

**KASTAMONU ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**POLİETİLEN VE POLİPROPİLEN ESASLI ÜRÜNLERİN, PLASTİK
ENJEKSİYON İŞLEM PARAMETRELERİ VE TERMODİNAMİK
YÖNTEMLERLE ISI YAYILIMININ İNCELENMESİ**

İLKER CENGİZ

FİZİK ANA BİLİM DALI

KASTAMONU 2012

Her hakkı saklıdır

TEZ ONAYI

İlker CENGİZ tarafından hazırlanan “**Polietilen ve Polipropilen Esaslı Ürünlerin, Plastik Enjeksiyon İşlem Parametreleri ve Termodinamik Yöntemlerle Isı Yayılımının İncelenmesi**” adlı tez çalışması, aşağıdaki jüri üyeleri tarafından oy birliği ile Kastamonu Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Fizik Anabilim Dalı’nda **YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

Danışman : Prof. Dr. Ferhad NASİBOV

Jüri Üyeleri :

Prof. Dr. Ferhad NASİBOV
Kastamonu Üniversitesi, Fen Edebiyat Fakültesi
Fizik Bölümü

Yrd. Doç. Dr. Can Doğan VURDU
Kastamonu Üniversitesi, Fen Edebiyat Fakültesi
Fizik Bölümü

Yrd. Doç. Dr. Ahmet CAN
Selçuk Üniversitesi, Cihanbeyli Meslek Yüksek Okulu
Makine ve Metal Teknolojileri Bölümü

Yukarıdaki sonucu onaylıyorum

Doç. Dr. Ömer KÜÇÜK
Enstitü Müdürü

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

POLİETİLEN VE POLİPROPİLEN ESASLI ÜRÜNLERİN, PLASTİK ENJEKSİYON İŞLEM PARAMETRELERİ VE TERMODİNAMİK YÖNTEMLERLE ISI YAYILIMININ İNCELENMESİ

İlker CENGİZ

Kastamonu Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Fizik Anabilim Dalı

Danışman: Prof. Dr. H. Ferhad NASİBOV

Bu çalışmada “polipropilen” ve “polietilen” esaslı ürünlerin plastik enjeksiyonla üretimindeki işlem parametreleri ve termodinamik yöntemlerle ısı yayılımı incelendi. Öncelikle polimerler sınıflandırılarak genel yapıları araştırıldı. “Polietilen” ve “polipropilen”lerin yapısı ve oluşumu incelenerek diğer polimerlerle karşılaştırıldı. Alçak yoğunluklu polietilen, yüksek yoğunluklu polietilen, lineer alçak yoğunluklu polietilen ve polipropilenlerin özellikleri ve kullanım alanları incelenerek karşılaştırma yapıldı. Bu yapılardan oluşan ürünlerin plastik enjeksiyon sürecindeki mekanik işlemler ve etkileri araştırıldı. Daha sonra ısı yayılımı konusunda bize referans olan “Fourier Metodu”yla gerekli kısımlar matematiksel olarak incelendi. Termoplastiklerin ısı karşısındaki davranışları, camsı geçiş sıcaklıkları, maksimum kullanım sıcaklıkları, ısıl bozunma sıcaklıkları, ısıl iletkenlikleri ve ısı kapasiteleri incelendi. Son olarak plastik enjeksiyonlama esnasında ürün üzerinde oluşan hatalar, sebepleri ve çözümleri araştırıldı.

Anahtar Kelimeler: polietilen; polipropilen; polimer; termoplastik; plastik enjeksiyon kalıplama; ısı yayılımı; ısı geçişi; fourier metodu;

ABSTRACT

M. Sc. Thesis

POLYETHYLENE AND POLYPROPYLENE BASED PRODUCTS, PLASTIC INJECTION PROCESS PARAMETERS AND THERMODYNAMIC INVESTIGATION OF METHODS HEAT DISSIPATION

İlker CENGİZ

Kastamonu University
Graduate School of Natural and Applied Sciences
Department of Physics

Supervisor: Prof.Dr. H. Ferhad NASİBOV

In this study, "polypropylene" and "polyethylene"-based products in the production of injection molding methods, heat dissipation and thermodynamics of the process parameters were evaluated. First, the overall structures of polymers were classified. "Polyethylene" and "polypropylene" s examining the structure and formation compared to other polymers. Low-density polyethylene, high density polyethylene, linear low density polyethylene and polypropylenes were compared by examining the properties and application areas. Mechanical processing of these structures and to investigate the effect of the process of plastic injection products. Then, with reference to us about heat dissipation, "Fourier Method" with the necessary parts were analyzed mathematically. Attitudes of temperature thermoplastics, glass transition temperatures, maximum temperatures, the thermal decomposition temperature, thermal conductivity and heat capacity were examined. Finally, on the product errors that occur during plastic injection, causes, and solutions were investigated.

Key Words: polyethylene, polypropylene, polymer, thermoplastic, plastic injection molding; heat dissipation; heat transfer; fourier method;

TEŞEKKÜR

Çalıőmalarımı yönlendiren, araőtırmalarımın her aşamasında bilgi, öneri ve yardımlarını esirgemeyerek akademik ortamda olduğu kadar beőeri iliőkilerde de engin fikirleriyle bana büyük katkılar sağlayan danışman hocam sayın Prof. Dr. Ferhad Nasibov'a, yüksek lisans eğitimim süresince her konuda desteklerini aldığım hocalarım sayın Yrd. Doç. Dr. Can Doğan VURDU ve sayın Yrd. Doç. Dr. Ahmet CAN'a ve her zaman yanımda olan aileme en derin duygularla teşekkür ederim.

İlker CENGİZ

Kastamonu, Őubat, 2012

SİMGELER VE KISALTMALAR

Simgeler	Açıklama
l	eğrilmiş numunenin boyu
ρ	numunedeki eğrilik yarıçapı
Φ	katman kaldırılmış yüzeyin tepe noktasının düzleme uzaklığı
z_0	katman kaldırılmamış parçanın orta eksene kadar kalınlığı
z_1	katman kaldırılmış parçanın orta eksene kadar kalınlığı
E	Malzemenin Elastiklik katsayısı
ν	Poisson oranı
σ_x	x yönündeki gerilme
σ_y	y yönündeki gerilme
κ_x	x yönündeki eğrilik yarıçapının tersi
κ_y	y yönündeki eğrilik yarıçapının tersi

Kısaltmalar	Açıklama
PP	Polipropilen
PE	Polietilen
YYPE	Yüksek yoğunluklu polietilen
AYPE	Alçak yoğunluklu polietilen
PET	Polietilen Terafitalat
PVC	Polivinil Klorür
PS	Polistiren
ABS	Akrilonitril butadien stiren
PC	Polikarbonat
PA	Poliamid
KO	Kareler ortalaması
KT	Kareler toplamı
SD	Serbestlik derecesi

İÇİNDEKİLER

ÖZET.....	i
ABSTRACT.....	ii
TEŞEKKÜR.....	iii
SİMGELER DİZİNİ.....	iv
İÇİNDEKİLER.....	v
ÇİZELGELER DİZİNİ.....	viii
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	ix
RESİMLER DİZİNİ.....	x
1. GİRİŞ.....	1
2. POLİMERLERE GİRİŞ.....	4
2.1 Polimerlerin Yapısı ve Özellikleri.....	4
2.2 Plastikler.....	5
2.2.1 Termoplastikler.....	5
2.2.2 Termoset plastikler.....	7
2.2.3 Elastomerler.....	8
3. POLİMERİZASYON.....	9
3.1 Polimerizasyon Çeşitleri.....	9
3.1.1 Katılma polimerizasyonu.....	10
3.2. Basamaklı Polimerizasyon.....	12
3.2.1 Kütle (blok) polimerizasyonu.....	13
3.2.2 Çözelti polimerizasyonu.....	15
3.2.3 Süspansiyon (boncuk) polimerizasyonu.....	16
3.2.4 Emülsiyon polimerizasyonu.....	18
3.3 Polietilen Malzemeler.....	21
3.3.1 Alçak yoğunluklu polietilen (AYPE).....	21
3.3.2 Yüksek yoğunluklu polietilen (YYPE).....	22
3.3.3 Lineer alçak yoğunluklu polietilen (LAYPE).....	23
3.3.4 Polietilenlerin teknik özellikleri.....	24
3.4 Polipropilen Malzemeler.....	25
3.4.1 Polipropilenin teknik özellikleri.....	25
4. PLASTİK ENJEKSİYON KALIPLAMA.....	28
4.1 Plastik Enjeksiyon Kalıplama Süreci.....	28
4.2 Plastik Enjeksiyon Presi.....	30
4.2.1 Mengene mekanizması.....	31
4.2.2 Yumuşatma ünitesi.....	31
4.2.3 Enjeksiyon ünitesi.....	32
4.2.4 Kontrol üniteleri.....	32
5. PLASTİK ENJEKSİYON KALIBI.....	33
5.1 Yolluk, Dağıtıcı, Giriş Tipleri ve Özellikleri.....	33
5.2 Kalıplarda Sıkışan Havanın Çıkartılması ve Önemi.....	39
5.3 Kalıp Sıcaklık Kontrolü.....	40
5.4 Ürünün Kalıptan Alınması.....	40
6. POLİMERLER ESASLI ÜRÜNLERDE ISI GEÇİŞİ VE FOURİER.....	41
6.1 Uygulamalı Parabolik Meselelerde Fourier Metodu Ve Kaynak Fonksiyonunun Kullanılması.....	41
6.1.1 Uçlarındaki değişken sıcaklığı verilen bir çubuktaki ısının yayılması.....	41

6.1.2 Uçları ile bulunduğu çevre arasında ısı alışverişi olan çubuktaki ısının yayılması	43
6.1.3 Sonsuz silindire ısının yayılması	46
6.1.4 Homojen kürede ısının yayılması	48
6.1.5 Dikdörtgen levhada ısının yayılması	51
6.1.6 Sıcaklık dalgaları	52
6.1.7 Cismin donması hakkındaki mesele.....	56
6.2 Polimerlerin Isısal Özellikleri.....	59
6.2.1 Polimerlerin ısı karşısındaki davranışları	60
6.2.2 Polimerlerde camsı geçiş sıcaklığı	61
6.2.3 Polimerlerde maksimum kullanım sıcaklığı	63
6.2.4 Polimerlerde ısı bozunma sıcaklığı	64
6.2.5 Polimerlerde ısı iletkenlik	65
6.2.6 Isı kapasitesi	67
7. TERMOPLASTİK ESASLI ÜRÜNLERİN KALIPLANMASINDA ÜRÜN ÜZERİNDE OLUŞAN HATALAR VE ÇÖZÜMLERİ	69
7.1 Enjeksiyon Makinesinden Kaynaklanan Hatalar ve Çözümleri	69
7.1.1 Yanma izi	69
7.1.2 Renk izi	71
7.1.3 Hava izi	72
7.1.4 Oluklu çizgi.....	74
7.1.5 Gerilim beyazlaması/çatlama.....	76
7.1.6 Tamamen dolmamış baskı	77
7.1.7 Parça yüzeyinin kabuklanması	79
7.1.8 Hava kabarcıkları	81
7.1.9 Baskının kalıbın içinde kalması	82
7.1.10 Parça ölçüleri hatası	84
7.1.11 Farklı ağılıkta baskı	85
7.1.12 Memeden sonraki yolluğun yapışması	85
7.1.13 Plastiğin yılan gibi fişkırtarak kalıba dolması	86
7.2 Kalıptan Kaynaklanan Hatalar ve Çözümleri.....	87
7.2.1 Baskıdaki çökme	87
7.2.2 Farklı parlaklıklar	89
7.2.3 Yanma etkisi.....	91
7.2.4 Çapaklı parça.....	92
7.2.5 İtici izleri.....	93
7.2.6 Baskının kalıptan çıkarken uğradığı deformasyon.....	95
7.2.7 Çarpılma.....	96
7.2.8 Eteklenme.....	97
7.2.9 Kanal İzi	98
7.2.10 Yolluğa yakın soluk noktalar	99
7.3 Hammaddeden Kaynaklanan Hatalar ve Çözümleri	100
7.3.1 Nem izi	100
7.3.2 Cam Fiber izi	101
7.3.3 Kaynak izi	101
7.3.4 Koyu noktalar	103
7.3.5 Yüzeyin bozuk olması	104
8. SONUÇ VE ÖNERİLER.....	106

9. KAYNAKLAR.....	111
10. ÖZGEÇMİŞ.....	113

ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge	Sayfa
Çizelge 2.1 En çok kullanılan termoplastikler ve kullanım alanları.....	6
Çizelge 2.2 Sık kullanılan termoset malzemeler ve kullanım alanları.....	7
Çizelge 2.3 Termoplastik elastomer örnekleri.....	8
Çizelge 3.1 Alçak Yoğunluklu Polietilenin Özellikleri.....	22
Çizelge 3.2 Yüksek Yoğunluklu Polietilenin Özellikleri.....	23
Çizelge 3.3 Polietilen Teknik Özellikleri.....	24
Çizelge 3.4 Polipropilen Özellikleri.....	27
Çizelge 6.1 Bazı polimerlerin camsı geçiş sıcaklıkları ve erime sıcaklıkları.....	63
Çizelge 6.2 Bazı polimerlerin maksimum kullanım ve bozunma sıcaklıkları.....	65
Çizelge 6.3 Isıl İletkenlik Değerleri.....	67
Çizelge 6.4 Bazı maddelerin ve polimerlerin ısı kapasite değerleri.....	68

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil	Sayfa
Şekil 2.1 Bir etilen molekülü.....	4
Şekil 2.2 Polietilen molekülü.....	4
Şekil 2.3 Düz, dallanmış, çapraz bağlanmış polimer yapıları.....	5
Şekil 2.4 Termoplastik ve Termoset plastik molekül zincirleri arasındaki farklar..	7
Şekil 3.2 Radikalik katılma polimerizasyonunu ilerleyişi.....	11
Şekil 3.3 Anyonik radikalik polimerizasyon basamakları.....	12
Şekil 3.3 Kütle polimerizasyonu ile küçük boyutlarda poli(metil metakrilat) lev..	14
Şekil 3.4 Çözelti polimerizasyonu.....	15
Şekil 3.5 (a) Misel yapıcı olarak kullanılan sodyum lauril sülfat (b) Misel yapıcı molekülün Apolar ve polar uçları.....	19
Şekil 3.6 İçerisinde monomer bulunan misel.....	19
Şekil 3.7 Misel yapıcı moleküller tarafından sarılmış polimer tanecikleri.....	19
Şekil 3.8 Polietilenin Yapısı.....	20
Şekil 3.9 Polipropilenin Yapısı.....	25
Şekil 4.1 Plastik enjeksiyon kalıplama çevrimi a) Dolum, b) Ütuleme ve soğutma c) Soğutma ve mal alma d) Kalıbın açılıp ürünün alınması.....	28
Şekil 4.2 Enjeksiyon basınç grafikleri a) gerçekleşen, b)ideal.....	29
Şekil 4.3 Bir plastik enjeksiyon kalıplama presinin elemanları.....	30
Şekil 5.1 Bir plastik enjeksiyon kalıbı ve oluşturan elemanlar.....	33
Şekil 5.2 Enjeksiyon kalıbında besleme sistemi.....	34
Şekil 5.3 Dağıtıcı Kesitleri.....	35
Şekil 5.4 Dağıtıcı yerleşimlerine örnekler.....	36
Şekil 5.5 Farklı ürünlerin aynı kalıptaki yerleşimlerine örnekler.....	36
Şekil 5.6 Giriş tipleri örnekler.....	37
Şekil 6.1 Çubuktaki ısının yayılım eğrileri.....	45
Şekil 6.2 Homojen kürede ısını yayılım eğrileri.....	49
Şekil 6.3 Polimerlerin ısı geçişlerdeki davranışları.....	60
Şekil 6.4 Polimerlerde camsı geçiş sıcaklığı.....	61
Şekil 6.5 Kesit alanı A olan silindirde ısının aktarımı.....	66
Şekil 7.1 Yüksek sürtünme nedeniyle boya konsantresindeki ufak farklılıklar....	71
Şekil 7.2 Kazılmış yerlerin arkasında oluşan hava izi.....	73
Şekil 7.3 Akan plastiğin önü duvara yakın donar.....	74
Şekil 7.4 Soğutulmuş tabaka akan plastiğin ön kısmının kalıp duvarına dokunmasını geciktirir.....	75
Şekil 7.5 Akan plastik önü kalıp duvarına tekrar dokunur.....	75
Şekil 7.6 Kuvvetler etkilenen molekül yapıları.....	76
Şekil 7.7 İnce kaburgalara yakın doldurma problemi.....	78
Şekil 7.8 Farklı yapısal oluşumlu basılmış parçanın kesitindeki kabuklanma....	80
Şekil 7.9 Parçadaki hava kabarcıkları.....	82
Şekil 7.10 Kalıp doldurma normal ve plastiği fişkirtme.....	86
Şekil 7.11 Yüzeydeki farklı parlaklıklar.....	91
Şekil 7.12 Örnek delikte çapak çıkmış parça.....	92
Şekil 7.13 Görülebilir itici izleri olan parça.....	93
Şekil 7.14 Kaynak izlerinin oluşumu.....	102

RESİMLER DİZİNİ

Resim	Sayfa
Resim 3.1 Süspansiyon polimerizasyonu ile elde edilen polimerler.....	17
Resim 3.2 Araç lastiği.....	20
Resim 6.1 100 °C su ile dolu PET şişe.....	64
Resim 7.1 Tamamen dolmamış ürün.....	79
Resim 7.2 Eteklenmiş parça.....	97

1. GİRİŞ

Polietilenler ve polipropilenler, termoplastik ailesinin en çok kullanılan plastiklerindendirler. Polietilenler en eski polimerlerinden biri olup önceleri sadece alçak yoğunluklu üretilirken, gelişim göstermiş ve yüksek yoğunluklu, lineer, orta yoğunluklu olmak üzere üç yeni polietilen türü aileye eklenmiştir. Yeni türlerin eklenmesi, yani polietilenin iyileştirilmesi ile oyuncaktan, ev eşyasına, bidonlardan poşetlere kadar pek çok alanda kullanılmaktadır. Polietilenlerin dayanıklılık, sağlamlık, kolay işlenebilme ve dielektrik özelliklerinin üstünlüğü ile günümüzde oldukça yaygın olarak kullanılmaktadır. Polipropilenlerde ise en yaygın kullanım alanı depolama tanklarının ve bunlarla ilgili parça ve ekipmanların imalatıdır. Polipropilen tanklar, kimyasal maddelerin depolanmasında, su tasfiye ve atık su tesislerinde tercih edilir.

Termoplastikler konusu ilgi çeken bir konudur. Termoplastik katkılı ürünlerin üretimi ile ilgili bir çok çalışma yapılmıştır. Termoplastiklerin enjeksiyon kalıplarında şekillendirilmesi, kalıplama sırasında oluşan gerilmelerin giderilmesi, malzeme özellikleri ve ısıl özellikleri ile ilgili çeşitli akademik çalışmalar yapılmıştır. Ürünler üzerinde oluşan bozukluklar, kalıplama şartları ile ilgili birçok makale yayınlanmıştır.

Young (2004) plastik enjeksiyon kalıplamada, sıcaklık ve basınç değişimlerinin dolum sonrasında gelişen kalıntı gerilmeler üzerindeki etkisini temel bir model kullanarak hesaplamıştır. Simülasyonlarda polistiren (PS) ve polikarbonat (PC) malzemeler kullanmıştır. 90 mm x 49 mm x 7 mm ebatlarında ve 1 mm kalınlığında kutu bir parçayı modellemiştir. Sayısal analizden elde etmiş olduğu sonuçları daha önce yapılmış olan benzer çalışmalarla kıyaslamıştır ve geliştirmiş olduğu sayısal modelin kalıntı gerilmelerin hesaplanmasında kullanılabileceğini belirtmiştir.

Lee ve arkadaşları (2002), enjeksiyon veya sıkıştırma ile kalıplanmış merkezden girişli disk şeklinde parçalardaki akış ve ısıl nedenli kalıntı gerilmeleri ve çift kırınımı sayısal bir yöntemle hesaplamayı amaçlamışlardır. Sayısal analiz ile akış ve ısıl nedenli kalıntı gerilmeleri enjeksiyon kalıplamanın her safhası için

hesaplamışlardır. Analizlerde, merkezden girişli 101,6 mm çapında ve 2,01 mm kalınlığında simetrik, dairesel bir parçayı modellemişler ve malzeme olarak polistiren (PS) kullanmışlardır. Sayısal analiz sonuçlarını, aynı kalıplama şartlarının sağlandığı deneysel bir çalışmadan elde edilmiş verilerle kıyaslamışlardır. Isıl nedenli kalıntı gerilmenin parçanın merkezinde çekme gerilmesine, ara katmanlarda basma gerilmesine neden olduğunu saptamışlardır. Yüzey katmanında ise, ütüleme basıncı, ütüleme süresi ve diğer süreç şartlarına bağlı olarak çekme veya basma şeklinde geliştiğini ifade etmişlerdir.

Huang ve Tai (2001), plastik enjeksiyonla kalıplanmış ürünler üzerindeki çarpılmaları etkileyen faktörleri belirleyebilmek için ticari bir yazılım kullanarak, simülasyon çalışması gerçekleştirmişlerdir. 6 deney faktörü ve her bir faktör için 2 seviye belirlemişlerdir ve Taguchi Deneysel Tasarım yöntemini uygulamışlardır. Taguchi Deneysel Tasarım Analizine göre, belirlemiş oldukları faktörlerden kalıplanmış ürünlerdeki çarpılmaya en fazla etki eden faktörün ütüleme basıncı olduğu ve onu sırasıyla, kalıp sıcaklığı, enjeksiyon sıcaklığı ve ütüleme süresinin takip ettiğini ifade etmişlerdir. Dolum süresi ve giriş ölçüsünün, çarpılma üzerinde etkili olmadığını belirtmişlerdir.

Karataş ve Erel (2003) termoplastik malzemelerin kalıplanması esnasında üründe oluşan hatalar ve çözümleri ile ilgili bir çalışma yapmışlardır. Bu çalışmada enjeksiyon tezgahından, malzeme özelliklerinden ve kalıplardan kaynaklanan hataların sebepleri geniş bir biçimde incelenmiş ve çözüm önerileri sunulmuştur.

Her geçen gün bu çalışmalara bir yenis eklenmiş, farklı durumlar ele alınmıştır. Çünkü, termoplastik ailesine sürekli yeni bir yapı eklenmektedir. Üretimde bu plastiklerle birlikte kullanılan katkı maddelerine de yenileri eklenmektedir.

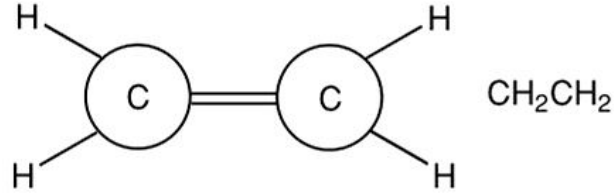
Bu çalışmada “polipropilen” ve “polietilen” esaslı ürünlerin plastik enjeksiyonla üretimindeki işlem parametreleri ve termodinamik yöntemlerle ısı yayılımı incelendi. Öncelikli olarak ikinci bölümde; polimerlerin genel yapıları araştırılarak bir sınıflandırma yapıldı. Termoplastikler, termosetler ve elastomerlerin özellikleri

karşılaştırıldı. Üçüncü bölümde; polimerizasyon çeşitleri ve aşamaları incelendi. Alçak yoğunluklu polietilen, yüksek yoğunluklu polietilen, lineer alçak yoğunluklu polietilen ve polipropilenlerin özellikleri ve kullanım alanları incelenerek karşılaştırmalar yapıldı. Dördüncü ve beşinci bölümde; plastik enjeksiyon sürecinde uygulanan işlemler ve ürüne etkileri araştırıldı. Üretimde ısı, akış, kalıplama ve kalıpta sıcaklık kontrolü gibi konular incelendi. Altıncı bölümde ısı yayılımı konusunda “Fourier Metodu” referans alınarak; çubukta, sonsuz silindirde, homojen kürede, dikdörtgen levhada ısı yayılımları matematiksel olarak incelendi. Bununla birlikte cismin donması ve sıcaklık dalgaları ile ilgili de matematiksel bir inceleme yapıldı. Termoplastiklerin ısı karşısındaki davranışları, camsı geçiş sıcaklıkları, maksimum kullanım sıcaklıkları, ısıl bozunma sıcaklıkları, ısıl iletkenlikleri ve ısı kapasiteleri incelendi. Son olarak plastik enjeksiyonlama esnasında ürün üzerinde oluşan hatalar, sebepleri ve çözümleri araştırıldı.

2. POLİMERLERE GİRİŞ

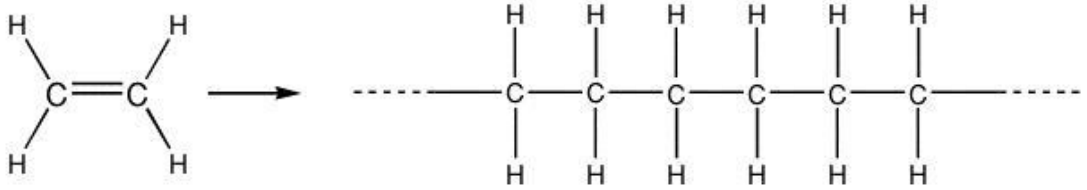
2.1 Polimerlerin Yapısı ve Özellikleri

Polimerler monomer denilen küçük moleküllerin birbirlerine tekrarlar halinde eklenmesiyle oluşan çok uzun zincirli moleküllerdir. Aynı monomerlerin oluşturduğu polimerlere homopolimer, en az iki farklı tip monomerden oluşan polimere ise kopolimer denir. En basit ve sık karşılaşılan monomer etilen'dir. Kimyasal olarak iki karbon (C) atomu ve dört hidrojen (H) atomundan meydana gelmiştir[18, 20]. Şekil 2.1.'de bir etilen molekülü görülmektedir.



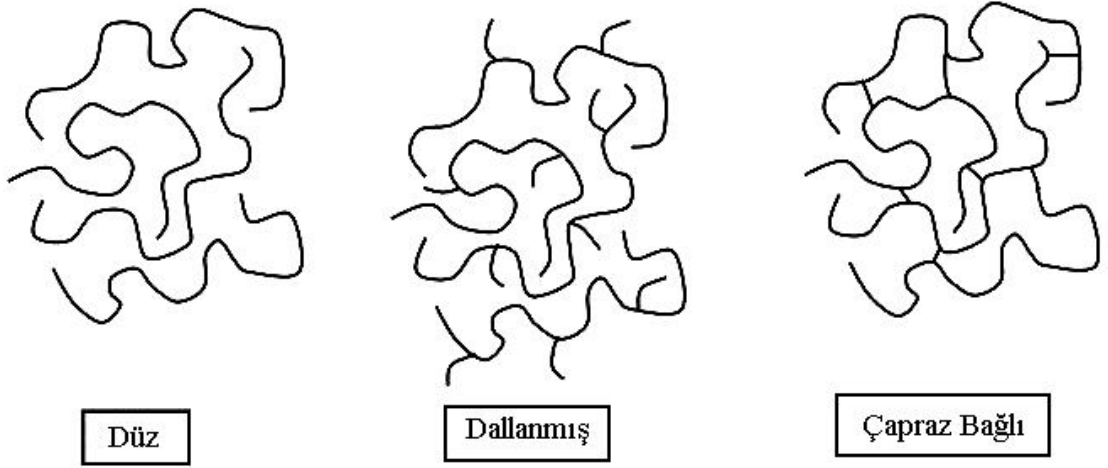
Şekil 2.1 Bir etilen molekülü[18]

Etilen'deki karbon atomları arasında bulunan çift bağ, polietilenin oluşmasına izin vermektedir (Şekil 2.2) [18].



Şekil 2.2 Polietilen molekülü[18]

Polimer zincirleri eğer uzun-zincir şeklinde ise “doğrusal lineer”, bu zincire bağlı olarak bazı yan zincirler varsa “dallanmış”, polimer zincirleri birbirine ara zincirler ile bağlanarak bir ağ yapı (üç boyutlu) oluşturuyorsa “çapraz bağlı” olarak tanımlanmışlardır (Şekil 2.3) [7].



Şekil 2.3 Düz, dallanmış, çapraz bağlanmış polimer yapıları[4]

2.2 Plastikler

Plastikler, polimerler ve kullanılabilirliğini artırmak için katılan diğer katkı malzemelerinden oluşurlar. Plastiklerdeki asıl polimer içeriği %20 ile %100 arasında değişebilir. Kullanılan diğer katkıların tipleri ve oranları uygulamada plastikten beklenenler doğrultusunda belirlenir [7, 18].

Plastikler fiziksel özelliklerine göre üç ana sınıfa ayrılırlar, termoplastikler, termoset plastikler ve elastomerler [18].

2.2.1 Termoplastikler

Bu malzemeler, ısıtıldıkları zaman yumuşar ve akar, soğutulunca sertleşirler, katılaşır. Tekrar ısıtıldıklarında yeniden akışkan hale gelebilirler. Bu olay termoplastikler için tekrar edilebilir bir özelliktir. Bu şekillendirme esnasında hiçbir kimyasal değişime uğramazlar. Bunun anlamı, bu plastikler yeniden işlenebilirler ve yeniden ergitilerek geri dönüştürülebilirler. Genel de polimerizasyon adı verilen kimyasal işleme elde edilirler. En çok kullanılan termoplastik malzemeler ve kullanım alanları Çizelge 2.1’ de verilmiştir.

Çizelge 2.1 En çok kullanılan termoplastikler ve kullanım alanları[18]

Termoplastik Polimer	Uygulamalar
Yüksek yoğunluklu polietilen (YYPE)	Paketleme, borular, tanklar, şişeler, kasalar
Alçak yoğunluklu polietilen (AYPE)	Paketleme, sebze çantaları, oyuncaklar, kapaklar
Polipropilen (PP)	Şapkalar, yoğurt kapları, bavullar, borular, kovalar, halılar, batarya kılıfı
Polistiren (PS)	Çoğunlukla saydam parçalar, yoğurt kapları, fast food köpük paketleri, kasetler
Polyamid (PA)	Yataklar, dişliler, cıvatalar, paten tekerleri, misina
Polietilen Terafitalat (PET)	Saydam karbonlu içecek şişeleri
Polivinil Klorür (PVC)	Gıda paketleri, ayakkabılar, zemin

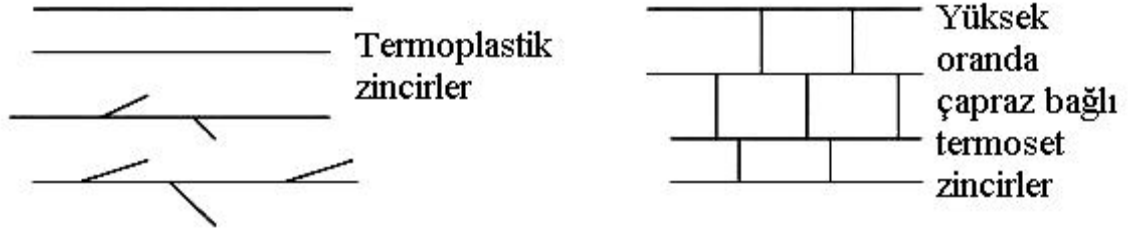
Termoplastikler katılaştığı zaman iki tip moleküler yapıdan birine sahip olurlar: amorf veya yarı kristal yapı [20].

Amorf polimerlerde, polimer zincirleri yapısal bir düzen göstermez. Moleküller arasında kendi kendini tekrar eden, düzenli boşluklar ve mesafeler yoktur. Amorf polimerler yeterince düşük sıcaklıklarda sert ve kırılındırlar. Isıtıldıklarında camsı geçiş sıcaklığı (T_g) denilen bir sıcaklıkta yumuşar ve kauçuk gibi özellikler gösterirler [7, 20].

Yarı kristal polimerlerin örgüsünde amorf ve kristal yapılar bir arada bulunur. Polietilen, Polipropilen, Poliamid, Poliester gibi plastikler yarı kristal yapıdadırlar. Bu polimerler camsı geçiş sıcaklıkları altında kırılındırlar. Camsı geçiş sıcaklığı üzerine çıktıklarında belli derecede yumuşaklık kazanmakla birlikte polimer örgüsü sıkıca bir arada durur. Bu malzemeler, soğutuldukları zaman moleküler yapıları yüksek oranda düzenlidir ve kristal yapıdadırlar. Kristal bölgelerin ölçüsü, zincirlerin yapısı ve soğutma hızına bağlıdır. Yarı-kristalin malzemeler, moleküler yeniden düzenlenme nedeniyle çekerler [18].

2.2.2 Termoset plastikler

Termoset plastikler, ısıtıldıkları zaman sürekli bir katılaşma meydana gelir. Isıtıldıklarında kimyasal yapıları bozulduğu için termoplastikler gibi yeniden işlenemezler. Geri dönüşümleri yoktur. Kalıplama veya ısıl süreç öncesinde, termoplastiklere benzer ip şekilli zincirler oluştururlar. Fakat kalıplama esnasında ısının etkisiyle moleküller çapraz bağlar ile yüksek yoğunlukta ağ oluştururlar. Bu nedenle kalıplanmış termosetler tekrar ergitilemez. Genelde polikondenzasyon yöntemi ile üretilirler. Termoplastik ve termoset plastiklerin moleküler düzeni arasındaki farklar Şekil 2.4’de görülebilir. Termosetler, çoğunlukla dayanım gerektiren yerlerde kullanılırlar [7, 18, 20]. Çizelge 2.2’de termosetlerin kullanım alanlarından bazı örnekler verilmiştir.



Şekil 2.4 Termoplastik ve Termoset plastikler molekül zincirleri arasındaki farklar[18]

Çizelge 2.2 Sık kullanılan termoset malzemeler ve kullanım alanları [18]

Termoset Polimerler	Uygulamalar
Epoksi	Yapıştırıcılar, elektrik yalıtımı
Melamin	Isı dayanımlı tabakalı yüzeyler,vb., mutfak tezgahları
Fenoliks	Tava/tencere kulpu, ütüler, ütüler, ekmek kızartma makineleri
Poliüretan (PU)	Yalıtım ve döşemecilik için esnek veya rijit köpük
Doymamış polyester	Duvarlar, ekmek kızartma makinelerinin kenarları, uydu çanakları

2.2.3 Elastomerler

Elastomerler oda sıcaklığında, gerçek uzunluğunun en az iki katına kadar defalarca esnetilebilen ve tekrar orijinal uzunluğuna geri dönebilen malzemeler olarak tanımlanır.

