T.C.
İSTANBUL ÜNİVERSİTESİ-CERRAHPAŞA
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

ISIL İŞLEMLERİN POLİMERİK MALZEMELERİN İŞLENEBİLİRLİĞİ ÜZERİNDEKİ ETKİSİNİN İNCELENMESİ

Muhammet Faruk TOPRAK

DANIŞMAN
Prof. Dr. M. Hüsnü DİRİKOLU

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Makine Mühendisliği Programı

Ağustos, 2023

TEZ KABUL VE ONAYI

Muhammet Faruk TOPRAK tarafından, **Prof. Dr. M. Hüsnü DİRİKOLU** danışmanlığında hazırlanan **"ISIL İŞLEMLERİN POLİMERİK MALZEMELERİN İŞLENEBİLİRLİĞİ ÜZERİNDEKİ ETKİSİNİN İNCELENMESİ"** başlıklı bu çalışma, jürimiz tarafından **03/08/2023** tarihinde yapılan sınav sonucunda **oy birliği** ile başarılı bulunarak **Yüksek Lisans Tezi** olarak kabul edilmiştir.

Tez Jürisi

		İmza	**Sonuç**
DANIŞMAN	Prof. Dr. M. Hüsnü DİRİKOLU İstanbul Üniversitesi-Cerrahpaşa Makine Mühendisliği Anabilim Dalı		☒ Kabul ☐ Ret
ÜYE	Doç. Dr. Nuray BEKÖZ ÜLLEN İstanbul Üniversitesi-Cerrahpaşa Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı		☒ Kabul ☐ Ret
ÜYE	Dr. Öğr. Üyesi Şakir ALTINSOY İstanbul Yeni Yüzyıl Üniversitesi Biyomedikal Mühendisliği Anabilim Dalı		☒ Kabul ☐ Ret

BEYAN

Bu tez çalışmasının kendi çalışmam olduğunu, tezin planlanmasından yazımına kadar bütün aşamalarda etik dışı davranışımın olmadığını, bu tezdeki bütün bilgileri akademik ve bilimsel etik kuralları içinde elde ettiğimi, bu tez çalışmasıyla elde edilmeyen bütün bilgi ve yorumlara kaynak gösterdiğimi ve bu kaynakları da kaynaklar listesine aldığımı, yine bu tezin çalışılması ve yazımı sırasında patent ve telif haklarını ihlal edici bir davranışımın olmadığını ve her türlü hukuki sorumluluğu aldığımı kabul ederim.

Muhammet Faruk TOPRAK

BÜTÇE DESTEKLERİ

ISIL İŞLEMLERİN POLİMERİK MALZEMELERİN İŞLENEBİLİRLİĞİ ÜZERİNDEKİ ETKİSİNİN İNCELENMESİ

Bu tez çalışması için herhangi bir kurumdan bütçe desteği alınmamıştır.

TEŞEKKÜR

Yüksek lisans tez çalışmamda konu seçiminden araştırmanın yürütülmesine dek bana yön gösteren, destek ve emeklerini esirgemeyen, beni yüreklendiren, öğrencisi olmaktan her zaman gurur duyacağım tez danışmanım Prof. Dr. M. Hüsnü DİRİKOLU hocama teşekkürlerimi sunarım.

Ağustos 2023 Muhammet Faruk TOPRAK

İÇİNDEKİLER

Sayfa No

TEZ KABUL VE ONAYI ..... **ii**
BEYAN ..... **iii**
BÜTÇE DESTEKLERİ ..... **iv**
TEŞEKKÜR ..... **v**
İÇİNDEKİLER ..... **vi**
ŞEKİL LİSTESİ ..... **viii**
TABLO LİSTESİ ..... **x**
SİMGE VE KISALTMA LİSTESİ ..... **xi**
ÖZET ..... **xii**
ABSTRACT ..... **xiii**
1. GİRİŞ **1**
1.1. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI 1
2. KAVRAMSAL ÇERÇEVE **7**
2.1. PLASTİK MÜHENDİSLİĞİ 7
2.1.1. Polimerik Malzemeler 7
2.1.2. Termoplastikler ve Termosetler 11
2.1.3. Mühendislikte Plastikler 12
2.2. POLİMERLERİN MEKANİK ÖZELLİKLERİ 14
2.2.1. Mekanik Özellikler 14
2.2.2. Gerilme, Gerinim ve Deformasyon 16
2.2.3. Çekme Özellikleri 20
2.2.4. Basma Özellikleri 24
2.2.5. Eğilme Özellikleri 25
2.2.6. Sertlik Özellikleri 26
2.2.7. Tokluk Özellikleri 29
2.3. PLASTİKLERİN ISIL İŞLEMLERİ 29
2.4. PLASTİKLERİN TALAŞLI İMALATI 33
2.4.1. Polimer Özelliklerinin İşleme Üzerindeki Etkileri 34
2.4.2. Takım Geometrisi ve İşleme Parametrelerinin Etkileri 36

3. YÖNTEM **38**
3.1. DENEYSEL NUMUNELER ve ÖZELLİKLERİ 38
3.1.1. Polietereterketon (PEEK) 39
3.1.2. Polipropilen (PP) 45
3.1.3. Tetrafloroetilen (PTFE) 48
3.2. ISIL İŞLEM DENEYLERİ 51
3.2.1. Deneylerde Kullanılan PEEK Polimerinin Tavlanması 52
3.2.2. Deneylerde Kullanılan PP Polimerinin Tavlanması 54
3.2.3. Deneylerde Kullanılan PTFE Polimerinin Tavlanması 55
3.3. İŞLENEBİLİRLİK DENEYLERİ 56
4. BULGULAR **61**
4.1. BOYUT ANALİZİ 61
4.2. SERTLİK TESTİ 63
4.3. YÜZEY PÜRÜZLÜLÜK TESTİ 64
5. TARTIŞMA **68**
6. SONUÇ VE ÖNERİLER **70**
KAYNAKLAR **71**
İNTİHAL RAPORU İLK SAYFASI **76**
ETİK KURUL İZİN YAZISI **77**
KURUM İZNİ YAZILARI **78**
ÖZGEÇMİŞ **79**

