ve bükülmeler malzeme yüzeyinde çatlaklar oluşturabilir ve bu çatlak içine sızan kimyasal madde etkisini göstererek bozunma başlatır.

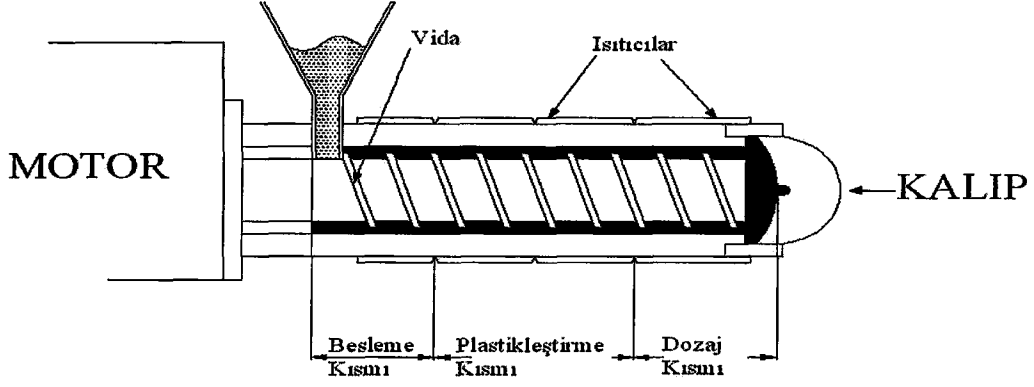
Polimerlerin kimyasal dirençlerinin belirlenmesinde kimyasal ajanın cinsi, konsantrasyonu, polimerik malzemenin yapısı, sıcaklık, yüzey pürüzlülüğü ve gerilmelerin etkisi göz önünde bulundurulması gerekli noktalardır. Uzun süreli sürünme testleri ile kimyasal dirençleri belirlenmeye çalışılır.

## **2.5. Plastik İşleme Yöntemleri**

### **2.5.1. Ekstrüzyon**

Ekstrüzyon işlemi eritilmiş polimer malzemenin dar bir kesitten basınçla geçirilerek şekillendirilme işlemidir. Ekstrüzyon işlemi bir diş macununun sıkılması olayına benzetilebilir. Ekstrüzyon, ekstruder denilen makinelerde yapılır. Ekstruder makineleri bir silindir ve bu silindir içerisinde dönen vidadan ibarettir. Ekstruder çeşidine göre vida tek veya daha fazla olabilir. Şekil 2.5' de görüldüğü gibi silindirin bir ucunda bir huni bulunur ve bu huni vasıtasıyla piston içerisine katı parçacıklar halindeki polimerler atılır. Polimer malzeme vida vasıtasıyla pistonun diğer ucuna doğru ilerlemeye başlar ve bu sırada silindir etrafındaki ısıtıcılar vasıtasıyla eriyik halini almaya başlar ve son olarak silindirin dar ucundan kalıba basılarak istenilen

şekil verilmiş olur. Kalıbın şeklini alan malzeme daha sonra kalıptan çıkartılarak su veya havayla soğutulur.



Şekil 2.5. Ekstruder

Ekstruder silindirin çapı ekstruderin kapasitesini belirleyen bir özelliktir. Ayrıca silindirin boy/çap ( $L/D$ ) oranı da üretim kapasitesine ve işlenecek polimer göz önüne alınarak seçilmesi gereken bir değerdir. Termoplastiklerin işlenmesinde genellikle,  $L/D$  oranı 20/1–24/1 olan ekstruderler kullanılmaktadır.

Ekstruderler Şekil 2.5 'de görüldüğü gibi üç bölgeye ayrılırlar. a ) huni içerisine konan malzemeyi silindir içerisine alarak ileri doğru süren besleme bölgesi, b) silindir cidarlarına temasla erimenin olduğu plastikleştirme bölgesi, c) eriyen polimerin başlığa basıldığı dozaj bölgesidir.

Besleme bölgesi polimeri vida vasıtasıyla silindir içerisinde ileri doğru sürerken polimerin basıncının da bir miktar artmasını sağlar.

Sıkıştırma bölgesi eriyiğin oluştuğu bölgedir. Silindir içerisinde ilerleyen polimer vida çapının da artmasıyla basıncı artar ve cidara sürtünmeyle eriyik halini alır. Ayrıca malzemenin bu bölgeden geçişi sırasında içerisinde bulunan hava geriye doğru itilerek dışarı atılır.

nc ve son bölge olan dozaj bölgesinde erimiş polimer başlığa doğru basılır ve bu esnada eriyik akışındaki düzensizlikler varsa düzeltilir ve eriyiğin sabit bir hız ve basınçta kalıba basılması sağlanır. Bu bölgede, eriyik içerisindeki gazların atmosfere atılması için bir tahliye hattı bulunur.

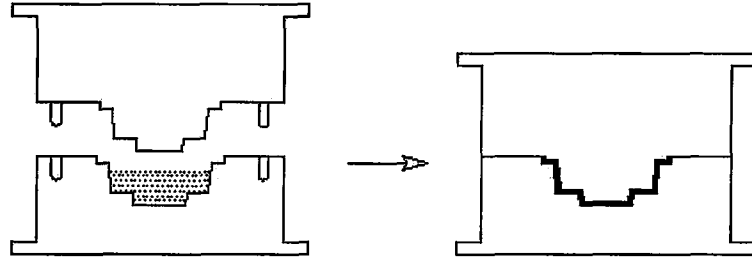
## **2.5.2 Kalıplama**

Hemen hemen tüm kalıplama işlemlerinde polimer, basınç ve ısı yardımı ile istenilen şekilde hazırlanmış kalıba aktarılır. Boyut kararlılığının sağlanması için polimerlerin türüne göre soğutma veya ısıtma uygulanır. Termoplastikler de  $T_g$  veya  $T_m$ 'nin altına düşmek üzere soğutma yapılırken, termosetlerde yeterli çapraz bağ oluşumunu sağlamak için ısıtmaya devam edilir. Çok çeşitli kalıplama yöntemi vardır. Bunlardan çok yaygın olarak kullanılan bazıları aşağıda zet biçimde tanıtılmıştır.

### **2.5.2.1 Baskılı Kalıplama**

Bu türde, polimer malzeme katı halde, yeterli miktarda kalıp boşluğuna konur, kalıp kapatılır, ısı ve basıncın etkisiyle malzemenin kalıbın şeklini alması sağlanır (şekil 2.6). Bu yöntem genellikle termosetlerin kalıplamasında kullanılır.

130-200 °C sıcaklık ve 7-70 Mpa basınçta çalışılır. Polimerizasyon süresi 3-20 dakikadır. Baskılı kalıplama, basit ve ucuz bir yöntemdir. Ancak küçük ayrıntılar içeren, karmaşık ve çok ağır parçaların üretimi için uygun değildir. <sup>[19]</sup>

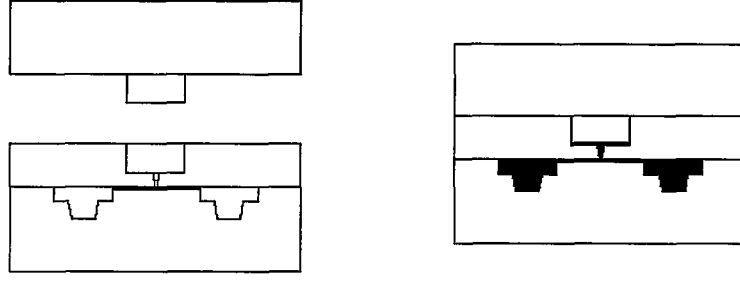


Şekil 2.6. Baskılı Kalıplama

### 2.5.2.2 Transfer Kalıplama

Transfer kalıplama baskılı kalıplamaya benzemektedir. Burada kullanılan yöntem; bir pota içerisinde hazırlanan eriyik plastiğin üzerine basınç yapılarak bağlantı delikleri vasıtasıyla tekli veya çoklu halde hazırlanmış olan kalıplara enjekte edilir (Şekil 2.7). Daha sonra ürün soğutularak kalıptan çıkartılır.

Transfer kalıplamada çoklu kalıpların kullanılması nedeniyle hızlı bir şekilde üretim yapılabilmektedir. Transfer kalıplamayla daha çok ince parçalar üretilmektedir.



Şekil 2.7 Transfer Kalıplama

### 2.5.2.3 Enjeksiyonla Kalıplama

Enjeksiyon kalıplama yöntemiyle hemen hemen her tür parça üretilebilmekte olup genellikle termoplastiklerin üretiminde kullanılırlar.

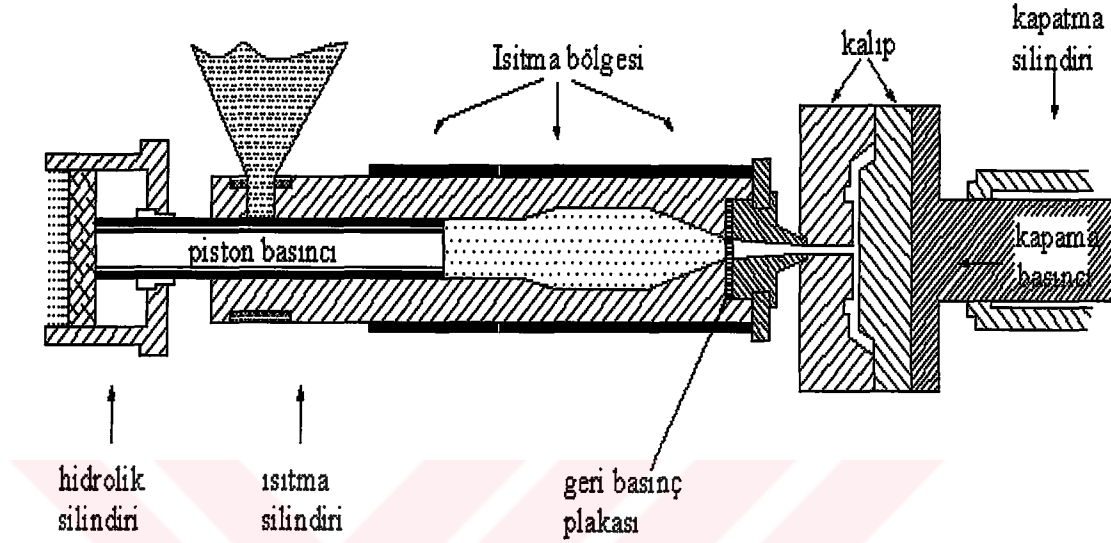
Enjeksiyonla kalıplama tekniği ekstrudere benzemektedir. Aralarındaki fark ekstruderdeki başlık yerine kalıbın bulunmasıdır. Ayrıca silindir içerisinde polimerin hareketini sağlayan sistem piston da olabilmektedir.

Enjeksiyonla kalıplama işleminde ilk olarak toz veya granül haldeki polimer madde enjeksiyon kalıplama makinesinde ilerlerken aynı zamanda eritilir ve viskoz sıvı haline gelen polimer istenilen şeklin verilmesi için kalıplanır daha sonra soğutma yapılarak kalıp içindeki ürün soğutulur ve kalıptan çıkartılır.

Enjeksiyon kalıplama makineleri enjeksiyon ve kapatma olmak üzere iki ayrı sistemden oluşurlar. (Şekil 2.8). Kapatma sistemi kalıbı bağlama, kalıbı açıp kapatma ve erimiş polimeri kalıba enjekte eden sistemleri kapsamaktadır. Kalıp yüzeylerinin tam olarak birbirine yapışması ürün kalitesini etkileyen önemli bir özelliğidir. Tam



olarak kapanma sağlanmadığı zaman kalıp arasında kalan boşlukta malzeme taşarak ürünün bozuk veya çapaklı olmasına yol açacaktır.