Termoplastik Elastomerler: Uzun bir süre, elastomerler sık çapraz bağlanma nedeniyle termoset tip malzemeler (örneğin; poliisoprene (doğal kauçuk)) olarak tanımlanmışlardır. Bu malzemelerin büyük bir dezavantajı, termoplastik elastomerlerde (TPEs) var olan, geri dönüşümün olmamasıdır. En sık kullanılan termoplastik elastomer örnek, stiren-bütadien-stirendir (SBS). TPEs'lerin termoset tip elastomerlere göre avantajları şunlardır [18]:

- Daha düşük parça yoğunluğu nedeniyle daha düşük parça maliyetleri
- Daha kısa çevrim süresi
- Artıkların ve parçaların geri dönüşebilmesi
- Renklendirilebilmek.

Termoplastik elastomerleri ticari açıdan daha başarılı yapan özellikleri, daha düşük esneklik ve elastiklidir. Gerilimden kurtulma kabiliyeti ve gerçek şekline geri dönmesi, sızdırmazlık elemanları gibi uygulamalar için onları uygun yapmaktadır. Elbette termoplastik kauçuklar, uzun süredir geçerlidir ve bu malzemeler günümüzde TPE'lerle yer değiştirmektedir [18]. Çizelge 2.3'de bazı termoplastik elastomer örnekleri ve onların temel molekülleri verilmiştir.

Çizelge 2.3 Termoplastik elastomer örnekleri [18]

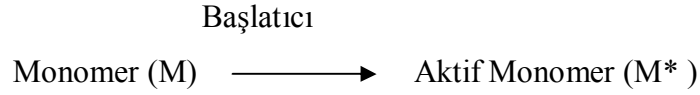
Tip	Elastomer Açıklama	Alt Grup
TPE-O	Polyolefin karışımları	PP/EPDM, PP/EPDM çapraz bağlı
TPE-V	Polyolefin alaşımları	çeşitli
TPE-S	Stiren	SEBS, SBS, SEBS/PPE
TPE-A	Polyamid	PA 12 tabanlı, PA 6 tabanlı
TPE-E	Polyester	Polyesterester, Polieterester
TPE-U	Poliüretan	Polyester üretan, Polieterester üretan, Polieter
SEBS = stiren-etilen/bütiren-stiren terblok kopolimer		

3. POLİMERİZASYON

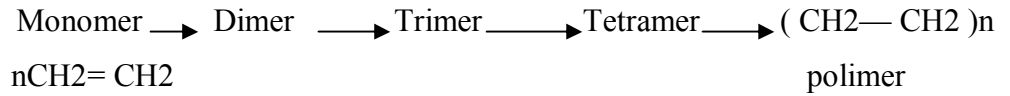
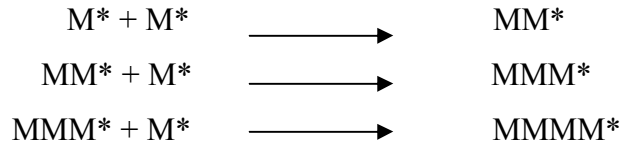
3.1 Polimerizasyon Çeşitleri

Monomer birimlerinden başlayarak polimer moleküllerinin elde edilmesine kadar olan reaksiyonlara polimerizasyon reaksiyonları denir. Polimerizasyon reaksiyonları yoğunlaşma ve zincir reaksiyonu şeklinde olabilir. Polimerizasyon oluşumu üç kısımdan meydana gelmektedir [2].

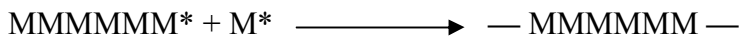
Başlama: Başlatıcılar monomerin kimyasal yapısını etkilerler. Monomer içinde bulunan atomlar, başka atomlarla bağ kuracak hale gelirken monomerler uygun kimyasallarla polimerleşebilecek hale getirilir.



Çoğalma: Oluşan aktif monomer, başka monomerlerle birleşerek, iki ve daha fazla monomer zinciri oluşturacak şekilde birleşirler .



Sonlanma: Monomer zincirinde bulunan aktif uçlar pasifleşir, yapı daha kararlı hale gelerek polimerleşme sonuçlanır.



Farklı kimyasal tepkimelerden yararlanılarak farklı polimerler elde edilmektedir. Bu tepkimeler genel işleyiş mekanizmaları açısından; katılma polimerizasyonu ve

kondenzasyon polimerizasyonu (basamaklı) olmak üzere temel iki polimerizasyon yöntemi altında toplanır [2].

3.1.1 Katılma polimerizasyonu

Katılma polimerizasyonun da monomerler aktif merkeze birer birer katılarak polimer zincirini büyütürler. Polimerizasyon süresince zincir büyüklüğü çok değişmez. Zincir reaksiyonları ile monomerler doğrudan doğruya polimer moleküllerine girerler [11].

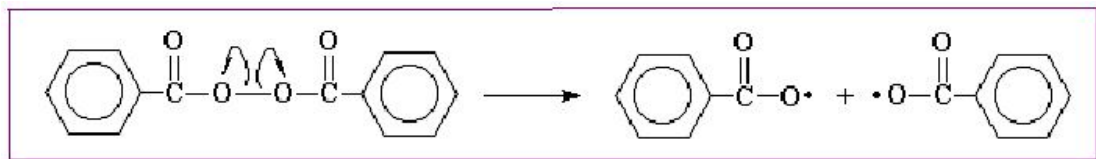
Katılma polimerizasyonunun iki çeşit başlatma yöntemi vardır. Bunlar;

- . Radikalik katılma polimerizasyonu
- . İyonik katılma polimerizasyonu [14].

Radikalik Katılma Polimerizasyonu: Polietilen, polipropilen ve polistiren gibi ticari sentetik polimerler doymamış organik bileşiklerin katılma polimerizasyonu ile üretilir. Çiftleşmemiş elektronu bulunan bileşiklerden faydalanılarak yapılır. Polimerizasyon radikaller üzerinden başlar ve zincir büyümesi yine radikaller üzerinden ilerler [27].

Serbest radikal, bir vinil monomerinin çifte bağı ile reaksiyona girerek monomere katılır ve çiftleşmemiş elektronu bulunan bir radikal verir. Çok kısa sürede çok sayıda monomer molekülü bu büyüyen zincire katılır. En sonunda iki radikal birbiriyle reaksiyona girerek polimer molekülünü oluştururlar [23].

Benzoil peroksit iyi bir başlatıcıdır ve benzen, toluen gibi çözücülerde hazırlanan çözeltiler 70–80 °C 'de ısıtıldığı zaman aşağıdaki tepkime ile parçalanarak benzoil oksil radikali üretilir.

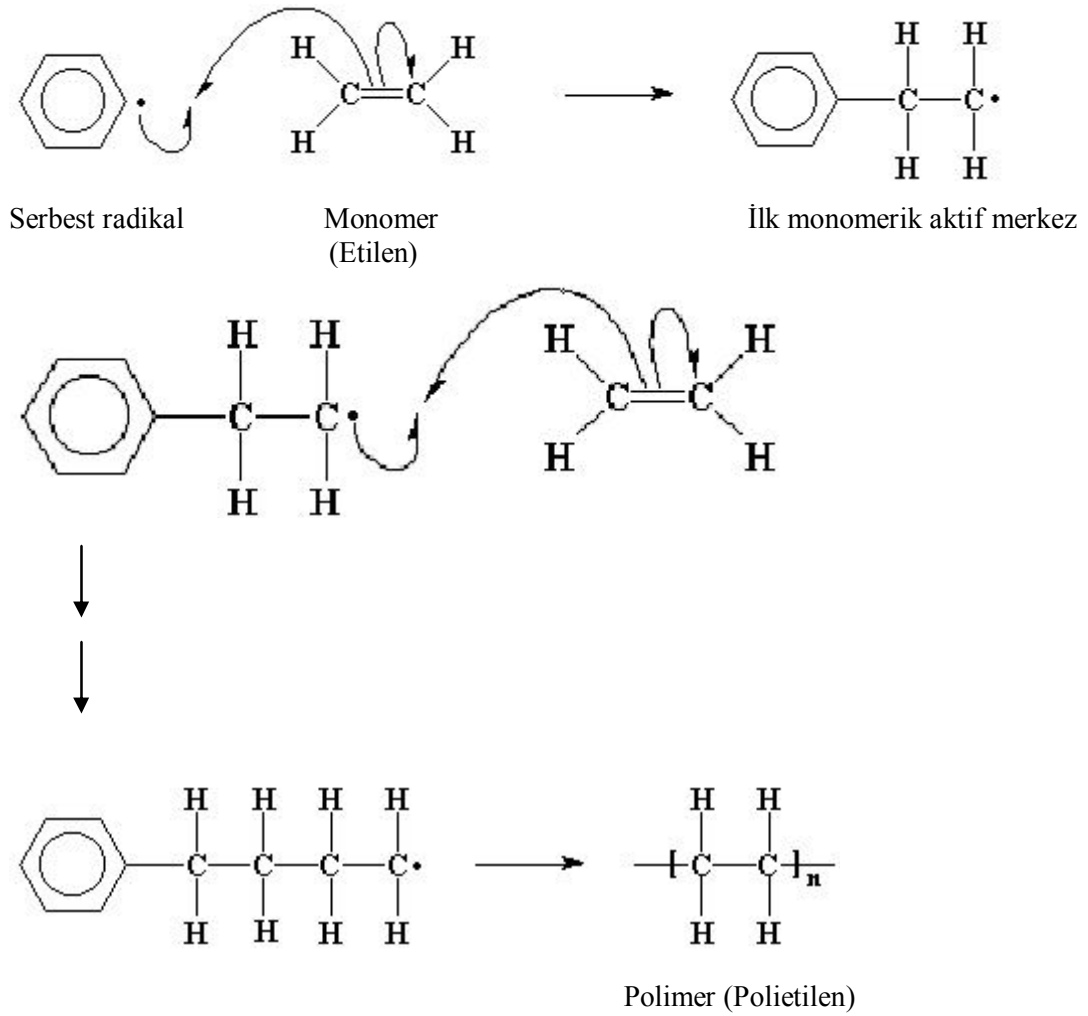


Benzoil peroksit

2 mol Benzoil oksil Radikali

Benzoil oksid radikali ortamda akrilonitril gibi bir vinil monomeri bulunduğunda, monomerin π - elektronlarının birisinin üzerinden monomerle birleşerek ilk monomerik radikali meydana getirir. Radikaldeki aktif merkeze yeni bir monomer aynı şekilde bağlanır ve radikalik aktif zincir bu şekilde büyür [11].

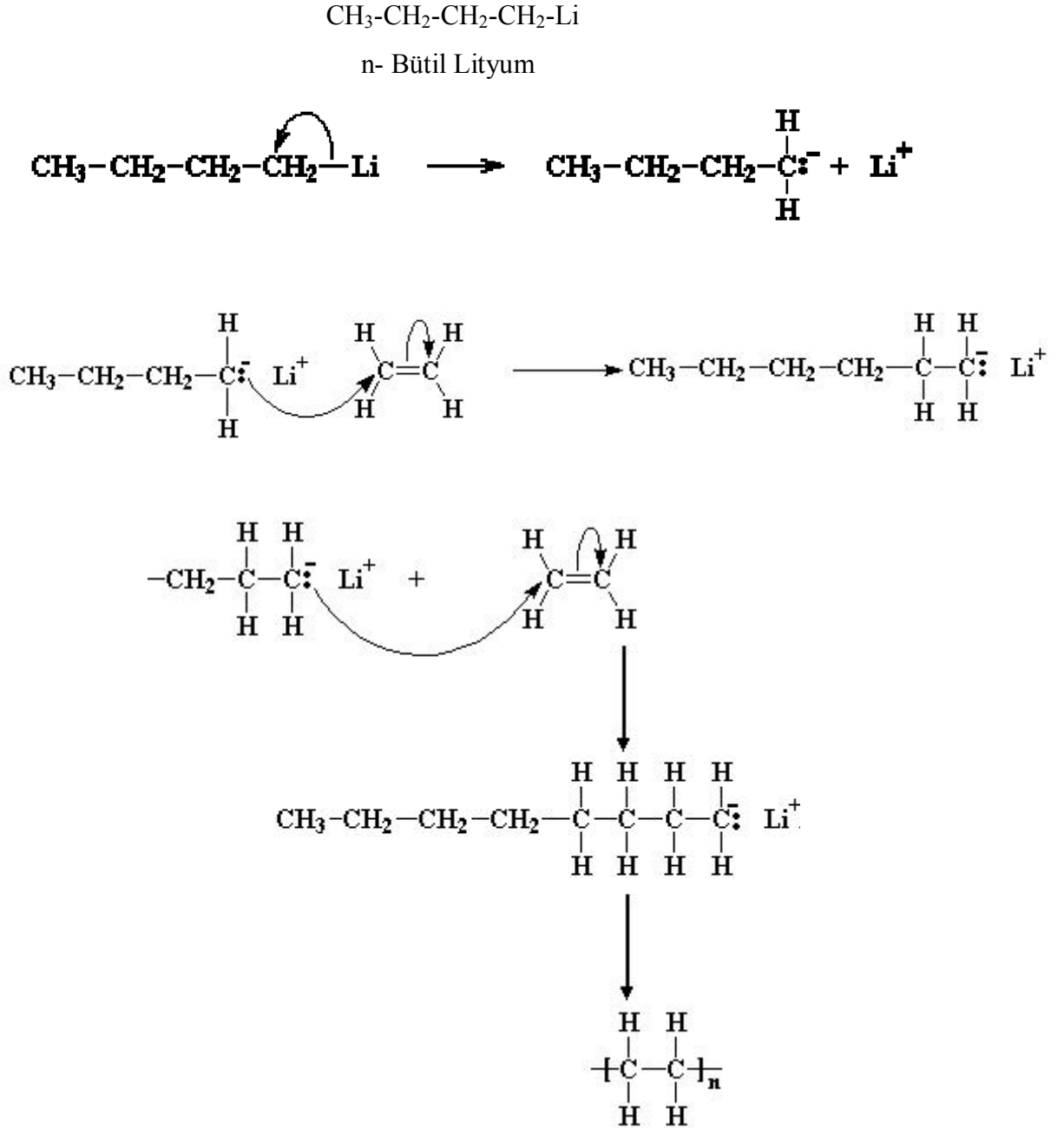
Aktif polimer zincirleri sonlanma tepkimeleri ile aktifliklerini yitirirler.



Şekil 3.2 Radikalik katılma polimerizasyonunu ilerleyişi. Polietilen polimerizasyonu [2]

İyonik Katılma Polimerizasyonu: İyonik polimerizasyon, zincir büyümesinden artı ya da eksi yüklü aktif merkezlerin sorumlu olduğu katılma polimerizasyonu türüdür. Monomer molekülleri zincir uçlarındaki iyonik aktif merkezlere radikalik polimerizasyona benzer şekilde katılarak polimer molekülünü büyütürler. Aktif

merkezin yükü eksi ise “anyonik katılma polimerizasyonu”, artı ise katyonik katılma polimerizasyonu tanımlamaları kullanılır. [27].

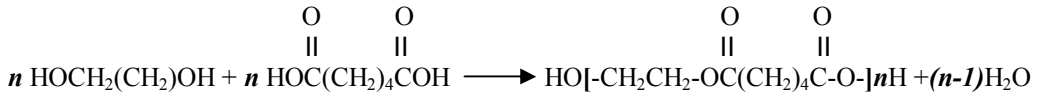


Şekil3.3 Anyonik radikalik polimerizasyon basamakları [2]

3.2 Basamaklı Polimerizasyon

Basamaklı polimerizasyon fonksiyonel gruplar taşıyan moleküller arasında adım adım ilerler. Önce iki monomer tepkimeye girerek bir dimer oluşturur. Dimer, diğer bir monomerle etkileşerek trimer veya kendisi gibi bir dimerle etkileşerek tetramere dönüşür ve benzer tepkimelerle zincir büyüme sürdürür [27].

Burada en önemli ön koşul; OH, NH₃, CO₃ v.b. gibi küçük moleküller çıkararak, kondensasyon polimerlerini oluşturmaktır. Örneğin dikarboksilli asitlerle glikollerden poliesterlerin, dikarboksilli asitlerle diaminlerden poliamidlerin oluşmasında yan ürün olarak su açığa çıkar [23].



Bu reaksiyonda etilen glikol ile adipik asit monomerleri polikondensasyona uğramıştır.

Poliester formülünde köşeli parantez içindeki birim polimer zincirinde yinelenmektedir. Bu birime **yinelenen birim** denir. Yinelenen birimin bileşeni reaksiyona giren iki monomerinkinden farklıdır. Bu reaksiyon bir denge reaksiyonudur. Reaksiyon bütün fonksiyonlu gruplar tükeninceye kadar sürer.

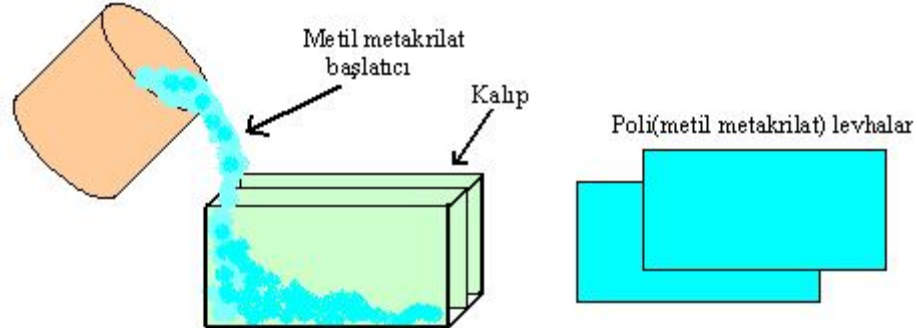
Basamaklı polimerizasyon; polimerlerin molekül ağırlığının yavaş yavaş artması ile ilerler. Basamaklı polimerizasyonda reaksiyon derecesi, reaksiyon süresinin bir fonksiyonu olduğundan istenilen molekül ağırlığı reaksiyonun uygun bir süre sonunda durdurulması ile elde edilir.

Reaksiyon, reaksiyona giren maddelerden birinin tamamen tükenmesi ve bütün zincirlerin her iki yönde aynı fonksiyonlu gruplarla sonlanması ile durdurulur[2,14].

3.2.1 Kütle (blok) polimerizasyonu

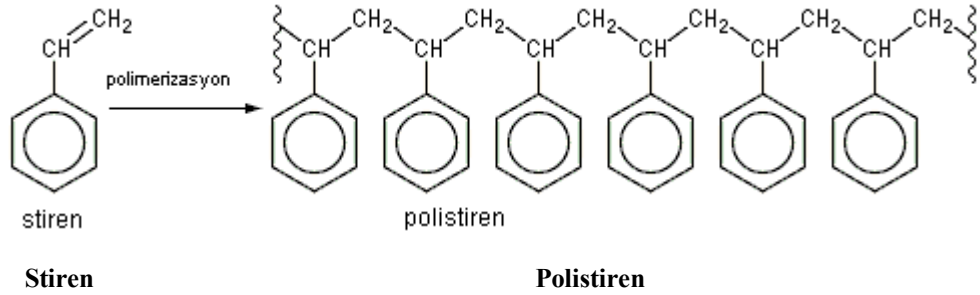
Blok ya da kütle polimerizasyonu, monomerlerin doğrudan doğruya veya monomer fazında pek az olarak çözülmüş olarak başlatıcı ve zincir transfer ajanları gibi katkı

maddelerinin bulunduğu ortamdaki polimerizasyonlarına dayanır. Oluşan polimer, polistirenin stirende, polimetil metakrilatın metil metakrilatta olduğu gibi, çözünebilir [2].



Şekil 3.3 Kütle polimerizasyonu ile küçük boyutlarda poli(metil metakrilat) levhalar [14].

Etilen, stiren ve metil metakrilatın polimerizasyonu bu şekilde yapılır. Naylon 6,6'da kütle polimerizasyonu ile elde edilebilir. Yabancı maddelerin polimerizasyon ortamına girme olasılığı çok az olup polimer ürünün ayrılması oldukça kolaydır.



Kütle polimerizasyonun da reaksiyonlar ekzotermiktir, bu nedenle ısı transferi kolayca yapılabilir.

Bu polimerizasyonun diğer polimerizasyon yöntemlerine göre üstünlükleri şunlardır:

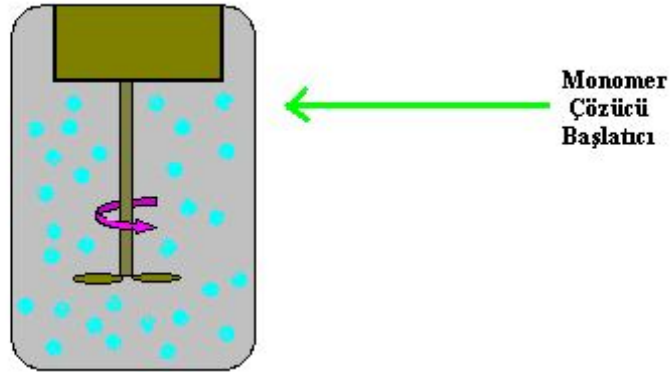
- Polimerizasyon hızının yüksek olması
- Uygulama kolaylığı
- Ekonomik olması
- Temiz polimer eldesi

- Polimerin doğrudan işlenebilmesi

Ancak polimerizasyon sırasında artan ortam viskozitesi, ısı aktarımını ve karıştırmayı zorlaştırır. Ayrıca tepkimeye girmeyen monomerlerin temizlenmesi gerekir. Bu dezavantajlar büyük ölçeklerde üretim yapılmasını sınırlar. Özellikle laboratuvar çalışmalarında kullanılan polimerizasyon yöntemidir. Kondenzasyon polimerizasyonları için elverişlidir. Çünkü bu tür polimerizasyonlarda yüksek molekül ağırlıklı polimer, reaksiyonunun en son aşamalarına kadar oluşamaz [23].

3.2.2 Çözelti polimerizasyonu

Çözelti polimerizasyonunun başlangıcında polimerizasyon ortamında monomer, çözücü ve başlatıcı bulunmaktadır. Bu polimerizasyonda monomer reaksiyona katılmayan (inert) bir çözücü içerisinde polimerleştirilir. Çözücü polimerizasyon ortamını seyrelttiği için viskozite düşer, karıştırma kolaylaşır ve daha etkin bir ısı transferi yapılabilir [20].



Şekil 3.4 Çözelti polimerizasyonu [20].

Polimerizasyonda kullanılan çözücü hem monomeri hem de başlatıcıyı çözerse polimerizasyon homojen bir ortamda başlar, ilerler ve sonlanır. Buna homojen çözelti polimerizasyonu denir.

Çözücü monomeri çözüp, polimeri çözmemesi sonucu ortamda çözünmeyen toz ve tanecik halinde polimer kalır. Ortamın homojenliğinden söz edilemez. Bu tür çözelti polimerizasyonlarına heterojen çözelti polimerizasyonu denir.

Çözelti polimerizasyonunda kullanılacak çözücünün seçimi önemlidir. Çözücüler; pahalı ve sağlık açısından zararlı olmamalıdır. Çözücülerden ayrıca; polimerizasyon koşullarında uygun erime ve kaynama noktası, polimerden kolay uzaklaştırılma, düşük alevlenme noktası, transfer tepkimelerine girebilme özellikleri beklenir. Bu koşullarda daha çok alifatik ve aromatik hidrokarbonlar, esterler, alkoller ve eterler kullanılır. Su tercih edilen bir çözücüdür, ancak monomerlerin birçoğu organik olduklarından su içerisinde çözelti polimerizasyonu yapılamaz. Ancak poliakrilamit, poli(akrilik asit), poli(metil metakrilat) gibi bazı polimerler su ortamında sentezlenebilir [2, 23].

Çözelti polimerizasyonunun avantajları:

- Isı aktarımı kolaylığı
- Vizkozitenin düşüklüğü
- Sıcaklık kontrolünün kolaylığı
- Ürünün doğrudan kullanımı

Çözelti polimerizasyonunun dezavantajları:

- Çözücüye zincir transfer (mol kütlelerini düşürür)
- Çözücünün polimerden uzaklaştırılması (maliyeti yükseltir, ürün doğrudan kullanılmayacak ise bozunmaya neden olabilir)
- Çözücünden dolayı çevre kirliliği (çözücü ayrıca zehirli ve kanserojen olabilir) [23].

3.2.3 Süspansiyon (boncuk) polimerizasyonu

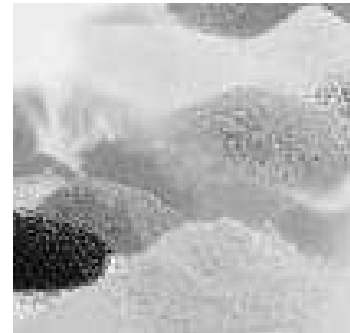
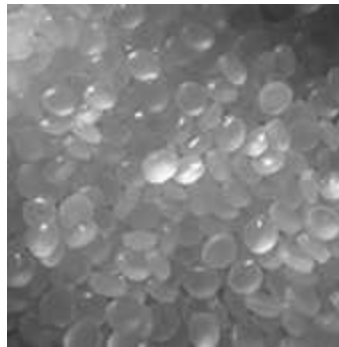
Süspansiyon polimerizasyonunda, polimerizasyon ortamı sudur. Çoğu monomer suda çözünmediği için, su ile karıştırıldıklarında su ve monomer ayrı fazlar halinde ayrılırlar. Süspansiyon polimerizasyonunda iyi bir karıştırma yapılarak monomer su içerisinde damlalar halinde dağıtılır ve faz ayrılmasının önüne geçilir. Su içerisinde dağılan monomer damlalarının çapı 0,1-5 mm arasında değişir ve ortama ayrıca monomer damlalarının birleştirilmesini önleyen ve stabilizör denen kimyasallar

katılır. Stabilizörler, organik karakterdeki monomer damlaları ile polar su moleküllerinin temas yüzeylerini azaltan maddelerdir [23].

Gerekli önlemler alınmazsa tanecikler kümeleşerek bloklaşır. Stabilizatör olarak genellikle jelâtin, kaolin, pudra, bentonit, baryum, kalsiyum ve magnezyum karbonatlar, alüminyum hidroksit gibi suda çözünmeyen inorganik bileşikler kullanılır. Ayrıca mekanik karıştırma ile damlaların birbirine yapışması engellenir [2,14].

Başlatıcısı organik fazda (monomerde) çözünen türdedir. Ortama katılan başlatıcı monomer damlalarında çözünür ve sistem başlatıcının bozunma sıcaklığına ısıtıldığında polimerizasyon başlatıcı moleküllerinin bulunduğu monomer damlalar içerisinde başlar. Polimerizasyon sonunda elde edilen toz polimer sudan süzülerek ayrılır ve kurutulur. Polimer granül halinde üretilir. Süspansiyon polimerizasyonunda karşılaşılan en önemli sorun ortamdaki taneciklerin birleşerek toplanma eğilimidir[23].

Stiren, metil metakrilat, vinil klorür, vinil asetat bu yöntemlerle polimerleştirilebilir. Elde edilen en son ürüne bakılarak bu tür polimerizasyona inci veya tane polimerizasyonu da denir [14].



Resim 3.1 Süspansiyon polimerizasyonu ile elde edilen polimerler [2]

Süspansiyon polimerizasyonunun avantajları:

- Isı aktarımı kolaydır.

- Sıcaklık kontrolü kolaydır.
- Ürün yapıştırıcı ve boya olarak kullanılabilir.
- Organik çözücü kullanılmaması
- Yığın ve çözelti polimerizasyonundan daha emniyetli olması

Çözelti polimerizasyonunun dezavantajları:

- Daha çok kesikli üretime uygundur.
- Ortamdaki maddelerden kaynaklanan polimer kirlenmesi
- Suyun ve stabilizatörün polimerden uzaklaştırılması, kurutulması gibi yan işlemler gerektirmesi bunun ekonomik açıdan yük oluşturması [14].

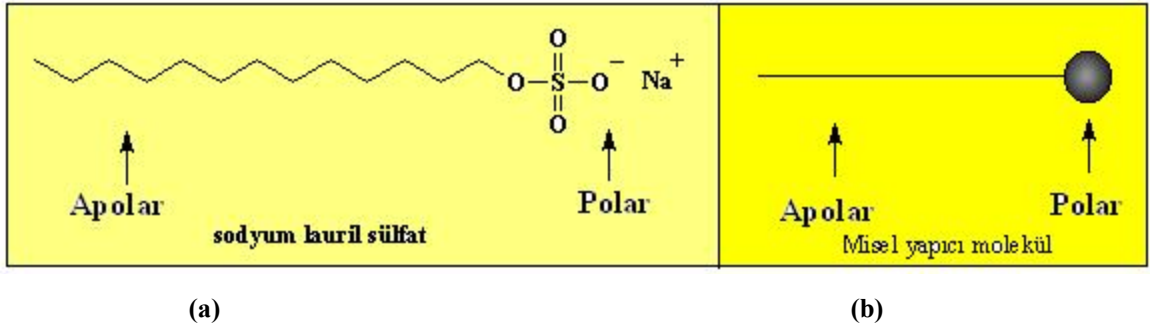
Akrilik asit, metakrilik asit, metil metakrilat, stiren, vinil asetat, vinil klorür, tetraflor etilen, klortrifloretilen monomerleri bu yöntemle polimerleştirilir. Süspansiyon polimerizasyonu endüstride çok sık kullanılan bir polimerizasyon yöntemidir [2].

3.2.4 Emülsiyon polimerizasyonu

Uygun emülsiyon yapıcılar yardımı ile su içinde çok ince dağılmış monomerin polimerleştirilmesi yöntemidir.

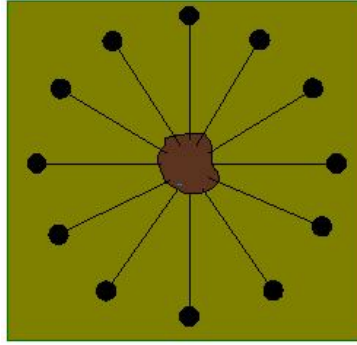
Su ortamında, yüzey aktif bir madde ve suda çözünen bir başlatıcı bulunur. Monomer emülsiyon yapıcı bir madde yardımıyla ortama dağılmış haldedir. Polimerizasyon başlatıcısı suda çözünen bir maddedir. Ortam devamlı karıştırılarak monomerin çok küçük parçacıklar halinde dağılarak elde edilmesi sağlanır.

Emülsiyon polimerizasyonunda, ortamda; su, monomer, misel yapıcı ve başlatıcılar bulunmaktadır. Monomer yüzey aktif bir madde (sabun gibi) ile kararlı hale getirilir ve bu damlacıklara **misel** denilir. Misellerin bir ucu hidrofobik diğer ucu hidrofiliktir. Polimerleşme misellerde çabuk ve oldukça düşük sıcaklıklarda yapılır. Yapılan ölçümler misellerin çubuk şeklinde olduğunu göstermiştir. Her misel 50- 100 emülsiyon yapıcı molekülden oluşur. Miseli oluşturan bu moleküllerin, hidrokarbon kuyrukları miselin içine, iyonik uçları ise suya doğru dönük durmaktadır [2, 14, 23].



Şekil 3.5 (a) Misel yapıcı olarak kullanılan sodyum lauril sülfat (b) Misel yapıcı molekülün Apolar ve polar uçları [14]

Emülsiyon polimerizasyonunun başlangıcında misel yapıcı ve su karıştırılır. Karışımda bulunan misellerin bir kısmı suda çözünür, bir kısmı da bir araya toplanarak küresel miseller oluşturur.

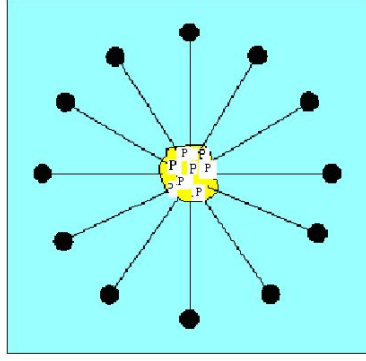


Şekil 3.6 İçerisinde monomer bulunan misel [2].

Su içerisinde miseller çözüldükten sonra karıştırılarak ortama monomer katılır.

- Monomerin bir kısmı suda çözünür.
- Bir kısmı misellerin içine girerek onları şişirir.
- Diğerleri de monomer damlaları halinde suda dağılır

Emülsiyon yapıcı madde ortamda bulunan monomerlere tutunur ve polimerizasyon gerçekleşir. Ortamdaki polimerlere sarılarak polimerizasyon işlemi sonlanmış olur.



Şekil 3.7 Misel yapıcı moleküller tarafından sarılmış polimer tanecikleri [2]

Emülsiyon polimerizasyonunun tekniği özellikle sentetik kauçuğun üretiminde kolaylık sağlar. Endüstride stiren- bütadien (SBR)kauçuğun üretiminde kullanılmaktadır. SBR özellikle lastik endüstrisinde kullanılan önemli bir polimerdir.



Resim 3.2 Araç lastiği

Emülsiyon polimerizasyonunun avantajları:

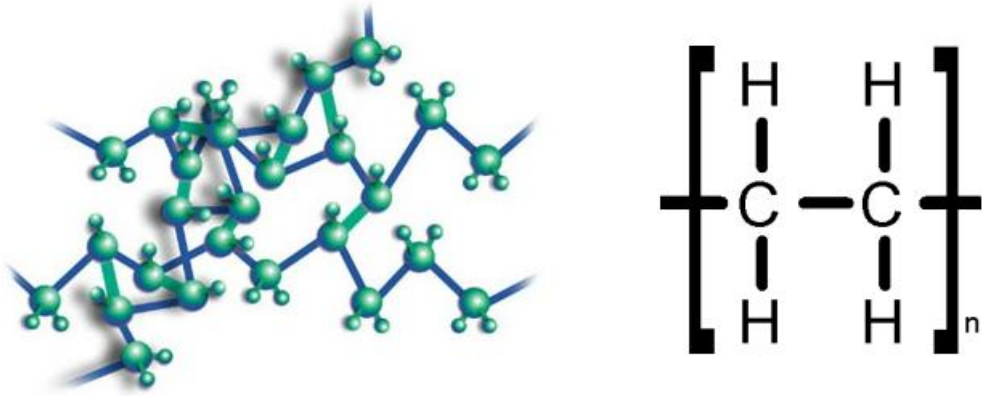
- Polimerizasyon hızı yüksektir.
- Yüksek mol kütleli polimer elde edilebilir.
- Sıcaklık kontrolü kolaydır.
- Viskozite düşüktür.
- Kütle ve çözelti polimerizasyonuna göre daha emniyetlidir.
- Organik çözücü kullanılmaz.