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa No

Şekil 1.1: Kesme hızına bağlı olarak LDPE ve HDPE'nin kayma gerilmesi değerleri 2
Şekil 2.1: Polimerizasyon süreci ve polietilen oluşumu 8
Şekil 2.2: Polimer zincirlerin biçimleri 9
Şekil 2.3: Termoplastiklerin yapısı 10
Şekil 2.4: Termosetlerin yapısı 10
Şekil 2.5: Elastomerlerin yapısı 11
Şekil 2.6: Termoplastik ve termoset polimerik yapının şematik gösterimi 12
Şekil 2.7: Temel test konfigürasyonlarının şematik gösterimi: a) çekme b) basma c) eğilme 16
Şekil 2.8: Çekme kuvvetine maruz kalan dikdörtgen numune 17
Şekil 2.9: Normal ve kayma gerilmeleri 18
Şekil 2.10: Kesme kuvvetinin etki ettiği malzemede açısal şekil değişimi 19
Şekil 2.11: Orijinal boydaki uzunluk değişimi – gerinim 19
Şekil 2.12: Tipik çekme testi ekipmanı 20
Şekil 2.13: Çekme kuvveti 21
Şekil 2.14: Kırılma anında boydaki değişim 22
Şekil 2.15: Yarı kristal bir malzemenin gerilim – gerinim eğrisi 23
Şekil 2.16: Basma deneyi 25
Şekil 2.17: Eğilme testi türleri a) iki noktalı eğme b) üç noktalı eğme 26
Şekil 2.18: Shore A – Shore D ölçüm cihazı 27
Şekil 2.19: Shore D sertliği ile elastisite modülü arasındaki ilişki 28
Şekil 2.20: Gerilim – Gerinim eğrisinin altında kalan alan = tokluk 29
Şekil 2.21: Endüstriyel tavlama fırını 30
Şekil 2.22: Amorf ve yarı kristal yapı 31
Şekil 2.23: Polimerik malzemelerin yapılarının sıcaklığa bağlı olarak grafiksel durumu 32
Şekil 2.24: Malzeme kaldırma işlemlerinin sınıflandırılması 33
Şekil 2.25: Plastik işleme uygulamaları 34
Şekil 2.26: Sıcaklığın bir fonksiyonu olarak hacim modülü 35
Şekil 2.27: Polimerlerin mekanik özelliklerini karakterize eden gerilim – gerinim eğrileri ... 35
Şekil 2.28: Endüstriyel uygulamalarda kullanılmak üzere işlenmiş PEEK malzemeler 36
Şekil 2.29: Talaş kaldırma işlemi 36

Şekil 2.30: Çalışmada kullanılan CNC tornalama işleminin kurulum görünümü 37
Şekil 3.1: Deneylerde kullanılan malzemeler 39
Şekil 3.2: Polimer malzemelerin sıcaklık, kimyasal ve mekanik kararlılıklarına göre sınıflandırılması 40
Şekil 3.3: PEEK' in kullanım alanları 42
Şekil 3.4: PEEK malzemeden üretilen hedefleme kolu 43
Şekil 3.5: PEEK malzemenin dişçilik alanında kullanımı 43
Şekil 3.6: PEEK malzemenin kranioplasti uygulamalarında kullanımı 44
Şekil 3.7: Tornalama işlemi ile üretilmiş radyal bilyalı rulman 45
Şekil 3.8: Propilenin katalitik polimerizasyonu 45
Şekil 3.9: PP malzemeden üretilmiş otomotiv parçası 47
Şekil 3.10: HVAC uygulamalarında kullanılan polipropilen boru 47
Şekil 3.11: PTFE'nin moleküler yapısı 48
Şekil 3.12: PTFE uygulama alanları 50
Şekil 3.13: Kuru hava sterilazatörü 51
Şekil 3.14: PEEK malzemenin ısıl işlemi 53
Şekil 3.15: PEEK ısıl işlem süresi ve sıcaklık tablosu 53
Şekil 3.16: PP ısıl işlem süresi ve sıcaklık tablosu 54
Şekil 3.17: PTFE ısıl işlem süresi ve sıcaklık tablosu 55
Şekil 3.18: PEEK polimerinin teknik resmi 56
Şekil 3.19: PTFE polimerinin teknik resmi 56
Şekil 3.20: PP polimerinin teknik resmi 57
Şekil 3.21: Deneylerde kullanılan CNC 5-Eksenli freze tezgâhı 58
Şekil 3.22: PEEK polimerlerinde kullanılan iş parçası modelleri 58
Şekil 3.23: PTFE polimerlerinde kullanılan iş parçası modelleri 59
Şekil 3.24: PP polimerlerinde kullanılan iş parçası modelleri 59
Şekil 3.25: Deneylerde kullanılan kesici takımlar ve tutucular 60
Şekil 3.26: Deneyler esnasında çekilmiş görüntüler 60
Şekil 4.1: Boyutsal ölçümler 61
Şekil 4.2: Sertlik ölçüm testleri 63
Şekil 4.3: Yüzey pürüzlülük ölçümleri 64

TABLO LİSTESİ

Sayfa No

Tablo 2.1: Polimerlerin sınıflandırılmasının şematik gösterimi 8
Tablo 2.2: Polimerlerin ve metallerin önemli özellikleri 13
Tablo 2.3: Standart mekanik testler 15
Tablo 2.4: Shore testi için test prosedürleri 28
Tablo 3.1: Deneylerde kullanılan stok malzeme ölçüleri 38
Tablo 3.2: PEEK malzemenin ısı direnci ve ısı kararlılığı 41
Tablo 3.3: PEEK polimerinin mekanik özellikleri 41
Tablo 3.4: PP'nin temel özellikleri ve test metotları 46
Tablo 3.5: PTFE malzemenin genel özellikleri 49
Tablo 3.6: Elektro-mag M6040 P kuru hava sterilazatörünün teknik özellikleri 52
Tablo 3.7: CNC 5-Eksenli freze tezgahının teknik özellikleri 57
Tablo 4.1: PEEK boyutsal analiz sonuçları 62
Tablo 4.2: PTFE boyutsal analiz sonuçları 62
Tablo 4.3: PP boyutsal analiz sonuçları 62
Tablo 4.4: Shore D sertlik testi sonuçları 63
Tablo 4.5: PEEK numunelerinin yüzey pürüzlülük testi sonuçları 65
Tablo 4.6: PTFE numunelerinin yüzey pürüzlülük testi sonuçları 66
Tablo 4.7: PP numunelerinin yüzey pürüzlülük testi sonuçları 67

SİMGE VE KISALTMA LİSTESİ

Simgeler	Açıklama
N	: Newton
σ	: Gerilme
γ	: Kesme Gerinimi
ε	: Gerinim
E	: Elastisite Modülü
H	: Sertlik
F	: Kuvvet
A	: Girinti Yüzey Alanı
P	: Fosfor
B	: Bor
Ge	: Germanyum
Si	: Silisyum
C	: Karbon

Kısaltmalar	Açıklama
PEEK	: Polietereterketon
PTFE	: Politetrafloroetilen
PP	: Polipropilen
ASTM	: Uluslararası Amerikan Test ve Materyalleri Topluluğu
ISO	: Uluslararası Standartlar Teşkilatı
PAI	: Poliamid-imid
PAI	: Poliimid
HDPE	: Yüksek Yoğunluklu Polietilen
LDPE	: Alçak Yoğunluklu Polietilen
UHMWPE	: Ultra Yüksek Moleküler Ağırlıklı Polietilen