Şekil 2.8 Enjeksiyonla Kalıplama

Enjeksiyonla kalıplamada elde edilen üründе çekme ( büzülme ) ve yönelme istenmeyen özelliklerdir. Kristalin polimerlerde çekme % 1 – 4, amorf polimerlerde ise % 0,3 – 0,7 arasındadır. Özellikle kristalin polimerlerde basınç artınca çekme az olur. Çekmenin azalması için kalıp bir yandan soğutulurken bir yandan da basınç altında tutulur. Bu süre genellikle 15 – 20 saniyedir. Kalıp sıcaklığı yüksek olursa donma yavaş, kristallik oranı yüksek ve çekme yavaş olur. Ürünün et kalınlığı ile yüzde çekme artar. Eğer hızlı soğutma yapılsaydı, çıkan malzemede kristallenme yavaşta olsa devam eder ve ürünün zamanla büzüldüğü gözlenir (ikincil çekme ).

Yüksek enjeksiyon basıncı, polimer eriyiğinin veya kalıplama sıcaklığının yükseltilmesi, soğutma hızının yüksek olması polimerik üründе yönelmeyi artıran

faktörlerdir. Yönelme genellikle çekmeyi artırır. Malzeme yönelme yönünde daha sağlam fakat dik yönde daha zayıf olur.

Püskürtme basıncı ve hızının yüksek olması da üründe iç gerilmelere neden olur. Bu da, yönelme ile birlikte çatlamlar ve bükülmelere yol açar. Günümüzde PE, PS, ABS, SAN, Naylon başta olmak üzere birçok polimer bu yöntemle işlenmekte ve çok çeşitli ürün elde edilmektedir.

Termosetlerin enjeksiyonla kalıplaması termoplastikler den farklıdır. Burada, enjektör silindrinde eritilen polimer prepolimer şeklindedir. Bu, tamamen polimerleşmemiş eriyik yaklaşık 140 Mpa basınçta kalıba enjekte edilir. Kalıbın yaklaşık %90 'ı doldurulur. Doldurma süresi ürün ağırlığına bağlı olarak 1 – 10 saniye arasında değişir. Bundan sonra basınç 70 Mpa veya daha düşük değerlere indirilir. Kalıp bu ikinci basınçta 10-15 saniye tutulur. Termoplastiklerin işlenmesinden farklı olarak, kalıp genellikle elektrikli ısıtıcılarla ısıtılmaktadır. Kalıp sıcaklığı yaklaşık 150-200 °C 'dır. Bu sıcaklıkta, kalıp içerisinde polimerizasyon devam eder ve polimer, çapraz bağlı sonuç ürün (termoset) haline dönüşür. Termosetlerde dikkat edilmesi gerekli en önemli husus, erimiş polimerlerin silindirde, kalıp yollarında ve diğer kalıp dışı bölgelerde sertleşmenin önlenmesidir.<sup>[19]</sup>

#### **2.5.2.4 Şişirmeyle Kalıplama**

Bu yöntem içi boş ve ağız kısmı olan plastik ürünlerin üretiminde kullanılmaktadır. Bu yöntemde şişirme için kullanılan gaz hava olabileceği gibi diğer

gazlarda olabilir. Ancak ucuz olmaları nedeniyle genellikle hava ve azot kullanılır. Bu metotla kalıplama üç şekilde uygulanmaktadır.

**Ekstrüzyon – şişirmeyle kalıplama :** Bu teknikte parison adı verilen bir boru yardımıyla erimiş plastik bir tüp oluşturulur(bu eriyiğe parison da denir), bu erimiş plastik tüp genellikle alüminyumdan yapılan bir kalıp içerisine konur ve eriyik plastik içerisine gaz basılarak eriyiğe kalıbın şekli verilir. Kalıp soğutucu sıvı vasıtasıyla soğularak kalıptan çıkartılır ve ürün elde edilmiş olur.

**Enjeksiyon – şişirmeyle kalıplama :** Bu yöntemde parison bir çelik çubuk etrafında oluşturulur daha sonra kalıba konularak tekrar ısıtılır ve çubuk içerisinden hava üflenerek şişirilir ve kalıbın şeklini alması sağlanır daha sonra soğutularak kalıptan çıkartılır.

**Gerilim – şişirme ile kalıplama :** Birçok ürünün ambalajlanması amacıyla plastik şişe ve bidon yapımında kullanılan yöntemdir. Enjeksiyon veya ekstrüzyon yöntemiyle hazırlanan parison şişirilirken hem aksenel hem de radyal yönde hareket sağlanır. Bu hareket düşük gaz geçirgenliğine ve çarpma drencinin yüksek olmasına yol açar.

#### **2.5.2.5 Döner Kalıplama**

Büyük ve basit ürünlerin yapılmasında kullanılan bir yöntemdir. Burada içi boş ve iki parçaya ayrılan bir kalıp kullanılır. Bu kalıp içerisine eriyik veya katı haldeki plastik konularak kalıp iki ekseninde döndürülür ve böylece eriyen plastiğin eşit cidar kalınlığı oluşturularak kalıp cidarına yapışması sağlanır. Daha sonra kalıp döner vaziyette soğutulur ve ürün kalıptan çıkartılır.

### 2.5.3 Kaplama

Kaplama, metallere polimerlere kadar bir çok malzemenin koruma, estetik vb. nedenlerle yüzeylerinde, polimer malzemenin bir film tabakası oluşturulması işlemidir.

Kaplanacak malzemenin türüne, hassasiyetine, kullanılan kaplama malzemesine göre seçilen çok farklı kaplama yöntemleri vardır. Örneğin metal malzemelerin yüzeylerine koruyucu film tabakası oluşturulması ve metallerin dekoratif hale getirilmesi için eriyik kaplama, akışkan yatakta kaplama ve elektrostatik püskürtmeyle kaplama yöntemleri kullanılır.

Monomer, prepolimer veya polimer malzemenin yüzeyi kimyasal reaksiyonlarla sağlam ve polimerik kaplama yapılır.

### 2.5.4 Döküm

Polimerlerde döküm işlemi monomer döküm, polimer döküm ve çözücü döküm olarak adlandırılan üç farklı yöntemle gerçekleştirilir. Monomer döküm de; monomere polimerizasyonu başlatıcılar, katkı maddeleri ilave polimer ilave edilerek döküm şurubu hazırlanır. Bu şurup daha sonra hazırlanmış olan kalıba doldurulur ve polimerleşmenin sağlanması için gerekli olan sıcaklık ve sürede bekletilerek polimerleşme sağlanır. Soğutma sağlandıktan sonra ürün kalıptan çıkartılır.

Polimerik döküm tekniğinde viskoz çözeltisi hazırlanan polimer film şeklinde çekilir. Film içerisindeki çözücü madde buharlaştırılarak katı polimerik film elde edilir.

Çözücü döküm tekniği polimerik film hazırlanmasında kullanılan bir diğer tekniktir. Bu yöntemde ise film içerisindeki çözücülerin çöktürülerek polimer filmin sertleştirilmesi sağlanır.

### **2.5.5. Haddeleme**

Haddeleme, plastik malzemelerden film veya levha şeklinde ürünler elde edilmesinde kullanılan bir yöntemdir. Haddeleme silindirleri ve eriyik hunisinden oluşan karmaşık olmayan bir şekle sahiptir. Erimiş haldeki plastik uygun halde yerleştirilmiş olan silindirler arasında geçirilerek film veya levha şekline getirilir.

Bu yöntemle üretilen ürünlere örnek olarak yağmurluklar, masa örtüleri, kredi kartları, tepsiler vb. örnekler verilebilir.

## **2.6. Plastiklerin Fiziksel Hal Değişimleri**

### **2.6.1. Giriş**

Polimerlerde meydana gelen birçok teknolojik ve fizikokimyasal prosesleri anlayabilmek için, polimerlerin bulunduğu fiziksel hallerinin ve özelliklerinin iyi bilinmesi gerekir. Polimerlerin fiziksel halleri ve onlarda meydana gelen değişmeler hakkında gerekli bilgilere sahip olmak polimerlerin işlenmesi bakımından da çok önemlidir. Bu konudaki görüşler küçük molekülü maddeler için geliştirilen faz halleri hakkındaki genel fikirlere ve polimerlerin yapısı hakkındaki deneysel verilere dayanır.

Her şeyden önce bir maddenin faz hali ile fiziksel hali arasında bir fark vardır. Ortamın basınç ve sıcaklığına bağlı olarak madde gaz, sıvı ve katı olmak

üzere üç halde bulunabilir. Bu hallerin her birinde bulunan maddenin molekül veya atomlarının istifleme şekli, hareket şekli ve moleküller arası etkileşimler birbirinden farklıdır. Bu kriterle bakımından gaz ve katı halleri iki uç noktayı temsil eder. Maddenin gaz hali en seyrek istiflemenin olduğu, en serbest hareket olan ve moleküller arası kuvvetlerin minimum olduğu bir fiziksel hal iken, katı hali en sık istiflemenin olduğu, en sınırlı hareket olan ve moleküller arası kuvvetlerin maksimum olduğu bir fiziksel haldir.

Sıvı hal gaz ve katı halin arasındadır. Sıvılar hareket türleri bakımından gazlara, istifleme yoğunluğu bakımından da katılara yakındır. Sahip oldukları hareketlilik sayesinde sıvı molekülleri kolayca hareket eder ve onların ağırlık merkezlerinin konumları ile sürekli olarak değişir. Bu nedenle sıvılar kolayca şekil değiştirirler ve küçük bir basıncın etkisiyle bile akarlar.

Maddenin faz hali hakkında açık bir fikir elde edebilmek için, faz kavramını göz önüne almak gerekir. Faz terimi küçük moleküllu maddeler için yapısal ve termodinamik olarak tanımlanabilir. Termodinamikte, faz bir ara yüzeyle diğer parçalardan ayrılan ve termodinamik özellikleri onlardan farklı olan bir sistem parçası olarak tanımlanır. Bir faz yeteri büyüklükte basınç, sıcaklık ve ona anlam katacak diğer termodinamik özelliklere sahip olmalıdır. Fazlar diğer fazlardan ayrılabilir olmalıdır. Yapısal bakımdan fazlardaki moleküllerin karşılıklı sıralanma düzeni birbirinden farklıdır. Bu düzene bağlı olarak kristalin, sıvı ve gaz fazları arasında farklılıklar vardır. <sup>[20]</sup>

### 2.6.2. Faz Geçişleri

Faz geçişleri bir fazdan diğerine olan geçişlerdir. Diğer bir değişle, moleküllerin karşılıklı düzeninde ve maddenin termodinamik özelliklerinde bir değişme meydana getiren geçişlerdir. Faz geçişleri birinci dereceden ve ikinci dereceden olabilir.

Birinci dereceden faz geçişleri iç enerji ve spesifik hacim değişiminde kesinlikler olan geçişlerdir. Bu geçişler ısı oluşmasını veya soğurulmasını gerektiren geçişlerdir. Bunlar, erime, buharlaşma, süblimleşme ve bir kristal halin diğerine dönüşmesini kapsar. Denge, fazların molar ve spesifik termodinamik potansiyelleri eşittir. Bu nedenle, birinci dereceden geçişler sırasında termodinamik potansiyel sürekli bir şekilde değişir.

İkinci dereceden faz geçişi iç enerjinin ve spesifik hacmin düzgün bir şekilde değiştiği geçişlerdir. Bu geçişte ısı çıkmaz veya soğurulmaz fakat iç enerjinin ve hacmin birinci türevleri yani ısı kapasitesi  $(\partial H/\partial T)_v$  ve bastırılabilirlik  $(\partial V/\partial P)_T$  geçiş noktasında sıçrama şeklinde değişir. <sup>[20]</sup>

### 2.6.3. Kristallenme ve Camsı Geçiş

Katılar kristalin ve amorf halde bulunabildikleri için, dengedeki sıvı halden katı hale yani kristalin ve camsı hale geçiş için doğal olarak iki olası yol vardır.