Emülsiyon polimerizasyonunun dezavantajı:

- Polimerden miseli uzaklaştırmak zordur [11].

3.3 Polietilen Malzemeler

Polietilenler termoplastik ailesinin en eski polimerlerinden biri olup önceleri sadece alçak yoğunluklu üretilirken gelişim göstermiş ve yüksek yoğunluklu, lineer, orta yoğunluklu olmak üzere üç yeni polietilen türü aileye eklenmiştir. Polietilenler günümüzde oldukça yaygın olarak kullanılmaktadır. Yeni türlerin eklenmesi, yani polietilenin iyileştirilmesi ile oyuncaktan, ev eşyasına bidonlardan poşetlere kadar pek çok alanda kullanılmaktadır. Polietilenlerin dayanıklılık, sağlamlılık, kolay işlenebilme ve dielektrik özelliklerinin üstünlüğü ile günümüzde oldukça yaygın olarak kullanılmaktadır [28,29].



Şekil 3.8 Polietilenin Yapısı

3.3.1 Alçak yoğunluklu polietilen (AYPE)

AYPE bir otoklavda veya boru tipi tubular reaktörde, etilen monomerlerinin 1200 – 3000 atm basınç ve 130 - 350°C sıcaklıkta, organik peroksitlerin yardımıyla polimerizasyonundan elde edilir. Yüksek basınç proseslerinde katalizör olarak O₂ veya peroxide kullanılır.

AYPE üretmek için yüksek basınçlı proses ve oksijen ve peroksit katalisti kullanılır. Polietilen üretmek için gerekli saf etilen, pompalar yardımıyla 150 MPa' a basılarak 190°C' deki tubuler reaktöre beslenir. Aynı anda reaktöre katalist eklemesi de yapılır. Reaksiyon bir çözelti içinde gerçekleşir. Buradan çıkan karışım yüksek basınç separatörüne gelir. Burada reaksiyona uğramış etilen polietilen olarak düşük basınç separatörüne yollanırken, reaksiyona girmeyen etilen sisteme geri beslenmek üzere

önce kompresöre, oradan tubuler reaktöre yollanır. Düşük basınç separatöründen çıkan ürün ekstrudera beslenir. Ekstruderda kalıplanan ürün, önce soğutulur sonra kurutular [28].

Çizelge 3.1 Alçak Yoğunluklu Polietilenin Özellikleri [28]

Özgül Ağırlık	0,91 – 0,93 g/cm ³
Elastiklik Modülü	0,1 – 0,26
Erime Noktası °C	98 – 120
Dayanma Gücü / Mpa	4,1 – 1,6

Alçak yoğunluklu polietilen günümüzde, ağır hizmet torbası, sera örtüsü, ambalaj filmi, kablo kılıflama, ev eşyası, oyuncak, boru, hortum, tüp, şişe, kumaş ve metal kaplamaları, rotasyonlar, kalıplama maddeleri, her çeşit streç ve şirink film, poşet, peçete için naylon torba vs. üretiminde kullanılır [28].

3.3.2 Yüksek yoğunluklu polietilen (YYPE)

Yüksek yoğunluklu polietilen kopmaya, kırılmaya ve parçalanmaya karşı direncini kaybettiği gibi bunların kalıplanması için yüksek sıcaklığa ve basınca ihtiyaç vardır. YYPE, titanyum tetraklorür katalizör (Ziegler – Nata katalizörü) ve organometalik katalizörler yardımıyla 10 – 20 atm basınç ve 70 – 80 °C sıcaklıkta etilenin polimerizasyonu sonucu elde edilir. YYPE, düşük basınçla çalışan proseslerde üretilmektedir. YYPE, dallanmış yapıya sahiptir.

YYPE üretmek için düşük basınçlı prosesler ve besleme olarak etilenle birlikte komonomer beslemesi yapılmalıdır. Union Carbide's Unipol prosesi kullanılır. Saf etilen ile 1 – butane komonomeri sıvı yataklı reaktöre beslenir. Aynı anda reaktöre katalist de beslenir. Reaktörde 100°C' de basınç 690 kPa' dan 2100 kPa' çıkar. Sıvı yataklı reaktörde reaksiyona girmeyen etilen önce kompresörle basılıp daha sonra uygun sıcaklığa gelmesi için soğutulup sisteme tekrar beslenir. Reaksiyona giren kısım reaktörden gaz olarak çıkan ürün gaz-lock odasına kurutulmak üzere alınır. Buradan çıkan ürün separatöre gelir. Separatörde, ürün nitrojen ile temizlenerek

depolanmaya alınır. Reaktör içinde polimerin kalma süresi ortalama 3 – 5 saattir[28, 29].

Çizelge 3.2 Yüksek Yoğunluklu Polietilenin Özellikleri [30]

Özgül Ağırlık	0,94 – 0,97 g/cm ³
Elastiklik Modülü	0,41 – 1,24
Erime Noktası °C	127 – 137
Dayanma Gücü / Mpa	21 – 38

Yüksek yoğunluklu polietilen günümüzde, ev eşyası, oyuncak, ambalaj filmi, boru (sert boru, deterjan ve kozmetik şişesi (şeffaf olmayan)), su, gaz bidonu, levha, kağıt, kumaş ve metal kaplamada rotasyonel kalıplama maddeleri, atlet tipi poşet, plastik poşetler, laminasyon, file çuval, basınçlı su borusu, gaz ve kanalizasyon, su dağıtım, kanalizasyon, sulama dağıtım şebeke boruları alanlarında kullanılır [28].

3.3.3 Lineer alçak yoğunluklu polietilen (LAYPE)

Son zamanlarda alçak basınçlı otoklav ve tubular reaktörler kullanmak suretiyle LAYPE üretimi yapılmaktadır. LAYPE'nin özellikleri AYPE' den oldukça farklıdır. Gerilime dayanımı ve uzama AYPE' ne nazaran daha yüksek, darbe dayanımı daha iyidir. Isı direnci 15°C' daha yüksek, islenmesi daha zordur. Buna karşılık berraklık, parlaklık daha kötü olup, erime gücü daha düşüktür. LAYPE üretimi gaz fazı prosesinde gerçekleştirilir, elde edilen reçine, etilen – alfa olefin kopolimeri olup, lineer bir yapıya sahiptir. LAYPE' de dallanma olmadığından işleme esnasında makine çekim yönündeki uzaması çok fazladır. Çekim yönünde dik uzaması ise düşüktür. LAYPE otken, hekzen ve büten ile kopolimer olarak da üretilir [28].

LAYPE işleme teknikleri ile AYPE işleme teknikleri aynı olup, LAYPE yalnız basına islenmek istenildiğinde konvansiyonel AYPE ekstruderlerinde işlenmez. Bu yüzden AYPE içinde LAYPE % 40' avaran oranlarda karıştırılarak kullanılır. LAYPE'ni tek basına işlemek için bu ürüne göre dizayn edilmiş yeni ekstrüder kullanmak gerekir .

LAYPE günümüzde, Film ekstruzyon ürünleri; çöp torbaları, zirai amaçlı ağır hizmet torbaları, branda, market torbaları, tekstil ürün ambalajları, enjeksiyon kalıplama ürünleri; ev esyaları, oyuncak imali, kırtasiye malzemeleri, elektronik sanayi bağlantı parçaları, döner kalıplama ürünleri; çeşitli büyüklükte konteynırlar, çöp bidonları, portatif kulübeler, şişirme ile kalıplama ürünleri; çeşitli hacimde şişeler gibi ürünlerde kullanılır [30].

Çizelge 3.3 Polietilen Teknik Özellikleri [30]

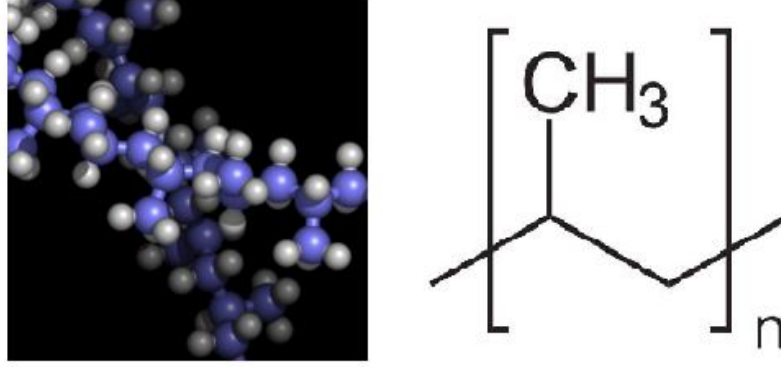
POLİETİLEN TEKNİK ÖZELLİKLERİ

TEKNİK ÖZELLİKLERİ	PE- HD	PE - 500	PE - 1000 UHMW	PP - H	PP - S (R)
Yoğunluk gr/cm ³ DIN 53479	0,96 - 0,96	0,96	0,96	0,94 - 0,92	0,95
Ürün Gerilimi N/mm ² DIN 53455	22	28	22	33 - 31	32
Üründeki Sünme Yüzdesi DIN 53455	9	8	10	8 - 8	8
Kırılmadaki Çekme Yüzdesi	300-500	150	150	70 - 70	70
Bükülme -E Modülü N/mm ² DIN 53457	750	850	800	1200	1300
Çarpma Mukavemeti ky/m ² DIN 53453	KIRILMAKSIZIN	KIRILMAKSIZIN	KIRILMAKSIZIN	KIRILMAKSIZIN	KIRILMAKSIZIN
Çentiklenmiş Çarpma Mukavemeti kj/m ² DIN 53453	12-13	50	KIRILMAKSIZIN	4 - 4	4
Bilya Dışleme Sertliği N/mm ² DIN 53456	40-43	45	40	70	70
Kıyı (Kenar) Sertliği DIN 53505	63-62	66	64	72 - 70	72
Sünme K-1 Müşterek Termal Etkisi DIN 53752	1,8 - 10 (14)	1,8 - 10 (14)	1,8 - 10 (14)	1,6 - 10 (14)	1,6 - 10 (14)
Isı Geçirgenliği W/mk DIN 5348	0,38	0,38	0,38	0,22	0,22
Alev Geciktirme DIN 4102	B2	B2	B2	B2	B1
Elektrik Geçirmezliği Kv/mm DIN 5348	47-50	44	44	52 - 58	22
Satın Mukavemeti OHM DIN 53482	10(14)	10(14)	10(14)	10(14)	10(14)
Isı Tablosu °C	-50/ +80	-100 / +80	-260 / +80	-0,5 / +100	0 / +100
Kimyevilere Mukavemeti	ASİT, ALKALİ VE SOLVENTLERE KARŞI YÜKSEK DERECEDE DAYANIKLI				
Fizyolojik olarak kabul edilebilirliği	evet	evet	evet sadece natür	evet	hayır
Kaynaklama	evet	evet (şartlı olarak)	evet (şartlı olarak)	evet	evet
Tutkallama ve cam elyaf takviye	YALNIZ ÖNCE DENEMEDEN SONRA			ÜSTÜ KAPLANMIŞ LEVHALARLA MÜMKÜN	
Laklama Baskısı	YALNIZ ÖNCE DENEMEDEN SONRA				
Sıcak Şekillenme	iyi	mümkün	şartlara bağlı	iyi	iyi

3.4 Polipropilen Malzemeler

En yaygın ticari termoplastik polimer olan polipropilen 2001 senesinde tüm dünyada 45 milyon ton üretilerek 65 milyar dolarlık bir pazar yaratmıştır. Özellikle izotaktik polipropilen (PP) düşük yoğunluğu ve yüksek mukavemeti sayesinde çok yüksek güç:ağırlık oranına sahiptir. Bu sebeple de otomotiv parçalarından tekstil ve paketleme endüstrisine kadar her alanda en yaygın kullanılan polimerdir.

Olefin tesislerinden ve petrol rafinelerinden çıkan gazlardan elde edilen propilen monomerinin koordinasyon katalizörleri ile polimerizasyonu sonucu elde edilen bir polimerdir [29, 30].



Şekil 3.9 Polipropilenin Yapısı [29].

3.4.1 Polipropilenin teknik özellikleri

Polipropilen düşük özgül ağırlıklı olefin sınıfı bir plastiktir. İyi kimyasal ve elektriksel özelliklere sahip ve rijiddir. 0°C'nin altında kullanımı, mekanik özellikleri zayıfladığı için tercih edilmez. Normal olarak +0°C, +100°C sıcaklık aralığında kullanılır.

Polipropilen, yorulmaya karşı çok iyi direnç gösterir. Düşük maliyetlidir, iyi bir darbe dayanımı vardır. Sürtünme katsayısı düşük olup, çok iyi elektrik yalıtımı sağlar. Kimyasal direnci iyidir. Tüm termoplastik işleme proseslerine uygundur. Polipropilenin, erime sıcaklığı 160 santigrat derece civarındadır.

Boru ve plaka parçaları gri ve opak beyaz renkte olup iç yüzeyler çok düzgün olduğundan bakteri oluşturmaz, yosun tutmaz ve kireç bağlamaz, dolayısıyla çap daralması diye bir sorunu olmaz. Ayrıca, kimyasal maddelere karşı üstün dirençlerinden ötürü paslanmaz ve çürümezler, içinden geçen su ve/veya sıvıya koku vermez. Buna karşın şu dezavantajlara sahiptir. UV ışını dayanımı azdır. Boya ve kaplaması zordur [29].

Polipropilen'in özellikleri kısaca şunlardır:

- Yüksek moleküller ağırlık, iyi bir esneklik ve düşük erime değeri,
- Sıcağa karşı uzun süre dayanıklılık,
- Yüksek sıcaklıklarda formunu ve kimyasal yapısını muhafaza etmek,
- Kimyasal maddelere karşı dayanıklı olup asit, baz ve tuzlardan etkilenmezler, paslanmaz, erimez ve çürümezler. İçinden geçen sıvıya koku vermez, tadını değiştirmez,
- Yüzeyler çok düzgün olup sürtünme katsayısı düşük ve bakteri üretmez, yosun bağlamaz, kireç tutup çapı daralmaz,
- - 5°C ile + 95°C arasındaki dış ortam sıcaklıklarından etkilenmezler ve izolasyon gerektirmezler,
- PN20 basınç sınıfındaki boruların işletme basıncı en az 50 yıl ömre göre 20°C sıcaklıkta 20 Atü, 70°C sıcaklıkta 8,5 Atü'dür.
- Normal dış etkenlerde, tesisatta uzun süreli kullanma sıcaklıkları 70° ila 95°C'dir.
- Genleşme metallere göre daha fazla olup Lineerdir.
- Füzyotherm kaynak tekniği ile kolayca ve tam olarak birleştirilirler, çap daralması olmaz [29, 30].

Polipropilen genelde 3 farklı şekilde üretilir. Piyasada çoğunlukla homopolimer, kopolimer ya da blok-kopolimer olarak görülür. Kopolimerler üretilirken kullanılan ko-monomer genellikle etilendir ve etilen-propilen kauçuğu elde edilir. EPDM diye adlandırılan bu kopolimer polipropilenin modifikasyonunda sıkça kullanılır ve düşük sıcaklıklardaki darbeye karşı direncinin artmasında büyük rol oynar. Buna ek olarak, etilen monomerinin kopolimer zincirine rasgele yerleştirilmesi polipropilenin

kristalliğinin düşmesine sebep olur ve böylece daha şeffaf bir plastik elde edilir [29]. Polipropilen malzeme özellikleri Çizelge 3.4 de verilmiştir.

Çizelge 3.4 Polipropilen Özellikleri [29]

Polipropilen		
Yapı	Kristal	
Yoğunluk	0.93	g/cm ³
Erime Sıcaklığı	160	°C
Kristalleşme Sıcaklığı	111	°C
Camsılaşma Sıcaklığı	-10	°C
Doğrusal Genleşme Katsayısı (CTE)	115	µm/m-°C
Yük Altıda Eğilme Sıcaklığı (HDT)	102	°C @ 0.46 MPa
Azami Servis Sıcaklığı (Hava)	78	°C
Dielektrik Dayanımı	23	kV/mm
Saydımlık	Yarı Saydam	
Mekanik Özellikleri		
Gerilme Mukavemeti	31	MPa
Basma Mukavemeti	45	MPa
Çekme Modülü	1.3	GPa
Kopma Esnemesi	200	%
Darbe Dayanımı (Çentiksiz Izod)	8.39	J/cm
Sertlik	R95	Shore Ölçeği
* Tabloda ortalama değerler verilmiştir. Bu değerlerin polimerin molekül ağırlığına ve numunenin üretim şekline göre farklılık göstermesi mümkündür.		

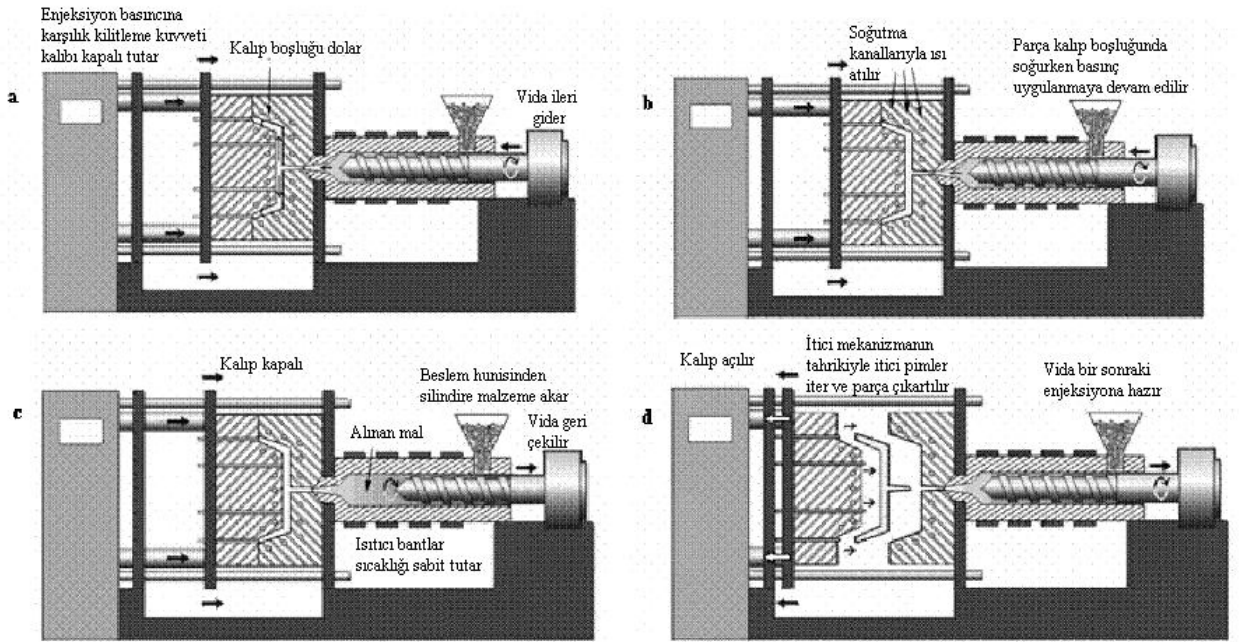
4. PLASTİK ENJEKSİYON KALIPLAMA

4.1 Plastik Enjeksiyon Kalıplama Süreci

Plastik enjeksiyon kalıplama, ergimiş veya yumuşatılmış plastik malzemenin kalıp boşluğuna yüksek basınç altında doldurulması ve kalıp boşluğunun şeklinde katılaştırılması sürecidir. Bir enjeksiyon kalıplama sisteminin temel adımları;

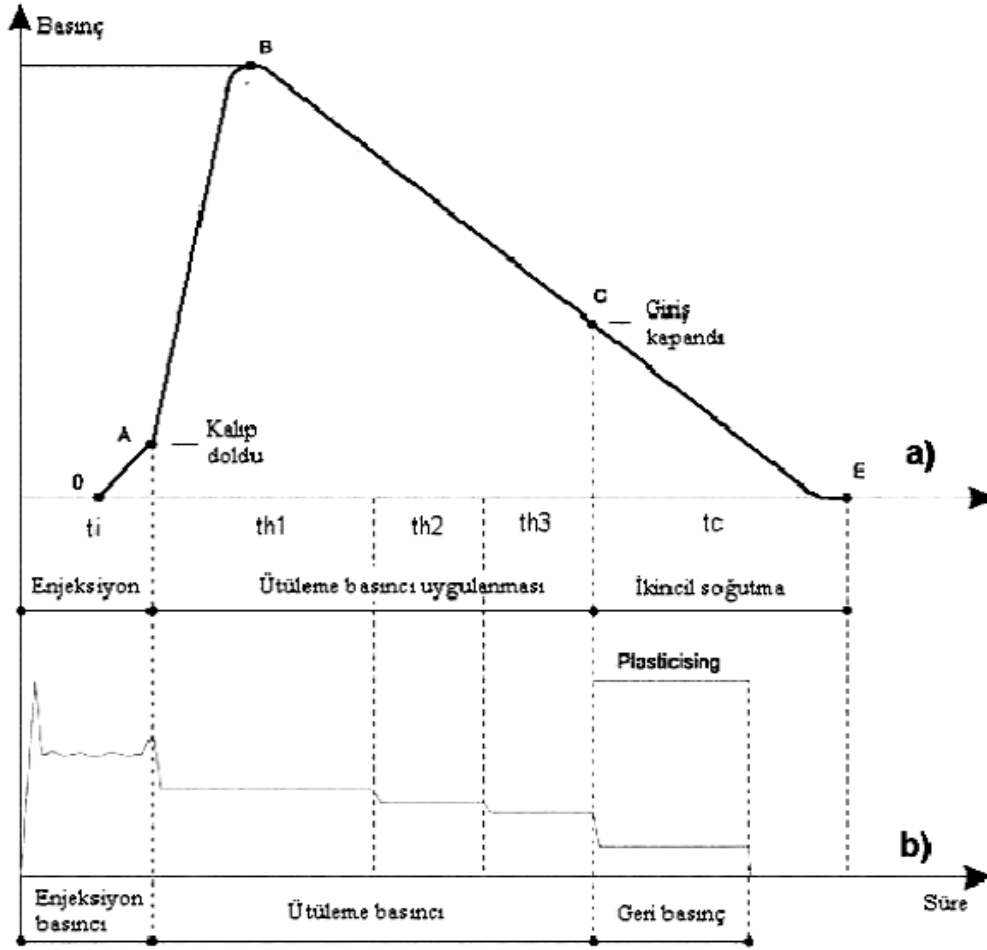
- Kalıbın kapanması
- Ergimiş veya yumuşatılmış plastiğin kalıp boşluğuna enjekte edilmesi
- Plastik soğuyup kalıptan çıkmaya hazır olana kadar kalıbın kapalı tutulması
- Kalıbın açılması ve
- Bitmiş ürünün kalıptan alınması [4, 18, 24]

Plastik enjeksiyon kalıplama çevriminin adımları şematik olarak Şekil 4.1’de verilmiştir.



Şekil 4.1 Plastik enjeksiyon kalıplama çevrimi a) Dolu, b) Ütülme ve soğutma c) Soğutma ve mal alma d) Kalıbın açılıp ürünün alınması [24].

Plastik enjeksiyon kalıplama esnasında uygulanan ve gerçekleşen enjeksiyon basınç grafikleri Şekil 4.2’de verilmiştir. Şekilde tI enjeksiyon süresi, tHP1,tHP2,tHP3 ütülme süreleri, tC soğutma süresini ifade etmektedir.



Şekil 4.2 Enjeksiyon basınç grafikleri a) gerçekleşen, b)ideal [18]

Herhangi bir malzeme için başarılı bir kalıplama işlemi; malzeme seçimi ve kalıp tasarımı ile birlikte enjeksiyon parametrelerini doğru ayarlamakla mümkündür. Ekonomik bakış açısına göre kalıplamada amaç, her parçanın, yüksek kalitede ve kısa süreli bir kalıplama çevriminde üretilmesidir. Kalıplama çevriminin üç temel aşaması bulunur: Dolum, ütleme ve soğutma [6, 16]

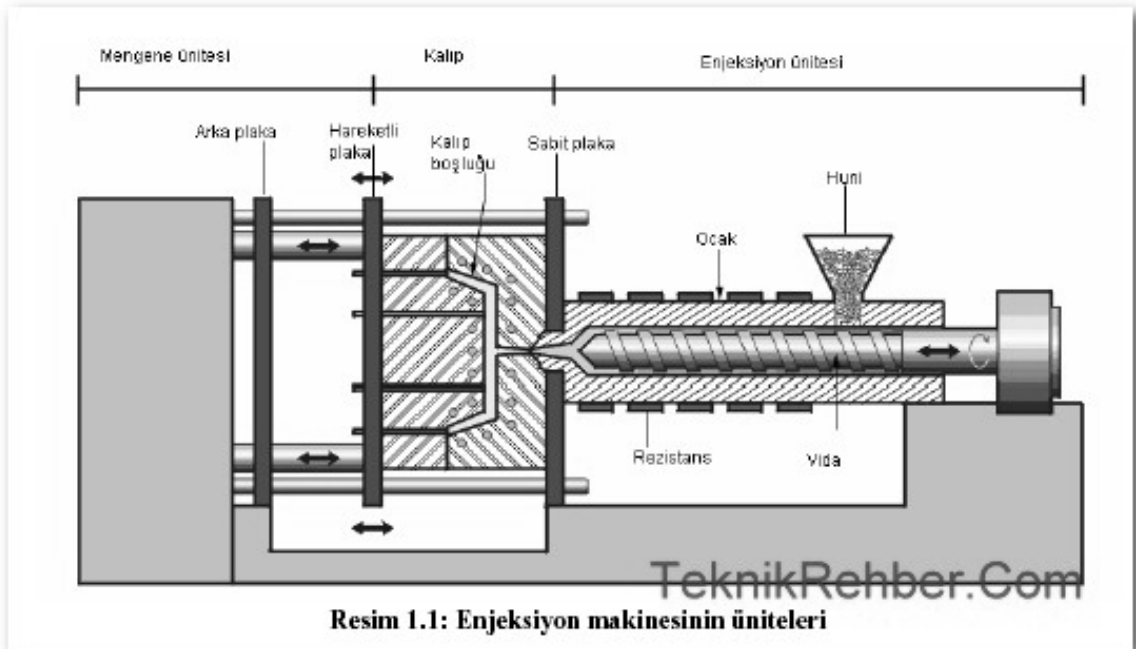
Dolum; Plastik malzemenin sıcaklığı, basınç altında akabileceği bir noktaya kadar yükseltilir. Bu işlemde, enjeksiyon kalıplama presinin silindiri içinde pistonlu vida ile katı granüller her noktada aynı sıcaklık ve viskozite değerine sahip ergiyik haline gelene kadar ısıtılır ve karıştırılır. Bu safhada son olarak, ergitilmiş malzeme, basınç altında, şeklini alması istenen kalıp boşluğuna enjekte edilir. Dolum safhasının önemli parametreleri, enjeksiyon basıncı, enjeksiyon sıcaklığı, enjeksiyon hızı ve dolum süresidir [16].

Ütüleme; Kalıp boşluğunun doldurulması sonrasında, malzeme soğuma nedeniyle çekme meydana gelir. Çekme sonucunda meydana gelen hacim kaybı ütüleme safhasına ekstra malzeme enjekte edilerek tamamlanır. Bu safha ütüleme olarak adlandırılmaktadır. Ütüleme safhasında en önemli parametreler, ütüleme basıncı ve süresidir [9, 16].

Soğutma ve kalıptan çıkartma; Ütüleme safhası sonrasında, ürün kalıptan çıkma sıcaklığına kadar soğutulur. Herhangi bir enjeksiyon kalıplama çevriminde soğutma süresi toplam çevrim süresinin %70 ini tutar. Gerçekte soğutma safhası, malzemenin enjeksiyonunun hemen ardından başlar enjeksiyon, ütüleme ve tutma safhalarını kapsar. Son olarak kalıp açılır, sıcaklık ve basınç altında kalıp boşluğu şeklini almış olan parça kalıptan dışarı alınır [9, 16].

4.2 Plastik Enjeksiyon Presi

Plastik enjeksiyon preslerinin (Şekil 4.3), farklı tipte ürünlerin, farklı ekonomi ve performanslarda üretilmesini sağlayan birçok tipleri vardır [9].



Şekil 4.3 Bir plastik enjeksiyon kalıplama presinin elemanları

Enjeksiyon kalıplama presleri; enjeksiyon kapasiteleri, ergitme kapasiteleri, vida çapı, enjeksiyon hızı, enjeksiyon basıncı ve kalıp kapama kuvvetlerine göre sınıflandırılırlar [6].

Bir enjeksiyon kalıplama tezgahının temel kısımları aşağıdaki gibi tanımlanmıştır:

- 1- Mengene mekanizması
- 2- Yumuşatma ünitesi
- 3- Enjeksiyon ünitesi
- 4- Kontrol üniteleri.

Kontrol ve yardımcı ünitelerle birlikte bu ünitelerin yapıları tezgah tiplerine ve markalarına göre değişiklik gösterebilir [4].

4.2.1 Mengene mekanizması

Mengene mekanizması, çevrim esnasında ihtiyaç duyulduğu zaman kalıbı açar ve kapatır. Mengene mekanizmasının görevi iki kalıp yarımını aynı ekseninde kapalı tutmaktır. Enjeksiyon esnasında kalıbın kapalı tutulması için gerekli kalıp kilitleme kuvvetini sağlamalıdır. Açma/kapama üniteleri; hidrolik, hidrolik ve mafsal birleşimi veya elektrik gücüyle hareket ettirilebilirler [4, 18].

4.2.2 Yumuşatma ünitesi

Yumuşatma aşamasının amacı, malzemenin kalıba gönderilmesi için homojen bir ergiyik elde etmektir. Soğuk olan plastik malzemeyi enjeksiyon için gerekli olan sıcaklık değerine veya ergiyene kadar karıştıracak olan (tezgah tipine göre) pistonlu vidalı mil ve silindirden oluşur. Pistonlu vidalı mil silindir içinde dönerek plastiği karıştırır. Silindirin dış çevresinde ısıtıcılar bulunur ve çoğunlukla üçten fazla ısıtıcı bölge vardır [4, 18]. Enjeksiyon sıcaklığı (ergiyik sıcaklığı) bu ısıtıcılar üzerinden kontrol edilir.

4.2.3 Enjeksiyon ünitesi

Enjeksiyon ünitesi, ergiyik malzemeyi yüksek basınç ile kalıp içerisine iter. Uygulanacak basıncın değeri, ürünün uzunluğu ve et kalınlığı oranına (L/t) göre belirlenir. Enjeksiyon hızı, enjeksiyon süresi, enjeksiyon basıncı, geri basınç, ütüleme basıncı, ütüleme süresi gibi kalıplama parametreleri, enjeksiyon ünitesinden kontrol edilmektedir [4, 18].

4.2.4 Kontrol üniteleri

Veri Paneli: Bu panel, operatörün kalıbı gözlemleyebilmesi için mengenenin güvenlik kapısının yanındadır. Operatör, bütün fonksiyonları buradan yönetebilmektedir.

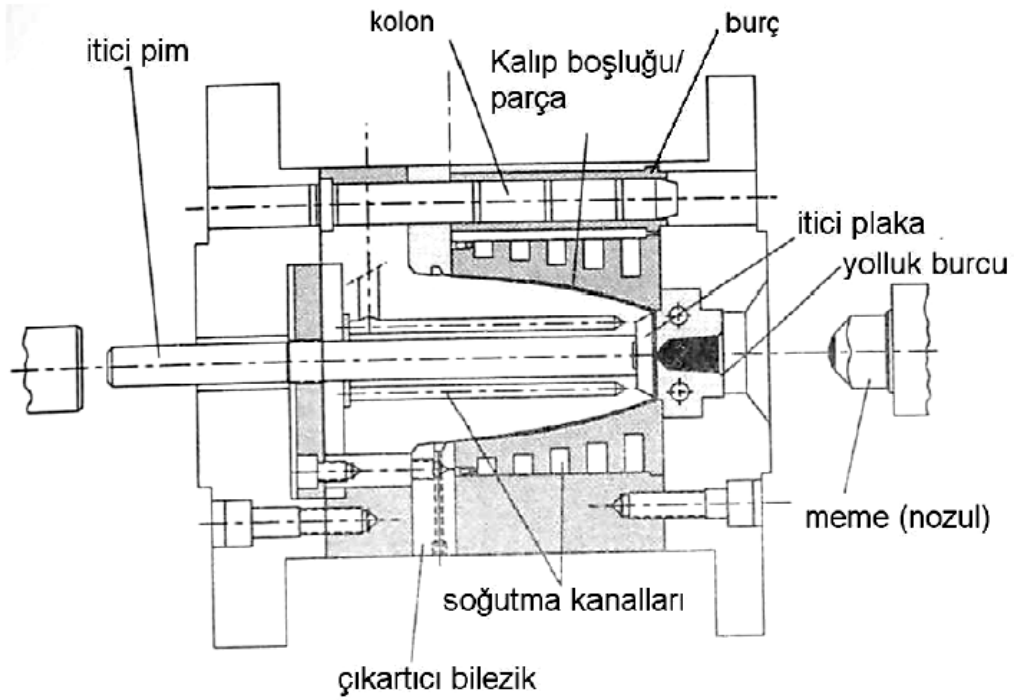
Akıllı Kontrol: Pozisyon sensörleri, zamanlayıcılar... vb. algılayıcılardan gelen sinyalleri ve makine ayarlarını yönetir. Günümüzde akıllı tezgâhlarda elektronik sviçler veya mikrobilgisayarlar kullanılmaktadır.

Güç Kontrolleri: Motorlara ve ısıtıcılara güç kontrolü ve dağılımı ile tezgâhın ve kalıbın ısı kontrollerini kapsar.