ÖZET

YÜKSEK LİSANS TEZİ

ISIL İŞLEMLERİN POLİMERİK MALZEMELERİN İŞLENEBİLİRLİĞİ ÜZERİNDEKİ ETKİSİNİN İNCELENMESİ

Muhammet Faruk TOPRAK

İstanbul Üniversitesi-Cerrahpaşa

Lisansüstü Eğitim Enstitüsü

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Makine Mühendisliği Programı

Danışman: Prof. Dr. M. Hüsnü DİRİKOLU

Hafiflik, esneklik, korozyona karşı direnç, işlenme kolaylığı ve diğer mühendislik malzemelerinde bulunmayan özellik kombinasyonlarını barındırdığı için plastikler, tasarımcılar ve mühendisler tarafından yaygın olarak kullanılmaya başlanmıştır. Plastiklerin medikal, optik, elektronik, hassas makineler gibi alanlarda üstün özelliklerinin vermiş olduğu avantaj neticesinde kullanımlarının artması, plastik parçaların daha hassas talaşlı imalat yöntemleriyle işlenmesi ihtiyacını doğurmuştur. Bu ihtiyaç neticesinde plastik malzemelerin mekanik özellikleri, ısıl işlemleri ve işlenebilirliği ile alakalı daha fazla araştırma yapılmalıdır. Bu tez çalışmasında plastik malzemelerin mekanik özelliklerine bağlı olarak işlenebilirliği etkileyen faktörler incelenmiştir. Ayrıca ısıl işlemin mekanik özelliklere ve işlenebilirliğe etkisi geniş bir şekilde ele alınmıştır. Bu doğrultuda polietereterketon (PEEK), tetrafloroetilen (PTFE) ve polipropilen (PP) gibi mekanik özellikleri iyi ve yaygın olarak kullanılan polimer malzemeler deney numuneleri olarak seçilmiştir. Mekanik özelliklerini iyileştirmek için söz konusu plastikler endüstriyel tavlama fırınlarında tavlanmıştır. Deney numuneleri ısıl işlem görmüş ve görmemiş olarak iki grup halinde sınıflandırılmıştır. Autodesk Fusion360 CAD/CAM programı kullanılarak belirlenen işleme parametreleriyle ve kesici takımlarla CAM programları hazırlanmış olup, iki gruptaki deney numuneleri 5 eksenli Haas UMC 750 CNC tezgahında işlenmiştir. Kesme deneyleri sonunda söz konusu polietereterketon (PEEK), tetrafloroetilen (PTFE) ve polipropilen (PP) malzemeleri boyutsal doğruluk ve yüzey pürüzlülüğü ile sertlik ve çekme deneyleri sonuçlarına bakılarak karşılaştırılmışlardır. Böylece ısıl işlemin polimerik malzemelerin işlenebilirliği üzerindeki etkileri incelenebilmiştir.

Ağustos 2023 , 92 sayfa.

Anahtar kelimeler: Isıl İşlem, Polimerik Malzemeler, İşlenebilirlik, Talaşlı İmalat, Termoplastikler, Fusion360, Yüzey Pürüzlülüğü, Sertlik

ABSTRACT

M.Sc. THESIS

INVESTIGATION OF THE EFFECTS OF HEAT TREATMENT ON THE MACHINABILITY OF POLYMERIC MATERIALS

Muhammet Faruk TOPRAK

İstanbul University-Cerrahpaşa

Institute of Graduate Studies

Department of Mechanical Engineering

Mechanical Engineering Programme

Supervisor : Prof. Dr. M. Hüsnü DİRİKOLU

Plastics have become widely used by designers and engineers due to their lightness, flexibility, corrosion resistance, ease of processing and combinations of properties not found in other engineering materials. The increasing use of plastics in areas such as medical, optical, electronics and precision machinery as a result of their superior properties has led to the need to process plastic parts with more precise machining methods. As a result of this need, more research should be done on the mechanical properties, heat treatment and machinability of plastic materials. In this thesis, the factors affecting the machinability of plastic materials depending on their mechanical properties were investigated. In addition, the effect of heat treatment on mechanical properties and machinability is discussed extensively. For this purpose, widely used polymer materials with good mechanical properties such as PEEK, PTFE and PP were selected as test specimens. These plastics were annealed in industrial annealing furnaces to improve their mechanical properties. The specimens were classified into two groups as heat treated and non-heat treated. CAM programs were prepared using Autodesk Fusion360 CAD/CAM program with the specified machining parameters and cutting tools, and the test specimens in the two groups were machined on a 5-axis Haas UMC 750 CNC machine. At the end of the cutting tests, these PEEK, PTFE and PP materials were compared with respect to dimensional accuracy and surface roughness as well as hardness and tensile test results. Thus, the effects of heat treatment on the machinability of polymeric materials could be investigated.

August 2023, 92 pages.

Keywords: Annealing, Polymeric Materials, Machinability, Machining, Thermoplastics, Fusion360, Surface Roughness, Hardness

1. GİRİŞ

1.1. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

Polimer malzemelerin mühendislik malzemeleri haline gelme süreci, fiziksel ve mekanik özellikleri, bu özelliklerin avantajları, mekanik özelliklerin iyileştirilmesi için polimer malzemelerin tavlanması ve bunun işlenebilirlik üzerindeki etkileri hakkında bilimsel literatürde yer alan çalışmalar incelenmiştir.

Bu bağlamda Patil ve diğerleri [1] yüksek performanslı plastik malzemelerin endüstride bu kadar yaygın kullanılmasının temel işlevleri üzerine araştırmalar yapmış olup, bu yaygınlığın en önemli sebepleri olarak, kullanılan yüksek performanslı plastiklerin görünüm, işlevsellik, düşük enerji tüketimine katkısı noktasında konfor sağladığını bildirmişlerdir. Araştırmanın sonucunda plastik malzemelerin güvenilirliğinin arttığını ve her geçen gün daha fazla talep gördüğünü bildirmişlerdir. Bu talep doğrultusunda araştırma ve geliştirmelerin devam etmesi gerektiğini ifade etmişlerdir.