Kristallenme kısa mesafeli bir diziliş halinden uzun mesafeli bir diziliş haline geçiştir. Kristallenme bir faz oluşum prosesidir. Bu yüzden birinci dereceden bir faz geçişidir.

Camsı geçiş hiçbir faz değişimi olmadan yani kısa mesafeli diziliş korunarak hareketli sıvının katı hale geçişidir. Bu nedenle, camsı geçiş bir faz değişimi değildir.

Kristallenme, erime ve donma noktası denilen ve kristal halin altında dengede bulunduğu belli bir sıcaklıkta olur. Çünkü, kristalin termodinamik potansiyeli sıvınınkinden daha küktür.

Bununla beraber, kristallenme noktasının altındaki sıcaklıklarda sıvı veya aşırı soğumuş hal elde edilebilir. Aşırı soğumuş bir sıvı daima dengesiz bir haldedir ve bazen evre koşullarındaki çok küçük bir değişme kristallenmeye neden olur.

Bir sıvı soğutulduğu zaman ve özellikle aşırı soğutulduğu zaman, onun viskozite katsayısı artar ve onun ısısal hareket enerjisi (  $E=kT$  ) azalır. Bu moleküllerin bir kristal örgüsü oluşturmak için yeniden gruplaşmasını önler. Belli bir sıcaklıkta sıvıların viskozite katsayısı  $10^{13}$  poise yaklaşır. Bu değer bir katının viskozite katsayısına eşittir. Aşırı soğumuş sıvı katılaşır fakat bir kristalin yapı oluşturamaz ve madde camsı hale geçer. Amorf bir maddenin viskozitesinin  $10^{13}$  poise eşit olduğu sıcaklığa camsı geçiş sıcaklığı veya camsılaşma noktası  $T_g$  denir. Bir madde camsı halde kabul edildiği zaman onun bütün özellikleri değişir; o sıvı halin karakteristik özelliklerini kaybeder ve bir katının özelliklerini kazanır. Bu değişmeler bir sıçrama şeklinde birdenbire olmaz ama 10 veya 20  $^{\circ}C$  'lik belli bir sıcaklık aralığında yavaş yavaş olur. Bu yüzden, camsı geçiş sıcaklığı bir nokta değil, bu aralığın ortalamasıdır.

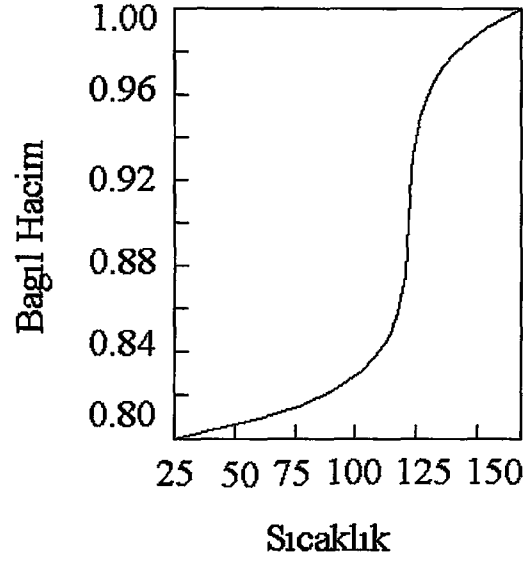


#### 2.6.4. Kristallenme ve Erime Termodinamiği

Bilindiği gibi daha önce polimerlerin faz ve yığışma hali incelenmiş ve katı polimer kristal ve amorf olmak üzere iki kısma ayrılmıştı. Kurumsal olarak tamamen amorf polimerlerde erime veya tersine kristallenme olayı; tamamen kristal polimerlerde erime veya tersine geçiş olayı hiç gözlenmez. Fakat, sadece amorf yada sadece kristalin halde polimerlere, bazı spesifik durumlar hariç, pratikte hiç rastlanmaz. Genellikle amorf ve kristalin yapı birlikte bulunur.

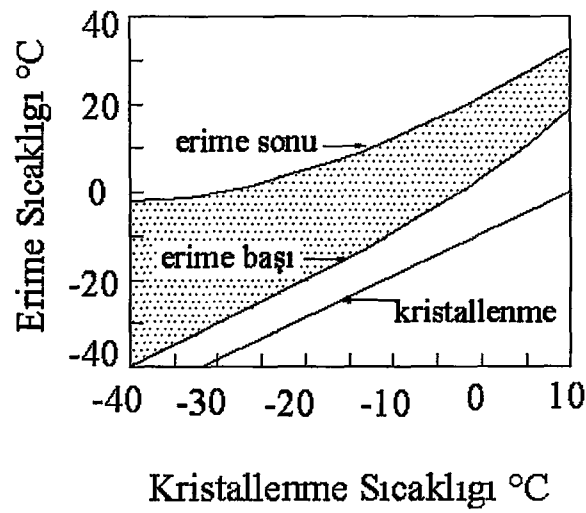
Kristallenme, polimerin düzensiz bir halden düzenli bir hale geçiş prosesidir. Erime, tersine polimerin düzenli bir halden sıvı eriyik haline geçtiği bir prosestir. Polimerlerin erimesi genellikle birinci dereceden bir faz geçişi olarak değerlendirilir. Fakat, polimerlerin spesifik yapısından dolayı, bu geçiş kendine has bir özelliğe sahiptir. Örneğin, küçük moleküllü maddeler dar bir sıcaklık aralığında hatta tek bir sıcaklıkta erirken, polimerler 100° C'a varan çok geniş bir sıcaklık aralığında erirler.

Polimerlerin erimesi ve kristallenmesi hakkında esas bilgi dilatometrik verilerden elde edilmiştir. Bu nedenle, bir dilatometreye konulmuş kristal haldeki bir polimer yavaş yavaş ısıtıldığı zaman hacmindeki değişme gözlenebilir. Tipik bir hacim sıcaklık ilişkisi Şekil 2.9 da verilmiştir. Bu grafikten polimer hacmindeki değişmenin geniş bir sıcaklık aralığında olduğu ve polimerin kristallenme derecesinin yavaş yavaş azaldığı görülebilir.



Şekil 2.9 Hacim değişimi verilerine göre polietilenin erime eğrisi

Polimerin kristalinite derecesindeki yavaş yavaş azalma prosesine kısmi erime denir ve kristalinite çizgisinin tamamen kaybolduğu sıcaklığa da denge erime sıcaklığı yada  $T_m^0$  denir. Kısmi erime sıcaklık aralığı polimerin kimyasal yapısına, örneğin geçmişine özellikle de şekil 2.9 de olduğu gibi kristallenme koşullarına bağlıdır.



Şekil 2.10 Kristal kauçuğun erime sıcaklığının sıcaklık ile değişimi

Eğer bir doğal kauçuk örneği  $-25\text{ }^{\circ}\text{C}$  ile  $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$  arasında kristallenirse onun erimesi  $0\text{ }^{\circ}\text{C}$  de tamamlanır.  $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$  de kristallenen bir örnek  $0\text{ }^{\circ}\text{C}$  den  $16\text{ }^{\circ}\text{C}$  arasında erir. Uzun süre kristallenmiş halde kalan örnekler daha yüksek sıcaklıkta, diyelim  $40\text{ }^{\circ}\text{C}$  de eriyebilir.

Diğer kristalin polimerlerin erimesi de doğal kauçuğun erimesine benzer ama aynı zamanda ondan farklı yanı da vardır. Örneğin, polietilenin erime sıcaklığı kristallenme sıcaklığına daha az bağlıdır.

Polimerlerin kısmi erimesinin çeşitli nedenleri vardır. Bunlardan birisi bir polimerde çeşitli büyüklükte kristallerin bulunabilmesidir. Bir polimer küçük parçalara ayrıldığı zaman serbest yüzey enerjisinin arttığı bilinmektedir. Bu yüzden, onlar daha büyük kristallerin erime sıcaklığından daha düşük sıcaklıkta erirler. Bununla beraber, kısmi erime lamel yapısına sahip tek polimer kristallere göre de tespit edilir. Bu erime hem makromoleküllerin katlanmasıyla oluşan lamel kristalit (kristal tanecikleri) yüzeylerin eriyik difüzyonunu hem de eriyik kristalin sınırından içeriye doğru ilerlemesinin bir sonucudur. Böyle bir kristalin erime sıcaklığı ile  $l$  katlanma büyüklüğü aşağıdaki eşitlik ile birbirine bağlanır.

$$T_m = T_m^0 \left( 1 - \frac{2\sigma}{\Delta H_m l d_{kr}} \right) \quad (2.4)$$

Burada,  $\sigma$  = spesifik serbest enerji veya yüzey gerilim,  $\Delta H_m$  = spesifik erime ısı ve  $d_{kr}$  = kristal yoğunluğudur.

Eşitlik (2.4) 'e göre, kristalin büyüklüğü artıkça  $T_m$  'nin artacağı ve en büyük erime sıcaklığının en büyük kristallere ait olması gerektiği ortaya çıkar. Bu nedenle, dengedeki erime sıcaklığı dengede bulunan son derece büyük bir polimer kristalinin erime sıcaklığı olarak tanımlanabilir.

Polimerlerin erime sıcaklığı, erime entalpisi ve entropisi arasındaki bağıntı;

$$T_m^0 = \frac{\Delta H_m}{\Delta S_m} \quad (2.5)$$

Bazı polimerler için bu parametre değerleri çizelge 2.2' de verilmiştir. Bu nedenle polimerler çok yüksek erime ısılarına ve nispeten düşük erime sıcaklıklarına sahip olabilirler.  $T_m$  'nin düşük değerleri genellikle yüksek zincir esnekliği ve eriyik de çok sayıda konforizasyonun oluşma olasılığı ile ilgilidir. Bu erime entropisinin yüksek değerlerde olmasına yol açar. Erime entropisi küçük olunca erime sıcaklığı yüksek olur.<sup>[20]</sup>

Polimer	$T_m(^{\circ}C)$	$\Delta H(J/mol)$	$\Delta S (J/mol.K)$
Polietilen	145,5	4.020	8,66
Polipropilen	176	10.880	24,18
Polistiren	242	8.370	16,23
Poli(dekametilen sebasinat)	80	50.200	142,26

Çizelge 2.2 Bazı Polimerlerin Termodinamik Parametreleri

### 3 ARAŞTIRMA BULGULARI

#### 3.1 Faz Dönüşümünde Genel Denklemler

Maddelerin faz geçişi çözümlerinde enerjinin korunumu denklemi esas alınır. Malzemenin iç enerjisinde artış ve azalma meydana geldiği için entalpinin artışı ve azalışına göre hesaplamalar yapılmaktadır.

Enerji denklemi bağıl entalpi terimi olarak yazılırsa;

$$h = h_{ref} + \int_{T_{ref}}^T c_p dT \quad (3.1)$$

burada  $h_{ref}$ : malzemenin katı durumdaki entalpi,  $T_{ref}$ ; referans sıcaklığı,  $c_p$ ; malzemenin sabit basınçtaki özgül ısısını göstermektedir.

Buradan entalpi;

$$H = h + \Delta H \quad (3.2)$$

şeklinde ifade edilir.

$$\beta = \frac{\Delta H}{L_g} = 0 \quad T < T_{katı} \quad (3.3)$$

$$\beta = \frac{\Delta H}{L_g} = 1 \quad T > T_{sıv} \quad (3.4)$$

$$\beta = \frac{\Delta H}{L_g} = \frac{T - T_{katı}}{T_{sıv} - T_{katı}} \quad T_{katı} < T < T_{sıv} \quad (3.5)$$

faz dönüşüm problemleri için enerji denklemi;

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho h) + \frac{\partial}{\partial t}(\rho \Delta H) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i h) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i \Delta H) = \frac{\partial}{\partial x_i}(k \nabla T) \quad (3.6)$$

olarak tanımlanmaktadır. Burada  $\rho$  :malzemenin yoğunluğunu, h: entalpisini, k: ısı iletim katsayısını, t:zamanı göstermektedir.