5. PLASTİK ENJEKSİYON KALIBI

Genellikle termoplastik malzemenin ısıtılarak akıcı hâle getirilmesi, kapalı, soğuk ve istenilen ölçü şeklindeki iç kalıp boşluğuna enjekte edilmesi ve soğutulmuş elde edilmek istenilen özdeş ürünlerin ortaya çıkarılmasına yarayan aparat veya mekanizmalara plastik enjeksiyon kalıbı denir.

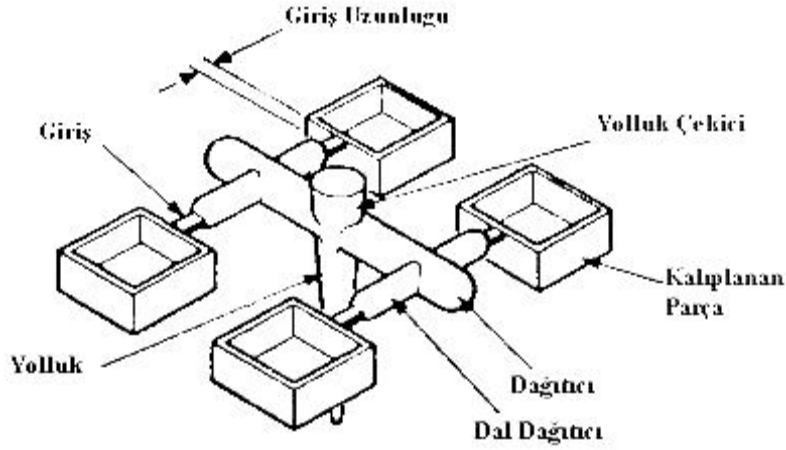
Bir plastik kalıbında parçanın şekillenmesinde etkili olan unsurlar; yolluk ve dağıtıcılar, giriş, kalıp boşluğu, soğutma sistemi (termoplastikler için) ve ürün çıkartma sistemidir.



Şekil 5.1 Bir plastik enjeksiyon kalıbı ve oluşturan elemanlar [8]

5.1 Yolluk, Dağıtıcı, Giriş Tipleri ve Özellikleri

Kalıpta, dolum esnasında, ergiyük yolluktan geçer ve dağıtıcılarla kalıp boşluklarına dağılır (Şekil 5.2).



Şekil 5.2 Enjeksiyon kalıbında besleme sistemi [24].

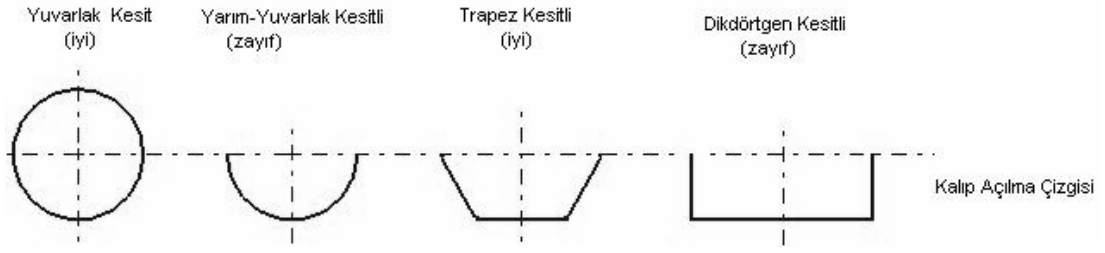
Yolluk; ergimiş plastiği yumuşatma ünitesinden kalıp boşluğuna veya dağıtıcı sisteme ileten bir kanaldır. Eğer dağıtıcı sistem yoksa ve plastik doğrudan yolluktan kalıp boşluğuna taşınıyorsa, bu yolluk giriş tipi, yolluk giriş olarak adlandırılır [9].

Dağıtıcı sistem; tasarlandığı zaman üç ana başlık takip edilir: dağıtıcı şekli, dağıtıcı yerleşimi ve dağıtıcı ölçüleri.

Dağıtıcı tasarımında parçanın tam dolumu açısından dikkat edilmesi gereken noktalar şunlardır:

1. Kalıp boşluğu en az kaynak hattı ile dolmalı
2. Bütün kalıp gözleri aynı sürede dolmalı
3. Akış bölünmesi mümkün olanın en azı olmalı
5. Ürünün kalıptan çıkartılması kolay olmalı
6. Ürünün görünüşü etkilenmemeli (giriş yeri ürünün görünüşünü etkilememeli)
7. Dağıtıcı; sıcaklık ve basınç kayıplarının ve bozulmanın en az olması için mümkün olan, en kısa uzunlukta olmalı
8. Dağıtıcı kesiti, parçaların tam olarak dolmasına ve ütülenmesine imkân verecek kadar geniş olmalıdır [18].

Dağıtıcı Şekli: Şekil 5.3'de örnek dağıtıcı kesitleri verilmiştir. İdeal dağıtıcı kesiti, malzemenin akışını kolaylaştırmak ve minimum ısı kaybı için mümkün olan en az temas alanına sahip olmalıdır [18].



Şekil 5.3 Dağıtıcı Kesitleri

Yuvarlak kesitli dağıtıcı kanallar, basınç ve sıcaklık kaybını önleyen en iyi yolluk ve giriş bağlantı tipidir. Uygulamalarda dairesel kesitlerden daha çok malzeme aktığı ve sürtünmenin düşük olduğu görülmüştür. Yuvarlak dağıtıcılar kalıpların iki yarısına da işlenir.

Yarım yuvarlak kesitli dağıtıcı kanallar, genellikle kalıp yarımlarından birine açılır. Bu dağıtıcı kanal genellikle tercih edilmez ve mümkünse kullanılmaz.

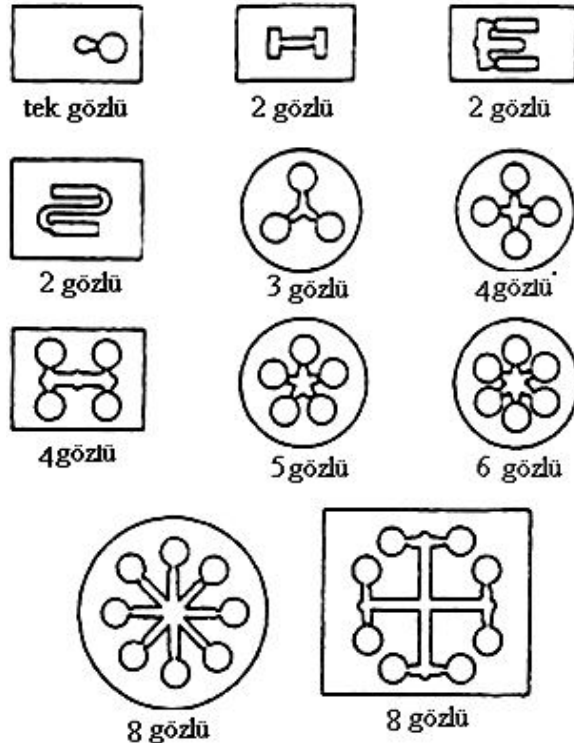
Trapez kesitli dağıtıcı kanallar, genellikle kalıp yarımlarından birine açılır. Bu tip dağıtıcı kanallar en çok üç plakalı ve yuvarlak kesitli dağıtıcı kanalların açılması mümkün olmayan kalıplara açılır. Yuvarlak kesitli olanlara nazaran sürtünme fazladır. Fakat yuvarlak dağıtıcılardaki yolluk, çakıştırma zorunluluğunu ortadan kaldırır.

Dikdörtgen kesitli dağıtıcı kanallar kalıp yarımlarından birine açılır. Sürtünme fazla olduğundan dolayı tercih edilmez ve mümkünse kullanılmaz.

Ergiyik plastik, dağıtıcıda ilerlerken, soğuk kalıp yüzeyine temas eden malzeme hızla sıcaklığını kaybeder ve katılaşır. Plastik akışı, bu katılaşmış tabakanın merkezinden devam eder. Bu nedenle çevredeki katılaşmış plastik malzeme, merkezdeki ergiyik akışının sıcaklığını korumaktadır [18].

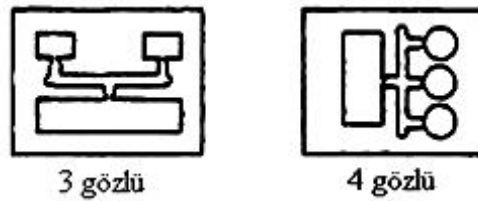
Dağıtıcı Yerleşimi: Dağıtıcı yerleşimi; kalıp göz sayısı, parçaların şekli, kalıp tipi, giriş yeri ve tipi faktörlerinden etkilenmektedir. Dağıtıcı uzunluğu, basınç kaybını ve malzeme firesini azaltmak için mümkün olduğunca kısa tutulmalıdır. Ayrıca

dağıtıcılar malzemeyi yolluktan girişe, her bir kalıp gözüne aynı mesafe ve sürede taşımalıdır. Şekil 5.4’de farklı dağıtıcı yerleşimleri verilmiştir [18].



Şekil 5.4 Dağıtıcı yerleşimlerine örnekler [18]

Bazen, farklı parçaların aynı kalıptan üretilmesi istenir. Bu durumda, kalıp boşluğunun dengeli dolması için dağıtıcı ve giriş ölçüleri birbirinden farklı verilebilir (Şekil 5.5) [18].



Şekil 5.5 Farklı ürünlerin aynı kalıptaki yerleşimlerine örnekler [18]

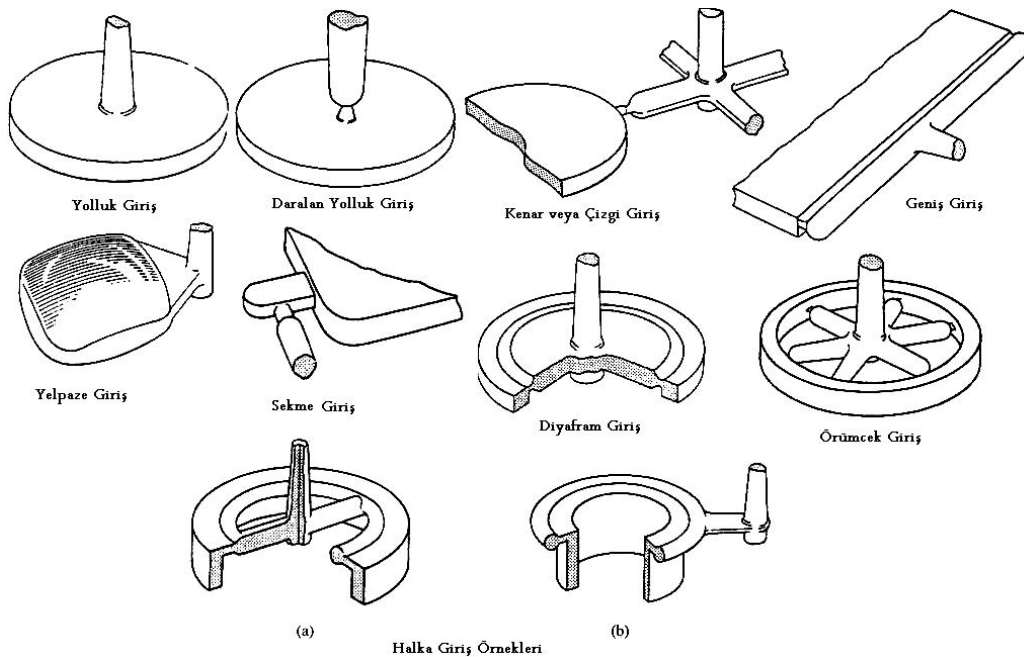
Giriş

Giriş, ergiyiğin kalıp boşluğuna girdiği bölgeye verilen addır. Kalıp dolumun da en önemli kararlardan biri, plastik parça için kullanılan girişin tipi, sayısı ve yerinin saptanmasıdır. Girişler, parça üzerinde bir veya daha fazla noktaya yerleştirilebilir ve farklı tasarımlarda olabilirler. Farklı giriş tasarımları ve yerleri parça kalitesi

üzerinde çarpıcı etkiler yapabilir. Giriş şekli, kalıplama sürecinin dolun ve ütüleme safhalarında etkili olacaktır. Bir parçanın son ölçüleri (en iyi performans ve görünüm) üzerine önemli bir etkisi vardır [3]. Çeşitli giriş tipleri Şekil 5.6'de verilmiştir.

Giriş şekli parça kalitesini birçok yönde etkileyebilir:

- Kalıp dolumu
- Kalıp boşluğunda basınç dağılımı
- Kaynak veya birleşme kalitesi ve yeri
- Gaz sıkışmaları ve kalıbın dolmaması
- Moleküler dağılım ve yönü
- Girişin parçadan ayrılma kolaylığı
- Ölçüsel toleranslar
- Giriş ölçüsü ve yeri
- Çökme izlerinin kontrol kabiliyeti
- Çekme boşluklarının kontrol kabiliyeti
- Kalıntı gerilme
- Çarpılma ve düzgünlük [3]



Şekil 5.6 Giriş tipleri örnekler [18].

Yolluk Giriş: Bu giriş tipi özellikle tek gözlü kalıplar (bardak ve bir eksenle döndürülmüş şekilde parçalar) için tercih edilen bir giriş tipidir. Kenar girişten farkı, malzeme doğrudan kalıp boşluğuna akar, basınç kaybı ve paylaşımı en alt düzeydedir (Şekil 5.6).

İğne Yolluk Giriş: (Daralan yolluk giriş) Bu tip giriş iki açılma çizgili kalıplarda kullanılır. Bitirme operasyonlarını elimine eder çünkü küçük giriş parçanın çıkartılması esnasında kırılır. Diğer taraftan giriş, kalıp dolmuş esnasında tıkanmaması için çok küçük olmamalıdır. Yüksek enjeksiyon basıncı altında girişten geçen malzemenin sürtünme ısısı ürün üzerinde benek (splash) ve yanıklara neden olabilir (Şekil 5.6) [8, 18].

Kenar veya Çizgi Giriş: Bu giriş tipi, çoğunlukta düz veya derin olmayan, nispeten küçük parçaların çok gözlü kalıplarında kullanılır. Girişin boyutları, kalıplanan parçanın şekli ve kalınlığına göre belirlenir. Kesit için giriş kalınlığı, parça kalınlığının yaklaşık olarak %75'i alınabilir ve dağıtıcı kadar geniş olabilir (Şekil 5.6) [8, 18].

Geniş (Flash) Giriş: Bu giriş tipinin uzun, düz, ince kesitli parçalar için kullanımları oldukça başarılıdır. Geniş bir kalıp boşluğunu hızlı ve dengeli bir şekilde doldurur. Parçanın uzunluğu, genişliği ve akış etkileri girişin uzunluğunu belirler. Bazı örneklerde parçanın uzunluğunun tamamı giriş olması faydalıdır, genellikle uzunluğun %50 si yeterlidir (Şekil 5.6) (18)

Yelpaze (Fan) Giriş: ince kesitli kalıplamalar örneğin optik lensler, için bu giriş tipi sıklıkla kullanılır. Bunun nedeni, malzeme donmadan yavaş bir dolmuş için yeterli boyutta yapılmış dağıtıcı sağlamasıdır (Şekil 5.6) [18].

Sekme (Tab) Giriş: Bu giriş, özellikle düz veya derin olmayan parçaların üretiminde, çoklu kalıp gözlerinde kenar girişe alternatif olarak kullanılabilir. Kenar girişe göre avantajları; kalıp boşluğunda malzemenin püskürmesini en aza indirerek kaynak

hatları ve akış izlerini kontrol etmesidir. Renklendirilmiş malzeme kullanıldığı zaman girdap yaratarak dağılmasına yardım eder (Şekil 5.6) [18].

Diyafram (Disk) Giriş: Bu giriş tipi, boru şeklindeki bir parçanın tek gözlü kalıplamasında, üniform bir dolum elde etmek için kullanılabilir. Diyafram giriş parçadan son bir işlemle ayrılır (Şekil 5.6) [8, 18].

Örümcek (Spider) Giriş: Bu diyafram girişin bir türüdür. Normalde geniş çaplı parçaların kalıplanmaları ve malzeme firesini azaltmak için kullanılırlar. Bir dezavantajı kaynak hatlarına neden olur (Şekil 5.6) [18].

Halka Giriş: Boru tipi parçaların çoklu kalıplamalarında bu tip bir giriş, kalıbın dengeli dolmasını sağlar (Şekil 5.6) [18].

5.2 Kalıplarda Sıkışan Havanın Çıkartılması ve Önemi

Bir diğer tasarım unsuru, kalıplama esnasında sıkışan hava ve gazların atılması için ihtiyaç duyulan tahliye noktalarıdır. Sıkışan hava ve gazlar, kalıplanan parçalarda farklı hatalara neden olurlar. Bunlar:

- Kalıbın tam dolmaması
- Yanma veya kavrulma
- Çekme (bitmiş parçalarda bastırmalar veya dalga şeklinde çizgiler sıklıkla görülür)
- Uç durumlarda; alevlenen gazlar kalıp yüzeyinde kimyasal aşındırmaya neden olabilirler

Kalıp açılma çizgisinden, vana tıparlar ve pimlerle hava atımı yaygın kullanılan yöntemlerdir. Son gelişmeler, gaz ve hava çıkışına izin veren fakat polimeri geçirmeyen gözenekli metallerin kullanımını içerir [18].

5.3 Kalıp Sıcaklık Kontrolü

Kalıp sıcaklığı veya kalıp duvar sıcaklığı enjeksiyon kalıplamada en önemli süreç parametrelerinden biridir. Kalıp sıcaklığı, çekmeyi dolayısıyla kalıptan çıkan

parçanın boyutlarını, parçanın son görünümünü, çevrim süresini (soğutma süresini) dolayısıyla parça maliyetlerini etkiler. Enjeksiyon kalıplamada ekonomik kalite gelişimi, doğru, tekrarlanabilir ve dengeli kalıp sıcaklığı olmaksızın mümkün değildir [19].

Termoplastik kalıplama sisteminde ana amaç, çevrim süresini ve kalıplanan parçanın soğutulmasında ısı farklılıklarını en aza indirmektir. Kalıbın soğutulması, parça şeklinin korunumu ve kalite kontrol için gereklidir. Dengeli (uniform) soğutma, çarpılma ve yüksek kalıntı gerilmeyi önleyerek parça kalitesini artırır. Bu nedenlerle, bir enjeksiyon kalıbı tasarımında, soğutma kanallarının boyutları ve yerleşimi en önemli tasarım unsurudur.

Yüksek kalıp sıcaklıkları ($>30^{\circ}\text{C}$) için ısı transfer yağı kullanmak gerekir. Yağ soğutuculu bir sistem 350°C ' ye kadar olan sıcaklıklar için uygundur. Düşük kalıp sıcaklığı ($<30^{\circ}\text{C}$) istendiği durumlarda, soğutma için kanallarda su dolaşımı yeterlidir. Sıcaklık 25°C den düşükse bir su/glikol (antifriz) karışımı gerekir [18].

5.4 Ürünün Kalıptan Alınması

Bir parça katılaştıktan ve soğutulduktan sonra, kalıp boşluğundan çıkartılması gerekir. İdeal olanı, yerçekimi ile yapılması ve parçanın yere düşmesidir. Fakat yan maçalar, yapışma veya iç gerilime gibi tasarım unsurlarına sahip bazı parçalar kalıptan elle veya robot ile çıkartılmalıdır [18].

Çıkartma takımları, genellikle kalıplama tezgâhının açılma mesafesi ile mekanik olarak hareket ederler. Eğer var olan çıkartma takımları yeterli gelmezse, pnömatik veya hidrolik sistemlerde kullanılabilir [18].

6. POLİMERLER ESASLI ÜRÜNLERDE ISI GEÇİŞİ VE FOURIER METODU

6.1 Uygulamalı Parabolik Meselelerde Fourier Metodu Ve Kaynak Fonksiyonunun Kullanılması

6.1.1 Uçlarındaki değişken sıcaklığı verilen bir çubuktaki ısının yayılması

Bu mesele

$$\frac{\partial u}{\partial t} = a^2 \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} \quad (1)$$

ısı iletkenlik denkleminin

$$u \Big|_{t=0} = \varphi(x) \quad (2)$$

başlangıç koşulunu ve

$$u \Big|_{x=0} = \psi_1(t) \quad , \quad u \Big|_{x=l} = \psi_2(t) \quad (3)$$

sınır koşullarını sağlayan çözümün bulunması meselesidir. Burada $\varphi(x)$, $\psi_1(t)$ ve $\psi_2(t)$ verilen fonksiyonlardır.

$$u(x,t) = \sum_{n=1}^{\infty} T_n(t) \sin \frac{n\pi x}{l} \quad (4)$$

serisi şeklinde olmasını istiyoruz. Burada

$$T_n(t) = \frac{2}{l} \int_0^l u(x,t) \cdot \sin \frac{n\pi x}{l} dx \quad (5)$$

Bu ifadeye iki kez kısmi integrasyon uygularsak:

$$T_n(t) = \frac{2}{n\pi} [u(0,t) - (-1)^n u(l,t)] - \frac{2l}{n^2\pi^2} \int_0^l \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} \sin \frac{n\pi x}{l} dx$$

$u(x,t)$ fonksiyonu (1) denklemini (3) sınır koşulları sağladığından

$$T_n(t) = \frac{2}{n\pi} [\psi_1(t) - (-1)^n \psi_2(t)] - \frac{2l}{n^2\pi^2 a^2} \int_0^l \frac{\partial u}{\partial t} \sin \frac{n\pi x}{l} dx \quad (6)$$

yazılabilir.

Şimdi (5) ifadesini t ye göre türetirsek:

$$\frac{dT_n(t)}{dt} = \frac{2}{l} \int_0^l \frac{\partial u}{\partial t} \sin \frac{n\pi x}{l} dx \quad (7)$$

(6) – (7) eşitliklerinden integrali çıkarırsak $T_n(t)$ katsayıları için şu denklemi buluruz.

$$\frac{dT_n(t)}{dt} + \frac{n\pi a^2}{l^2} T_n(t) = \frac{2n\pi a^2}{l^2} [\psi_1(t) - (-1)^n \psi_2(t)] \quad (8)$$

Bu denklemin genel çözümü

$$T_n(t) = e^{-\left(\frac{n\pi a}{l}\right)^2 t} \left[C_n + \frac{2n\pi a^2}{l^2} \int_0^l e^{\left(\frac{n\pi a}{l}\right)^2 \tau} [\psi_1(\tau) - (-1)^n \psi_2(\tau)] d\tau \right] \quad (9)$$

dir. Açıkta ki burada

$$C_n = T_n(0)$$

(2) başlangıç koşulunun sağlanması için

$$u(x, 0) = \sum_{n=1}^{\infty} T_n(0) \sin \frac{n\pi x}{l} = \varphi(x)$$

eşitliğinin sağlanması gerekir. Dolayısıyla

$$T_n(0) = C_n = \frac{2}{l} \int_0^l \varphi(x) \cdot \sin \frac{n\pi x}{l} dx \quad (10)$$

Böylece (1)-(3) probleminin çözümü (4) serisi olacaktır, ki burada $T_n(t)$ ler (9) ve (10) eşitlikleri ile tanımlanırlar.

Özel bir hal olan çubuğun iki ucundaki sıcaklıkların sabit olmaları halini göz önüne alalım. Yani

$$\psi_1(t) = u_1 = \text{const}, \quad \psi_2(t) = u_2 = \text{const}$$

olsun. Buna göre (9) eşitliği şu hale gelir:

$$T_n(t) = \frac{2}{n\pi} [u_1 - (-1)^n u_2] \left[1 - e^{-\left(\frac{n\pi a}{l}\right)^2 t} \right] + \frac{2}{l} \int_0^l \varphi(x) \cdot \sin \frac{n\pi x}{l} dx e^{-\left(\frac{n\pi a}{l}\right)^2 t}$$

$T_n(t)$ yi (4) serisinde yerine yazarsak

$$u(x, t) = \frac{2u_1}{\pi} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\sin \frac{n\pi x}{l}}{n} + \frac{2u_2}{\pi} \sum_{n=1}^{\infty} (-1)^{n-1} \frac{\sin \frac{n\pi x}{l}}{n} +$$

$$+ \frac{2}{\pi} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{(-1)^n u_2 - u_1}{n} e^{-\left(\frac{n\pi a}{l}\right)^2 t} \sin \frac{n\pi x}{l} +$$

$$+ \frac{2}{l} \sum_{n=1}^{\infty} e^{-\left(\frac{n\pi a}{l}\right)^2 t} \sin \frac{n\pi x}{l} \int_0^l \varphi(x) \cdot \sin \frac{n\pi x}{l} dx$$

buluruz.

$$\sum_{n=1}^{\infty} \frac{\sin n\xi}{n} \begin{cases} \frac{\pi - \xi}{2}, & 0 < \xi < 2\pi \\ 0, & \xi = 0, 2\pi \end{cases}$$

$$\sum_{n=1}^{\infty} (-1)^{n-1} \cdot \frac{\sin n\xi}{n} \begin{cases} \frac{\xi}{2}, & -\pi < \xi < \pi \\ 0, & \xi = \pi, -\pi \end{cases}$$

olduğunu biliyoruz. Buradan sonuç olarak

$$u(x,t) = u_1 + (u_2 - u_1) \frac{x}{l} + \frac{2}{\pi} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{(-1)^2 u_2 - u_1}{n} e^{-\left(\frac{n\pi a}{l}\right)^2 t} \cdot \sin \frac{n\pi x}{l} +$$

$$+ \frac{2}{l} \sum_{n=1}^{\infty} e^{-\left(\frac{n\pi a}{l}\right)^2 t} \sin \frac{n\pi x}{l} \int_0^l \varphi(x) \cdot \sin \frac{n\pi x}{l} dx \quad (11)$$

elde ederiz [5].

6.1.2 Uçları ile bulunduğu çevre arasında ısı alışverişi olan çubuktaki ısının yayılması

Bu mesele

$$\frac{du}{dt} = a^2 \frac{d^2 u}{dx^2} \quad (12)$$

ısı iletkenlik denkleminin

$$\frac{du}{dx} - hu \Big|_{x=0} = 0, \quad \frac{du}{dx} + hu \Big|_{x=l} = 0 \quad (13)$$

sınır koşulunu ve

$$u \Big|_{t=0} = \varphi(x) \quad (14)$$

başlangıç koşulunu sağlayan çözümünün bulunması problemdir. Fourier Metoduna göre bu problemin:

$$u(x,t) = X(x) \cdot T(t) \quad (15)$$

şeklindeki özel çözümlerini bulmaya çalışacağız. Buna göre

$$T'(t) + a^2 \lambda^2 T(t) = 0 \quad (16)$$

$$X''(x) + \lambda^2 X(x) = 0 \quad (17)$$

denklemlerini elde ederiz. (15) özel çözümünün sıfırdan farklı olması için ve (13) sınır koşullarını sağlaması için aşağıdaki şartların sağlanması gerekir:

$$X'(0) - hx(0) = 0, \quad X'(l) - hx(l) = 0 \quad (18)$$

Böylece (17) denkleminin (18) sınır koşulunu sağlayan çözümünün bulunması problemi yani esas değerler problemi ile karşı karşıya kaldık. (17) denklemini integre ederek

$$X(x) = c_1 \cos \lambda x + c_2 \sin \lambda x \quad (19)$$

elde ederiz. (18) sınır koşullarından:

$$h_1 c_1 - \lambda c_2 = 0$$

$$(h \cos \lambda l - \lambda \sin \lambda l) c_1 + (h \sin \lambda l + \lambda \cos \lambda l) c_2 = 0 \quad (20)$$

buluruz. Bu iki homojen denklemden oluşan sistemin çözümü açıktır, yani $c_1 = c_2 = 0$ dır. Buradan da $X(x) = 0$ bulunur. Ancak biz bu çözümle ilgilenmiyoruz. c_1 ve c_2 den en az biri sıfırdan farklı olmak zorunda, yani (20) sisteminin katsayılar determinantı sıfır olmak zorunda:

$$\begin{vmatrix} h & -\lambda \\ h \cos \lambda l - \lambda \sin \lambda l & h \sin \lambda l + \lambda \cos \lambda l \end{vmatrix} = 0$$

Bu determinant

$$\mu = \lambda l, \quad p = hl > 0 \quad (21)$$

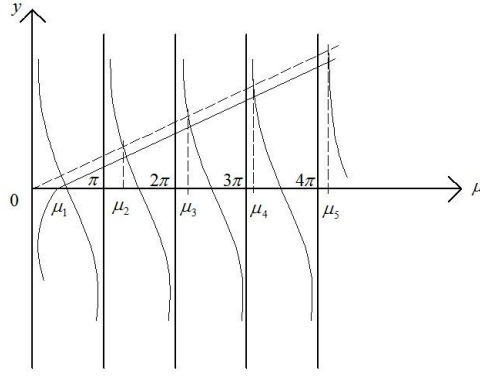
dönüşümü sonrasında

$$2 \cot g \mu = \frac{\mu}{p} - \frac{p}{\mu} \quad (22)$$

haline gelir. Bu denklemin sonsuz sayıda reel kökü vardır, bu da

$$y = 2 \cot g \mu, \quad y = \frac{\mu}{p} - \frac{p}{\mu}$$

eğrilerinin grafikleri çizilirse açıkça görülüyor (Şekil 6.1).



Şekil 6.1 [5]

Şekilde görüldüğü gibi $(0, \pi), (\pi, 2\pi), \dots$ aralıklardan her birinde denklemin pozitif kökleri vardır. Negatif kökler ise mutlak değerce pozitif köklere eşittirler.

$\mu_1, \mu_2, \mu_3, \dots$ ile (22) denkleminin pozitif köklerini gösterelim. O halde (21)'e göre esas değerler:

$$\lambda_n^2 = \left(\frac{\mu_n}{l} \right)^2, \quad (n = 1, 2, 3, \dots) \quad (23)$$

şeklinde olacaklardır. Her esas değere karşılık gelen bir esas fonksiyon vardır:

$$x_n(x) = \cos \frac{\mu_n x}{l} + \frac{p}{\mu_n} \sin \frac{\mu_n x}{l} \quad (24)$$

$\lambda = \lambda_n$ için (16) denkleminin genel çözümü:

$$T_n(t) = a_n e^{-\left(\frac{\mu_n a}{l} \right)^2 t}$$

şeklinde dirler ki burada a_n sabitlerdir. Böylece 12 denkleminin özel çözümleri:

$$u_n(x, t) = X_n(x).T_n(t) = a_n e^{-\left(\frac{\mu_n a}{l} \right)^2 t} \left(\cos \frac{\mu_n x}{l} + \frac{p}{\mu_n} \sin \frac{\mu_n x}{l} \right)$$

şeklinde dirler ve bu çözümler keyfi a_n sabitleri için (13) sınır koşullarını sağlıyorlar.

Şöyle bir seri oluşturalım:

$$u_n(x, t) = \sum_{n=1}^{\infty} a_n e^{-\left(\frac{\mu_n a}{l} \right)^2 t} \left(\cos \frac{\mu_n x}{l} + \frac{p}{\mu_n} \sin \frac{\mu_n x}{l} \right) \quad (26)$$

başlangıç koşulundan

$$\varphi(x) = \sum_{n=1}^{\infty} a_n \cdot \left(\cos \frac{\mu_n x}{l} + \frac{p}{\mu_n} \sin \frac{\mu_n x}{l} \right) = \sum_{n=1}^{\infty} a_n X_n(x) \quad (27)$$

bulunur. Esas değerler teorisine göre $X_n(x)$ esas fonksiyonlar ortogonaldirler. Yani

$$\int_0^l X_n(x) \cdot X_m(x) dx = 0 \quad (n \neq m) \quad (28)$$

Esas formların normlarının karesini hesaplayalım:

$$\int_0^l X_n^2(x) dx = \int_0^l \left(\cos \frac{\mu_n x}{l} + \frac{p}{\mu_n} \sin \frac{\mu_n x}{l} \right)^2 dx = \frac{l}{2} \frac{p(p+2) + \mu_n^2}{\mu_n^2} \quad (29)$$

buluruz. (27) serisinin düzgün yakınsak olduğunu varsayarsak ve (28) ile (29) bağlantılarını dikkate alarak a_n katsayılarını şu formülle bulabiliriz:

$$a_n = \frac{2}{l} \frac{\mu_n^2}{p(p+2) + \mu_n^2} \int_0^l \varphi(x) \cdot \left(\cos \frac{\mu_n x}{l} + \frac{p}{\mu_n} \sin \frac{\mu_n(x)}{l} \right) dx$$

Bu ifadeyi (26) da yerine yazarsak (12)-(14) problemin çözümünü elde ederiz:

$$u(x,t) = \frac{2}{l} \sum_{n=1}^{\infty} e^{-\left(\frac{\mu_n a}{l}\right)^2 t} \frac{\mu_n \cos \frac{\mu_n x}{l} + p \sin \frac{\mu_n x}{l}}{p(p+2) + \mu_n^2} \int_0^l \varphi(x) \cdot \left(\mu_n \cos \frac{\mu_n x}{l} + \frac{p}{\mu_n} \sin \frac{\mu_n(x)}{l} \right) dx \quad (30)$$

6.1.3 Sonsuz silindirde ısının yayılması

Bu paragrafta sonsuz uzunluktaki, kesitinin yarıçapı R olan düzgün bir silindirdeki ısının radyal yayılmasını inceleyeceğiz. Silindirin yan yüzeyinde değeri sıfır olan sabit sıcaklık vardır [5].

Böyle formülize ettiğimiz problem:

$$\frac{\partial u}{\partial t} = a^2 \left(\frac{\partial^2 u}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial u}{\partial r} \right) \quad (31)$$

ısı iletkenlik denkleminin:

$$u \Big|_{r=R} = 0 \quad (32)$$

sınır koşulunu ve

$$u \Big|_{t=0} = \varphi(r) \quad (32)$$

başlangıç koşulunu sağlayan çözümünü bulmak problemidir. Burada $\varphi - r$ ya bağlı verilen bir fonksiyondur.

Fourier metoduna göre (31) denkleminin:

$$u(r, t) = T(t) w(r) \quad (34)$$

şeklindeki özel çözümlerini arıyoruz. Buna göre

$$T(t) + a^2 \lambda^2 T(t) = 0 \quad (35)$$

$$w''(r) + \frac{1}{r} w'(r) + \lambda^2 w(r) = 0 \quad (36)$$

denklemleri elde edilir ki, burada λ - parametredir.