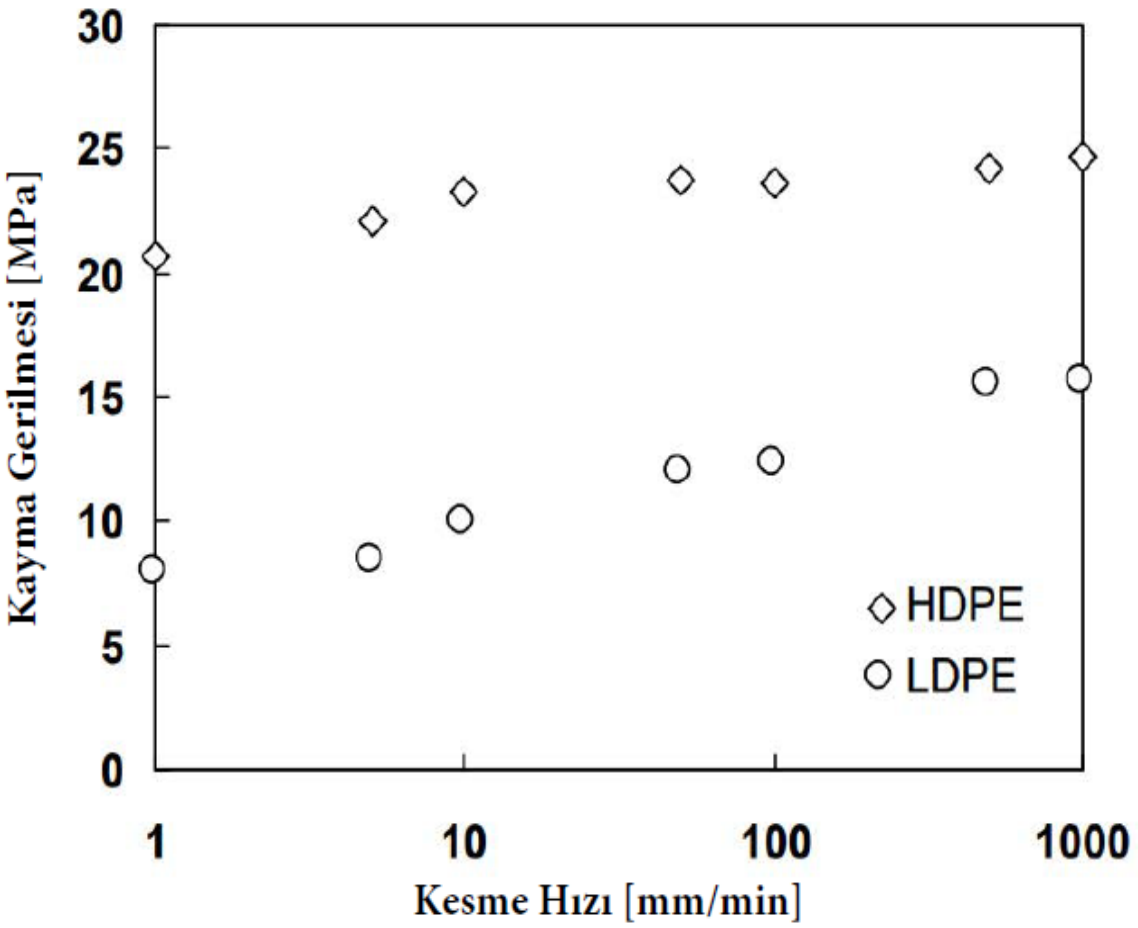
Aklonis [2] tarafından yapılan çalışmada, polimerlerin mekanik özelliklerinin zaman ve sıcaklıkla önemli derecede değiştiği tespit edilmiştir. Çalışmada yapılan deneyler sırasında polimerlerin karmaşık davranışlar sergilediği görülmüş ve bu karmaşıklığın önüne geçebilmek için bazı mekanik modellerin kullanılması gerektiği kanaatine varılmıştır. Çalışmada yay ve amortisör gibi mekanik parçaların çeşitli konfigürasyonlarda kullanılmasının polimerlerin viskoelastik davranışlarını karşıladığını bildirmişlerdir.

Kurt [3] tarafından yapılan çalışmada, yüksek performanslı polimerlerin değişken sıcaklıklardaki (23°C-250°C) tribolojik davranışları incelenmiştir. Çalışmada yapılan deneyler 10 N-150 N yük aralığında 0.5 m/s-4.0 m/sn kayma hızı aralıklarında 2000 metre kayma mesafesinde gerçekleştirilmiştir. Bu verilere göre deneylerde kullanılan polimer ve kompozit malzemelerin aşınma ve sürtünme davranışlarına uygulanan yükün, kayma hızının ve sıcaklığın etkisi incelenmiş ve birbirleri arasında karşılaştırılmıştır. Çalışmada AISI 316L çelik malzeme yerine kullanılabilecek plastikler PAI+%12 Grafit + %3 PTFE, PEEK+%30 Karbon Fiber kompozitleri ve PAI polimerleri olarak bildirilmiştir.

Jeet ve diğerleri [4] tarafından yapılan çalışmada, mühendislik polimerlerinin talaşlı imalatına dair araştırmalara yer verilmiştir.

Crawford ve diğerleri [5] tarafından yazılan kitapta, plastiklerin özellikleri ve işlenmesi konusunda mühendisleri bilgilendirmek amacıyla geniş kapsamlı bilgilere yer verilmiştir.

Xiao ve Zhang [6] tarafından yapılan çalışmada, termoplastik ve termoset polimerlerin işlenebilirliği değerlendirilmiştir. Polimer viskozitesinin yüzey bütünlüğünü, talaş oluşumunu ve işleme kuvveti üzerindeki etkilerini incelemişlerdir. İşleme sırasında gerinim hızı ve sıcaklık arasındaki ilişki ele alınmıştır. Kayma gerilmesinin, gerinim hızıyla arttığını, sıcaklığın artmasıyla da azaldığını yüksek ve düşük yoğunluklu Polietilen (HDPE ve LDPE) üzerinde işleme testleri gerçekleştirerek göstermişlerdir. Kayma gerilmesindeki artışın yüzey kalitesini arttırdığını görmüşlerdir. Bu durum Şekil 1.1'de gösterilmektedir.



Şekil 1.1: Kesme hızına bağlı olarak LDPE ve HDPE'nin kayma gerilmesi değerleri

Jar ve diğerleri [7] tarafından yapılan çalışmada, tavlamanın PEEK malzemenin kısa ve uzun vadeli davranışı üzerindeki etkisi incelenmiştir. Deneysel sonuçlar malzemede bir tür ikincil kristalitin büyüdüğünü desteklemiş ve bu ikincil kristalitin varlığının, PEEK'in mekanik özelliklerini geliştirdiği gözlemlenmiştir.