### 3.2 Sınır Tabaka Denklemlerinin Boyutsuzlaştırılması

Sınır tabaka denklemlerinde boyutsuz sayı grupları kullanılarak çözüme gidilmesi ve sonuçta boyutlu hale dönüştürülmesi, problemlerin çözümünde kolaylık sağlamaktadır. Bu yüzden sınır tabaka denklemleri önce boyutsuzlaştırılır daha sonra çözüm yoluna gidilir. Boyutsuzlaştırmak için aşağıdaki gibi boyutsuz değişkenler kullanılır.

$$\begin{aligned}x^* &= \frac{x}{L} & y^* &= \frac{y}{L} \\u^* &= \frac{U}{u_0} & v^* &= \frac{v}{u_0} \\ \theta &= \frac{T - T_{kan}}{T_{kan} - T_{siv}} & \tau &= \frac{\alpha t}{L^2}\end{aligned} \quad (3.7)$$

Bu değişkenler sınır tabaka denklemlerinde değişken dönüşümü yapılarak yerlerine yazılır ve gerekli işlemler yapılarak, boyutsuz süreklilik denklemi, boyutsuz momentum denklemi ve boyutsuz enerji denklemi elde edilir.Burada L karakteristik uzunluk ve  $u_0$  herhangi bir referans hızını göstermektedir.

#### 3.2.1 Süreklilik Denkleminin Boyutsuzlaştırılması

Eşitlik (1.10) da tanımlanan boyutlu süreklilik denklemini boyutsuzlaştırmak için  $u = (U.u_0)$ ,  $v = (V.u_0)$  şeklinde yazılıp süreklilik denkleminde yerine konursa

### Boyutsuz Süreklilik Denklemi

$$\frac{\partial U}{\partial X} + \frac{\partial V}{\partial Y} = 0 \quad (3.8)$$

biçimini alır.

### 3.2.2 Enerji Denkleminin Boyutsuzlaştırılması

Faz dönüşümü çözümlenmeleri için, enerji denklemi boyutlu ve zamana bağlı olarak aşağıdaki şekilde yazılır:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho h) + \frac{\partial}{\partial t}(\rho \Delta H) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i h) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i \Delta H) = \frac{\partial}{\partial x_i}(k \nabla T) \quad (3.9)$$

Boyutsuz parametreler türetilip ve düzenlenerek çıkartılmış boyutsuz zamana bağlı enerji denklemi şu şekildedir;

$$\Phi(\text{Ste}, \theta) \frac{\partial \theta}{\partial \tau} + u^* \frac{\partial \theta}{\partial \tau} + = \frac{\partial^2 \theta}{\partial x^{*2}} \quad (3.10)$$

Yukarıdaki boyutsuz denklemde geçen, Ste, Stefan sayısı olup

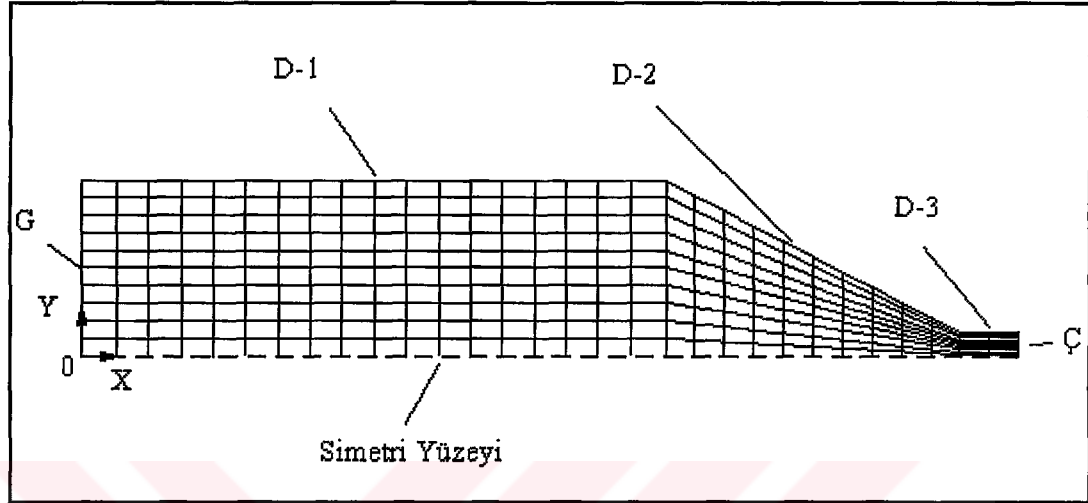
$$\text{Ste} = \frac{C_p \delta T}{\delta L} \quad (3.11)$$

şeklindedir.<sup>[21]</sup>

### 3.3 Çalışılan Model ve Sınır Şartları

Bu tez çalışmasında pistonlu bir plastik enjeksiyon makinesinin iki boyutlu modeli üzerinde incelemeler yapılmıştır. Model simetrik bir yapıya sahiptir. Malzemenin kanala enjekte edildiği giriş bölgesi 0.06 m genişliğindedir. Kanal

uzunluğu 0,16 m olup malzemenin kanaldan çıkış kesiti 0,004 m dir. Model simetrik olduğu için Y doğrultusunda simetri ekseninden bölünerek yarısı üzerinde çalışmalar yapılmıştır. Model yatay yönde 30 bölmeye, dikey yönde 10 bölmeye ayrılmıştır. Kanalin başlangıç noktası 0 noktasıdır (Şekil 3.1).



Şekil 3.1. Kullanılan enjeksiyon modeli

D-1: 550 K sabit sıcaklıktaki yüzeyi, D-2: ısı taşınım katsayısı 15 W/m<sup>2</sup>-K ve sıcaklığı 400 K olan ortamla temas halindeki konveksiyon yüzeyini, D-3: 350 K sabit sıcaklıkta tutulan soğuma yüzeyini, G: malzemenin kanala enjekte edildiği giriş yüzeyini ve Ç: malzemenin kanaldan kalıba basıldığı çıkış yüzeyi temsil etmektedir

### 3.4 Kullanılan Malzeme ve Özellikleri

Yapılan çalışmada, günümüzde plastikler arasında daha yaygın olarak kullanılan polivinil klorür (PVC) malzeme kullanılmıştır. PVC malzemenin yoğunluğu:1,391 (g / cm<sup>3</sup>), eriyik viskozitesi:15,5 x 10<sup>-4</sup> (Pa.s), ısı iletim katsayısı: 0,165 (W/m-K), ısı kapasitesi: 934 (J / kg – K), erime sıcaklığı 483 (K), katılaşma

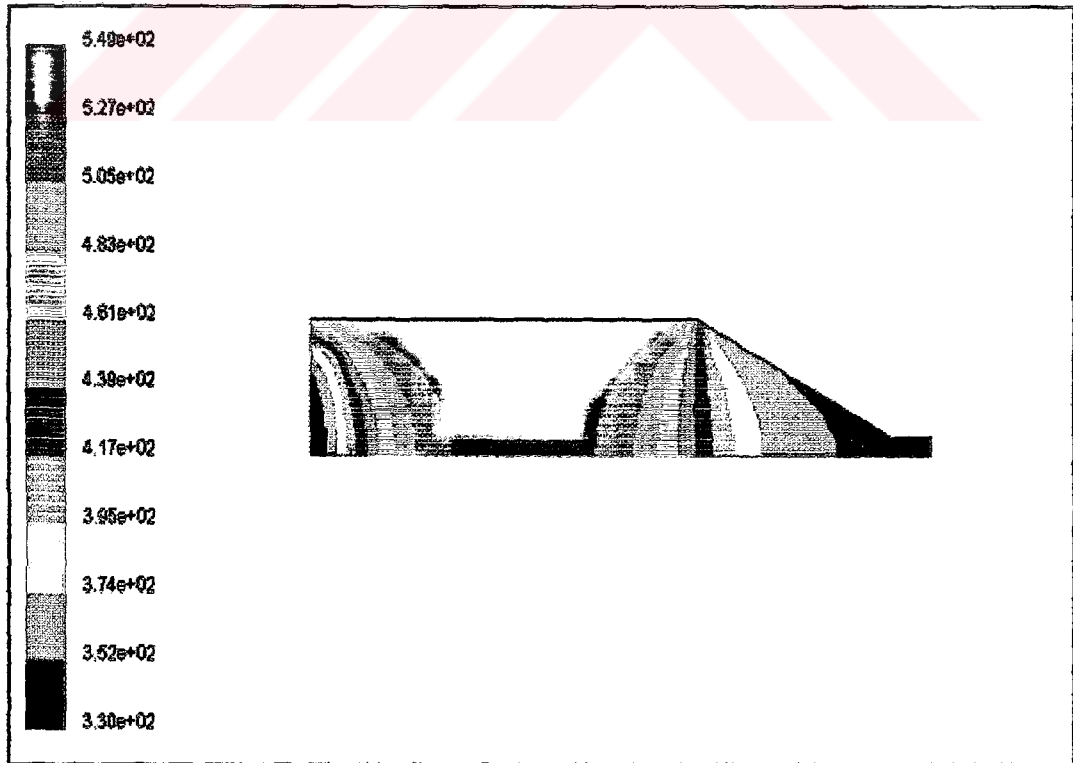


sıcaklığı 453(K), erime entalpisi 11,3 (kJ/mol) dır. Tüm değerler sabit olarak alınmıştır.

### 3.5 Yapılan Çözümlemeler

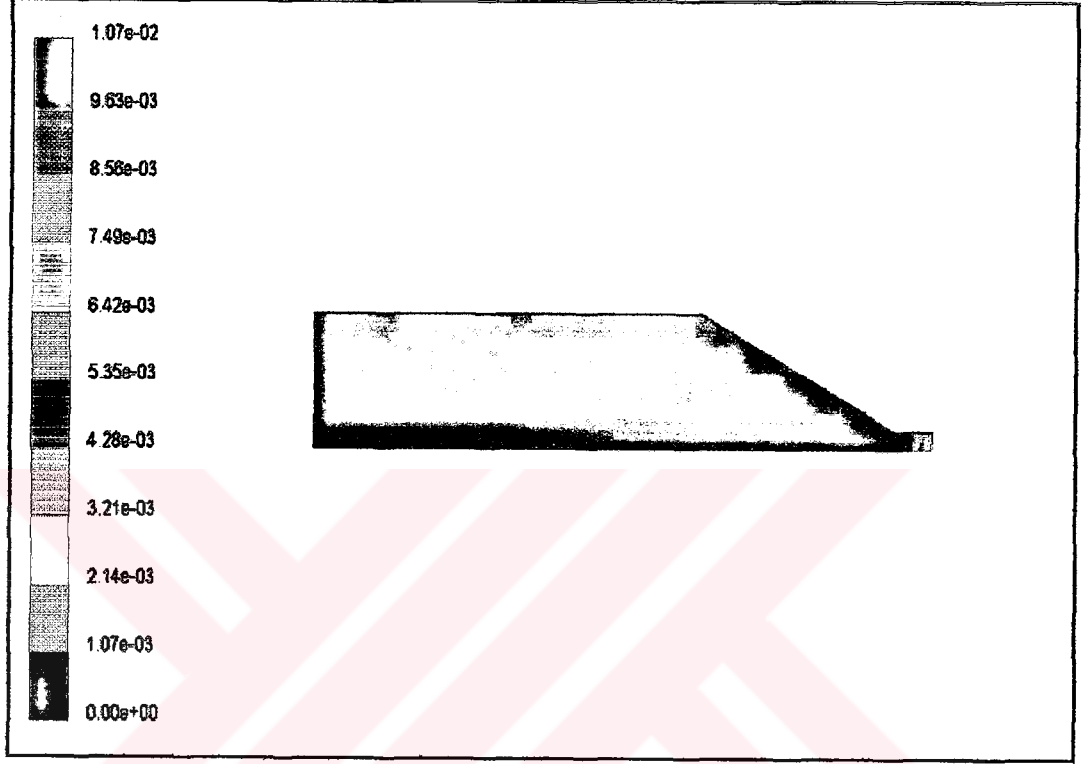
Tasarlanan model ve grid yapısı bir bilgisayar programı yardımıyla, Şekil (3.19) gösterilen sonlu elemanlara ayrılmış durumdaki model oluşturulmuştur. Oluşturulan bu model, sonlu eleman esaslı bir bilgisayar programına aktarılmış ve bu program yardımıyla sınır şartları girilmiş ve gerekli çözüm tanımlamaları yapılmıştır.