(36) denkleminin genel çözümü;

$$w(r) = c_1 I_0(\lambda r) + c_2 Y_0(\lambda r)$$

$r \rightarrow 0$ iken $Y_0(r\lambda) \rightarrow \infty$ olur. Fakat silindirin eksenindeki sıcaklığın sınırlı(sonlu) olması gerekir, dolayısıyla $c_2 = 0$ dır. λ parametresi ise (32) sınır koşulu yardımıyla bulunabilir. Açık ki bu parametre sonsuz sayıda değer alabilir. Bu değerler:

$$\lambda_n = \frac{\mu_n}{R} \quad (37)$$

formülü ile belirlenirler ki burada μ_n ler

$$I_0(\mu) = 0 \quad (38)$$

denklemin pozitif kökleridir.

Her λ_n^2 esas değerine karşılık gelen bir esas fonksiyon vardır:

$$w(r) = I_0\left(\frac{\mu_n r}{R}\right) \quad (39)$$

Şimdi (34) ve (35) denklemlerini göz önüne alarak:

$$u_n(r, t) = a_n e^{-\left(\frac{a\mu_n}{R}\right)^2 t} \cdot I_0\left(\frac{\mu_n r}{R}\right) \quad (40)$$

fonksiyonlarını buluruz ki, bu fonksiyonlar (31) denklemini ve (32) sınır koşulunu sağlıyorlar(keyfi a_n ler için):

$$u_n(r,t) = \sum_{n=1}^{\infty} a_n I_0\left(\frac{\mu_n r}{R}\right) e^{-\left(\frac{a\mu_n}{R}\right)^2 t}. \quad (41)$$

serisini oluşturalım. (33) başlama koşulunun sağlanması için

$$\sum_{n=1}^{\infty} a_n I_0\left(\frac{\mu_n r}{R}\right) = \varphi(r) \quad (42)$$

eşitliğinin sağlanması gerekir. Bu seri verilen $\varphi(r)$ fonksiyonunun $(0,R)$ aralığında Bessel fonksiyonlarına göre açılımıdır. (42) açılımının katsayıları:

$$a_n = \frac{2}{R^2 I_1^2(\mu_n)} \int_0^R \rho \varphi(\rho) I_0\left(\frac{\mu_n \rho}{R}\right) d\rho \quad (43)$$

formülü ile hesaplanır.

(43) ifadesini (41) serisinde yerine koyarsak (31)-(33) probleminin çözümünü

buluruz:

$$u_n(r,t) = \frac{2}{R^2} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{I_0\left(\frac{\mu_n r}{R}\right)}{I_1^2(\mu_n)} e^{-\left(\frac{a\mu_n}{R}\right)^2 t} \int_0^R \rho \varphi(\rho) I_0\left(\frac{\mu_n \rho}{R}\right) d\rho \quad (44)$$

6.1.4 Homojen kürede ısının yayılması

Kürede ısının yayılması meselesini göz önüne alalım. Bu mesele kürenin keyfi bir noktasındaki sıcaklığın yalnızca bu noktanın kürenin merkezine olan r uzaklığına olduğu varsayımı altında incelenir. Bunun dışında varsayalım ki kürenin yüzeyi ile bulunduğu çevre arasında ısı alışverişi vardır. Bu çevrenin sıcaklığı sıfır derece olsun [18]. Buna göre mesele

$$\frac{\partial u}{\partial t} = a^2 \left(\frac{\partial^2 u}{\partial r^2} + \frac{2}{r} \frac{\partial u}{\partial r} \right) \quad (45)$$

ısı iletkenlik denkleminin

$$\frac{\partial u}{\partial r} + hu \Big|_{r=R} = 0 \quad (46)$$

sınır koşulunu ve

$$u \Big|_{t=0} = \varphi(r) \quad (47)$$

başlangıç koşulunu sağlayan çözümünü bulmak problemidir.

$v = ur$ alırsak:

$$\frac{\partial u}{\partial t} = a^2 \frac{\partial^2 u}{\partial r^2} \quad (48)$$

$$u \Big|_{r=0} = 0, \quad \frac{\partial u}{\partial r} + \left(h - \frac{1}{R} \right) v \Big|_{r=R} = 0 \quad (49)$$

$$v \Big|_{t=0} = r \varphi(r) \quad (50)$$

elde ederiz.

Böylece (45)-(47) meselesi uçlarından birindeki sıcaklığın sıfır, diğerlerinde ise çevre ile ısı alışverişi bulunan bir çubuğun içindeki ısının yayılması problemine dönüştü. Fourier Metodunu kullanarak (48) denkleminin

$$v = a e^{-\lambda^2 a^2 t} \cdot \sin \lambda r \quad (51)$$

şeklindeki özel çözümlerini bulmaya çalışalım, öyle ki bu çözümler (49) sınır koşullarını keyfi a için sağlasın ve λ aşağıdaki denklemin çözümü olsun:

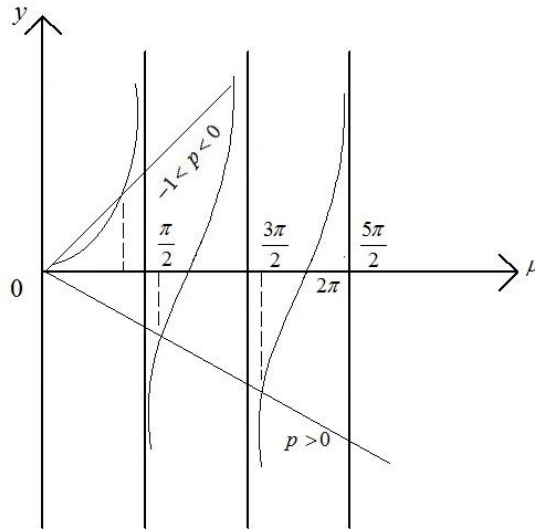
$$\lambda R \cos \lambda R + (h R - 1) \sin \lambda R = 0 \quad (52)$$

$$\lambda R = \mu, \quad p = h R - 1 > -1 \quad (53)$$

alırsak (52) denklemini şu hale gelir:

$$\mu \cdot \cos \mu + p \sin \mu = 0 \quad (54)$$

Bu denklemin sonsuz sayıda reel kökü vardır. Bu da aşağıdaki eğrilerin grafikleri çizilirse kolayca görülür. (Şekil 6.2)



Şekil 6.2 [5]

$$y = tg\mu, \quad y = -\frac{\mu}{p}$$

Şekilde görüldüğü gibi $1 < p < 0$ iken $\left(0, \frac{\pi}{2}\right), \left(\pi, \frac{3\pi}{2}\right), \dots$ aralıkların her birinde

(54) denkleminin bir pozitif kökü vardır ve n büyüdükçe bu kökler $(2n-1)\frac{\pi}{2}$

değerlerini alıyorlar. $0 < p < \infty$ iken pozitif kökler $\left(\frac{\pi}{2}, \pi\right), \left(\frac{3\pi}{2}, 2\pi\right), \dots$

aralıklarındadır ve n büyüdükçe $(2n-1)\frac{\pi}{2}$ değerlerini alıyorlar. Belirtmemiz gerekir

ki (54) denkleminin negatif kökleri mutlak değerce pozitif köklere eşittirler.

$\mu_1, \mu_2, \mu_3, \dots$ ile denklemin pozitif köklerini gösterelim. O halde (53)'e göre esas değerler

$$\lambda_n^2 = \left(\frac{\mu_n}{R}\right)^2, \quad (n = 1, 2, 3, \dots) \quad (55)$$

olurlar. Her esas değere karşılık bir esas fonksiyon vardır.

$$\omega_n(r) = \sin \frac{\mu_n r}{R} \quad (56)$$

şimdi seriyi oluşturalım.

$$v(r, t) = \sum_{n=1}^{\infty} e^{-\left(\frac{\mu_n a}{R}\right)^2 t} \sin \frac{\mu_n r}{R} \quad (57)$$

(50) başlangıç koşulunu sağladığından

$$r\varphi(r) = \sum_{n=1}^{\infty} a_n \sin \frac{\mu_n r}{R} \quad (58)$$

(58) açılımının her iki tarafını $(0, R)$ aralığında integre ederek:

$$\int_0^R \sin \frac{\mu_n r}{R} \cdot \sin \frac{\mu_k r}{r} = \begin{cases} 0, & k \neq n \\ \frac{R}{2} \frac{p(p+1) + \mu_n^2}{p^2 + \mu_n^2}, & k = n \end{cases}$$

eşitliğinden de yararlanarak a_n katsayılarını

$$a_n = \frac{2}{R} \cdot \frac{p^2 + \mu_n^2}{p(p+1) + \mu_n^2} \int_0^R r \varphi(r) \sin \frac{\mu_n r}{R} dr$$

formülü ile bulabiliriz. Bu ifadeyi (57) serisinde yerine yazarsak ve $v = ru$ olduğunu hatırlarsak (45)-(47) probleminin çözümünü şöyle buluruz.

$$u(r,t) = \frac{2}{Rr} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{p^2 + \mu_n^2}{p(p+1) + \mu_n^2} e^{-\left(\frac{\mu_n a}{R}\right)^2 t} \sin \frac{\mu_n r}{R} \int_0^R \rho \varphi(\rho) \sin \frac{\mu_n \rho}{R} d\rho \quad (59)$$

6.1.5 Dikdörtgen levhada ısının yayılması

İncecik hanojen dikdörtgen levhanın kenarlarındaki sıcaklık derecesi 0° olsun. Keyfi bir $t > 0$ anında levhadaki sıcaklığın dağılımını bulalım. İlgilendiğimiz durumda levhanın yan yüzeyi ile bulunduğu çevre arasında ısı alışverişi olmadığını varsayalım.

Bu mesele

$$\frac{\partial u}{\partial t} = a^2 \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right) \quad (60)$$

ısı iletkenlik denklemi

$$u \Big|_{x=0} = u \Big|_{x=p} = 0, \quad u \Big|_{y=0} = u \Big|_{y=q} = 0 \quad (61)$$

sınır koşullarını ve

$$u \Big|_{t=0} = \varphi(x, y) \quad (62)$$

başlangıç koşulunu sağlayan çözümünü bulma meselesidir. Fourier metoduna göre (60) denkleminin

$$u = T(t).X(x)Y(y)$$

şeklindeki özel çözümlerini bulmaya çalışalım. Buna göre $X(x)$, $Y(y)$ ve $T(t)$ fonksiyonları için aşağıdaki denklemleri elde ederiz:

$$\begin{aligned} X''(x) + \lambda^2 X(x) &= 0, & Y''(y) + \mu^2 Y(y) &= 0 \\ T'(t) + a^2(\lambda^2 + \mu^2)T(t) &= 0 \end{aligned}$$

Burada λ^2 ve μ^2 sabitlerdir.

Bu denklemlerin genel çözümleri:

$$X(x) = c_1 \cos \lambda x + c_2 \sin \lambda x, \quad Y(y) = c_3 \cos \mu y + c_4 \sin \mu y$$

$$T(t) = A e^{-a^2(\lambda^2 + \mu^2)t}$$

(61) sınır koşullarının sağlanması için:

$$c_1 = 0, \quad c_3 = 0, \quad \lambda = \frac{m\pi}{p}, \quad \mu = \frac{n\pi}{q} \quad (m, n = 1, 2, 3, \dots)$$

alınmak zorunda

Böylece (60) denkleminin (61) sınır koşullarını sağlayan özel çözümleri:

$$u_{mn} = A_{mn} e^{-a^2\pi^2\left(\frac{m^2}{p^2} + \frac{n^2}{q^2}\right)t} \cdot \sin \frac{m\pi}{p} x \cdot \sin \frac{n\pi}{q} y$$

şeklinde olurlar.

$$u(x, y, t) = \sum_{m, n=1}^{\infty} A_{m, n} e^{-a^2\pi^2\left(\frac{m^2}{p^2} + \frac{n^2}{q^2}\right)t} \cdot \sin \frac{m\pi}{p} x \cdot \sin \frac{n\pi}{q} y \quad (63)$$

serisi oluşturalım. (62) başlangıç koşulunun sağlanması için

$$\varphi(x, y) = A_{m, n} \sin \frac{m\pi x}{p} \cdot \sin \frac{n\pi y}{q}$$

olmalı. Yazdığımız seri $\varphi(x, y)$ fonksiyonunun iki katlı Fourier serisine açılımıdır.

Buradaki A_{mn} katsayıları

$$A_{mn} = \frac{4}{pq} \int_0^p \int_0^q \varphi(x, y) \cdot \sin \frac{m\pi x}{p} \cdot \sin \frac{n\pi y}{q} dx dy \quad (64)$$

formülü ile verilirler. Bu ifadeyi (63) serisinde yerine yazarsak (60)-(62) probleminin çözümünü buluruz (5).

6.1.6 Sıcaklık dalgaları

Sıcaklık dalgalarının toprakta yayılması problemi Fourier'in doğa olaylarını açıklamak için geliştirdiği matematiksel ısı iletkenlik teorisinin birinci örneklerinden biridir [5].

Yeryüzünün sıcaklığın bilindiği gibi günlük ve yıllık olmak üzere belirgin bir periyodik karakteri vardır. Topraktaki sıcaklığın periyodik titreşimlerini inceleyelim ve bunu yaparken toprağı homojen $0 \leq x < \infty$ yarı sonsuz uzay gibi düşünelim. Bu problemin başlangıç koşulları yoktur. Zira yüzeydeki sıcaklığın seyri bir çok kez

tekrarlanıyor ve başlangıç sıcaklığın etkisi yok saydığımız başka faktörlerin (örneğin toprağın heterojen oluşu) etkisine göre küçüktür. Böylece problemimiz şöyle formülize edilebilir [5].

$$\frac{\partial u}{\partial t} = a^2 \frac{\partial u}{\partial x^2}, \quad (0 \leq x < \infty, -\infty < t) \quad (65)$$

ısı iletkenlik denkleminin

$$u(0, t) = A \cos \omega t \quad (66)$$

koşulunu sağlayan sınırlı çözümünün bulunması. Bu matematiksel meselenin çözümü:

$$u(x, t) = e^{-\sqrt{\frac{\omega}{2a^2}}x} \cdot \cos\left(\sqrt{\frac{\omega}{2a^2}}x - \omega t\right) \quad (67)$$

şeklinde olacaktır.

Bulunan çözümün yardımıyla sıcaklık dalgalarının toprakta yayılması olayı şöyle karakterize edilebilir: Eğer yüzeyin sıcaklığı uzun zaman periyodik olarak değişiyorsa, toprakta aynı periyoda sahip olan sıcaklık titreşimleri meydana gelir. Burada

1. Titreşimlerin amplitütü $A(x) = A e^{-\sqrt{\frac{\omega}{2a^2}}x}$ derinliğe eksponansiyel olarak azalır. Yani eğer derinlik aritmetik dizi şeklinde artıyor ise, amplitütler geometrik dizi şeklinde azalıyor. (Fourier'in birinci kanunu)

2. Topraktaki sıcaklığın titreşimleri evrelerin yersizmesi ile meydana gelirler. Toprağın yüzeyindeki sıcaklığın maksimum (minimum) değerinin toprağın içindeki bir yere ulaşması için gereken zaman derinlik ile orantılıdır:

$$\delta = \sqrt{\frac{\omega}{2\omega a^2}}x$$

(Fourier'in ikinci kanunu)

3. Sıcaklığın ulaşacağı derinlik sıcaklık titreşimlerin periyoduna bağlıdır. Sıcaklık amplitüdün nispeten değişikliği:

$$\frac{A(x)}{A} = e^{-\sqrt{\frac{\omega}{2a^2}}x}$$

dir. Bu formül gösteriyor ki periyot küçükse sıcaklığın ulaştığı derinlikler de küçüktür. T_1 ve T_2 periyotlu titreşimlerin derinlikleri x_1 ve x_2 ise, bu derinliklerde aynı sıcaklık değişikliği meydana geliyor ve bu derinlikler

$$x_2 = \sqrt{\frac{T_2}{T_1}} x_1$$

bağıntısı ile aralarında bağılıdır (5).

(Fourier'in üçüncü kanunu). Örneğin günlük ve yıllık titreşimler için $T_2 = 365T_1$ dir ve buna göre

$$x_2 = \sqrt{365} x_1 = 19.1 x_1$$

Yani yüzeyde aynı amplitüt varsa yıllık titreşimlerin ulaştığı derinlik günlük titreşimlerin ulaştığı derinlikten 19.1 kez daha büyüktür.

Örnek olarak eski Sovyetler Birliğinin doğu bölgelerinde (Japonya yakınlarında) sıcaklığın yıllık titreşimlerinin incelenmesi sonucunda elde edilenlere bakalım:

Derinlik (m)	Amplitüt (°C)
1	11,5
2	6,8
3	4,2
4	2,6

Bu veriler gösteriyor ki 4m derinlikteki sıcaklık titreşimlerinin amplitütün değeri %13,3'e kadar azalıyor, ki yüzeydeki değeri % 19,5'tir.

Bu veriler yardımıyla toprağın sıcaklık iletkenlik katsayısı bulunabilir:

$$\ln \frac{A(x)}{A} = -\sqrt{\frac{\omega}{2a^2}} \cdot x, \quad a^2 = \frac{\omega x^2}{2 \ln^2 \frac{A(x)}{A}}$$

olduğundan toprağın iletkenlik sıcaklık katsayısı

$$a^2 = 4 \times 10^{-3} \frac{cm^2}{saniye}$$

Sıcaklığın maksimumunun 4m derinliğe ulaşması için gereken zaman yaklaşık olarak 4 aydır [5].

Burada önemli bir nokta şudur: Bu teori ısının kuru toprakta veya kayalarda yayılması için geçerlidir. Toprakta nem olması sıcaklık yayılmasını daha karmaşık hale getirir. Buzlanma olmasında ise gizli sıcaklığın ayrılması söz konusudur, ki bu olay bizim teorimizde göz önüne alınmamıştır.

Sıcaklık iletkenliği cismin fiziksel özelliklerinin incelenmesi açısından ve çeşitli teknik hesaplar açısından önemli bir karakteristiktir. Çubukta sıcaklık dalgalarının yayılması olayının incelenmesi ısı iletkenliğinin belirlenmesi için yapılan laboratuvar metotlarından biridir [5].

Yeterince uzun bir çubuğun bir ucunda periyodik $\mu(t)$ sıcaklığı olsun. Bu fonksiyonu Fourier serisine açalım:

$$\begin{aligned}\mu(t) &= \frac{a_0}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} \left[a_n \cos \frac{2\pi n t}{T} + b_n \sin \frac{2\pi n}{T} \cdot t \right] = \\ &= \frac{a_0}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} A_n \cos \left[\frac{2\pi n}{T} (t - \delta_n^0) \right] \\ A_n &= \sqrt{a_n^2 + b_n^2} \quad , \quad \delta_n^0 = \frac{T}{2\pi n} \left(\pi + \operatorname{arctg} \frac{b_n}{a_n} \right)\end{aligned}$$

$\mu(t)$ zamanın periyodik bir fonksiyonudur ve n inci harmoniği

$$\begin{aligned}u_n(x, t) &= a_n(x) \cdot \cos \frac{2\pi n}{T} t + b_n(x) \cdot \sin \frac{2\pi n}{T} t = \\ &= A_n \cdot e^{-\sqrt{\frac{\pi n}{T a^2}} \cdot x} \cos \left[\sqrt{\frac{\pi n}{T a^2}} x - \frac{2\pi n}{T} t + \delta_n^0 \right]\end{aligned}$$

veya

$$\frac{\sqrt{a_n^2(x_1) + b_n^2(x_1)}}{\sqrt{a_n^2(x_2) + b_n^2(x_2)}} = e^{-\sqrt{\frac{\pi n}{T a^2}} \cdot (x_1 - x_2)}$$

dir. Bu formül gösteriyor ki eğer herhangi iki x_1 ve x_2 noktalarındaki bir periyot için sıcaklığın değişmesini biliyorsak $a_n(x_1), b_n(x_1), a_n(x_2), b_n(x_2)$ katsayılarını bularak, harmonik analiz yardımıyla çubuğun sıcaklık iletkenlik katsayısını (yani a^2)

bulabiliriz. Çubuktaki periyodik sıcaklık titreşimleri örneğin şöyle meydana getirebiliriz. Çubuğun uçlarından birini elektrik sobasına koyalım ve eşit aralıklarla elektriği açıp kapatalım. Böyle periyodik ısıtılmanın sonucunda belirli bir zaman sonra sıcaklığın periyodik titreşimleri meydana gelir. Termometre ile herhangi x_1 ve x_2 noktasındaki $u(x_1, t)$ ve $u(x_2, t)$ sıcaklık derecelerini bir periyodik için ölçersek, yukarıda yapılan işlemler yardımıyla çubuğun yapıldığı maddenin sıcaklık iletkenlik katsayısını bulabiliriz [5].

6.1.7 Cismin donması hakkındaki mesele

Sıcaklığın değişmesi ile bir maddenin fiziksel durumu da değişebilir. Özel halde sıcaklığın erime noktasını geçmesi ile madde sıvı fazından sert cisim fazına geçmesi (veya tersi) mümkündür. Faz geçişinin yüzeyinde sıcaklık sabittir. Faz geçişinin yüzeyi hareket ederken sertleşmenin (veya erimenin) gizli ısıyı ayırıyor. Sertleşmenin yüzeyde sağlamak zorunda olduğu ek koşulları formülize edelim.

$x = \xi(t)$ düzleminin ayırma yüzeyi olduğu halini, yani düzlem problemini inceleyelim. t den $t + \Delta t$ zamanı içinde $x = \xi$ sınırı $\xi = x_1$ noktasından $\xi = x_1 + \Delta \xi$ noktasına kayar. Bu durumda $\rho \Delta \xi$ kütlesi sertleşiyor (veya $\Delta \xi < 0$ ise eriyor) ve $\lambda \rho \Delta \xi$ kadar bir ısı miktarı ayrılıyor.

Isı balansının sağlanması için bu ısı miktarı $\xi = x_1$ ve $\xi = x_1$ sınırlarından geçen ısı miktarlarının farkına eşit olmalıdır. Yani şu şart sağlanmalıdır.

$$\left(K_1 \frac{\partial u_1}{\partial x} \Big|_{x_1} - K_2 \frac{\partial u_1}{\partial x} \Big|_{x_2} \right) \Delta t = \lambda \rho \Delta \xi$$

Burada K_1 ve K_2 birinci ve ikinci fazın ısı iletkenlik katsayılarıdır. λ ise erimenin gizli ısısıdır.

$\Delta t \rightarrow 0$ limitine geçerek ayırma sınırı için ek bir koşul bulabiliriz:

$$K_1 \frac{\partial u_1}{\partial x} \Big|_{x=\xi} - K_2 \frac{\partial u_1}{\partial x} \Big|_{x=\xi} = \lambda \rho \frac{d\xi}{dt} \quad (68)$$

Bu ek koşul hem sertleşme olayı için ($(\Delta\xi) > 0, \frac{d\xi}{dt} > 0$ iken) hem de erime olayı için ($(\Delta\xi) < 0, \frac{d\xi}{dt} < 0$ iken) geçerlidir. Olayın yönü sol tarafın işareti ile belirlenir.

Suyun donması (buz haline gelmesi) olayını inceleyelim. Bu olayda faz geçişinin sıcaklık derecesi sıfırdır. $x = 0$ düzlemi ile sınırlı suyun $x \geq 0$ kütleini göz önüne alalım. $t = 0$ anında suyun sıcaklık derecesi sabit $c > 0$ olsun. Eğer $x = 0$ yüzeyinde sabit bir $c_1 < 0$ sıcaklığı varsa donmanın $x = \xi$ sınırı zamanla suyun derinliğine koyacaktır.

Donan suyun içindeki sıcaklığın dağılımı ve donma sınırının kaymasının hızı hakkındaki problem:

$$\begin{cases} \frac{\partial u_1}{\partial t} = a_1^2 \frac{\partial^2 u_1}{\partial x^2}, & 0 < x < \xi \\ \frac{\partial u_2}{\partial t} = a_2^2 \frac{\partial^2 u_2}{\partial x^2}, & \xi < x < \infty \end{cases} \quad (69)$$

denkleminin

$$\begin{cases} u_1 = c_1, & x = 0 \\ u_2 = c_2, & t = 0 \end{cases} \quad (70)$$

ek koşullarını ve

$$u_1 = u_2 = 0, \quad x = \xi \quad (71)$$

$$K_1 \frac{\partial u_1}{\partial x} \Big|_{x=\xi} - K_2 \frac{\partial u_2}{\partial x} \Big|_{x=\xi} = \lambda \rho \frac{d\xi}{dt} \quad (72)$$

donmanın sınırındaki koşulları sağlayan çözümünü bulmak problemidir. Burada K_1, a_1^2, K_2, a_2^2 ısı iletkenlik ve sıcaklık iletkenlik katsayılarıdır. 1 indisliiler buz için, 2 indisliiler su için. Problemin çözümünü:

$$\begin{aligned} u_1 &= A_1 + B_1 \Phi\left(\frac{x}{2a_1\sqrt{t}}\right) \\ u_2 &= A_2 + B_2 \Phi\left(\frac{x}{2a_2\sqrt{t}}\right) \end{aligned}$$

şeklinde olmasını istiyoruz. Burada A_1, B_1, A_2, B_2 henüz bilinmeyen katsayılar, Φ ise hata integralidir.

$$\Phi(x) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^x e^{-\xi^2} d\xi$$

(70) ve (71) şartlarını sağlandığından (70) şartlarından

$$A_1 = C_1 \quad , \quad A_2 + B_2 = C$$

bulunur. Bu son koşullar keyfi t değerleri için sağlanırlar. Bu da

$$\xi = \alpha\sqrt{t} \quad (73)$$

bağıntının sağlandığını mümkündür. Burada α sabittir. (73) donma sınırının hareket konusunu belirler.

A_1, B_1, A_2, B_2 ve α sabitleri için

$$\begin{cases} A_1 = C_1 \quad , \quad B_1 = -\frac{C_1}{\Phi\left(\frac{\alpha}{2a_1}\right)} \\ A_2 = -\frac{C\Phi\left(\frac{\alpha}{2a_2}\right)}{1-\Phi\left(\frac{\alpha}{2a_2}\right)} \quad , \quad B_2 = \frac{C}{1-\Phi\left(\frac{\alpha}{2a_2}\right)} \end{cases} \quad (74)$$

ifadeleri bulunur. α sabitini bulmak için (68) bağıntısından yararlanabiliriz:

$$\frac{K_1 c_1 e^{-\frac{\alpha^2}{4a_1^2}}}{a_1 \Phi\left(\frac{\alpha}{2a_1}\right)} + \frac{K_2 c_2 e^{-\frac{\alpha^2}{4a_2^2}}}{a_2 \left[1-\Phi\left(\frac{\alpha}{2a_2}\right)\right]} = -\lambda \rho \alpha \frac{\sqrt{\pi}}{2} \quad (75)$$

Bu transandant denklemin çözümü α nın değerini verir. $c_1 < 0, c_2 > 0$ için bir çözümünün bulunması α nın $(0, \infty)$ da değişirken denklemin sol tarafı $(0, \infty)$ aralığında, sağ tarafı ise $(-\infty, +\infty)$ aralığında değişmesinden dolayıdır. Eğer c erime sıcaklığı derecesine eşitse (yani $c = 0$ ise) katsayılarını belirleyen (74)-(75) ifadeleri daha basit şekle gelirler:

$$A_2 = B_2 = 0$$

$$A_1 = C_1, \quad B_1 = -\frac{C_1}{\Phi\left(\frac{\alpha}{2a_1}\right)} \quad (76)$$

ve

$$\frac{K_1 c_1 e^{-\frac{\alpha^2}{4a_1^2}}}{a_1 \Phi\left(\frac{\alpha}{2a_1}\right)} = -\lambda \rho \alpha \frac{\sqrt{\pi}}{2} \quad (77)$$

Burada $\frac{\alpha}{2a_1} = \beta$ alırsak (77) denklemi:

$$\frac{1}{\pi} \cdot \frac{e^{-\beta^2}}{\Phi(\beta)} = -D\beta$$

şekline gelir. Burada

$$D = \frac{\lambda \rho a_1^2}{K_1 c_1} < 0$$

$\varphi(\beta^1) = \frac{e^{-\beta^2}}{\sqrt{\pi} \Phi(\beta)}$ fonksiyonunun şekil 30 da verilen grafiğinden yararlanarak α nın değerini grafiksel olarak bulabiliriz [5].

6.2 Polimerlerin Isısal Özellikleri

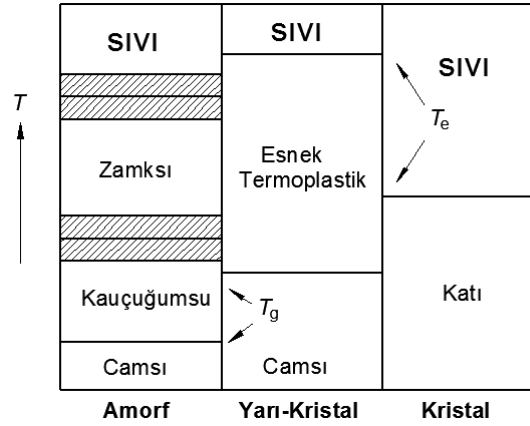
Plastiklerin ısısal özelliği en önemli özelliklerinden biridir. Her ne kadar bazı plastikler 100–180°C aralığında uzun süreli kullanım için tavsiye edilebilir ve örneğin PTFE ve polifenilen sülfid gibi, başka plastikler, 250°C a kadar servis ömrüne sahip iseler de, çoğu plastikler geniş bir sıcaklık aralığında yumuşama gösterirler [23].

Yüksek sıcaklıklarda plastiklerin kullanabilmelerini tayin eden yöntem yumuşama ve eğilme sıcaklığıdır. Bu amaçla kullanılan standart test, ASTM D648 veya BS 2782 Kısım 121'dir. Ancak bu sıcaklıkların malzemenin maksimum kullanma sıcaklıkları olmadığını hatırlatmakta fayda vardır. Bununla beraber düşük zorlamalarda veya uzun aralıklı yüklemelerde, plastikler bu veya daha yüksek sıcaklıklarda

dayanabilirler. Yumuşama sıcaklığı esasen sadece malzemenin ön seçiminde bir bilgi vermektedir [2].

6.2.1 Polimerlerin ısı karşısındaki davranışları

Polimer zincirleri polimer örgüsü içerisinde düzenli bir şekilde istiflenerek kristal yapıda bölgeler oluşturabilmektedir. Bazı polimerler enjeksiyon, ekstrüzyon vb yöntemlerle şekillendirilirken belli düzeyde kristallenirler. Ancak bu şekillendirme işlemleri sırasında büyük polimer moleküllerinin tamamının bir düzen içerisinde paketlenerek *tam kristal* yapı vermesi beklenemez. Bu nedenle, çeşitli amaçlar için kullanılan endüstriyel polimerler *amorf* veya *yarı-kristal*dirler. Polimerlerin ısı karşısındaki davranışları, yapılarında amorf ya da kristal bölgelerin varlığına yakından bağlıdır [25].



Şekil 6.3 Polimerlerin ısı geçişlerdeki davranışları [25].

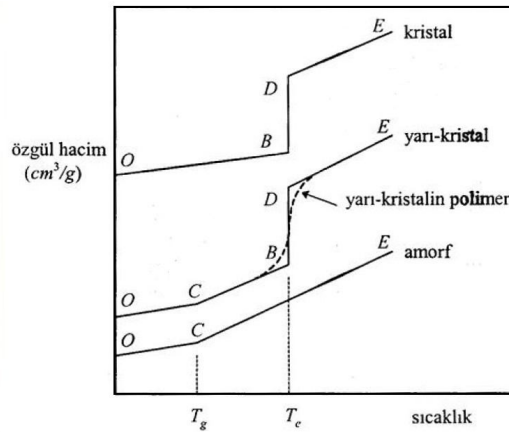
Amorf polimerler yeterince düşük sıcaklıklarda sert ve kırılmandır (cam gibi). Böyle bir polimer ısıtıldığında *camsı geçiş sıcaklığı* (T_g) adı verilen bir sıcaklıkta *yumuşar* ve kauçuk özellikleri gösterir (poliizobütlen, polibütadien gibi). Polimerlerin camsı geçiş sıcaklığı üzerinde ısıtılması sürdürülürse; polimer, kauçuğumsu davranışı da bırakarak zamk görüntüsü sonra da yüksek sıcaklıkta sıvı halini alır [25, 26].

Yarı-kristal polimerlerin örgüsünde amorf ve kristal bölgeler birlikte bulunur. Bu polimerler camsı geçiş sıcaklıkları altında, amorf polimerler gibi kırılırlar. Kırılma özelliklerini camsı geçiş sıcaklığına kadar korurlar. Camsı geçiş sıcaklığı geçildiğinde belli derecede yumuşaklık kazanmakla birlikte kristal yapılarından dolayı *esnek termoplastik* davranışa geçerler (polietilen, polipropilen gibi) [25, 26]. Yapıdaki kristal bölgeler, amorf bölgeler için çapraz bağlayıcı görevi yaparak polimer örgüsünü sıkıca bir arada tutar. Bu nedenle yarı-kristalin polimerler erime sıcaklığına kadar (T_c) esnek termoplastik özelliklerini değiştirmezler ve erime sıcaklığında kristal yapıları yıkılarak viskoz bir sıvı verecek şekilde erirler [23].

Tam kristal polimerler serttirler ve amorf bölgeler bulunmadığından camsı geçiş göstermezler. Erime sıcaklıklarına ulaşıldığında kristal yapı yıkılır ve polimer erir[2].

6.2.2 Polimerlerde camsı geçiş sıcaklığı

Doğrusal ve dallanmış zincirlerden oluşan amorf ve yarı-kristal polimerler camsı geçiş sıcaklığı üzerinde *yumuşarlar*. Sıcaklık yumuşama noktası üzerinde arttırıldığında yarı-kristal polimerler belli bir sıcaklıkta erir, amorf polimerler ise kauçuğumsu, zamksı davranışlar üzerinden geçerek sıvı görüntüsü alırlar. Sözü edilen ısıl geçişler sırasında polimerlerin *ölgül hacim* (cm^3/g), *ölgül ısınma ısısı* ($\text{J}/\text{kg}\cdot\text{K}$) gibi bazı özelliklerinde değişme gözlenir. Isıtılan (veya soğutulan) bir polimer örneğinin bu tür özellikleri izlenerek camsı geçiş ve erime sıcaklıkları bulunabilir [23, 25].