Ji ve diğerleri [8] tarafından yapılan çalışmada, yüksek ısı direnci ve iyi mekanik özelliklere sahip polimer malzeme olan Poliimid (PI)'in mekanik özellikleri ve işlenebilirliği incelenmiştir. PI malzeme yüzeyinin biçim doğruluğunun 6 mikron ve yüzey pürüzlülüğünün ise nanometre ölçeğine ulaşabileceği geleneksel tornalama işlemleri yerine tek noktalı elmas tornalama (SPDT) kullanılarak gösterilmiştir. Deneyler sonucunda görülen form doğruluğu ve Ra'daki yüzey pürüzlülük değeri, PI'nin mükemmel bir işlenebilirliğe sahip olduğunu göstermiştir.

Amza ve diğerleri [9] tarafından yapılan çalışmada, 3D baskı ile üretilen termoplastik parçaların, enjeksiyon kalıplama ile üretilen parçalara kıyasla daha düşük mekanik özelliklere sahip olduğu hakkında bilgilere yer vermektedir. Bu farkı azaltmak ve termoplastiklerin uygulamalarda kullanımını arttırabilmek için çalışma 3D baskılı parçaların mekanik özelliklerini geliştirmeyi amaçlayan ısıl işlemi analiz etmektedir.

Wangwang Yu ve diğerleri [10] tarafından yapılan çalışmada, amorf ve yarı kristal yapıya sahip polimer malzemeler üzerinde termal tavlamanın etkileri hakkında bilgilere yer verilmiş ve bu malzemeler farklı sıcaklık ve sürelerde ısıtılarak bu durumun etkileri gözlemlenmiştir.

Bir başka çalışmada Weihua Wang ve diğerleri [11], yüksek sıcaklıklarda tavlama işleminin polipropilen malzemenin kristalizasyonuna, mekanik özelliklere ve bu plastik parçaların yüzey kalitesine etkisi incelenmiş, bununla alakalı bilgilere yer verilmiştir.

Gnatowski ve diğerleri [12] polimer malzemelerin tavlama sonrası termomekanik özelliklerindeki değişimlerin dişlilerin işlenmesi sürecine etkilerini araştırmışlardır. Yapılan deneysel çalışmada tecaflon (PVDA) ve polietilen malzemeler tavlamaya tabii tutulmuştur. Numuneler aynı koşullarda ve işleme parametrelerinden ilerleme parametresi değiştirilerek yatay manuel freze tezgahında işlenmiştir. İşlenmiş malzemeler, mekanik ve termomekanik özellikler açısından test edilmiştir. Isıl işlem sonrası malzeme mukavemetinde olumlu sonuçlar olduğu görülmüştür.

K. Nakayama [13] hassas işlemenin teknolojik ilerlemenin yanı sıra hızlı sanayileşmenin gerekliliği olarak öne çıktığından bahsetmiştir. İşleme teknolojisinin, kesici takım malzemeleri,

takım tezgâhları ve kontrol teknolojisiyle desteklenerek, işlenmiş parçaların boyutsal doğruluğu, yüzey kalitesi, kenar kalitesi, yüzey bütünlüğü ve talaş kontrolünü etkileyen parametreler ve kesme kuvvetleri arasındaki ilişkiler ile alakalı bilgilere yer vermiştir.

Kobayashi [14] tarafından yapılan çalışmada, sekiz farklı plastik malzeme farklı kesme hızları, kesme derinlikleri ve besleme hızlarında, çeşitli kesici takımlar kullanılarak kesim yüzeyleri, yüzey pürüzlülüğü ve çıkan talaşlar gözlemlenmiştir. Bu çalışma ultra hassas bir hava mili ve kızağı kullanılarak yapılmıştır. Yapılan çalışma neticesinde ortaya çıkan sonuçlara bakıldığında, hassas işleme durumlarının plastik malzemelerin mekanik özelliklerine bağlı olduğu gerçeği açığa kavuşturulmuştur.

Carr ve Feger [15] tarafından yapılan polimer işleme konusundaki çalışmada belirli polimer sınıfları için numunenin malzeme özelliklerinin, ürün kalitesini doğrudan doğruya etkilediği bulunmuştur. Bu malzeme özellikleri arasında camsı geçiş sıcaklığı T_g, erime sıcaklığı T_m, viskozite ve gevşeme hızının yer aldığı gözlemlenmiştir.

Jagtap ve diğerleri [16] elektronik ve optik gibi alanlarda hassas ürünlerin gereksinimlerini sağlayan polimerler olan Poliamid Naylon ve Polipropilenin yüksek boyutsal doğruluk ve iyi yüzey kalitesi için tornalanması sonrası sonuçlarını incelemişlerdir.

Yan ve diğerleri [17] tarafından yapılan bir çalışmada, Poli(metil metakrilat) (PMMA), Polietereterketon (PEEK) ve Poliimid (PI) gibi iyi mekanik özelliklere sahip termoplastik polimer malzemeler kullanılmıştır. Çalışmada, yüksek hızlı mikrofrezeleme yapılarak yüzey pürüzlülüğü, çapak ve kesme özellikleri araştırılmıştır. Çalışma sonucunda PMMA, PEEK ve PI'nin iyi mekanik özelliklere ve işlenebilirliğe sahip olduğu anlaşılmıştır. Çalışmada malzeme sıcaklığı arttıkça malzemenin viskoelastik bir durumda olduğu görülmüş ve yüzey kalitesi gevrekliği giderilmiş olan bir malzemede viskoelastik bir malzemeye göre daha iyi çıkmıştır.

Butt ve Bhaskar [18] uygun maliyetli eklemeli üretim yöntemi olan FFF baskılı termoplastik parçaların yüzey kalitesini ve mekanik özelliklerini iyileştirmek için bilgilere yer verilmiştir. Çalışmada yaygın olarak kullanılan iki polimerik malzeme olan ABS ve Polilaktikasit PLA'yı dikkate alınmış ve sonuçları bakırla güçlendirilmiş PLA ve Alüminyum ile güçlendirilmiş ABS ile karşılaştırılmıştır. Dört farklı malzeme mekanik özelliklerini iyileştirmek için tavlama işlemi uygulanmıştır. Deneyler neticesinde tavlamanın bu dört malzeme üzerindeki etkisi, boyut analizi, ultrasonik test, çekme testi, mikroyapı analizi ve sertlik testi ile malzemeler

incelenmiştir. Bu çalışma, metal katkılı termoplastikler ve bunların yaygın olarak kullanılan PLA ve ABS malzemeleri ile uygulanabilirliği için iyi bir karşılaştırma sağlamıştır.

Özden ve diğerleri [19] tarafından yapılan bir araştırmada medikal uygulamadan elde edilen olumlu sonuçlar ve teknolojik gelişmeler neticesinde PEEK malzemenin diş hekimliği uygulamalarında kullanılmasıyla alakalı bilgilere yer verilmiştir. Araştırmada malzemenin mekanik özelliklerine ve bu özellikleri uygulamalardaki sonuçlarına, CAD/CAM sistemleriyle kullanılması, biyouyumluluk durumundan kaynaklı malzemenin bu alandaki kullanımını gün geçtikçe arttığına dikkat çekilmiştir.