İlk olarak, sonlu eleman esaslı bilgisayar programıyla kararlı halde kabul edilen ve tanımlanan model çözümlenmiştir. Yapılan çözümlenmeler sonucunda kararlı durumdaki sıcaklık, hız, sıvı oranı ve entalpi değerlerini gösteren kontur grafikleri elde edilmiştir. Elde edilen kontur grafikleri aşağıda gösterilmiştir.



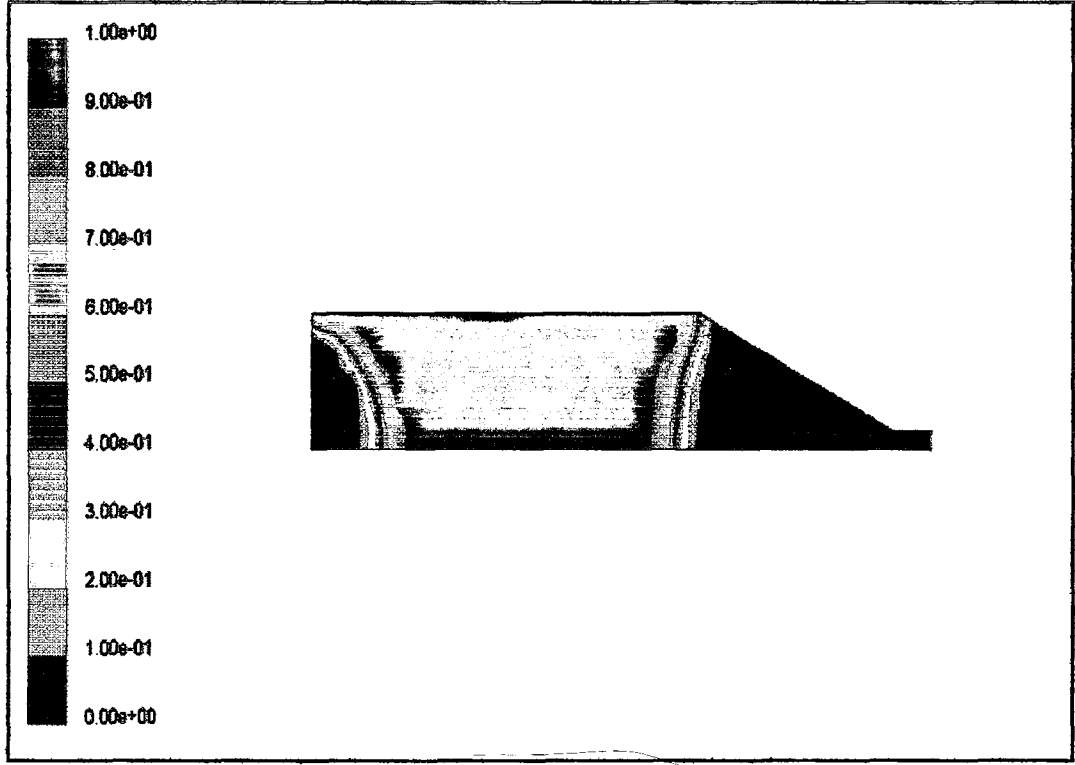
Şekil 3.2. Kararlı durumdaki sıcaklık kontur grafiği (K)

Bu grafik, kararlı haldeki modelin sıcaklık bölgelerini göstermektedir. Maviden kırmızıya gidildikçe malzemenin sıcaklığının arttığı görülmektedir. Kanal girişinden çıkışına kadar olan mesafede malzemenin sıcaklığının değişimi katmanlar şeklinde gösterilmiştir.



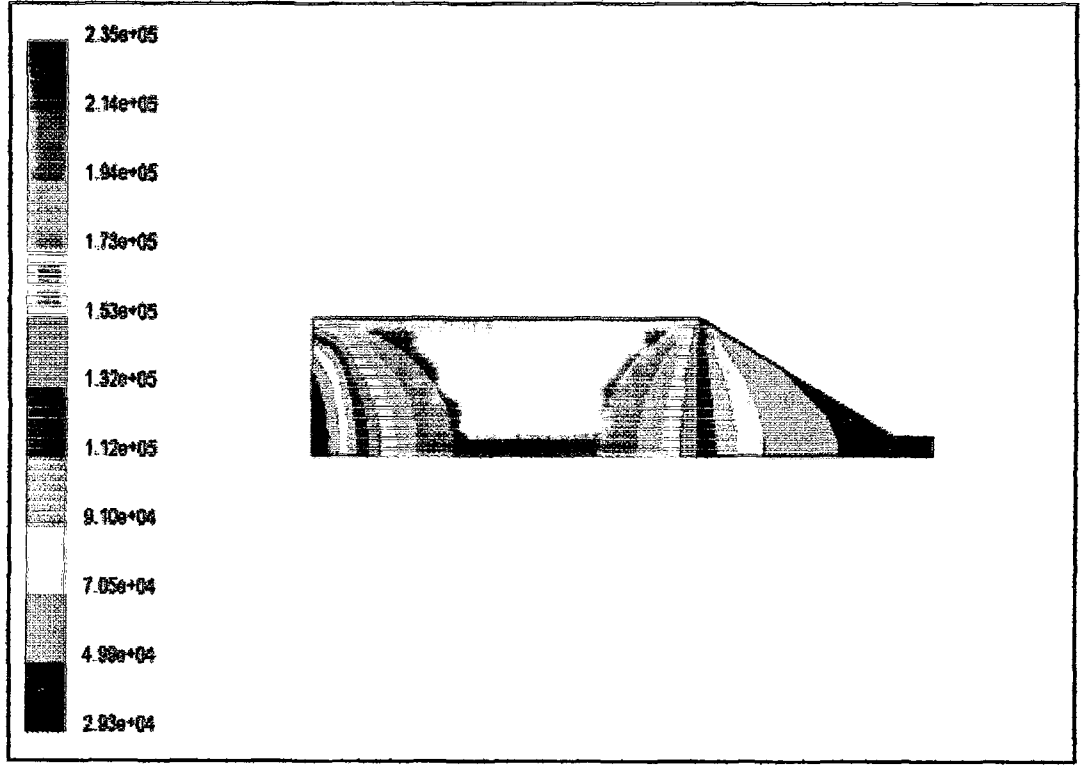
Şekil 3.3. Kararlı durumdaki hız kontur grafiği (m/s)

Kararlı haldeki hız grafiği, hızın kanal boyunca 0 – 0.00107 m/s aralığında değiştiğini ve kanal çıkışında, önceden tanımlanmış hız değeri olan 0.01 m/s değerine ulaştığı görülmektedir.



Şekil 3.4. Kararlı durumdaki sıvı oranının değişim kontur grafiği

Sistemin kararlı durumdaki katılaşma ve sıvılaşmanın başladığı ve sonra erdiği bölgeler gösterilmiştir. Grafik sıkalasındaki renkler sıvı malzeme oranını göstermektedir.



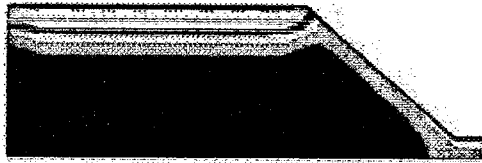
Şekil 3.5. Kararlı durumdaki entalpi kontur grafiği (j/kg)

Malzemenin entalpi değerinin değişimi renklerle gösterilmiştir. Erimenin olduğu, yani sıcaklığın yüksek olduğu bölgelerde entalpi değerinin de yüksek olduğu görülmektedir.

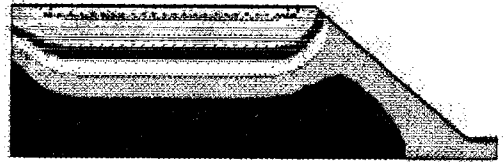
### 3.5.1 Zamana Bağlı Sıcaklık Çözümleri

Sonlu eleman esaslı bir bilgisayar programı kullanılarak daha önceden tanımlanan model ve sınır şartlarına göre zamana bağlı akış tanımlaması yapılmıştır. Belirli zaman aralıklarına göre çözümlenmeler yapılarak grafikler elde edilmiştir.

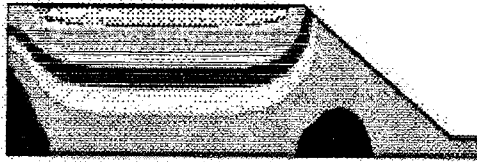
Pistonlu plastik enjeksiyon makinesi modeli içerisindeki plastik malzeme sıcaklığının D-1 yüzeyinden itibaren başlayıp tüm model içerisinde sıcaklığın katmanlar şeklinde artışı ve kanal çıkışında tekrar düştüğü, değişik zaman dilimlerinde alınan grafiklerle gösterilmiştir.