Şekil 6.4 Polimerlerde camsı geçiş sıcaklığı [25].

Tam kristal maddelerin özgül hacimleri erime noktasına kadar belli bir hızla artar (OB doğrusu). Erime noktasına ulaşıldığında (B noktası) kristal yapı bozunur ve madde erir. Kristal yapının tamamen bozunmasını sağlayacak ısı alınana kadar sistemin sıcaklığı değişmez. Erime sırasında gerçekleşen katı-sıvı faz değişimi nedeniyle hacimde sıçrama biçiminde bir artış (BD doğrusu) gözlenir. Hal değişiminin gözlemlendiği bu tür ısı geçişlere *birincil ısı geçişler* denir [23].

Camsı geçiş sıcaklığı altında bulunan amorf bir madde ısıtıldığında özgül hacim tam kristal maddelerdeki gibi belli bir hızla artar. Bu artış şekilde *OC* doğrusuyla verilmiştir. Camsı geçiş sıcaklığı geçildiğinde özgül hacmin sıcaklıkla değişim hızı yükselir (*CE* doğrusu) ve sıcaklık-özgül hacim doğrusunda bir kırılma gözlenir. Bu tür geçişte madde hal değiştirmemiş, sabit basınç altındaki ısınma ısısının büyüklüğü değişmiştir (*ikincil geçiş*) [23].

Yarı-kristal polimerlerin sıcaklık-özgül hacim grafikleri, amorf ve tam kristal maddelerin grafiklerinin birleşimine benzer. Camsı geçiş sıcaklığına ulaşıldığında (C noktası) polimer örgüsünde amorf bölgelerin katkısıyla özgül hacmin sıcaklıkla artış hızı yükselir (*CB* doğrusu) ve sıcaklık-özgül hacim doğrusunda bir kırılma gözlenir. Erime noktasına ulaşıldığında ise (*B* noktası) polimerin kristal bölgeleri erir [23].

Camsı geçiş sıcaklığı altında bulunan polimerlerin amorf ya da kristal bölgelerindeki zincirlerde yer alan atomlar ötelenme, titreşim gibi küçük moleküller için de geçerli olan atom hareketlerini sürdürürler. Ancak, zincirler eğilip-bükülme türü hareketleri yapamazlar. Bu nedenle polimer zincirleri, dışarıdan yapılan mekaniksel etkiler altında biçimlerini değiştiremezler ve aşırı zorlamalarda kovalent bağlar üzerinden kırılırlar.

Polimerlerin özellikleri ve kullanım yerleri camsı geçiş sıcaklıklarına yakından bağlıdır. Camsı geçiş sıcaklığının üzerinde kullanılan polimerlerde, dıştan yapılan mekaniksel etkiler zincir hareketleriyle karşılanır ve polimere yüklenen enerji polimer örgüsü içerisinde kolayca dağıtılır. Alishveriş poşetleri genelde camsı sıcaklığı yaklaşık -115 °C olan polietilenden yapılır. Polimer normal kullanımında

yumuşama noktası üzerinde bulunduğundan katlama, buruşturma, bükme gibi mekaniksel etkilerden zarar görmez [23, 27].

Ayran ve yoğurt kaplarının yapımında camsı geçiş sıcaklığı 100 °C dolayında olan polistiren, plastik su şişelerinin yapımında camsı geçiş sıcaklığı 80 °C dolayında olan polietilen tereftalat (PET) kullanılır. Her iki polimerin kullanım sıcaklıkları camsı geçiş sıcaklıklarının altındadır ve bu polimerlerden yapılmış malzemeler birkaç kez avuç içinde büküldüğünde kırılırlar [27].

Çizelge 6.1 Bazı polimerlerin camsı geçiş sıcaklıkları ve erime sıcaklıkları [30]

Polimer	Camsı Geçiş Sıcaklığı (°C)	Erime Sıcaklığı (°C)
Polietilen	-70 - -60	105 - 130
Polipropilen	-20 - +5	160
Poli(metil metakrilat)	85 - 110	130 - 140
Polistiren	70 - 100	240*
Poli(eter eter ketone)	145	340
Poli(laktik asit)	50 - 80	170 - 180
Poli(vinil klorür)	75 - 105	100 - 260

6.2.3 Polimerlerde maksimum kullanım sıcaklığı

Polimerlerden yapılan malzemeler sertliklerini ve şekillerini camsı geçiş sıcaklığı dolayına kadar koruyabilirler. Camsı geçiş sıcaklığı üzerinde, polimer zincirleri eğilme-bükülme hareketleri yapabildiğinden polimerik ürünün geometrisi değişir. Örneğin su, kola gibi içeceklerin bulunduğu plastik şişeler, camsı geçiş sıcaklığı 80 T olan poli(etilen terfalat)tan (PET) yapılır ve PET şişe içerisine kaynama sıcaklığındaki su (100 °C) konulduğunda şekli değişir (eğilir, bükülür). Bu gözlemden, PET in 80 °C den düşük sıcaklıklardan sıvıların doldurulduğu plastik şişelerin yapımına uygun olduğu sonucu çıkarılabilir [23, 26].



Resim 6.1 100 °C su ile dolu PET şişe

Polimerlerden yapılan ürünlerin özelliklerini kaybettiği ve işlevini yapamadığı en düşük sıcaklığa maksimum kullanım sıcaklığı adı verilir. Maksimum kullanım sıcaklığının değeri yük altında eğilme testi ile belirlenir. Yük altında eğilme testinde, yağ veya su banyosu içerisinde bulunan çubuk şeklindeki polimer örneğinin iki ucu alttan desteklenir ve ortasından sabit bir yükleme yapılır. Banyo sıcaklığı artırılarak test örneği izlenir. Test örneğinin belli oranda eğildiği sıcaklık, ısıl eğilme sıcaklığıdır ve bu sıcaklık maksimum kullanım sıcaklığı olarak alınır [23, 27].

Polimerlerin sert yapılarını, genelde, camsı geçiş sıcaklıklarının yaklaşık 3/4 katı sıcaklıklara kadar korudukları gözlemlenmiştir. Herhangi bir polimerin maksimum kullanım sıcaklığı camsı geçiş sıcaklıklarının 3/4 katı alınarak önceden kestirilebilir. Örneğin, camsı geçiş sıcaklığı 100 °C olan bir polimer en fazla 75 °C dolayında kullanılacak sert ürünlerin yapımına uygundur. Çizelge 6.2 de bazı polimerlerin sürekli kullanım sıcaklıkları verilmiştir. Yüksek performanslı polimerlerden olan poli(amit imit), poli(eter eter keton) gibi polimerler, yüksek sıcaklıklara dayanıklıdır ve geniş bir sıcaklık aralığında mekanik özelliklerini fazlaca değiştirmezler[27].

6.2.4 Polimerlerde ısıl bozunma sıcaklığı

Polimerler yeterince yüksek sıcaklıklara ısıtıldığında, öncelikle polimer yapısındaki en zayıf kovalent bağlar kırılır ve polimer bozunmaya başlar. Polimerin bozunmaya başladığı sıcaklığa ısıl bozunma sıcaklığı denir (Çizelge 6.2). Polimerlerin buharlaştırılması için verilmesi gereken enerji, polimer moleküllerinin iriliğinden dolayı her zaman polimerin yapısındaki kimyasal bağların kırılma enerjisinden

yüksektir. Bu nedenle polimerler kaynamadan önce bozunurlar. Termoplastikler de bozunma genelde erimeden sonra, termoset polimerlerde ise katı halde başlar. Bazı termoplastikler erime sıcaklığı yakınlığında da belli düzeyde bozunmaktadırlar [2].

Bozunmaya uğrayan polimerin mekanik dayanım, uzama türü özellikleri bağ kırılmaları sonucu sistemden gaz çıkışı gözlenebilir, dış görünüşü ve rengi değişir.

Çoğu polimer ısı enerjisi ile ilk kez şekillendirilmesi sırasında karşılaşır ve bu aşamada ısı bozunma kaçınılmazdır. Özellikle termoplastikler yeniden şekillendirilmeye uygun polimerlerdir, atıkları toplanarak öğütüldükten sonra yeniden işlenirler. İkinci şekillendirilme sırasında, yeni bir bozunma süreci başlar. Bu özellikten dolayı termoplastik atıklar ısı bozunmanın etkilerini azaltılmak amacıyla yaklaşık %50 oranında yeni ürün ile karıştırılarak kalıplanırlar [23, 27].

Çizelge 6.2 Bazı polimerlerin maksimum kullanım ve bozunma sıcaklıkları [25]

Polimerler	Maksimum Kullanım Sıcaklığı (°C)	Bozunma Sıcaklığı (°C)
Poli(amit) imit	300	
Poliimit	250	
Polibenzimidazol	310	600-650
Polietrafloretilen	250	500-550
Poli(eter eter keton)	250	
Polisülfon	150	
Polikarbonat	125	325-400
Naylon 6	105	300-350
Polietilen	80	340-440
Polipropilen	121	

6.2.5 Polimerlerde ısı iletkenlik

Isıl iletkenlik, ısı enerjisinin bir malzeme içerisinde hareket yeteneğini gösteren bir kavramdır. Sıcak su dolu bir bardağın iç ve dış yüzeylerinin sıcaklıkları farklıdır ve

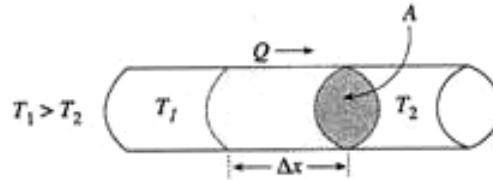
ısı, bardak içerisinden dış ortama doğru, bardağın yapımında kullanılan maddenin ısı iletkenliğinin büyüklüğüne bağlı bir hızla iletir.

Bardak iç çeperine yakın molekül ya da atomların enerjileri yüksektir. Enerjisi yüksek bu tanecikler, çarpışmalarla enerjilerini yakınlarındaki daha düşük enerjili komşu moleküllere aktarırlar. Bu tür enerji aktarımları bardağın iç çeperinden dış yüzeyine doğru ilerler ve sonuçta ısı enerjisi bardağın dış yüzeyinden dış ortama aktarılır [23, 26].

Maddelerin ısı iletkenliği (k) Fourier yasası ile verilmiştir.

$$K = - (\Delta Q/\Delta t) / A (\Delta T / \Delta x) \quad (1)$$

Bağıntıda; A ısının iletildiği alan, $\Delta T / \Delta x$ birim zamanda iletilen ısı miktarı (ısı akış hızı), T maddenin iki yüzeyi arasındaki sıcaklık farkı ve x ısının aktarıldığı yoldur (genelde madde kalınlığı). Isıl iletkenlik için çoğu kez J/(s m K) veya W/m K (W=J/s) birimleri kullanılır.



Şekil 6.5 Kesit alanı A olan silindirde ısının aktarımı [26].

Şekil 6.4 de kesit alanı A olan silindir biçimindeki bir malzeme içerisinden ısının aktarımı gösterilmiştir. Isı enerjisi malzemenin sıcaklığı yüksek bölgesinden (T1), soğuk bölgesine (T2) doğru hareket eder.

Maddelerin ısı iletkenliklerinin değeri sıcaklık farkı ve ısı akış hızı ölçüldükten sonra bağıntı (1) den hesaplanabilir. Sıcaklık farkını ölçmek kolay olmakla birlikte ısı akış hızının ölçülmesi zordur. Isı akış hızını incelikle ölçme yöntemlerinden birisi, ısıtıcıya verilen elektriksel gücün izlenmesidir.

Isıyı fazla absorplayan maddelerin ısı iletkenlik değerleri dūşüktür. Polimerler zincirlerindeki atom hareketleriyle fazla miktarda ısı absorpsiyonu yapabildikleri için ısıyı iyi iletmezler. Isıl iletkenlikleri seramikler ve metaller arasındadır.

Özellikle polimer köpüklerinin ısı iletim değerleri çok dūşüktür ve ısı yalıtımına uygun malzemelerdir, Çizelge 6.3 de verilen ısı iletkenlik değerlerinden görülebileceği gibi polistiren köpüklerinin ısı iletkenliği, normal polistirenin onda biri düzeyindedir [26].

Çizelge 6.3 Isıl İletkenlik Değerleri [30]

Madde	Isıl İletkenlik (W/m K) (25 °C de)	Polimer	Isıl İletkenlik (W/m K) (25 °C de)
Hava	0,024	Naylon 6	0,25
Alüminyum	250	Polietilen	0,5
Cam	1,05	Poli(vinil klorür)	0,19
Cam elyaf	0,04	Polietrafloretilen	0,25
Demir	80	Polistiren	0,3
		Polistiren köpük	0,03

6.2.6 Isı kapasitesi

Isı kapasitesi (C) maddelerin çevreden ısıyı absorplayabilme yeteneklerinin ölçüsüdür ve bir maddenin sıcaklığını 1 °C yükseltmek için verilmesi gereken ısı miktarı şeklinde tanımlanır.

Isı kapasitesinin sayısal değeri, malzemeye verilen ısının (Q), malzemede neden olduğu sıcaklık artışına (T) bölünmesiyle bulunur, birimi J/K dir [26].

$$C = \Delta Q / \Delta T \quad (2)$$

Bu bağıntıda ısı absorpsiyomu yapan madde yığın halinde düşünölmüş ve miktarı (kütlesi) göz önüne alınmamıştır. Bağıntı (2), madde miktarına (m) bölünerek, birim

kütle basma ısı kapasitesine karşılık gelen ve maddelerin ısı kapasitelerinin karşılaştırılmasında daha yararlı olan özgül ısı (C_p) elde edilir.

$$C_p = m (\Delta Q / \Delta T) \quad (3)$$

Özgül ısının birimi J/kg K veya J/mol K türünden verilebilir. Polimerler fazla miktarda ısı absorplarlar ve ısı kapasite değerleri metallere göre yüksektir (Çizelge 6.4).

Çizelge 6.4 Bazı maddelerin ve polimerlerin ısı kapasite değerleri. [23]

Madde	Özgül ısı (c_p) (J/mol K)
Alüminyum	900
Çelik	486
Cam	840
Alümina (Al_2O_3)	775
Polipropilen	1925
Polietilen	1850
Polistiren	1170
Polietrafloretilen	1050

7. TERMOPLASTİK ESASLI ÜRÜNLERİN KALIPLANMASINDA ÜRÜN ÜZERİNDE OLUŞAN HATALAR VE ÇÖZÜMLERİ

Bir plastik enjeksiyon işletmesinde ürün sorumlusu teknik elemanlar ve denetçilerin en büyük sorunu, üretilen plastik parçalarda karşılaşılan ve genel olarak “enjeksiyon hataları “ diye adlandırdığımız istenmeyen oluşumlardır. Biraz sonra tek tek ele alacağımız bu hataların kaynakları çeşitli olmakla birlikte arz ettikleri önem genellikle üç ana kategoride toplanabilir. Birincisi; enjeksiyondan kaynaklanan hatlardır, ikincisi; kalıptan kaynaklanan hatalar, üçüncüsü ise; hammaddeden kaynaklanan hatalardır [].

7.1 Enjeksiyon Makinesinden Kaynaklanan Hatalar ve Çözümleri

7.1.1 Yanma izi

Sıcaklık karşısında plastik malzemede doku bozulması sonucu oluşan ve renk bozulması şeklinde kendini gösteren bu tür hatalar, kalıp içerisine enjekte edilen erimiş plastiğin havayı sıkıştırması sonucu da görülebilmektedir. Erimiş plastiğin uçları kalıp boşluğunda bir araya gelir ve arada kalan hava, kalıp ayırma çizgisinden ve başka bir yerden tahliye edilemez ise hava sıkışmaları oluşmaktadır. Bunun sonucu olarak yarım kalmış ürünün yanında birbiri ardına sıralanmış yanık lekeler ortaya çıkmaktadır [12].

Yanma izinin sebebi erimiş plastiğin ısıyla zarar görmesidir. Sonuçta molekül boyunda azalma olabilir veya makro moleküllerde değişiklik olabilir.

Eğer erimiş plastik çok yüksek sıcaklıkta tutulur veya ocakta çok fazla kalırsa bozulur, gazlı bozulmuş ürün ortaya çıkar ki bu baskının yüzeyinde kahverengi gibi veya gümüşü renk bozukluğu olarak görülür [10].

Malzemenin silindirde iken oksitlenmesinden veya degradasyonundan kaynaklanan bu yanık türüne de özellikle PVC, asetal ve naylonlarda karşılaşılr. PVC ‘de bu olay, baskıdan baskıya yeri değişen koyu ve uzun bir iz şeklindedir.

Geri emişin yanlış uygulanmasından dolayı , silindir memesinde havanın sıkışmasında, parçanın yüzeyinde yanık izlerinin oluşmasına neden olabilir. Memeden mal akışının olmaması için yapılan ve mal alımından sonra vidanın biraz geriye alınması işlemi olan geri emiş yeterinden fazla ise memedeki malzeme oksitlenebilir ve yanıklar oluşur [1].

Isısal (Termal) bozulmanın sebepleri:

- Sıcaklık aşırı yüksek veya kurutma zamanı aşırı uzundur.
- Erime sıcaklığı aşırı yüksektir.
- Ocakta sürtünme çok fazladır.
- Ocakta plastiğin kalma süresi çok uzundur.
- Kalıp içinde sürtünme çok fazladır [10].

Hatayı Çözümleme:

Ocakta erimiş plastiğin kalma süresi kritik dereceden uzunsa;

- Baskı süresini kısalt.
- Plastiğin erime süresini uzat yani daha uzun zamanda erit.
- Makinayı yüksek kapasitede kullan,vida strokunu arttır.
- Hammaddeye konulan kırılmış malzeme miktarını azalt.

Yanma izi periyodik olarak görülüyorsa veya dışarı yapılan enjeksiyondan sonra görülüyorsa;

- Yolluk geçidinde ve ocakta oluşabilecek ölü noktalara, akmayı önleyen veya geciktiren şeylere engel ol .
- Ocak içinde ufak karıncalanmalar gibi eskime ve yıpranmaların olup olmadığını kontrol et.
- Granülün durumunu ve beslemeyi kontrol et [10].

Yanma izi yolluk geçidine yakın ise;

- Enjeksiyon oranını düşür.
- Sıcak yolluğu kontrol et.

- Yolluk geçidinde keskin köşe olmamasına dikkat et.
- Ufak yolluk kullanma .
- Memenin büyüklüğünü kontrol et [13].
- Kapanan memenin doğru çalışıp çalışmadığını kontrol et.
- Kullanılan kırılmış malzeme miktarını azalt.
- Renklendiricilerin daha fazla sıcaklığa dayanıklı olanı kullan [10].

7.1.2 Renk izi

Renk izinin nedeni, plastiğe pigmentin karıştırılması esnasında pigment parçacıklarının plastik içerisinde farklı yoğunluklarda bulunmasıdır. Bu şekilde kötü pigment dağılımının sebepleri; işletme şartları, diğer katkı madde parçacıklarının homojen dağılmamasıdır. Pigment ve boyalar termoplastiklerde olduğu şekilde aşırı çalışma sıcaklığına ve ocakta fazla beklemeye hassastırlar. Eğer renk izinin sebebi sıcaklık ise, bu yanma izi olarak sınıflandırılır [10].

Renk izi, plastik karışımını oluşturan malzemelerin düzgün şekilde karışmamasından veya karışımdaki pigmentlerin farklı konsantrasyonlarda farklı yönde dağılımlarından dolayı oluşur. Sıcaklık ve buna bağlı deformasyon da renk değişimine veya renk farklılığına sebep olur [17].



Şekil 7.1 Yüksek sürtünme nedeniyle boya konsantresindeki ufak farklılıklar [10].

(*Şekildeki siyah benekler renk pigmentleridir.)

Hatayı Çözümleme:

Kullanılan malzeme yüzeysel kuvvetlere müsaade ediyorsa; Plastik eriyiğinin homejenitesini mekanik yolla iyi hale getirilmelidir;

- Granülün durumunu ve beslemeyi kontrol et [10].
- Arka basıncı arttır ve vida hızını buna uygun hale getir.
- Enjeksiyon hızını arttır.
- Daha küçük yolluk geçidi kullan.

Kullanılan malzeme yüzeysel kuvvetlere müsaade etmiyorsa; Renklendirme işleminde değişiklik yapma imkanı varsa;

- Pigmentleme için; Daha ufak pigment kullan.Pasta şeklinde pigment veya boya kullan.
- Boyayla renklendirme için ise; Daha ufak parçacıklı boya kullan. Boyanın çözülebilirliğini kontrol et [10].

Renklendirme işleminde değişiklik yapma imkanı yoksa, daha ufak granül kulan. Eğer kullanma imkanı yoksa;

- Vida uzunluğu ve vida çapı oranını yükselt.
- Karıştırma ve yüzeysel sürtünme yapan parçalı vida kullan.
- Vida üzerinde plastiği karıştıran ilave parça ile tek yönlü geri dönüşsüz valf kullan [10].

Kaba yollukta renk bozulması meydana geliyorsa;

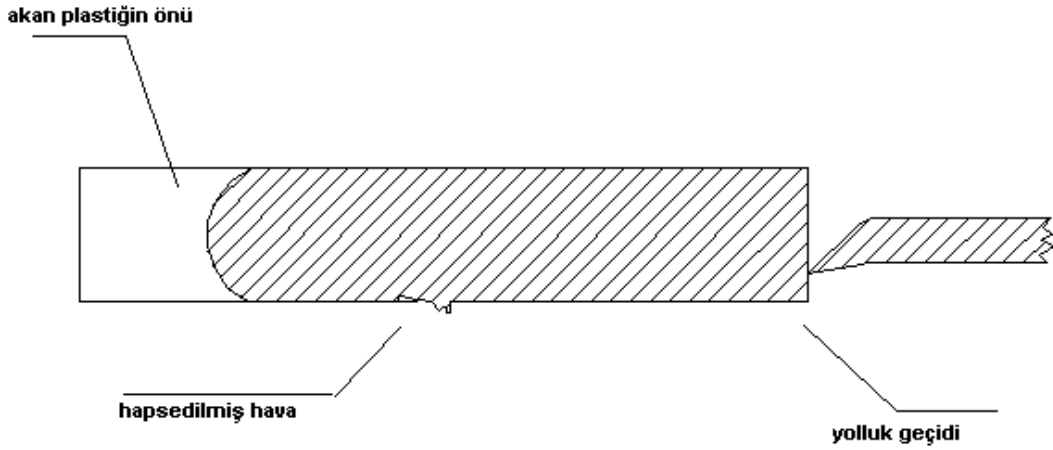
- Ocak ısısını azalt.
- Enjeksiyon hızını azalt.
- Meme deliğini büyüt
- Kalıp sıcaklığını arttır.
- Yolluk geçitlerini büyüt [15].

7.1.3 Hava izi

Kalıbın dolması esnasında hava kaçamayabilir, yüzeye doğru çekilir ve akma yönünde uzar. Özellikle yazılara, kaburgalara, tümseklere, ve gerilimin olduğu kısımlara yakın yerlerde, erimiş plastik malzeme hava kabarcığının üzerinden geçer

ve havayı hapseder. Sonuçta hava yakalanmış olur yani hava izi oluşur. Eğer hava vida önüne dekompresyon esnasında emilirse, hava izi yolluk geçidine yakın oluşur. Burada hava enjeksiyon esnasında kalıp boşluğuna nakil edilir ve sonra kalıp duvarlarına doğru itilir ve burada soğuyarak donar [10].

Bir çok durumda hava izi mat, gümüşi veya beyaz iz olarak gözükür ve bunlar parçanın tepesine, kaburga ve duvar kalınlıklarının farklı olduğu yerlere yakın oluşur. Ocaktan kalıba dik giden yolluğa yani ana yolluğa yakın, kapıdan başlayan tabakalar halinde iz oluşur. Hava izi ayrıca parçadaki yazılara yakın ve iç gerilim olduğu yerde oluşur [10].



Şekil 7.2 Kazılmış yerlerin arkasında oluşan hava izi [10].

Hatayı Çözümleme:

Havanın hapsedilmesi problemse;

- Enjeksiyon hızını azalt
- Kalıbın içindeki keskin geçişlere engel ol.
- Parçadaki ilave oyukların derinliğini azalt [17].

Hava izi yolluk geçidine yakınsa;

- Sıkıştırma esnasındaki vida dönme hızını azalt.
- Kalıplanabilir meme kullan.

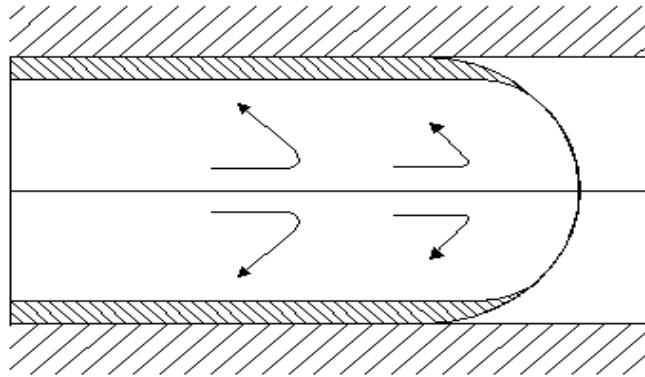
Hava izi yolluk geçidine yakın değilse;

- Enjeksiyon hızını düşür.
- Arka basıncı arttır.
- Baskının farklı bölgelerinde geçişin keskin olmamasına dikkat et.
- Memede kaçak olup olmadığını kontrol et.
- Yolluk geçidinin yerini değiştir [10].

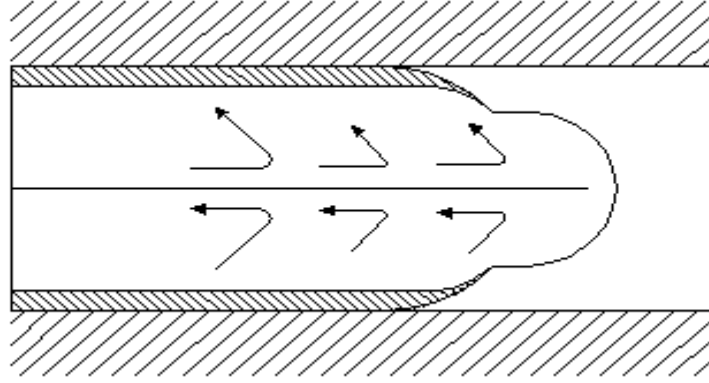
7.1.4 Oluklu çizgi

Baskının yüzeyinde çok ince oluklar gözükür. İğne kapıya yakın halka konsantrasyonları görülürken plastiğin akma yolunun sonuna kadar paralel izler oluşur veya film kapının arkasında paralel izler oluşur.

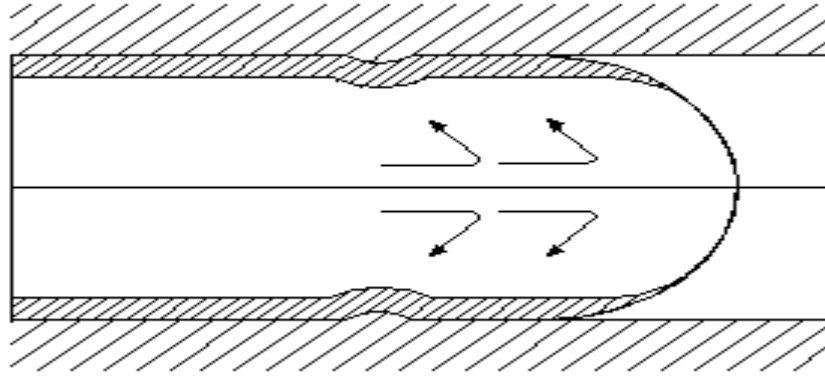
Erimiş plastiği soğuk kalıba enjekte ettiğimiz zaman akan plastiğin ön kısmının biraz gerisinde yüksek soğuma oranından dolayı akan plastiğin çevresinde donmuş bir tabaka oluşur. Bu soğuyan çevresel tabaka ayrıca akmanın ön kısmında duvara yakın olan bölümde soğumaya sebep olur. Eğer bu soğuma çok hızlı ise bu çok yüksek sıvı direnci veya donmuş akan plastiğin ön kısmını kalıp duvarına direkt dokunmasını geciktirir. Sonuç olarak bunu takip eden sıcak plastik kalıp duvarına doğru hareket edemez, fakat akan plastiğin orta kısmında uzamaya sebep olur. Belirli basınçtan sonra akan plastiğin ön kısmı kalıp duvarına tekrar değer. Soğutulmuş akan plastiğin ön kısmı baskı yüzeyiyle kontak kurmaz [10].



Şekil 7.3 Akan plastiğin önü duvara yakın donar [10].



Şekil 7.4 Soğutulmuş tabaka akan plastiğin ön kısmının kalıp duvarına dokunmasını geciktirir [10].



Şekil 7.5 Akan plastik önü kalıp duvarına tekrar dokunur [10].

Hatayı Çözümleme:

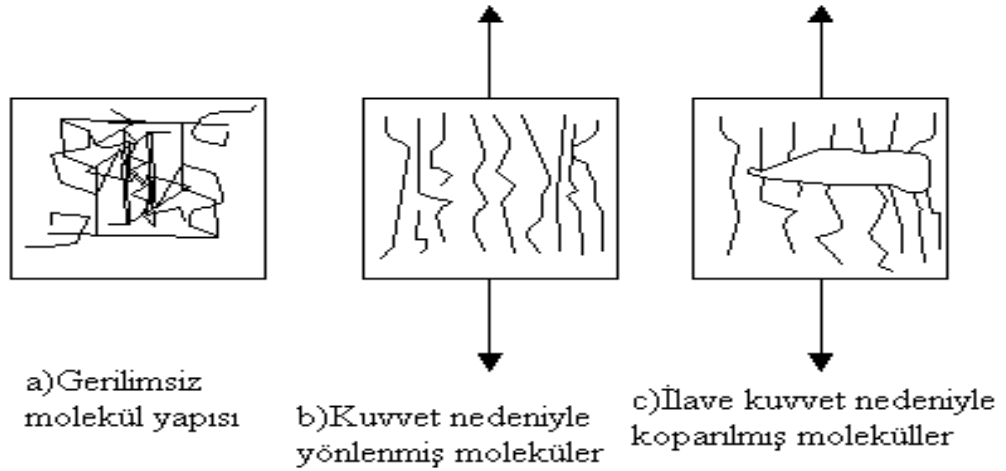
Enjeksiyon hızını arttır. Eğer hız maksimumda ise basıncıda maksimuma çıkar. Çıktıysa;

- Erime sıcaklığını arttır.
- Kalıp sıcaklığını arttır.
- Küçük yolluk kullanma [17].

7.1.5 Gerilim beyazlaması/çatlaması

Gerilim beyazlaması içerden ve dışardan gerilimler sebep olur. Gerilmeye maruz kalan bölge beyaz renge döner. Gerilim çatlaması baskının kalıptan çıkması yönünde çatlığa yakın bir şeydir. Bunlar sıkça, üretimden birkaç gün sonra veya haftalar sonra ortaya çıkar.

Gerilim beyazlaması veya çatlaması maksimum deformasyon oranı aşıldığı zaman oluşur. Maksimum deformasyon kullanılan malzemeye, moleküler yapıya, hammaddenin işlenmesine ve baskının bulunduğu hava şartlarına bağlıdır. Dahili ve harici gerilme, baskı kuvvetini zamana ve sıcaklığa bağlı fiziksel işlemle çok fazla miktarda azaltılabilir. Bu durumda moleküller arasındaki bağlantı kuvvetleri gerilim beyazlaması, yayılması ve baskının şişmesi işlemiyle azalır. Bu özellikle gerilim çatlaması için geçerlidir. Akmadan dolayı gerilme ve dahili soğuma gerilimi ilaveten, genişlemeden dolayı olan dahili gerilim, dahili gerilim için başka bir nedendir. Harici genişleme gerilimi, baskı basınç altındayken malın aniden kalıptan çıkarılıp atmosfer basıncına çıktığı zaman oluşur. Sonuç olarak baskının iç tabakası dış tabakası üzerine gerilim yapar. Yetersiz kalıp boyutlaması veya yüksek kalıp içi basıncı altındaki baskının kalıptan çıkarılması hatanın ana nedenidir [10].



Şekil 7.6 Kuvvetler etkilenen molekül yapıları [12].

Hatayı Çözümleme:

Gerilim beyazlaması kuvvetli deformasyondan dolayı oluşursa; Harici gerilimi azalt.

Baskı basınç altındayken kalıptan çıkarıldıysa;

- Enjeksiyon basıncından ütülemeye daha kısa sürede geç.
- Ütüleme basıncını azalt.
- Baskının kalıptan daha soğuk çıkmasını sağla.
- Dizaynı değiştirerek baskıyı kuvvetlendir [10].

Baskı basınç altındayken kalıptan çıkarılmadıysa;

- Kullanılan plastik yarı kristal ise; Kalıp sıcaklığını ve erime sıcaklığı düşürülür [17].
- Kullanılan plastik amorf ise; Kalıp sıcaklığını ve erime sıcaklığı artırılır. Ütüleme basıncı düşürülür.

Başka hammadde karışımı kullanma imkanı varsa;

- Malzemeyi seçerken bu malzemenin bulunduğu yerin çevre şartlarını göz önüne al.
- Yarı kristal malzeme kullan.
- Yüksek molekül ağırlıklı veya molekül ağırlıkları birbirine yakın malzeme tercih edilmeli.