Atasoy [20] tarafından yapılan tez çalışmasında, PTFE'in üretimi, yapısı, polimerizasyonu hakkında bilgilere yer verilmiştir. PTFE malzemenin gerilme-gerinme, darbe dayanımı, sertlik özellikleri araştırılmıştır. Malzemenin kullanım alanlarıyla alakalı geniş bir araştırma bilgisi aktarılmıştır. Araştırmalar sonunda PTFE malzemenin pozitif özellikleri sayesinde diğer malzemelere alternatif olabileceği kanaatine varılmıştır.

Small [21] tarafından yazılan makalede PEEK malzemenin olağanüstü mekanik, termal ve kimyasal direnç özelliklere sahip olduğundan ve bu özellikler neticesinde çeşitli endüstri alanlarında sızdırmazlık uygulamalarında kapsamlı olarak yer bulabildiğinden bahsedilmiştir. Makalede ayrıca PEEK malzemenin kullanıldığı alanları ve performans iyileştirmelerini içeren örneklere de yer verilmiştir.

Dinctosun [22] tarafından yazılan yüksek lisans tezinde tekrarlı temperleme ısıl işlemin Vermiküler Grafitli Dökme Demirlerin işlenebilirliğine etkisi araştırılmıştır. İşlenebilirlik özellikleri; kesme kuvvetleri, yüzey pürüzlülüğü ve silindiriklik açısından incelenmiştir.

Mazumdar [23] tarafından yazılan kitapta, kompozit malzemeler için hammadde seçiminden, parça üretimine kadar geçen süreç detaylı bir şekilde anlatılmaktadır.

Shirivastava [24] tarafından yazılan kitapta, plastik mühendisliği ve bu alandaki mühendislik esasları geniş bir çerçevede ele alınmıştır. Kitap yedi bölümden oluşmakta ve bu bölümler, polimerlerin sınıflandırılması, polimerizasyon, plastiklerin özellikleri ve standart testleri, plastik işleme teknikleri, plastik parça tasarımı ve uygulama konuları hakkında bilgileri içerir.

Kutz [30] tarafından yazılan plastik mühendisliği el kitabında, polimerik malzemeler hakkında derinlemesine bilgiler verilmiştir. Kitapta plastiklerle alakalı bilgilere yer verilmiş ve kitabın

bir bölümünde mühendislik termoplastiklerine odaklanılmıştır. Kitabın son bölümünde plastik parçaların tasarımı ve bu tasarımların uygulamalarıyla alakalı örnekler gösterilmiştir.

Pouzada [32] tarafından yazılan kitapta, plastik ürünlerin tasarımı ve imalatı ile alakalı araştırmalara yer verilmiştir. Geleneksel yöntemler açıklanmış, ayrıca yenilikçi teknolojilerin plastik ürünlerin tasarımı, malzeme seçimi, özellikleri, üretimi ve performansına entegrasyonu hakkında ayrıntılı bilgilere yer verilmiştir.

Peacock ve Calhoun [37, 38] tarafından yazılan kitapta, polimer bilimi kapsamlı bir şekilde incelenmiş, polimerler kimyasal yapılarından fiziksel özelliklerine kadar sistematik bir şekilde tanıtılmış ve bu konular üzerine örnekler gösterilerek bu ilkeler üzerine tartışılmıştır.

Aktaş [50] tarafından yapılan çalışmada polimer morfolojisi, yapısı, ısıl geçiş sıcaklıkları, camsı geçiş sıcaklığı, polimer viskozitesi ve plastiğin önemli özellikleri hakkında araştırmalara yer verilmiştir.

Groover [52] tarafından yazılan kitapta, malzeme, imalat ve imalat yöntemleri ile alakalı güncel araştırmalar temel bilgiler ile birlikte sistematik bir şekilde oluşturularak mühendisler, ve imalat alanında çalışmalar yapanlar için sunulmuştur.

Christopher ve diğerleri [53] petrol ve gaz uygulamalarında yüksek performaslı polimerlerin özellikleri, uygulamaları ve bozunmaya karşı dayanımlarıyla alakalı geniş çaplı bir araştırma yapılmıştır. Ayrıca çalışmada yüksek performanslı polimerlerden istenilen malzeme performansına göre malzeme güvenliği ve dayanımı arttırmak için polimerlerin özelliklerini iyileştirmeye yönelik araştırmalara da yer verilmiştir.

Koike ve diğerleri [56] tarafından yapılan araştırmada, yüksek performanslı mühendislik polimerleri ve bunların metallerin yerine kullanılmasıyla alakalı pazar talepleri hakkında bilgilere yer verilmiştir. Araştırmada yapılan deneysel çalışmada PEEK radyal bilyalı rulmanların yuvarlanma temaslı yorulma direnci değişken parametreler kullanılarak yapılan tornalama işlemiyle birlikte incelenmiştir. 186N ve 260N arasında değişen radyal yük altındaki malzemelerde ilerleme hızı en düşük olan malzemede çatlak başlangıcı daha geç meydana gelmiştir.

Yukarıda yapılan bilimsel literatür incelemelerinden, ileri mühendislik plastiklerinin işlenebilirlik performansının termomekanik özelliklere ve en nihayetinde söz konusu özellikleri belirlemede ısıl işlem reçetelerinin önem arz ettiği kanaatine ulaşılmıştır.

2. KAVRAMSAL ÇERÇEVE

Tez çalışmasının genel kısımlar bölümünde plastik mühendisliğinin gelişimi, plastiklerin mekanik ve fiziksel özellikleri, plastiklerin ısıl işlemleri, talaşlı imalatı ve işlenebilirliğini etkileyen parametreleri ile alakalı genel bilgilere yer verilmiştir.

2.1. PLASTİK MÜHENDİSLİĞİ

Öncelikli olarak bir kimya merakı olarak ön plana çıkan plastikler 20. yüzyılın devrim niteliğindeki malzemesi olarak görüldü. Daha sonra 20. yüzyılın ortalarında hızlı bir büyüme ve gelişmeye bağlı olarak diğer malzemelere alternatif olarak görülmüştür. Plastikler uygulamalarının önemi ve genişliği açısından yükselişlerini sürdürdüler ve günümüzde kendi başlarına temel malzemeler olarak kabul edilirler.