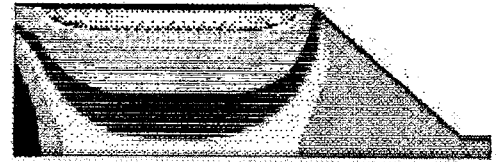
$t = 0,1 \text{ sn}$



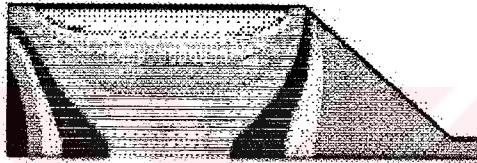
$t = 0,4 \text{ sn}$



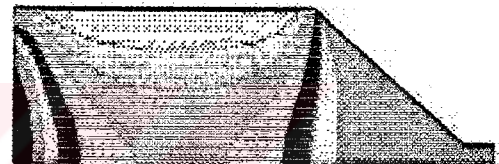
$t = 0,8 \text{ sn}$



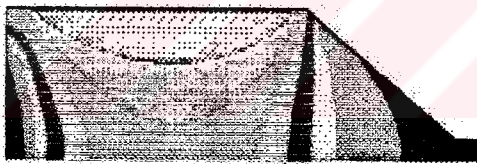
$t = 1,2 \text{ sn}$



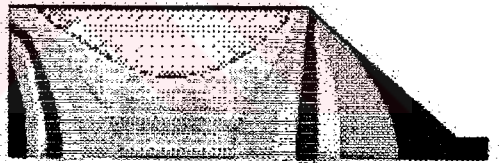
$t = 1,6 \text{ sn}$



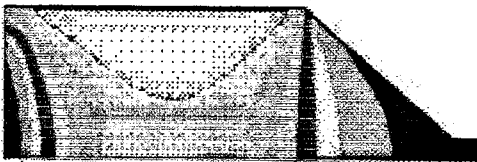
$t = 2 \text{ sn}$



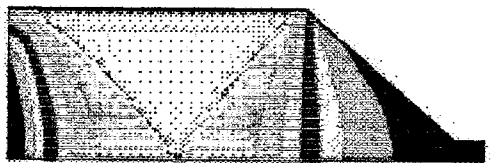
$t = 2,4 \text{ sn}$



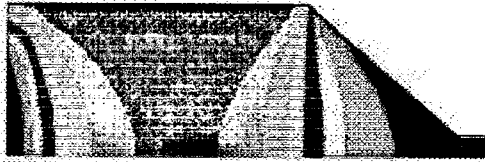
$t = 2,8 \text{ sn}$



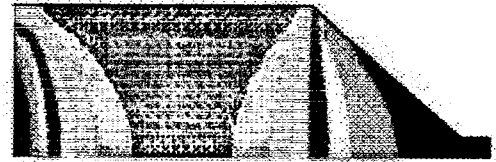
$t = 3,2 \text{ sn}$



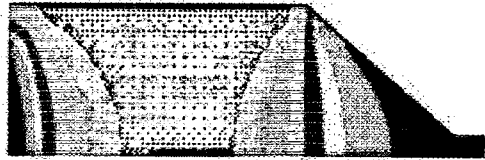
$t = 3,6 \text{ sn}$



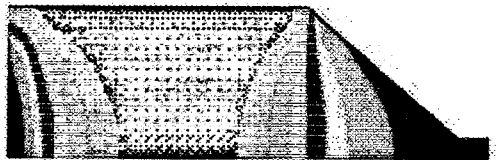
$t = 4 \text{ sn}$



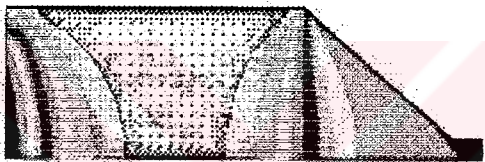
$t = 4,4 \text{ sn}$



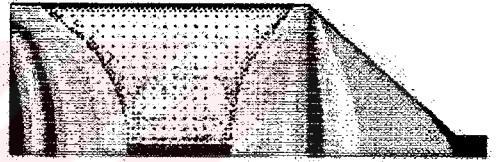
$t = 4,8 \text{ sn}$



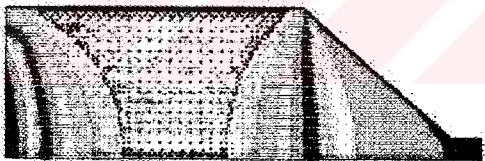
$t = 5,2 \text{ sn}$



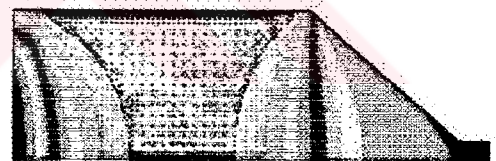
$t = 5,6 \text{ sn}$



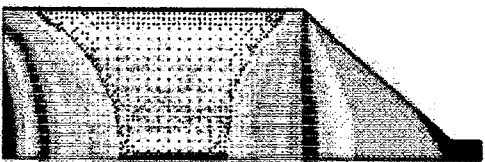
$t = 6 \text{ sn}$



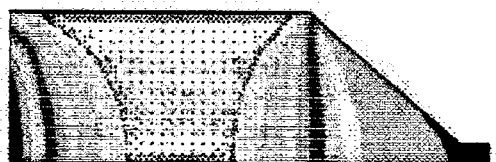
$t = 6,4 \text{ sn}$



$t = 6,8 \text{ sn}$

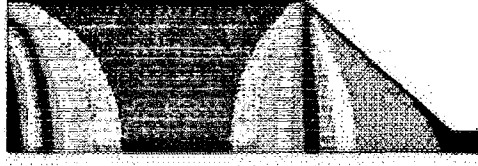


$t = 7,2 \text{ sn}$



$t = 7,6 \text{ sn}$





$t = 8 \text{ sn}$



$t = 8,4 \text{ sn}$

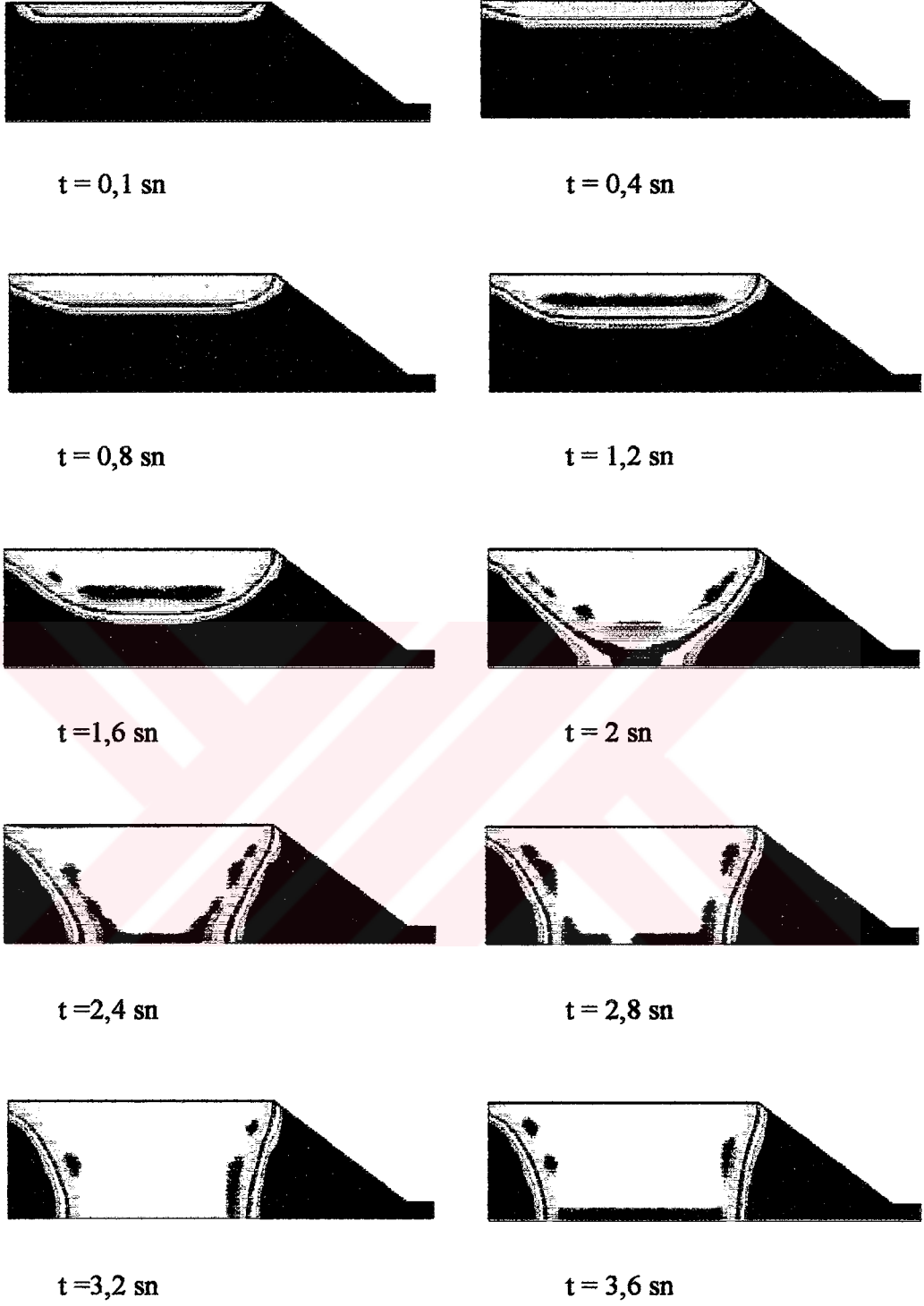
Şekil 3.6. Sıcaklığın zamana bağlı değişim grafikleri

Bu, sıcaklık kontur grafikleri, plastik enjeksiyon makinesinin iki boyutlu modeli üzerinde zamana bağlı çözümler sonucunda elde edilmiştir. PVC esaslı plastik malzeme kanal içerisindeki,  $x$  doğrultusunda hareketiyle birlikte, kanalın yüksek sıcaklıklı kenarından, merkezine doğru ilerleyen bir sıcaklık değişimi olduğu görülmektedir. Malzeme kanala katı halde girmektedir, orta kısımlara yaklaştıkça sıcaklığı artmakta ve sıvı hale geçmekte daha sonra ortamla temasta olan serbest yüzeye yaklaştıkça sıcaklık düşmekte ve malzeme tekrar katı hale dönmektedir. Son olarak da malzemenin kanal ucundan tekrar katı durumda çıktığı grafiklerde görülmektedir.

### 3.5.2 Zamana Bağlı Faz Dönüşüm Grafikleri

Zaman bağlı akış çözümleri sonucunda sıcaklık grafikleriyle birlikte sıvı miktarının değişimini gösteren grafiklerde elde edilmiştir.

Sıvı oranının zamanla değişimini gösteren grafikler aşağıda verilmiştir. Grafiklerde görüldüğü gibi başlangıç anında 550 K sıcaklıkla temasta olan kısım sıvıya dönüşmektedir, daha sonra zamanla, malzemenin ısı iletimine bağlı olarak kanal içerisinde akmakta olan malzemenin önce katı halden sıvı hale daha sonrada sıvı halden katı hale geçişi grafiklerde gösterilmiştir.



Şekil 3.7. Erime olayının zamana bağlı değişim grafikleri

Grafiklerde görülen mavi bölgeler malzemenin katı halde olduğunu, yani malzemenin sıcaklığının katılaşma sıcaklığı olan 453 K'ın altına inerek malzemenin tamamen katı hale geçtiği bölgeleri göstermektedir. Kırmızı bölgeler kanal



içerisindeki plastik malzemenin sıcaklığının, erime sıcaklığı olan 483 K'ın üzerine çıkarak malzemenin sıvı halde olduğu bölgeleri göstermektedir. Mavi ve kırmızı arasında yer alan renkler, malzemenin sıvı ve katı faz arasında kalan bölgelerini, yani faz geçişinin olduğu bölgeleri göstermektedir.



#### 4. TARTIŞMA VE SONUÇ

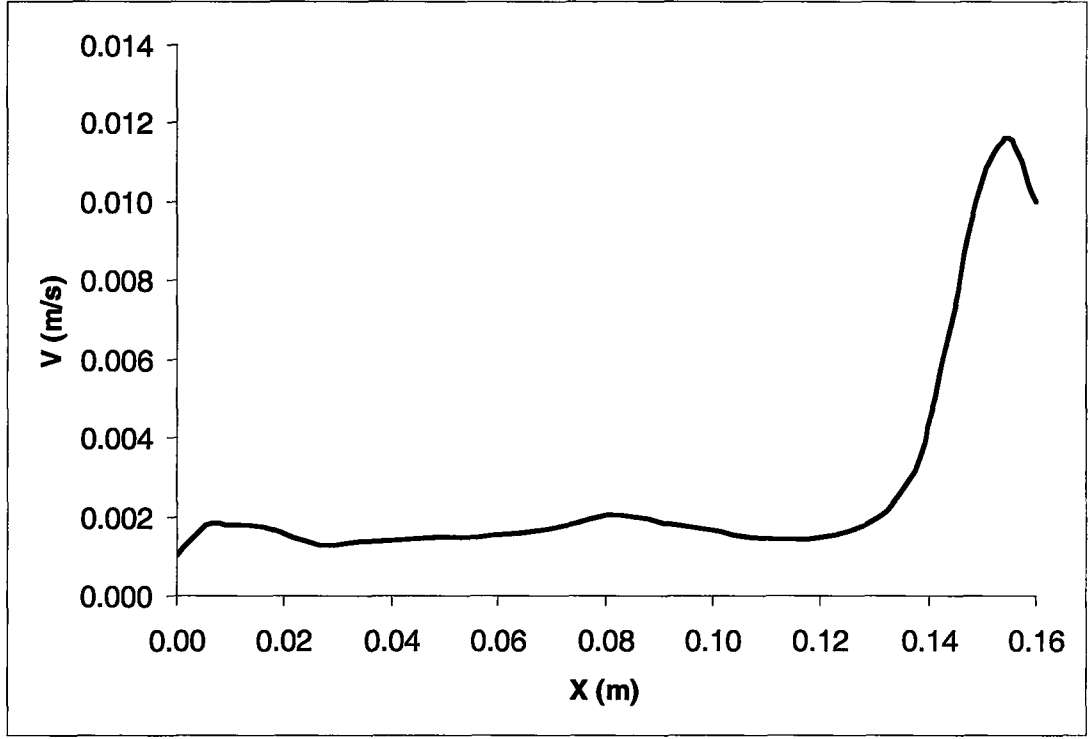
Plastik esaslı ürünlerin üretimi sırasında malzemede meydana gelen erime ve katılaşma süreci göz önünde bulundurulması ve kontrol altında tutulması gereken önemli bir aşamadır. Ayrıca plastik enjeksiyon makinelerinde ve plastik ürünlerin üretiminde kullanılan diğer makinelerdeki önemli sorunlardan biriside plastik malzemelerin kendilerine has özelliklerinden dolayı, aşırı ısıtılması veya bekletilmesi sonucunda malzemenin iç yapısının bozularak malzemenin yanmasıdır.