Başka hammadde karışımı kullanma imkanı yoksa;

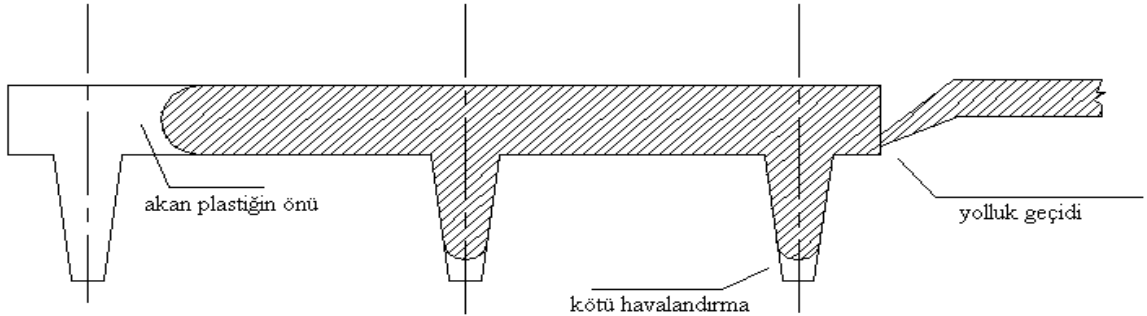
- Kalıp sıcaklığını sabit olmasını sağla.
- Düzgün kalıp dolmasını garanti et.

7.1.6 Tamamen dolmamış baskı

Dış kısımları tamamen oluşmamış parçalara tamamen dolmamış parçalar denir. Bu tip hata yolluk geçidinden çok uzak bir yerde eğer akma mesafesi uzunsa ortaya çıkar veya ince duvarlı baskıda olur [10].

Tamamen dolmamış ürün almanın birçok nedeni olabilir. İlk bakılacak şey makinenin enjeksiyon grubunun yeterince güçlü olup olmadığı, malzemenin akışkanlığının yeterince sağlanıp sağlanmadığı ve kalıbın tamamen dolmasını getiren bir karşı basınç veya engelin varlığıdır [15].

Kalıp içinde oluşan ve parçanın tamamen şekillenmesine karşı koyan bir iç basınç genellikle hava veya başka bir gazın sıkışıp kalmasındandır. Hava kalıyor ve hiçbir şekilde kaçamıyor ise, eksik ürün verme olayının yanında yanık izininde oluşması kaçınılmazdır. Ancak, bazen havanın yavaş bir sızma şeklinde kaçması durumunda oksidasyon reaksiyon yani yanma olmaz, fakat malzeme bu sırada donduğu için tam dolma gerçekleşmez. Havanın sıkışması kalıp yapım hatasından meydana gelebildiği gibi, havalandırma kanallarından yağ, gres, herhangi bir pislik veya plastik tıkanması yada küçülmesinden de olabilir. Kalıbın yüksek basınçta sıkılması durumunda da metalin elastik halde aşırı bastırılmasından dolayı havalandırmalar etkisiz halde kalabilir [15].



Şekil 7.7 İnce kaburgalara yakın doldurma problemi [1].

Hatayı Çözümleme:

Vida ocağın çok önünde ise;

- Plastik dozajını arttır.
- Geri dönüşsüz musluğu kontrol et.

Vida ocağın çok önünde değil ise;

- Maksimum basınca ulaşıldıysa: Enjeksiyon basıncı maksimuma çıkarılır. Erime sıcaklığını arttırılır.
- Kalıp doldurma esnasında basınç düşmesi varsa: Basınç değişimine bağlıdır. Değişim basıncını arttır. Basınç değişim mesafesini arttır. Basınç değişim süresini arttır.
- Kalıp doldurma esnasında basınç düşmesi yoksa: Enjeksiyon hızını değiştir. Kalıp sıcaklığını arttır. Havalandırmayı daha iyi hale getir. Yolluk geçit geometrisini değiştir. Nozzle deliği ve sıcaklığı kontrol et



Resim 7.1 Tamamen dolmamış ürün.

7.1.7 Parça yüzeyinin kabuklanması

Malzemenin tabakaları homojen olarak birbirine bağlanmamıştır ve sonuçta kabuklanma başlar. Bu yolluk geçidinde veya baskı yüzeyinde oluşur ve çok büyük veya çok ufak ve incedir bu yoğunluğa bağlıdır [10].

Yüzey kabuklanmalarının bir nedeni yine iç gerilmelerin fazla oluşundandır. Parça içerisinde giderilmemiş gerilmeler taşıyan bir parça, normalde etkilenmeyeceği bir solventle sıcak bir ortamda karşılaştığında yüzeyinde kabuklanmalar görülebilir [1].

Bir plastik malzemeye başka bir plastik malzeme karıştığında da üründe, özellikle ürün besleme ağzında soyulmalar olur. Fazla miktarda kullanılan kalıp ayırıcı yağları daha sonradan yüzey soyulmalarına neden olabilir [1].

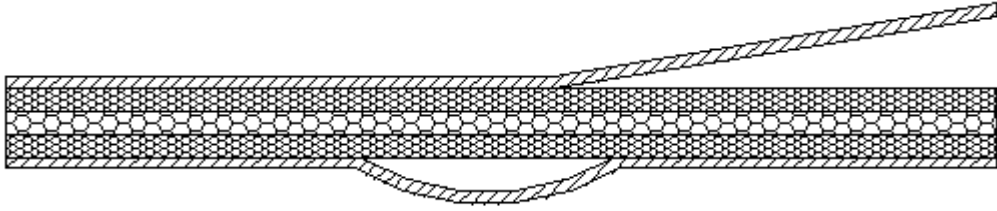
Fizikse nedeni: Yüzeydeki kabuklanma, birbirine yakın tabakaların arasındaki yeterli yapışmanın oluşmamasından dolayıdır. Farklı tabakalar farklı akma etkisi ve soğuma şartlarıyla basıda oluşur [10].

Yüksek sitres ve termal zararı aşağıdaki sebeplerden dolayıdır;

- Yüksek enjeksiyon hızı
- Yüksek erime sıcaklığı

Homojensizlik aşağıdaki sebeplerdendir;

- Granülün saf olmaması veya başka maddelerden granüle karışmış olması.
- Uyum sağlamayan boya veya masterbatch kullanımı.
- Granül içinde ve üzerindeki nem.
- İyi eritilmemiş hammadde.



Şekil 7.8 Farklı yapısal oluşumlu basılmış parçanın kesitindeki kabuklanma [1].

Hatayı Çözümleme:

Malzeme veya renk değişikliğinde hata oluşuyorsa;

- Granülün saflığını ve diğer malzemelerle karışıp, karışmadığını kontrol et.
- Boyanın plastik hammaddesine uyumlu olduğunu kontrol et.
- Nem oranını kontrol et.
- Erimiş plastik homojenitesini ve ocağın eritme performansını kontrol et [1].

Malzeme veya renk değişikliğinde hata oluşmuyorsa;

- Enjeksiyon hızını azalt.

- Erime sıcaklığını azalt.
- Kalıp sıcaklığını arttır [17].

7.1.8 Hava kabarcıkları

Baskı içinde veya üzerinde hava kabarcıkları veya gazın sebep olduğu boşluklar kaçınılmazdır. Vakum boşluğu ile karşılaştırıldığında bu gazın yakalanması kalıp duvarlarında da oluşabilir [10].

İki çeşit baskı içinde boşluk vardır, hava kabarcığı ve havasız vakumlu boşluk. Vakumlu boşluk ve baskının soğuyup çekmesi esnasında oluşur. Bu iki boşluğu birbirinden ayırmak oldukça zordur çünkü birbirine çok benzerler [10].

Fiziksel nedeni: Enjeksiyon esnasında hava erimiş plastik tarafından yakalanır ve bu baskı içinde boşluk şeklinde görülür. Temelde iki ana sebep bu hatanın nedenidir.

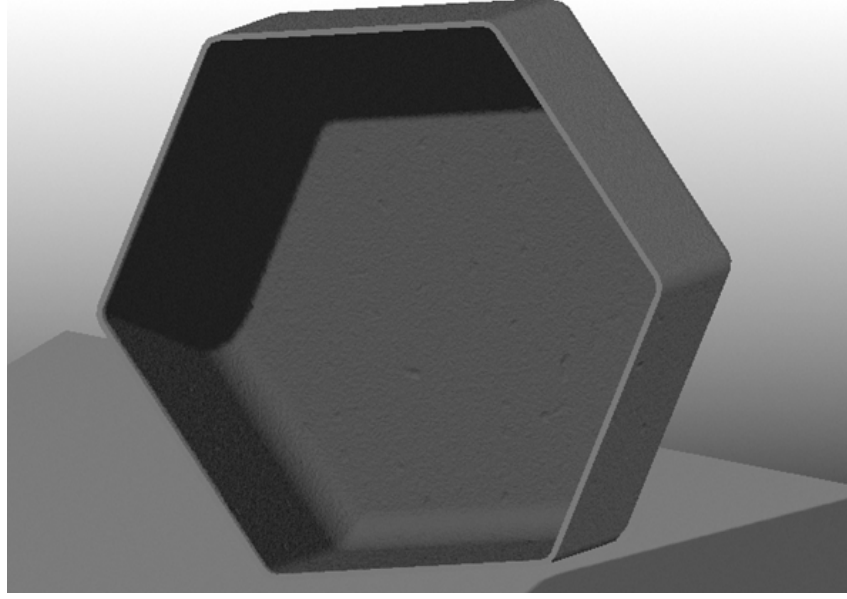
- Basınç azaltılması çok yüksek ve çok hızlıdır.
- Ocağın performansı çok düşük [15].

Hatayı Çözümleme:

Decompression azaltma imkanı varsa; Decompressionu azalt veya vidanın geri dönüşü yavaşlat.

Decompression azaltma imkanı yoksa;

- Hata proses esnasında aniden oluşuyorsa, beslemeyi kontrol et.
- Hata proses esnasında aniden oluşmuyorsa; Arka basıncı arttır ve vida hızını bu basınca uygun hale getir. Enjeksiyon stroğunu azalt. Ocağı kontrol et. Eğer şüphelenirse transparent olmayan parça gelişi güzel kontrol edilir. Enjeksiyon stroku vida çapının 1-3 katı olmalıdır [10].



Şekil 7.9 Parçadaki hava kabarcıkları.

7.1.9 Baskının kalıbın içinde kalması

Parçanın kalıpta kalmasının birçok nedeni olabilir. Malzemenin akışkanlığı buna kaynaklık edilebilir. Çok akışkan bir malzeme, kalıp içerisine gereğinden fazla bir basınçla enjekte edilebilir. Kalıp yüzeyini sıkıca kavrayan parçanın soğuma esnasında oluşan hacim küçülmesi neticesindeki vakum kuvvetinden kurtulması zorlaşır. Eğer malzeme vizkozitesi yüksekse, o zaman basıncı arttırmak gerekirken bunun sonucu yolluk besleme kanalında veya parçaya ait feder, bölme gibi yerleri çıkaran kalıp oyuklarında oluşacak aşırı basınç parçanın kalıba yapışmasına neden olabilir. Enjeksiyon hızının yavaş tutulmasında çekmeyi arttıracaktır ve parçanın kalıbın erkeğine yapışmasına yol açabilecektir [1].

Fazla malzeme beslemesinde ise parça kalıbın dışısında yani hareketsiz plakada kalabilir ki bu da ciddi bir yapışma sonucudur. Bazen kalıbın dışısı erkeğine göre daha sıcak tutularak, dışide kalma sorunu çözümlenebilir [1].

Kalıpta kalma makinanın da suçu olabilir. Eğer hidrolik sistem yeterli yağ debisini sağlayamıyor ise yukarıda da bahsedilen aşırı çekme olayı ile karşılaşılabilir[15].

Tabiidir ki kalıpta kalmanın en büyük kaynağı kalıp hatasındandır. İyi parlatılmamış yüzeyler parçanın sıkışmasına neden olabilir. Yalnız burada unutulmaması gereken bir şey süzdürmenin yapılacağı erkek yüzeyinin iyi parlatılmasının ters etki yapacağı ve parçanın dışıde kalabileceğidir. Ürün tasarımında yeterli aç, koniklik, pah kırma gibi süzdürmeyi kolaylaştıracak koşullar öngörülmalıdır [1].

Hatayı Çözümleme:

Baskının kalıbın dişi bölümüne yapışıyor;

- Enjeksiyon basıncı yüksek ve ütleme basıncı çok yüksek.
- Enjeksiyon ve ütleme süresi çok fazla ve baskıya fazla malzeme dolmasına sebep olur.
- Vida yastığı uzunluğu değişiyor.
- Baskı soğuması çok kısa, böylece tam bir soğuyup sertleşme oluşmuyor.
- Kalıbın dişi kısmının sıcaklığı çok yüksek ve belirlenen sürede soğuyup sertleşme sağlamıyor.
- Ocak ve meme sıcaklığı çok fazla belirlenen sürede tam sertleşmeye engel oluyor.
- Kalıbın dişi ve erkek kısmının birleştiği yerde kesik ve birbirine geçmiş kenar ve maçalar parlatmaya ihtiyaç duyar [10].

Baskı kalıbın erkek bölümüne yapışıyor;

- Enjeksiyon ve ütleme basıncı çok yüksek ve enjeksiyon ve ütleme zamanı çok fazla, kalıba fazla malzeme dolmasına sebep olur.
- Vida yastığı uzunluğunun değişmesi.
- Kalıp kapama süresi çok uzun ve bu parçanın kalıbın erkek kısmı üzerinde aşırı çekmesine sebep olur.
- Kalıbın erkek kısmının sıcaklığı çok fazla ve ayarlanmış sürede parçanın tam soğuyup sertleşmesine müsaade etmiyor.
- Ocak ve meme sıcaklığı çok yüksek ayarlanmış sürede soğumaya yardım etmiyor.

- Kesik olma ihtimali veya parlatma daha iyi yapılmaya ihtiyaç gösteriyor (17).

7.1.10 Parça ölçüleri hatası

Plastik enjeksiyonla şekillendirildiğinde, boşluk boyutlarıyla kalıplanan parça boyutları arasındaki farklardan kaçınılmamakta ve bu boyut daraltmaları parça ölçüleri hatası ile ifade edilmelidir [12].

Akış yönüne göre radyal ve teğetsel büzülme olarak farklı boyut değişmelerinin üründe gözlemlendiği büzülme izlerindeki fark, büzülmenin anizotropisinin bir ölçümü ve radyal ve teğetsel büzülme arasındaki fark olarak tayin edilebilmektedir [12].

Günümüzün plastik endüstrisinde yaygın olarak kullanıldığı ve akademik çalışmaların sürdürüldüğü büzülme probleminin temel sebepleri; Parçanın uygun olmayan tasarımı, girişin yerinin uygun olmaması, kalıplama şartları, moleküler düzenin şekillenmesi, yüksek düzeyde gerilme oluşmamasıdır [12].

Hatayı Çözümleme:

Baskı boyutlarının büyük olması;

- Enjeksiyon basıncı yüksek olduğunda kalıp basıncı fazla olduğu için çekme oranını azaltır buda boyutların büyük olmasını sağlar.
- Kalıp sıcaklığı düşük olduğunda sıcaklık ve basınç etkisiyle açılmış moleküllerin tabii durumuna gelmeden soğumasına sebep olur.
- Isıtılmış plastik moleküllerin ayrılmasına sebep olur ve soğutulduğu zaman moleküller kendilerini bir birlerine kilitlenmiş şekilde düzenlerler.
- Moleküller kısmi açılmış durumda daha fazla hacim kaplarlar ve daha büyük boyutlu baskılara sebep olur.

Baskı boyutlarının küçük olması;

- Enjeksiyon basıncı düşük olduğunda çekme oranını artırır ve bu baskının küçük olmasına sebep olur.

- Kalıp sıcaklığı yüksek olduğunda daha yüksek çekmeye sebep olur çünkü kalıp ve plastik malzeme genişletilmiş durumdadır.
- Baskı kalıptan çıktığında daha fazla çeker ve baskı boyutları küçülür [10].

7.1.11 Farklı ağılıkta baskı

Farklı ağılıktaki baskılar kalıbın her baskıda ürünün ağırlığında değişimler olmasıdır.

Hata Çözümleme:

- Enjeksiyon basıncındaki değişim çok fazla olmayacak.
- Erime sıcaklığındaki değişim malzemenin göstereceği toleransdan fazla ise değişik malzeme kullanma imkanı varsa malzemeyi değiştir.
- Eğer yüksek vida hızı ve arka basıncı yüksek sıcaklık yapıyorsa buda farklı parça oluşmasında önemli faktör olabilir.
- Vida önündeki yastığın uzunluğunu değiştirmek sabit olmayan vida hareket mesafesine sebep olacağından ötürü çok farklı kalıp içi basınçlara sebep olur.
- Kalıp sıcaklığında kalıp soğutma sıvısının sirkülasyonundaki farklılık nedeniyle değişim olması [10].

7.1.12 Memeden sonraki yolluğun yapışması

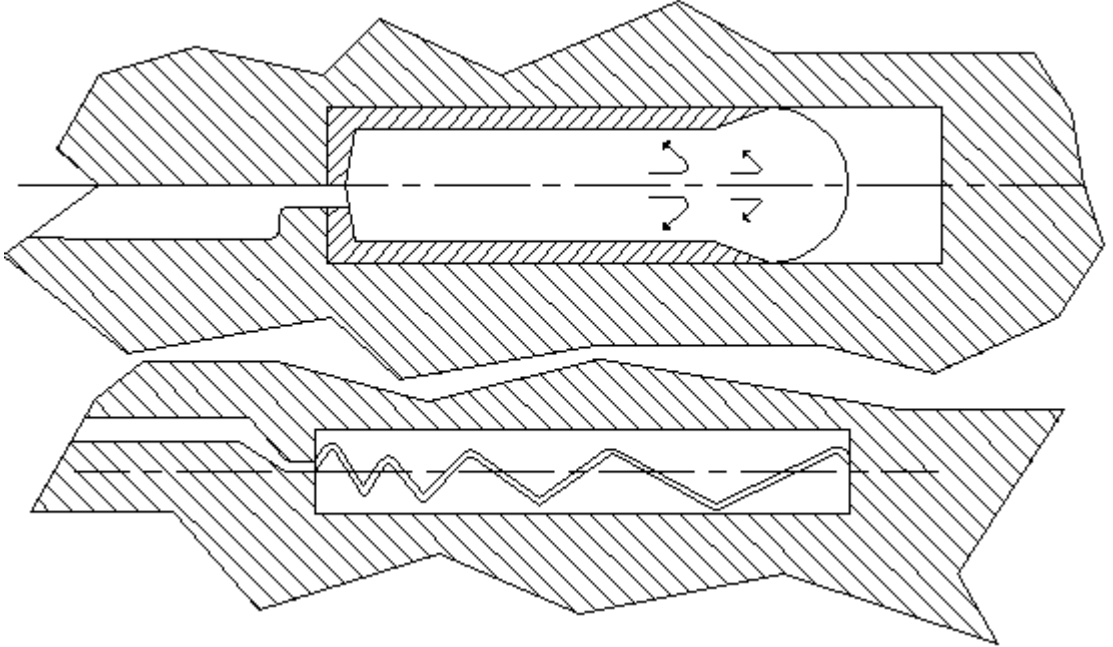
Hatayı Çözümleme:

- Enjeksiyon ve ütüleme basıncı çok yüksek veya enjeksiyon ve ütüleme süresi çok uzun ve bu yolluğun soğuyup çekerek yolluk duvarından ayrılmasına engel oluyor (5).
- Kalıp kapama süresi çok kısa ve bu yolluğun tam çekmesine müsaade etmiyor.
- Kalıp sıcaklığı meme bölgesinde çok fazla ve bu yolluğun soğuyup çekmesine engel oluyor.
- Yolluk çapı meme çapından büyük olmalıdır ve birleşim yerlerinde malzeme sıkışıp kalıp kalmadığı kontrol et.
- Yolluk çekicinin bu iş için yeterli olup olmadığı kontrol edilmelidir (10).

7.1.13 Plastiğin yılan gibi fıskırtarak kalıba dolması

Baskının yüzeyinde yılan gibi kaba veya mat izler görülür. Fıskırma sıkça renkte ve parlaklıkta farklılığa sebep olur. Bazı durumlarda yarık şeklinde görülebilir [10].

Fiziksel nedeni: Fıskırma erimiş plastiğin ön kısmının normal plastik akışından farklı olmasından dolayıdır. Sicim şeklinde oluşmuş plastik yolluk geçidinden başlamak üzere kontrolsüz bir hareketle kalıp boşluğuna girer. Bu durumdaki erimiş plastik sicimi öyle bir şekilde soğur ki arkadan gelen plastik bileşimi ile homojen olarak karışmaz. Bu durum sıkça uzun parçanın yüksek enjeksiyon hızıyla dolması durumunda oluşur.



Şekil 7.10 Kalıp doldurma normal ve plastiği fıskırtma [10].

Hatayı Çözümleme:

Enjeksiyon hızı azaltabilme imkanı varsa;

- Enjeksiyon hızını düşür.
- Enjeksiyon profilini yavaşça değiştir.

Enjeksiyon hızı azaltabilme imkanı yoksa;

- Erime sıcaklığı değiştirilebilir ise; Erime sıcaklığını arttır.

- Erime sıcaklığı değiştirilemezse; Kalıbın pozisyonunu kontrol et. Yolluk geçidini ve baskı arasındaki geçişi yuvarla. Yolluk geçidinin çapını arttır. Yolluk geçidini değiştir ve akmaya karşı direnç oluştur. Ocağın ön kısmının sızdırmazlığını sağla [10].

7.2 Kalıptan Kaynaklanan Hatalar ve Çözümleri

7.2.1 Baskıdaki çökme

Çökmeler genelde basının kalın kısmında veya kalınlık farklarının oluştuğu yerlerde oluşur. Bunun sebebi baskının farklı yerlerini farklı oranda soğumasıdır [10].

Bir de parça içerisinde vakum boşlu diyebileceğimiz bir boşluk oluşur ki nedeni, yüzeydeki çöküntüleri yaratan olgu ile aynıdır. Plastik malzeme eriyik halinde iken haline oranla daha fazla hacim kaplar. Faz değiştirme ve soğuma esnasında hacimsel küçülmeye uğrar ve tabiidir ki uzun ve kalın yerlerde bu küçülme kısa ve ince kesitlere göre fazla olur. Kalıplanmış bir plastik parça üzerinde ani kesit kalınlığı değişiklikleri var ise farklı hacimsel küçülme yüzeyde çöküntü şeklinde kendini belli eder. Eğer malzemenin kalıba değen yüzeyi çabuk donar ise, bu hacimsel küçülme içeride bir boşluk yaratarak gerçekleşecektir. Malzemenin özelliğinden ve parça tasarımının sonuçlarından kaynaklanan bu önemli mahzurun giderilmesi pek kolay değildir [1].

Fiziksel nedeni: Plastiğin soğuyup sertleşmesinin aşırı yavaş olması, Ütöleme basıncı süresinin aşırı kısa olması, Ütöleme basıncının, kalıp içindeki akma direncinin aşırı yüksek olması nedeniyle kalıp içerisine yeterince transfer edilmemesidir [10].

Hatayı Çözömleme:

Çökme İzi;

- Makine ayarını kontrol et veya değiştir.
- Ütöleme basıncını ve süresini arttır.
- Kalıbı değiştir yani geniş yolluklu kalıp kullan.

- Hammaddeyi deęiřtir yani içinde katkı maddesi olan, grade veya çekme oranı dūřuk plastik kullan.
- Tutma basıncı zamanını arttır [13].

Vida önünde toplanan erimiş plastik miktarı aşırı kkse;

- Enjeksiyon vidasının ileri geri hareket miktarını arttır.
- Tek yönlü valfli roketi kontrol et.

Çökme izi kapıya veya kalın baskı duvarına yakınsa;

- tleme basınç süresini optimize et.
- tleme basınç süresini arttır.
- Kalıp sıcaklığını azalt.
- Erimiş plastiğin sıcaklığını azalt.
- Enjeksiyon hızını azalt.

Çökme izi kapıdan uzakta veya baskının duvarlarındaysa;

- Arka basınç süresini optimize et.
- Arka basınç süresini arttır.
- Enjeksiyon hızını arttır.
- Erimiş plastiğin sıcaklığını arttır.
- Kalıp sıcaklığını arttır.

Çökme baskı kalıptan çıktıktan sonra olursa;

- Kalıp havalandırmasını kontrol et.
- Yolluk ve kapı boyutlarını kontrol et.
- Granül durumunu kontrol et.
- Kalıp ısı kontrol cihazı kullan.
- Baskının farklı yerlerindeki kalınlık farkını azalt.Parçayı inceltip baskıda oluşacak kuvvetteki azalmayı kaburga veya baskı duvarları arasına konulan baskıyı kuvvetlendiren atkı kullanarak takviye etmeye alış.
- Duvar kalınlığının kaburga oranını göz önüne al.

- Gaz yapan katkı maddesi koy.
- Çekme oranı düşük plastik kullan [13].

7.2.2 Farklı parlaklıklar

Baskı parlaklık yönüyle değerlendirildiğinde iki tip hata söz konusudur. Baskının tamamı aşırı parlak veya yeterince parlak değil yahut da baskının yüzeyinde parlaklık farklılıkları vardır. Parlaklık farklılığının hakim olduğu yerler baskının farklı kalınlıklarının olduğu yerlerdir [10].

Fiziksel sebebi:

1. Baskının parlaklığı baskı ışığa tutulduğunda görülür.
2. Işık parçada farklı yoğunluklarda emilir.
3. Yüzeyin düzgünlüğü arttıkça parlaklık en iyi düzeyde olur.
4. Kalıptaki parlaklık kalıp içinde plastiğin farklı soğuma ve farklı çekme şartlarına maruz kalmasıdır.
5. Soğuyan bölgelerde eğilmeden dolayı yani çekilmesiyle farklı parlaklıklar olabilir.

Hatayı Çözümleme:

Kalıp yüzeyi yeterli parlatılmışsa;

- Kalıp sıcaklığını arttır.
- Erime sıcaklığını arttır.
- Enjeksiyon hızını arttır.
- Kalıp yüzeyini daha parlak hale getir [17].

Kalıp yüzeyi daha parlak değilse;

- Kalıp sıcaklığını azalt.
- Erime sıcaklığını azalt.
- Enjeksiyon hızını azalt.
- Daha ince kumlu kalıp yüzeyi yap.

Parlaklık farkı kalıp yüzeyinde ise;

- Erimiş plastiğin homojenliğini daha iyi hale getir.
- Yastıklama miktarını azalt.
- Arka basıncını arttır ve vida hızını buna uydur.
- Meme sıcaklığını arttır.
- Kalıp yüzeyinin parlaklığını kalıbın her tarafında eşit hale getir.
- Ocağı kontrol et.

Parlaklık farklılığı kumlu yüzey, kaba yüzey, farklı itici, hareketli parçalarda ise;

- Kalıp içinde basıncın en üst düzeyde oluşmasına engel ol.
- Basınç değişim süresini en iyi hale getir.
- Ütüleme basıncını düşür.
- Ütüleme basıncı zamanını düşür.
- Kalıp sıcaklığının kalıbın her tarafında eşit olmasını sağla.
- İtici sistemini değiştir.

Parlaklık farkı deliklerdeyse;

- Delik geometrisini değiştir.
- Yolluk geçidinin yerini değiştir.

Parlaklık farkı kaynak çizgisindeyse;

- Kalıp sıcaklığını arttır.
- Enjeksiyon hızını arttır.
- Yolluk geçidinin yerini değiştir.

Parlaklık farkı baskının köşelerindeyse;

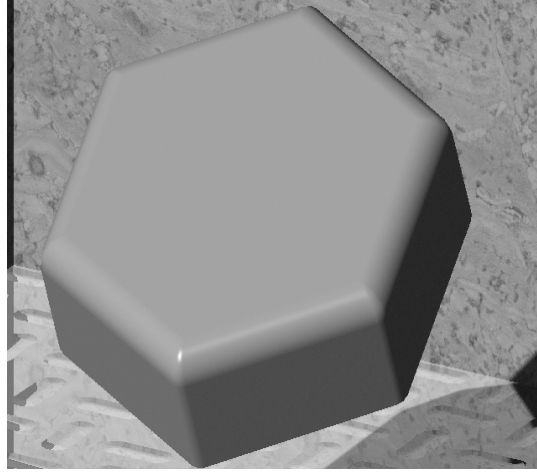
- Baskının köşelerindeki sıcaklığı eşit hale getir.
- Kalıbın hareketli kısmının sıcaklığını düşür.
- Köşelerin geometrisini değiştir.
- Kalıbın ısı sistemini değiştir.

Parlaklık farkı kaburgada ise;

- Ütüleme zamanını optimize et.,
- Ütüleme basıncını arttır.
- Baskının geometrisini değiştir.
- Kalıbın ısı sistemini değiştir.

Baskı kalınlığının değiştii yerlerde parlaklık farklıysa;

- Ütüleme zamanını optimize et.
- Ütüleme basıncını arttır.
- Enjeksiyon profilini baskı geometrisine uyumlu hale getir.
- Parçanın kalınlıklarının eşit hale gelmesini sağla [10].



Şekil 7.11 Yüzeydeki farklı parlaklıklar.

7.2.3 Yanma etkisi

Baskı yüzeyinde siyah nokta olarak görülebilir. Bu yanmanın oluştuğu kısım genelde tamamen dolmamıştır.

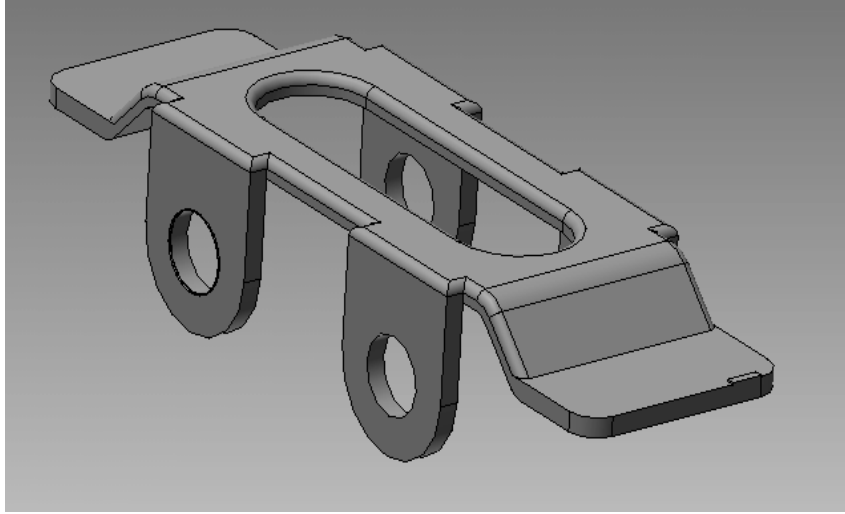
Fiziksel nedeni: Yanma etkisi tamamen havalandırma problemidir. Akan plastiğin birleştiği yerlerde havanın kaçamadığı yerlerde oluşur. Hava iticilerden çabuk kaçamazsa yanma etkisi olur.

Hatayı Çözümleme:

- Hata üretim esnasında aniden oluşuyorsa; havalandırma kanalını kontrol et.
- Kalıp kilitleme gücü azaltma imkanı varsa; makinanın kilitleme gücünü azalt.
- Kalıp kilitleme gücü azaltma imkanı yoksa; Enjeksiyon hızını düşür. Havalandırmanın yeterli olduğundan emin ol. Plastiğin akma şeklini değiştirerek havanın kalıp içinde kalmasına engel ol [10].

7.2.4 Çapaklı parça

Genellikle kalıp öpüşme yüzeylerinde, tampon pimlerinin çevrelerinde veya parçanın herhangi bir yerinde çapak tabiri kullanılan malzeme taşmasının bir çok nedeni vardır. Çapak oluşması kalıp veya makinadan kaynaklanabildiği gibi plastik parçanın ve kalıbın iyi tasarlanmamasından malzeme seçiminin yanlış olmasından yada proses şartlarının iyi ayarlanmamasından meydana gelebilir [1].



Şekil 7.12 Örnek delikte çapak çıkmış parça.

Fiziksel nedeni:

1. Kalıpta müsaade edilen açıklık aşılmıştır.
2. Makinanın kilitleme gücü yetersiz veya çok aşağı bir değere ayarlanmış.
3. Dahili kalıp basıncı aşırı yüksek.
4. Kullanılan makinanın kapama gücünün kalıbın ebatlarının büyük olmasından dolayı yetersiz kalması çapak vermeye neden olabilir.

5. Tasarım ve malzeme seçimi iyi yapılmış bir kalıbın uzun süre çapaksız ürün vermesi gerekmektedir [10].

Hatayı Çözümleme:

- Kilitleme kuvveti arttırılabilme imkanı varsa kilitleme kuvvetini arttır.

Kilitleme kuvveti arttırılabilme imkanı yoksa ve kalıp deformasyonu yüksekse;

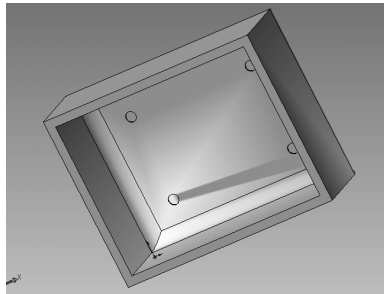
- Kalıp içinde en yüksek basınç oluşmasına engel ol.
- Basınç değişim noktasını en uygun hale getir.
- Ütuleme basıncını düşür.
- Kilitleme kuvvetini değiştir.
- Kalıbı sertleştir.

Kilitleme kuvveti arttırılabilme imkanı yoksa ve çapak kapağına yakınsa;

- Ütuleme basıncını daha erken geç.
- Enjeksiyon hızını düşür veya enjeksiyon profilini yavaş-hızlı yap.
- Erime sıcaklığını düşür.
- Kalıp sıcaklığını düşür.

7.2.5 İtici izleri

Basılmış parçanın iticilerinin olduğu yerin basınç altında kalması veya yükselmesidir. Bu şekilde oluşan parça et kalınlığı farklılığı baskının görülebilir yüzeyinde parlaklık farkı ve gerilime sebep olur [10].



Şekil 7.13 Görülebilir itici izleri olan parça.

Fiziksel nedeni: İticiyi yanlış takmak ve yanlış itici uzunluğu, Ürünün zamanından önce kalıptan çıkarılması, Hatalı boyutlandırma ve kalıp dizaynı, parça ve itici sistemi, İticiler ve kalıp duvarları arasında yüksek sıcaklık farkı.

Hatayı Çözümleme:

İtici düzgün şekilde yerine oturmuyorsa veya boşluğu varsa;

- İticiyi yerine sıkıca oturt.
- İtici başlığının yüzeyini ve iticinin üzerinde boşluklar oluşup, oluşmadığını kontrol et.