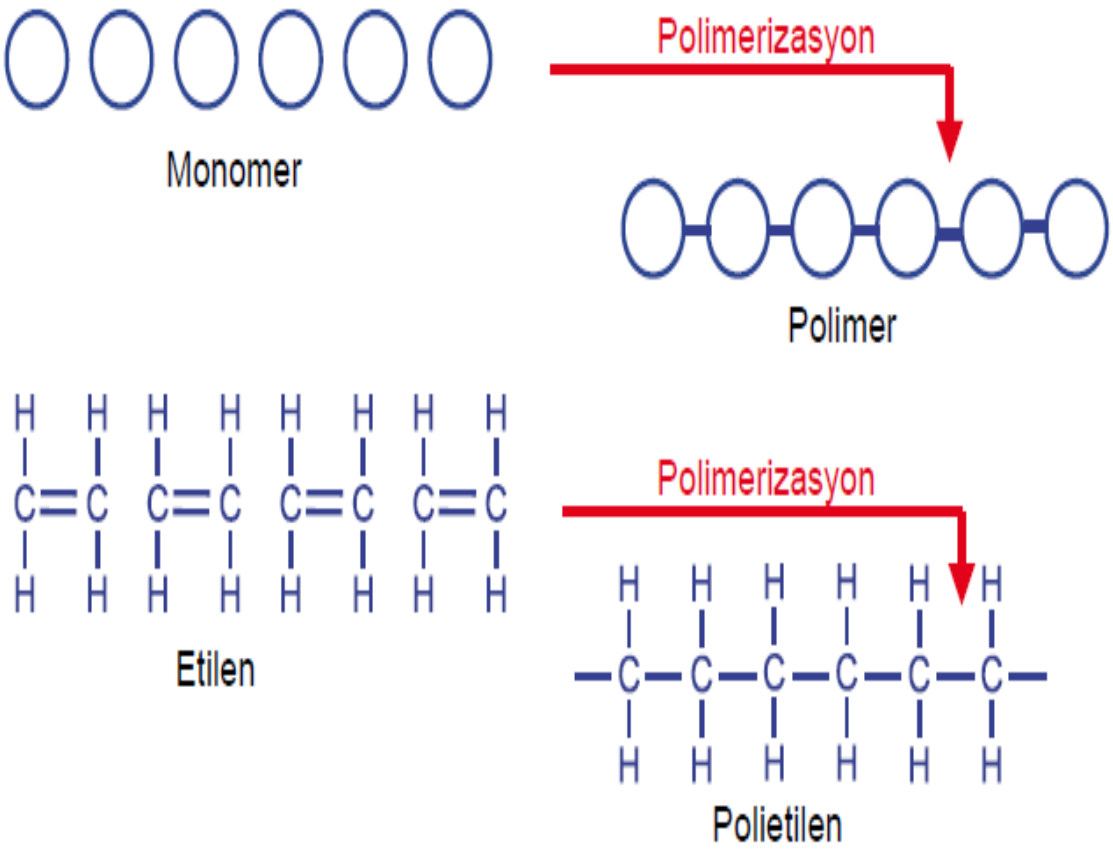
Buna bağlı olarak son 10 yılda hacim bazında plastik üretimi çelik üretimini geçmiştir. Hafiflik, esneklik, korozyona karşı direnç, işlenme kolaylığı ve diğer mühendislik malzemelerinde bulunmayan özellik kombinasyonlarını barındırdığı için plastikler tasarımcılar ve mühendisler tarafından yaygın olarak kullanılmaya başlanmıştır [23].

Plastiklerin son zamanlardaki popülaritesinin bu denli artmasının en önemli nedenlerinden biri olarak daha düşük maliyetlerle şekillendirilme ve işlenme kolaylığı gösterilmektedir.

2.1.1 Polimerik Malzemeler

Tüm plastikler polimerik malzemelerden üretilirler. Bu polimerik malzemeler bitkilerde ve hayvanlarda bulunabilir ya da laboratuvar ortamında üretilirler. Laboratuvar ortamında üretilen polimer malzemeler sentetik polimerler olarak adlandırılırlar. Sentetik polimerlere baktığımızda sentetik polimerler, molekülleri birleştirme süreci olarak bilinen "polimerizasyon" olarak adlandırılan kimyasal reaksiyonla üretilirler. Sentetik büyük moleküller, küçük moleküllerin bir araya gelmesiyle oluşur. Bu sentetik büyük moleküller monomerlerdir [24].

Yüzlerce ve binlerce monomer de bir polimer oluşturmak için kovalent bağlarla birlikte kimyasal olarak bağlanır. Şekil 2.1, bir polimer oluşturmak için monomerlerin bağlanmasını göstermektedir [25, 26].



Şekil 2.1: Polimerizasyon süreci ve polietilen oluşumu

Birçok polimerin adı poly- ve monomer adının son eki ile oluşur. Örneğin; monomerlerden Propilen ve Stirenden sırasıyla Polipropilen ve Polistiren üretilir.

Tablo 2.1'de polimerlerin sınıflandırılması şematik olarak gösterilmiştir. Polimerler, kimyasal bileşimlerine, yapılarına, ısıl davranışına, kullanım alanına ve fiziksel yapılarına göre sınıflandırılmışlardır [3].

Tablo 2.1: Polimerlerin sınıflandırılmasının şematik gösterimi

Kimyasal Bileşimlerine	**Yapılarına**	**Isıl Davranışlarına**	**Kullanım Alanına**	**Fiziksel Yapısına**
Organik	Homopolimer	Termoplastik	Plastikler	Amorf
İnorganik	Kopolimer	Termoset	Fiberler	Kristalin
	Termopolimer		Kaplamalar	YarıKristalin

Polimerler, kimyasal bileşimlerinin organik veya inorganik olmasına göre sınıflandırılırlar. Organik polimerlerin yapılarında karbon ve hidrojen atomunun yanı sıra oksijen, azot ve

halojen atomları da bulunur. Ana zincir Karbon (C) atomlarından oluşuyorsa bu polimerlere "organik polimer", ana zincir Karbon yerine Silisyum (Si), Germanyum (Ge), Bor (B), Fosfor (P) gibi elementlerden oluşuyorsa bu polimerlere "inorganik polimer" adı verilir.

Polimerler zincir yapılarına göre incelendiğinde polimer zinciri tek bir monomerden oluşan, iki farklı monomerden oluşan ve üç farklı cins monomerden oluşan polimerler olarak sınıflandırılır. Tek bir monomerden oluşan polimerlere "homopolimer" iki farklı monomerden oluşan polimerlere ise "kopolimer" adı verilir.