Günümüzde sıkça kullanılan, sonlu elemanlar çözüm yöntemlerini kullanan sonlu eleman esaslı bir bilgisayar programıyla bir enjeksiyon makinesi modeli üzerinde, erime ve katılaşma olayları zamana bağlı olarak incelenmiştir.

Yapılan çözümler sonucunda, plastik enjeksiyon makinelerinde kontrol altında tutulması gereken hız, sıcaklık, katı-sıvı oranının zamana göre ve kanal içerisindeki değişimleri grafiksel olarak elde edilmiştir. Plastik malzemenin kanala girdikten sonra tamamen eridiği ve çıkışta da tamamen katı duruma geçerek kalıba enjekte edildiği görülmüştür.

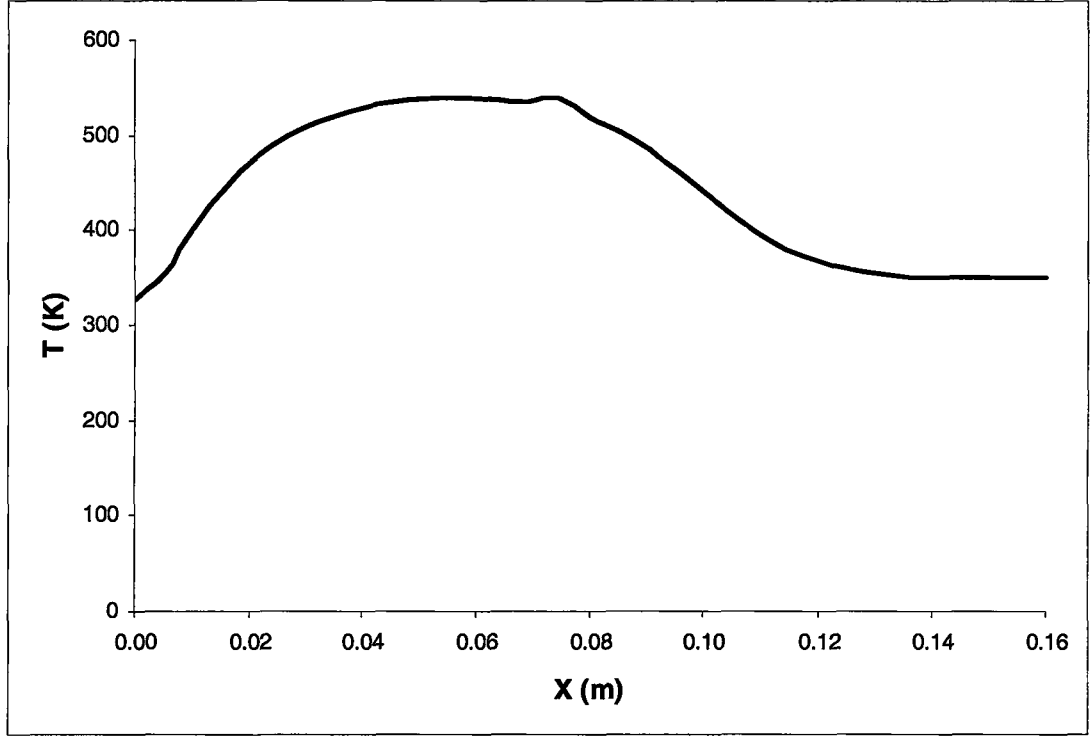
Tüm bu elde edilen şekiller ve grafikler, plastik esaslı ürünlerin üretimi için tasarlanacak makinelerin dizaynında ve plastik ürünlerin üretiminde ortaya çıkacak sonuçların önceden görülmesi ve önlemlerin alınması noktasında yardımcı olacaktır.

Kanal içerisindeki malzemenin akışı sırasında simetri eksenine boyunca hızın yola bağlı olarak değişimi Şekil (4.1) de gösterilmiştir.



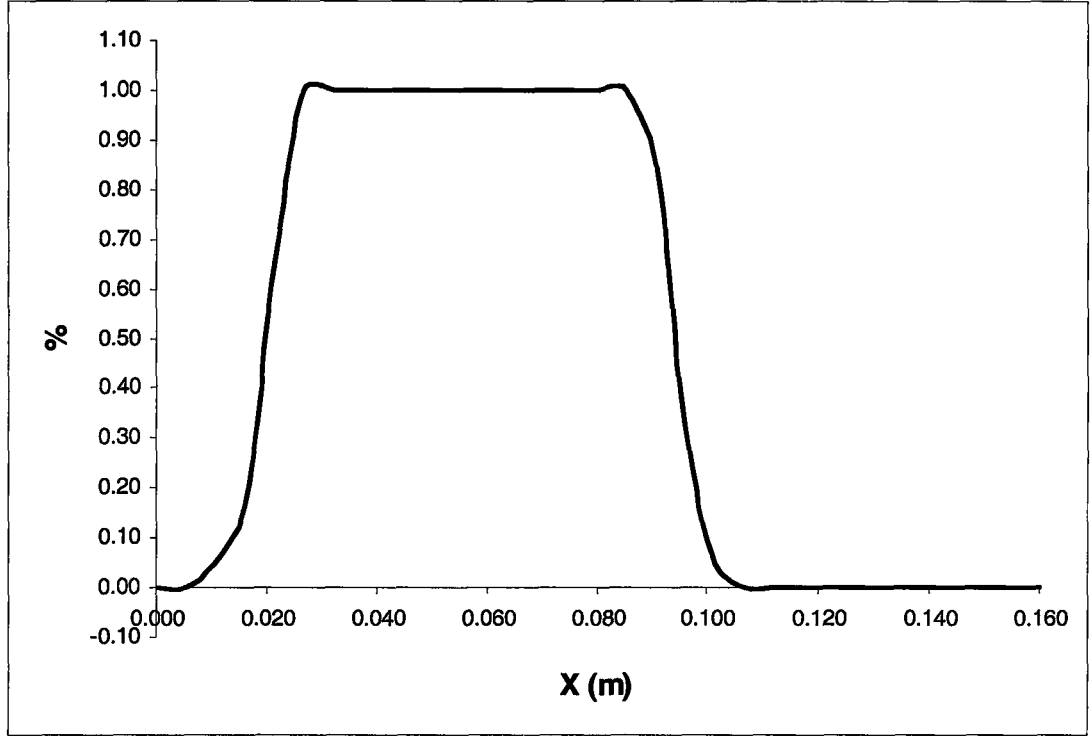
Şekil 4.1. Hızın kanalı boyunca değişim grafiği

Şekil (4.1) de görüldüğü gibi hız kanal girişinde başlangıç değeri olan 0.001 m/s değeri ile başlamıştır ve enjeksiyon kanalının daralmaya başlamasıyla birlikte  $x = 0.12$  m bölgesinde artmaya başlamış ve enjeksiyon kanalını çıkış bölgesine kadar artmıştır. Çıkış yüzeyinden sabit olarak tanımlanmış olan 0.01 m/s hız değeriyle kanal akışı sonlanmıştır.



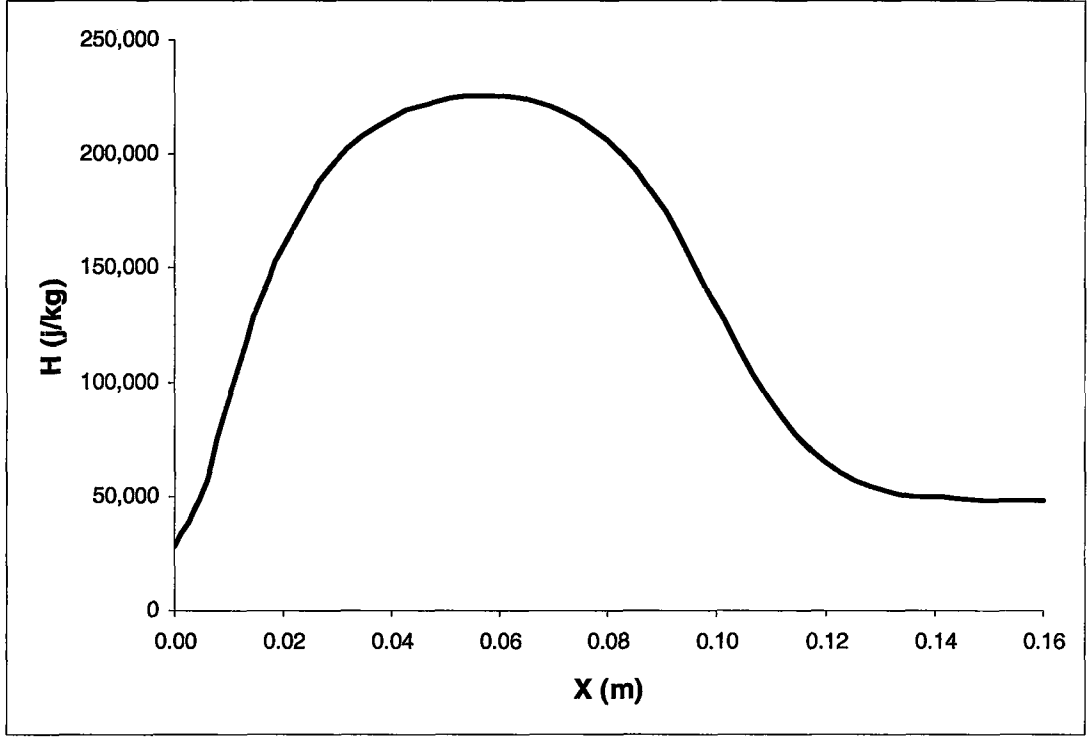
Şekil 4.2. Sıcaklığın kanal boyunca değişim grafiği

Kanalın simetri ekseni boyunca sıcaklığı değişimi Şekil (4.2) de görülmektedir. Plastik malzemenin önce sıcaklığının artarak erime sıcaklığını geçtiği ve daha sonra sıcaklığının düşerek katı sıcaklığı altına indiği bölgeler tespit edilmiştir.