Parlaklık farkı varsa;

- Kalıp içinde uygulanan basıncın en yüksek değerinin oluşmasına engel ol.
- Basınç değişim noktasını en iyi hale getir.
- Ütüleme basıncını düşür.
- Ütüleme basıncının süresini düşür.
- Sabit kalıp sıcaklığı kullan.
- İtici sistem ve dizaynı değiştir.

İtici izi baskı yüzeyinin üzerine çıkıyorsa;

- Daha geniş itici kulan.

Baskı zamanından önce kalıptan çıkıyorsa;

- Soğutma süresini kullan.

Kalıpta yüksek derecede deformasyon varsa;

- Kalıp içinde uygulanan basıncın en yüksek değerinin oluşmasına engel ol.
- Değişim noktasını yani basınç değişimini optimize yap.
- Ütüleme basıncını değiştir.
- Kalıbı sertleştir.

İtici kuvvetleri yüksekse;

- Ütüleme basıncını değiştir.

- Soğuma süresini değiştir.
- Erkek kısmın havalandırmasını daha iyi hale getir.
- Eğim açısı ve maçaları kontrol et.

İtici kuvvetleri yüksek değilse;

- Ütuleme basıncını düşür.
- Ütuleme basıncının süresini düşür.
- Kalıp sıcaklığını düşür[10].

7.2.6 Baskının kalıptan çıkarken uğradığı deformasyon

Baskıya yapılan zarara bağlı hatayı sınıflandırdığımızda kalıptan dışarı atılma izi, çatlak, kırılma, iticilerin bulunduğu yerdeki çok fazla gerilimle aşırı çekilip uzaması olarak sınıflandırılır [1].

Fizikse Nedeni: Parçanın kalıptan çıkarılması için gerekli kuvvet parçaya zarar vermeden uygulanamaz. Kalıptan parça çıkarma için gerekli uygulanan kuvvet ufak tutulmalıdır. Basılan parçanın geometrisi önemli faktördür.

Hatayı Çözümleme:

Baskı basınç altındayken dışarı atılıyorsa;

- Enjeksiyon basıncından ütulemeye daha erken geç.
- Ütuleme basıncını azalt.
- Soğuma süresini arttır.
- Baskıyı sertleştir.

İtici baskıya gömülüyorsa;

- Soğutma süresini arttır[15].

Deformasyon maçadan dolayı veya maçadaysa;

- Soğutma süresini azalt.

- İtici sistemini kontrol et.

Dışarı atılma izi varsa;

- Ütüleme basıncını azalt.
- Soğuma süresini arttır.
- Kalıp yüzeylerini kontrol et.

Baskının kalıbın erkek kısmına çekmesinden dolayı yüksek itici kuvvetleri gerekliyse;

- Soğutma süresini azalt.
- Ütüleme basıncını arttır.
- Ütüleme basıncının zamanını optimize et.

Ürüne çok kaburga konulmuşsa;

- Ütüleme basıncını azalt.
- Ütüleme basıncının zamanını azalt.
- Soğutma süresini arttır.

Ürüne çok kaburga konulmamışsa;

- Kalıp sıcaklığını değiştir.
- İtici hızını arttır.
- Kalıbın erkek kısmını havalandırmasını kontrol et.
- İtici sistemini kontrol et.
- Eğim açısını kontrol et.
- Kalıp ayırıcı sprey kullan[10].

7.2.7 Çarpılma

Ürünün yapısındaki ani kesit değişmelerinin ve kalıplama esnasında erimiş plastiğin dengesiz soğultmasından önemli ölçüde etkilenen çarpılma hataları, plastik ürünlerde sık karşılaşılan ve plastik parçanın tasarımı esnasında dikkat edilmediği takdirde soğutma donanımının yenilenmesi, plastik parça ve kalıp tasarımı ve imalatın yenilenmesi gibi giderilebilen hatalardandır [12].

Parçanın kalıptan çıktıktan kısa bir süre sonra yada uzun bir süre sonra çarpılması iç gerilmeler veya da farklı malzeme çekmeleri dolayısıyladır. Katkılı malzeme enjeksiyonunda katkı maddesinin yönlenmesine bağlı olarak çarpılmalar meydana gelebilir [1].

Fiziksel nedeni: Ürün tasarımı iyi yapılmalıdır. Çarpılma farklı malzeme çekmesinden ve iç gerilmeden olabilir.

Hatayı Çözümleme:

- Parçanın soğuması farklı olmamalı.
- Proses şartları incelenmeli.
- Kalıbın dizaynı kontrol et.
- Parçanın akış analizini kontrol et [1].

7.2.8 Eteklenme

Eteklenme, enjeksiyon basıncına ve bu basıncın etki edeceği alana bağlı olarak hesaplanması ve ayarlanması gereken kapama basıncının yetersizliğinden ve tasarım sırasında kalıp boşluklarının merkezinden kaçık yerleştirilen yolluk ve dağıtıcılarından dolayı oluşan bir kalıplama hatasıdır. İlk tasarımda dikkate alınması gereken bir kural olan, enjeksiyon basıncından doğan bileşke kuvvetin konumu, daima ana yolluğun eksenine olmasına dikkat edilmemesinden kaynaklanmaktadır. Ayrıca iticiler, plakalar veya parçalı yapılan boşlukların çok iyi alıştırılmamasından dolayı, ürün üzerinden eteklenme izleri kalmaktadır[12].



Resim 7.2 Eteklenmiş parça

Fiziksel nedeni:

1. Kalıbın hatalı olması.
2. Ayırma çizgisinin veya birbiri ile kavuşan yüzeylerin iyi alıştırılmaması.
3. Malzemenin aşırı sıcak olması.
4. Basıncın çok yüksek olması.
5. Aşırı besleme.
6. Düzensiz besleme.
7. Hatalı çevrim zamanı.
8. Yetersiz. Kapama kuvveti

Hatayı Çözümleme:

- Kalıbın dizaynını kontrol et.
- Enjeksiyon ayarlarını en uygun hale getir.
- Kalıbın öpüşen yüzeyleri kontrol et düzelt.
- Malzeme sıcaklığını düşür.

7.2.9 Kanal izi

Plastik parçanın fiziksel ve mekanik özelliklerini önemli ölçüde etkileyen ve parça kalitesini şekillendiren girişin yeri ve tipinin uygun olmaması, bazı önemli problemlerle birlikte kanal izlerinin oluşmasına yol açmaktadır. Girişin konumu en kalın kesitte olmalıdır.,Ürün üzerinde oluşan kanal izlerinin bir diğer kaynağı, giriş bölgesinde plastiğin katılaşmasından dolayı ütüleme basıncının çok düşük olmasıdır [12].

Fiziksel sebebi:

1. Kalın kesitler, çıkıntılar ve kemerler ile yetersiz besleme ve enjeksiyon basıncının çok düşük olmasından dolayı büzölmeye yol açan kalıp içindeki yetersiz erimiş plastik akışı.
2. Piston ilerletme zamanının çok kısa olması.
3. Dengelenmemiş girişler.
4. Enjeksiyon hızının düşük olması.

5. Plastiğin aşırı sıcak olması.
6. Sürülen parçaların aşırı sıcak olması.
7. Kalıp açılma zamanında değişme.

Hatanın Çözümlemesi:

- Girişleri dengele.
- Hammaddenin sıcaklığını düşür.
- Enjeksiyon hızını arttır.
- Yollukları genişlet[10].

7.2.10 Yolluğa yakın soluk noktalar

Yolluğu çevresinde oluşan bir halkadır ki sıkça çok ufak soluk renk halkası olarak görülür. Enjeksiyon esnasında yüksek enjeksiyon hızı, ufak yolluk geçidi nedeniyle bu yolluk girişinin arkasında moleküller akma yönünde yönelir. Kapının arkasında bu moleküllerin eski haline gelmesi için yeterli zamana sahip değildir. Bundan dolayı yönelmiş halde soğurlar. Bu plastik tabaka minimum oranda çekilip uzatılabilir ve yüksek yüzeysel kuvvet altında çatlar. Plastik akıntının içindeki sıcak plastik kalıp duvarına doğru akar ve çok ufak yarıklar, çentikler oluşturur. Bu bölgedeki parlak olmayan görünüş, bu bölgenin ışığı çok geniş bir şekilde yansıtmasından dolayıdır (10).

Fiziksel nedeni: Küçük yolluk geçidi ve yüksek enjeksiyon hızı.

Hatanın Çözümü:

- Enjeksiyon hızı düşürme imkanı varsa; enjeksiyon hızını azalt ve enjeksiyon profili kullan.
- Yolluk geçidinde değişiklik yapılırsa; kapıdan kalıp boşluğuna geçişi yuvarla, kapı çapını arttır, kapının yerini değiştir.

7.3 Hammaddeden Kaynaklanan Hatalar ve Çözümleri

7.3.1 Nem izi

Kutu şeklinde baskıların yüzeyinde nem izi oluşur ve bu plastiğin akma yönündedir. Gümüş renkli izin çevresi çoğunlukla kaba ve deliktir. Nem izi kalıp yüzeyindeki nemden dolayı oluşur, parlak olmayan tabakalar halinde ve büyük olarak oluşur [10].

Plastik malzemeler depolanma ve işleme esnasında havadan nem çekerler. Bu durum erimiş plastik içinde su buharı oluşturur. Akan plastiğin önündeki akma profili şekli nedeniyle gaz kabarcıkları erimiş plastiğin yüzeyine doğru itilir. Hava kabarcıkları İçerdeki basıncın etkisiyle patlar, akan plastiğin ön kısmıyla deformasyon olur ve kalıbın duvarlarında soğuyup donarlar [10].

Fiziksel sebebi:

1. Kalıp sıcaklık sisteminin kaçak yapması yani doğru kalıp sıcaklık kontrolünün olmaması.
2. Kalıpta bulunduğu ortam arasında sıcaklık farkı olmamasıdır.
3. Malzemenin yeterli kurutulmaması.
4. Plastiğin doğru depolanmaması.

Hatanın Çözümlemesi:

Kalıp yüzeyinde nem varsa;

- Kalıp soğutmada kaçak olup olmadığını kontrol et.
- Kalıp sıcaklığını arttır.
- Kurutma sistemini kullan.

Kalıp yüzeyinde nem yoksa;

- Plastiği yeterince kurut.
- Plastik torbalarını kontrol et.
- Plastiğin depolanmasını kontrol et.

- Malzemenin besleme hunisinde bekleme süresini azalt.
- Havalandırmalı ocak kullan.

7.3.2 Cam fiber izi

Cam fiber takviyeli malzeme kullanıldığında mat, kaba yüzey oluşur. Baskı yüzeyinde iz olarak metalik yansıyan cam fiberler görülür [10].

Fiziksel Nedeni: Cam fiberler yapılarından dolayı enjeksiyon esnasında akma yönünde uzunlamasına yönlendirilir. Erimiş plastik kalıbın duvarlarına dokunur dokunmaz soğuyup donarlar. Cam fiberleri erimiş plastikte yeterince çevrelenemezler. Buna ilave olarak baskı yüzeyi, cam fiber ve plastiğin farklı çekme oranından dolayı kaba bir görünüş alır [10].

Hatayı Çözümleme:

1. Hatanın belirtileri;

- Enjeksiyon hızını arttır.
- Kalıp sıcaklığını arttır.
- Erime sıcaklığını arttır.
- Ütöleme basınç zamanını en uygun hale getir.
- Ütöleme basıncını arttır.

2. Katkı malzemesinde değişiklik edilebilirse;

- Daha kısa cam fiber kullan.
- Cam parçacığı kullan [10].

7.3.3 Kaynak izi

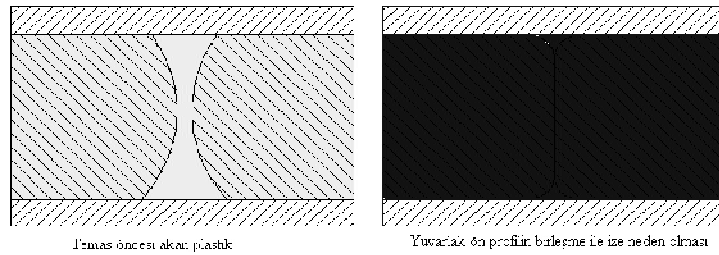
İki veya daha fazla akış hattının birleştiği ve kaynaştığı yerlerde oluşan çizgilere denir. Kalıpta birden fazla ürün besleme ağzı, delik çıkaran pimler ya da maçalar vb. erkek parçalar var ise kaynak izi olacaktır. Önem verilmez ve etkilerinin azaltılmasına çalışılmazsa büyük sorunlar çıkarabilir. Birleşme izi, görüntünün önemli olduğu bir üründe göze en çarpan yerde derin ve uzun bir çizgi halinde

belirebilir, yada daha kötüsü en ufak bir yükte çatlayabilen çok zayıf bir kesit oluşturabilir [1].

Plastikteki kaynak izi genelde optik ve mekanik zayıflığın göstergesidir. İz veya renk değişimi şeklinde görülür. İzler özellikle koyu veya düz yüzeyle çok parlatılmış saydam parçalarda belirgindir. Renk değişimi metal etkisi yapan pigmentle boyalı parçalarda görülür [10].

Fiziksel nedeni: Kaynak iki veya daha fazla yönden gelen plastiğin ön kısımlarının birleşmesiyle oluşur. Erimiş plastik malzemenin yuvarlak şeklindeki akış uçları karşılaştıkları vakit bu yuvarlaklık düzleşir ve birbirine yapışır. Bu işlem yüksek vizkoziteli akan plastiğin ön kısmının çekilmesini gerektirir. Eğer sıcaklık ve basınç yeterince yüksek değilse akan plastiğin ön kısmının köşeleri tamamen birleşmez ve bu da çizgi izinin oluşmasına neden olur. Buna ilaveten akan plastiklerin ön kısmı homojen olarak erimez. Bu da malzemedeki zayıf noktalar oluşmasına neden olur. Eğer enjeksiyonda kullanılan hammaddenin içinde katkı maddesi varsa bu katkı maddelerinin kaynak izine yakın yönlenebilmesi ihtimal dahilindedir. Bu aynı zamanda kaynak izine yakın yerde renk değişimine sebep olur [10].

Enjeksiyon ile kalıplanmış plastik parçaların üretim kalitesini malzemelerin kimyasal birleşimi, parça ve kalıp tasarımı ve üretimde kullanılan enjeksiyon şartları tayin edilmektedir. Enjeksiyonla kalıplanmış parçalar için, kenetlenme çizgisi de denilen kaynak, daima bir kalite problemi oluşturmuştur. Kaynak çizgileri, enjeksiyon işlemi sırasında ergiyik plastiğin ayrılması ve kalıp boşluğu içinde tekrar birleşmesi anında oluşmaktadır. İç geometrisi karmaşık ve maçalı olan parçalarda, değişken et kalınlığı olan parçalarda veya çok girişe sahip parçalarda bu olay kaçınılmaz olmaktadır [4].



Şekil 7.14 Kaynak izlerinin oluşumu [17].

Hatayı Çözümleme:

Kaynak izine yakın renk değişikliği varsa;

- Daha ufak pigment kullan.
- Yuvarlak pigment kullan.
- Daha hafif malzeme kullan.

Programda uygulanabilirse;

- C-mold veya mold flow programlarıyla kontrol yap.

Programda uygulanamazsa;

- Kalıp sıcaklığını arttır.
- Enjeksiyon hızını arttır.
- Erime sıcaklığını arttır.
- Ütüleme basıncını arttır.
- Kalıp havalandırmasını kontrol et.
- Daha kaba yüzeyli kalıp kullan.
- Yolluk geçidin yerini değiştir [10].

7.3.4 Koyu noktalar

Baskı yüzeyi oluşan koyu veya siyah noktalar ocak eskimesi, termal yanma veya kirden dolayıdır.

Fiziksel Nedeni:

1. Erime sıcaklığı çok yüksek.
2. Ocakta kalma süresi çok uzun.
3. Kirli yolluk geçidi.
4. Kirli ocak veya eskimiş ocak ve vida.
5. Granülün temiz olmaması.

Hatayı Çözümleme:

- Granül temizliğini kontrol et.
- Ocağı iyi temizle.
- Erime sıcaklığını azalt.
- Ocak sıcaklığını azalt.
- Vida hızını azalt.
- Arka basıncı düşür.

Erime sıcaklığı erime sınırını aşmıyorsa;

- Baskı süresini azalt.
- Erime süresini arttır.
- Ocağın boyutlarını kontrol et.

Kritik sürede değilse;

- Sıcak yolluk derecesini kontrol et.
- Çapak oranını azalt.
- Boyanın uyumluluğunu kontrol et [10].

7.3.5 Yüzeyin bozuk olması

Görünüşte sık görülen hatalar çizgilenmeler, noktalar, yüzeyde nem nedeniyle çizgi oluşumu, katlanmalar vb. temel olarak listedeki sebeplerden bir tanesi görünüş bozukluğuna sebep olur [10].

Hatanın Nedeni:

1. Erimiş plastikte gaz veya havanın bulunması.
2. Yetersiz havalandırma.
3. Enjeksiyon basıncına etki eden faktörler.
4. Ocak ve meme çıkışı arasında malzeme takılması.
5. Malzemenin kirlenmesi ve diğer sebepler.

Hatayı Çözümleme:

- Plastik erime sıcaklığının üst limitinde ise daha fazla gaz çıkarılır.
- Meme sıcaklığı meme arkasındaki birinci bölge sıcaklığını geçmemelidir.

- Besleme hunisinin boğaz kısmındaki soğutma kullanılan malzemenin kurutma sıcaklığının soğutma yapacak şekilde ayarlanmalıdır.
- Enjeksiyon basıncını arttırmak gazın atılmasını sağlar.
- Malzeme sıcaklığını arttırır.

8. SONUÇ VE ÖNERİLER

Plastik endüstrisi günümüzde hızla gelişmektedir ve plastik ürünler dünyamızda artık çok önemli bir yer tutmaktadır. Teknoloji ilerledikçe üretilen parçaların kalitesini artırmak için üretim aşamasındaki tüm fiziksel ve mekanik işlemler daha bilinçli bir gelişim göstermeye başlamıştır. Termoplastik esaslı ürünler genel olarak plastik enjeksiyon kalıplama yöntemi ile üretilir ve üretim aşamasına bir çok parametre etki eder. Bu parametreler oluşturulan ürünlerin fiziksel özelliklerine doğrudan doğruya etki etmektedir.

Enjeksiyon aşamasında, granül halindeki plastik malzeme enjeksiyon ünitesi üzerindeki hazneye dökülür. Oradan rezistanslı ısıtıcılar ile ısıtılan silindir içine, elektrik motoru ile kumanda edilen bir vida vasıtası ile alınır. Vida sıkıştırma işlemi yaparak sıcaklık ve basınç altında eriyik hale gelen plastik malzemeyi silindirin sonuna kadar ilerletir. Vidanın önüne kalıbı doldurmak için yeterince malzeme alındığında enjeksiyon işlemi başlar. Erimiş plastik, makinenin ucundaki bir meme vasıtası ile kalıbın içine gönderilir. Kalıp boşluğunun doldurulması sonrasında, malzemede soğuma nedeniyle çekmeler meydana gelir. Çekme sonucunda meydana gelen hacim kaybı ekstra malzeme enjekte edilerek tamamlanır. Kalıplama esnasındaki bu işlemler malzemelerin yapısı, ısı özellikleri ve akışkan özellikleri dikkate alınarak uygulanır.

Bu çalışmada termoplastik ailesinin en önemli plastiklerinden olan “polipropilen” ve “polietilen” esaslı ürünler baz alınarak plastik enjeksiyonla üretimindeki işlem parametreleri ve termodinamik yöntemlerle ısı yayılımı konuları üzerinde durulmuştur. Öncelikle termoplastik, termosetlerin genel yapıları incelenerek karşılaştırmalar yapılmıştır.

Bu karşılaştırmalar sonucunda, termoplastiklerin, ısı ile kimyasal özelliklerini kaybetmeden şekil değiştirebilen ve polimerizasyon yöntemiyle üretilen plastikler olduğu gözlenmiştir. Termosetler, ısı ile kimyasal özelliklerini kaybederler, geri dönüşümleri yoktur ve polikondenzasyon yöntemi ile üretilirler.

“Polietilen” ve “polipropilen” termoplastik ailesinin üyesi olduğu için ilk kısımdan sonra bu konu üzerine yoğunlaşmıştır. Konu içinde amorf ve yarı kristal termoplastik özellikleri ve kullanım alanları incelenerek karşılaştırmalar yapılmıştır. Amorf termoplastiklerde; polimer zincirleri yapısal bir düzen göstermez. Moleküller arasında kendi kendini tekrar eden, düzenli boşluklar ve mesafeler yoktur. Amorf polimerler yeterince düşük sıcaklıklarda sert ve kırılmandır. Isıtıldıklarında camsı geçiş sıcaklığı (Tg) denilen bir sıcaklıkta yumuşar ve kauçuk gibi özellikler gösterirler.

Yarı kristal termoplastiklerin; örgüsünde amorf ve kristal yapılar bir arada bulunur. Bu polimerler camsı geçiş sıcaklıkları altında kırılmandır. Camsı geçiş sıcaklığı üzerine çıktıklarında belli derecede yumuşaklık kazanmakla birlikte polimer örgüsü sıkıca bir arada durur. Bu malzemeler, soğutuldukları zaman moleküler yapıları yüksek oranda düzenlidir ve kristal yapıdadır.

Üçüncü bölümde; ilk olarak polimerizasyon süreci ve polimerizasyon çeşitleri araştırılmıştır. Katılma polimerizasyonu ile polietilen ve polipropilen oluşumları incelenmiştir. Daha sonra Alçak yoğunluklu polietilen, yüksek yoğunluklu polietilen, lineer alçak yoğunluklu polietilen ve polipropilenlerin atomik yapıları, teknik özellikleri ve kullanım alanları incelenerek karşılaştırmalar yapılmıştır.

Alçak yoğunluklu polietilen; 0,91-0,93 g/cm³ yoğunluk aralığında tanımlanır. Tümüyle esnek yarısaydam ya da opak varyasyonlarla oluşur ve hemen hemen hiç kırılmayacak kadar güçlüdür. Yüksek yoğunluklu polietilenden daha çok dallanma vardır, bundan dolayı moleküller arası bağları zayıftır. Gerilme dayanımı düşük, esnekliği yüksektir.

Yüksek yoğunluklu polietilen; 0,94 – 0,97 g/cm³ yoğunluk aralığında tanımlanır. Kopmaya, kırılmaya ve parçalanmaya karşı direncini kaybettiği gibi bunların kalıplanması için yüksek sıcaklığa ve basınca ihtiyaç vardır. Işık ve açık hava koşullarına alçak yoğunluklu polietilen kadar dayanıklı değildir.

Lineer Alçak Yoğunluklu Polietilende; gerilme dayanımı ve uzama alçak yoğunluklu polietilene nazaran daha yüksek, darbe dayanımı daha iyidir. Isı direnci alçak

yoğunluklu polietilenden 15°C' daha yüksek, işlenmesi daha zordur. Buna karşılık berraklık, parlaklık daha kötü olup, erime gücü daha düşüktür.

Polipropilen; düşük özgül ağırlıklı olefin sınıfı bir plastiktir. İyi kimyasal ve elektriksel özelliklere sahip ve katıdır. 0 °C'nin altında kullanımı, mekanik özellikleri zayıfladığı için tercih edilmez. Yorulmaya karşı çok iyi direnç gösterir. Düşük maliyetlidir, iyi bir darbe dayanımı vardır. Polietilenlerden çok daha yüksek mukavemete sahiptir. Bu sebeple özellikle güç ve ağırlığa maruz kalan yerlerde sık kullanılırlar.

Dördüncü bölümde; plastik enjeksiyonla kalıplama süreci incelenmiştir. Plastik enjeksiyon yöntemiyle yalnızca ısıtıldıklarında ve soğutulduklarında kimyasal özelliklerini kaybetmeyen termoplastikler kalıplanabilirler. Enjeksiyon sürecinde malzemenin kalıp boşluğuna enjekte edilmesi (dolum), ütüleme safhası, soğutma ve kalıptan çıkarılma safhaları hakkında incelemeler yapılmıştır. Bu incelemeler sonucunda şunlar gözlenmiştir;

Dolum safhasında; plastik malzemenin sıcaklığı, basınç altında akabileceği bir noktaya kadar yükseltilir. Bu işlemde, enjeksiyon kalıplama presinin silindiri içinde pistonlu vida ile katı granüller her noktada aynı sıcaklık ve viskozite değerine sahip eriyik haline gelene kadar ısıtılır ve karıştırılır. Bu safhada son olarak, ergitilmiş malzeme, basınç altında, şeklini alması istenen kalıp boşluğuna enjekte edilir.

Ütüleme safhasında; kalıba dolan malzemenin soğumasıyla oluşan çekme sonucunda meydana gelen hacim kaybı ekstra malzeme enjekte edilerek tamamlanır.

Soğutma ve kalıptan çıkartma safhasında; ütüleme sonrasında, ürün kalıptan çıkma sıcaklığına kadar soğutulur. Soğutma süresi kalıplama süresinin %70 i kadardır. Sonra kalıp açılır, sıcaklık ve basınç altında kalıp boşluğu şeklini almış olan parça kalıptan dışarı alınır.

“Fourier Metodu” referans alınarak yapılan hesaplamalar sonucunda; çubukta, sonsuz silindirde, homojen kürede ve dikdörtgen levhada ısı yayılımları aşağıdaki matematiksel denklem neticelerini vermiştir;

Uçlarındaki değişken sıcaklığı verilen bir çubukta:

$$u(x,t) = u_1 + (u_2 - u_1) \frac{x}{l} + \frac{2}{\pi} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{(-1)^n u_2 - u_1}{n} e^{-\left(\frac{n\pi a}{l}\right)^2 t} \cdot \sin \frac{n\pi x}{l} +$$

$$\frac{2}{l} \sum_{n=1}^{\infty} e^{-\left(\frac{n\pi a}{l}\right)^2 t} \sin \frac{n\pi x}{l} \int_0^l \varphi(x) \cdot \sin \frac{n\pi x}{l} dx$$

Uçları ile bulunduğu çevre arasında ısı alışverişi olan çubukta:

$$u(x,t) = \frac{2}{l} \sum_{n=1}^{\infty} e^{-\left(\frac{\mu_n a}{l}\right)^2 t} \frac{\mu_n \cos \frac{\mu_n x}{l} + p \sin \frac{\mu_n x}{l}}{p(p+2) + \mu_n^2} \int_0^l \varphi(x) \left(\mu_n \cos \frac{\mu_n x}{l} + \frac{p}{\mu_n} \sin \frac{\mu_n(x)}{l} \right) dx$$

Sonsuz silindirde:

$$u_n(r,t) = \frac{2}{R^2} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{I_0\left(\frac{\mu_n r}{R}\right)}{I_1^2(\mu_n)} e^{-\left(\frac{a\mu_n}{R}\right)^2 t} \int_0^R \rho \varphi(\rho) I_0\left(\frac{\mu_n \rho}{R}\right) d\rho$$

Homojen kürede:

$$u(r,t) = \frac{2}{Rr} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{p^2 + \mu_n^2}{p(p+1) + \mu_n^2} e^{-\left(\frac{\mu_n a}{R}\right)^2 t} \sin \frac{\mu_n r}{R} \int_0^R \rho \varphi(\rho) \sin \frac{\mu_n \rho}{R} d\rho$$

Dikdörtgen levhada da aşağıdaki biçimde ifade edilmiştir:

$$A_{mn} = \frac{4}{pq} \int_0^p \int_0^q \varphi(x,y) \cdot \sin \frac{m\pi x}{p} \cdot \sin \frac{n\pi y}{q} dx dy$$

Bununla birlikte termoplastiklerin ısı karşısındaki davranışları, camsı geçiş sıcaklıkları, maksimum kullanım sıcaklıkları, ısıl bozunma sıcaklıkları, ısıl iletkenlikleri ve ısı kapasiteleri hakkında araştırmalar yapılarak tablo ve çizelgelerle birlikte teknik değerler verilmiştir. Son bölümde ise plastik enjeksiyonlama esnasında ürüne etki eden; malzemenen, enjeksiyon makinesinden ve kalıptan kaynaklanan hatalar araştırılmıştır. Bu araştırmalar sonucunda, malzemenen kaynaklanan hataların, nem izi, cam fiber izi, kaynak izi, koyu noktalar ve yüzeyin bozuk olması olduğu tespit edilmiştir.

Enjeksiyon makinesinden kaynaklanan hatalar; yanma izi, renk izi, hava izi, oluklu çizgi, gerilim çatlamaşı, tamamen dolmamış baskı, parça yüzeyinin kabuklanmaşı, hava kabarcıkları, baskının kalıbın içinde kalmaşı, parça ölçülerinde değişim, farklı ağırlıkta baskı, memeden sonraki yolluğun yapışmaşı, plastiğin yılan gibi fışkırtarak kalıba dolmaşıdır.

Kalıptan kaynaklanan hatalar; baskıdaki çökme, farklı parlaklıklar, yanma etkisi, çapaklı parça, itici izleri, baskının kalıptan çıkarken uğradığı deformasyon, çarpılma, eteklenme, kanal izi ve yolluğa yakın soluk noktalaradır.

Bu çalışmanın daha fazla geliştirilebilmesi için;

Çeşitli şekillerdeki Polietilen ve polipropilenlere, belli ortam sıcaklıklarında çekme ve basma kuvvetleri uygulanarak malzeme üzerindeki ısı yayılımları deneysel olarak incelenebilir. Bu deneysel inceleme sonuçları bu çalışmadaki matematiksel denklemlerle karşılaştırılabilir.

Üretim aşamasında polietilen ve polipropilenleri pirinç halde bulunduğu hazneye belli oranlarda katkı malzemeleri katılarak kalıplanan ürün üzerindeki etkileri incelenebilir.

Plastik enjeksiyon makinesinde hazneden gelen malzemeyi kalıba enjekte eden rezistanslı ısıtıcıların bulunduğu silindirin etkileri farklı fiziksel özelliklerdeki silindirlerle karşılaştırılabilir.

9. KAYNAKLAR

1. Karababa, İ. 1989. Plastik İşleme Teknikleri ve Kalite Kontrol. Kimya Mühendisleri Odası.
2. Baysal, B. 1994. Polimer Kimyası Cilt I. ODTÜ Basım İşliği, Ankara.
3. Malloy, R. A. 1994. Plastic Part Design for Injection Molding. Hanser Publishers, 14-108
4. Rees, H. 1995. Mold Engineering. Hanser Publisers, 3-26
5. Aliyev, G.G. 1995. Kısmi Türevli Diferansiyel Denklemler. MEB Yayınları, Yayın No: 2962, Ankara.
6. Miles, D.C., Briston, J. H. 1996. Polymer Technology. Chemical Publishing Co. Inc., New York.
7. Savaşçı, Ö.T., Uyanık, N., Akovalı, G. 1998. Plastikler ve Plastik Teknolojisi. Çantay Kitabevi, 1-25; 199-203
8. Osswald, T. A. 1998. Polymer Processing. Hanser Publishers, 117-139
9. Rosato, D.V., Rosato D. V. 1999. Injection Molding Handbook. Kluwer Academic Publishers.
10. Turaçlı, H.R. 1999. Enjeksiyon Hataları ve Çözümleri. Pagev Yayınları, İstanbul.
11. Savran, H. Ö. 2001. Elastomer Teknolojisi – 1. Acar Matbaacılık, İstanbul.
12. Karaağaç, R. 2001. Plastik Parçalarda Oluşan Hatalar. Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Entitüsü, Ankara.
13. Akyüz, Ö. F. 2001. Plastikler ve Plastik Enjeksiyon Teknolojisine Giriş. Pagev Yayınları , İstanbul.
14. Saçak, M. 2002. Polimer Kimyası. Fersa Matbaacılık, Ankara.
15. Turaçlı, H.R. 2002. Termoplastik Malzemelerin Enjeksiyonu Esnasında Oluşan Hatalar ve Çözümleri-3. Plastik Dergisi, sayı 64; 146-155
16. Nirkhe, C. 2003. Comparison of Approaches for Optimizing Molding Parameters. Yüksek Lisans Tezi, Massachusetts Lowell Üniversitesi, 33-37
17. Karataş, Ç., Erel, C.G. 2003. Termoplastik Malzemelerin Kalıplanması Esnasında Üründe Oluşan Hatalar ve Giderilme Yöntemleri , Plastik Dergisi , sayı 66; 84-89

18. Goodship, V. 2004. Arburg Practical Guide to Injection Moulding. Smithers Rapra, 1-65
19. Goodship, V. 2004. Troubleshooting Injection Moulding. Smithers Rapra, 40-44
20. Saçak, M. 2005. Polimer Teknolojisi. Gazi Kitabevi, Ankara.
21. Güneş, A. T. 2005. Plastik Enjeksiyon Kalıpları. TMMOB, 1-61
22. Demir, S. ve Ratiu, A. 2005. Parabol, Elips ve Hiperbol. Matematik Dünyası Dergisi, 2005 Yaz; 23-28.
23. Saçak, M. 2005. Polimer Teknolojisi. Gazi Kitapevi, Ankara
24. Harper, C. A. 2006. Handbook of Plastics Technologies. McGraw-Hill Professional, 26-53
25. Hazer, B. 2006. Polimer Teknolojisi. KTÜ Fen-Edebiyat Fakültesi, Trabzon.
26. Cowie, J.M.G. 2007. Polymers: Chemistry & Physics of Modern Materials. 2nd Edition CRC Pres, Newyork.
27. Saçak, M. 2010. Polimer Kimyası. Gazi Kitabevi, Ankara.
28. www.kimyaturk.net, Polietilen, Erişim Tarihi: 25.09.2011.
29. www.polimernedir.com, Polipropilen, Erişim Tarihi: 28.09.2011.
30. www.teknolojishow.com, Termoplastik Teknolojisi: 29.09.2011

§10. ÖZGEÇMİŞ

Adı Soyadı : İlker CENGİZ

Doğum Yeri : ANKARA

Doğum Tarihi : 20.11.1981

Medeni Hali : Bekar

Yabancı Dili : İngilizce

Eğitim Durumu (Kurum ve Yıl)

Lise : Balgat Endüstri Meslek Lisesi (Kalıpcılık) / (1995-1999)

Lisans : Gazi Üniversitesi Teknik Eğitim Fakültesi Makine Eğitimi
Bölümü/(2001-2007)