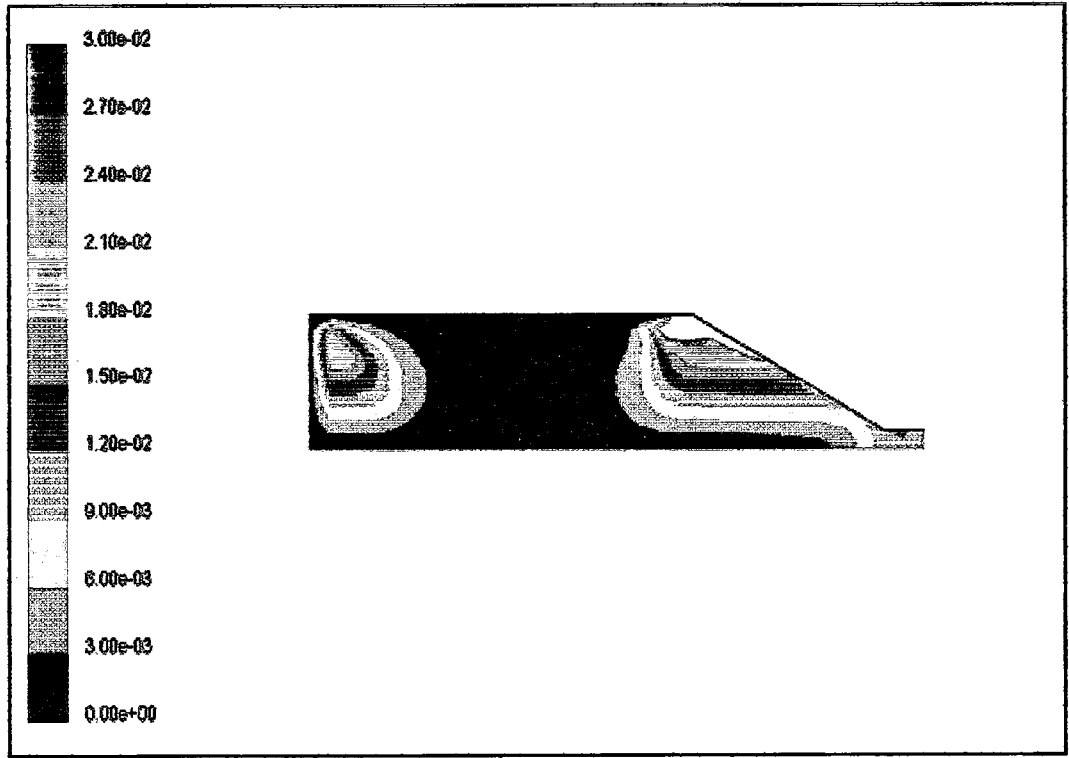
Şekil 4.3. Sıvı oranının kanal boyunca değişim grafiği

Plastik malzeme kanala katı halde girmektedir, kanal içerisinde ileri doğru hareketiyle birlikte katıdan sıvı hale geçmekte ve sıvı halde kanal içerisinde ilerlemektedir. Kanalın daralma bölgesine yaklaştığında düşük sıcaklıklı yüzeylerin etkisiyle sıcaklık düşmekte ve sıvı oranı azalarak tekrardan katı faza geçmekte ve katı halde kanaldan çıkmaktadır.

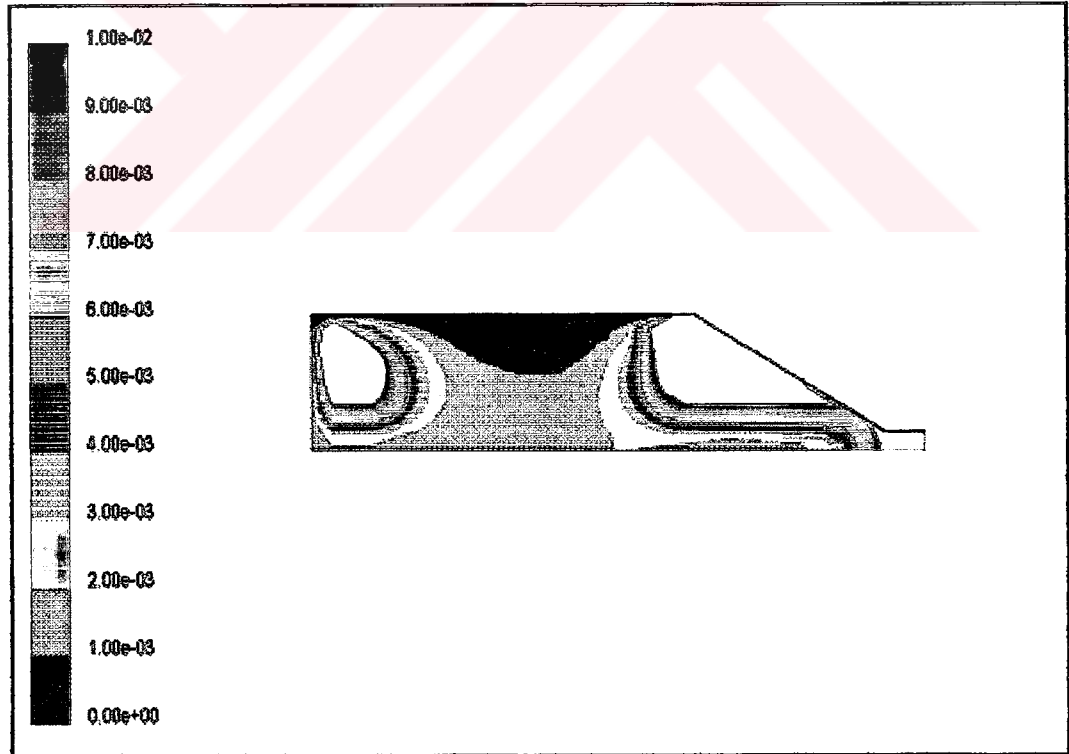


Şekil 4.4. Entalpinin kanal boyunca değişim grafiği

Malzemenin kanala girişinden itibaren entalpisi sürekli ve hızlı bir şekilde artmaktadır. Orta kısımlara gelindiğinde malzemenin faz değiştirmesine bağlı olarak entalpi artışı azalmaktadır. Malzeme 0,08 m bölgesini geçtikten sonra soğuk yüzeylerin etkisi sonucu sıcaklığı azalmaya başlamakta ve bunun sonucunda entalpi değeri düşmektedir. Bu da malzemenin sıvı fazdan tekrar katı faza geçmesinin bir göstergesidir.



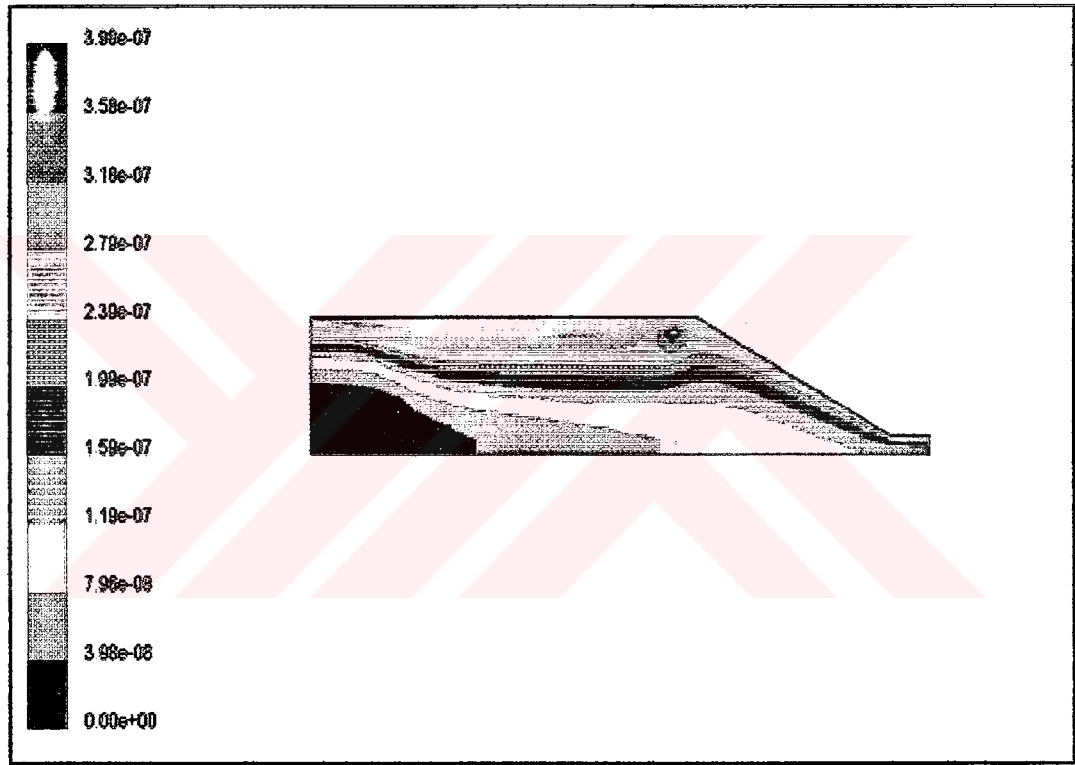
Şekil 4.5. Hızın 0,0 ile 0,03 (m/s) aralığındaki değişim grafiği



Şekil 4.6. Hızın 0,0 ile 0,01 (m/s) aralığındaki değişim grafiği

Şekil 4.5 ve Şekil 4.6 numaralı kontur grafikleri hızın farklı aralıklarındaki değişimini göstermektedir. Her iki grafikte de boş olan bölgeler hızın sıfırda ki hız değerlerinden daha yüksek değerlere ulaştığı bölgeleri göstermektedir.

Kanal kesitinin daralmasıyla birlikte daha küçük bir kanaldan geçmeye zorlanan malzemenin hızı artmaya başlamaktadır, artan bu hız değerlerinin kanalın daralmaya başladığı yüzeye yakın bölgelerde daha fazla olduğu kontur grafiklerinde görülmüştür.



Şekil 4.6. Kütlesel debinin kanal boyunca değişim grafiği (kg/s)

Plastik malzemenin katı halde olduğu kısımlarda kütlesel debi düşüktür. Diğer taraftan erimenin başlayarak malzemenin sıvı hale geçmesiyle birlikte sıvı maddenin kütlesel debisi artmaktadır.



## KAYNAKLAR

- [1] S. Sato, K. Oka, A. Murakami, Vol. 44, No.3, March 2004
- [2] H. Chen, U. Sundararaj, K. Nandakumar, Alche Journal, Vol. 49, June 2003
- [3] M. E. Ganaoui, A. Lamazouade, P. Bantoux, D. Morvan, Computers and Fluids, Vol. 31, pp. 539, 2002
- [4] R.W.Lewis, K.Ravindran, International Journal for Numerical Methods in Engineering, Vol.47, pp. 29, 2000
- [5] S. K. Das, Bull. Mater. Sci., Vol. 24, No. 4, pp. 373, August 2001,
- [6] Belete Kiflie ve Dr-Ing. Demiss Alemu, ESME 5th Annual Conference on Manufacturing and Process Industry, September 2000
- [7] A. Fasano, Meccanica, Vol 35, pp.163, 2000
- [8] A.E. Huespe, A. Cardona, V. Fachinotti, Computer Methods in Applied Mechanics Engineering, Vol.182, pp.439, 2000
- [9] A. Fic, A.J. Nowak, R. Bialecki, Institute of Thermal Technology
- [10] D.Y. Sheng, L. Jonsson, Casting and Flow Simulation, Process Metallurgy Depertmant, MEFOS, S 97125, Sweden
- [11] N. Sombatsompop, D. Chonniyom, A. K. Wood, Division of Material Technology, Thailand, 1999
- [12] T. Demirel, "Plastik Ekstruderlerinde Malzeme Akışı", İstanbul Teknik Üniversitesi Yüksek Lisans Tezi, 1997
- [13] S. Akkurt, Plastik Malzeme Bilgisi, İstanbul, 1991
- [14] E. Pişkin, Polimer Teknolojisine Giriş, 1987
- [15] S. Basan, Polimer Kimyası, Sivas, 2001
- [16] J.Brandrup, E.H.Immergut, Editors, Polymer Handbook, 1975

- [17] W. Weissbach, S. Anık, E.S. Anık, M. Vural, Malzeme Bilgisi ve Muayenesi, (çeviri), 1998
- [18] A.W. Birley, R.J. Heath, Plastics Materials Properties and Applications, USA, 1988
- [19] H. Yalçın, M. Gür, Malzeme Bilgisi, Ankara, 2002
- [20] F. Kaya, Plastikler Katkı Maddeleri ve İşleme Metotları, İstanbul 1983
- [21] Esam M. Alawadhi, Computer and Fluids, Vol. 33, pp 1335, December 2004