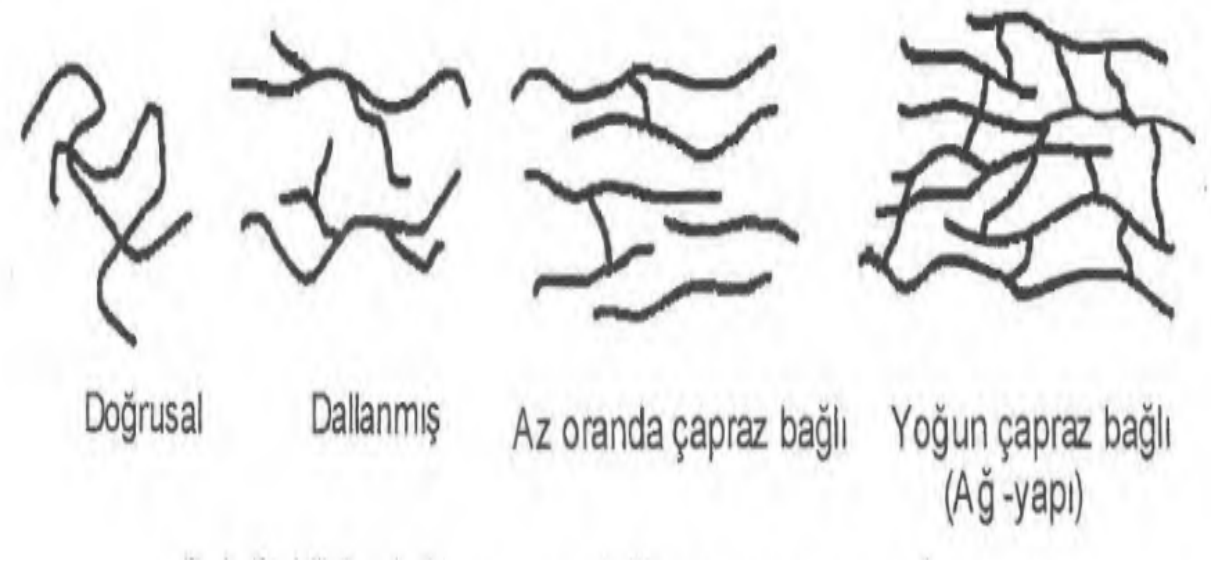
A-A-A-A-A (homopolimer)

A-A-B-A-B-B-B-A (kopolimer)

Etilen grubunun tekrarlandığı PE bir homopolimerdir, kopolimere örnek olarak PP kopolimer gösterilebilir.

Üç farklı monomerin reaksiyonundan oluşan polimerler ise "terpolimer" olarak adlandırılır.

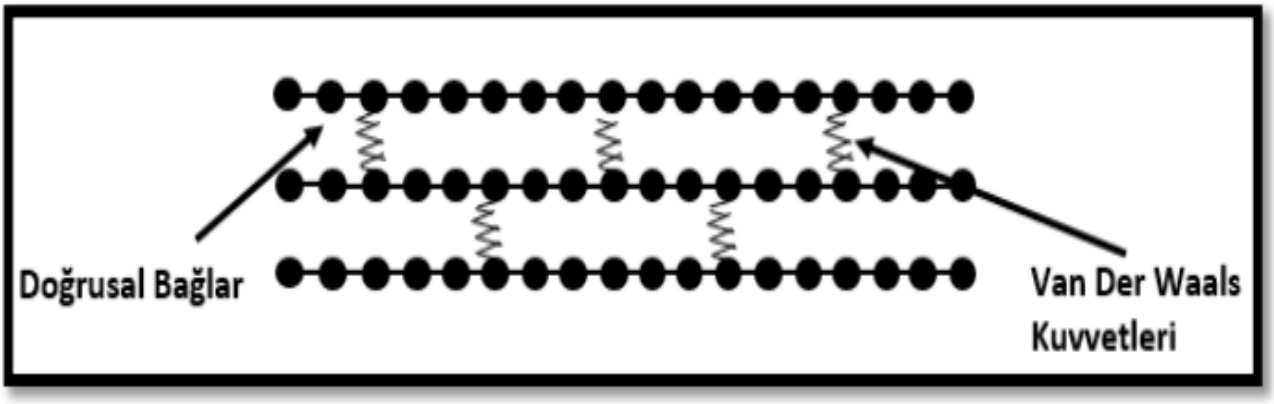
Polimerleri diğer malzemelerden ayıran özellikleri daha iyi kavrayabilmek için moleküler yapılarını incelemek gerekir. Çünkü moleküllerin büyüklüğü mekanik özellikleri etkileyen önemli bir kavram olarak karşımıza çıkar. Polimer zincirlerinin biçimleri polimer özelliklerini etkiler. Molekül zincir şekillerine göre polimerler; doğrusal, dallanmış çapraz bağlı şekilde sınıflandırılırlar. Çapraz bağ oranının fazla olması durumunda ağ-yapılı polimer karşımıza çıkar. Polimer zincirlerin biçimleri Şekil 2.2'de gösterilmektedir.



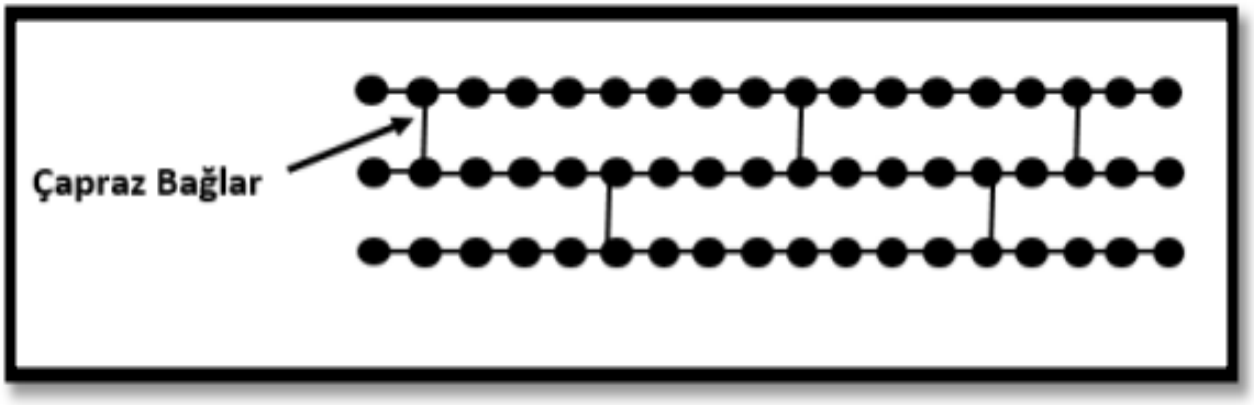
Şekil 2.2: Polimer zincirlerin biçimleri

Doğrusal ya da dallanmış polimerler özelliklerinde önemli değişiklikler olmadan ısıtılarak yeniden şekillendirilebilirler. Örneğin; doğrusal yapıda olan termoplastikler ısı ve basınç altında akarak şekillendirilebilirler. Ağ-yapılı polimerler zincirleri arasında yoğun çapraz bağlar bulunması nedeniyle geri dönüşümleri mümkün olmayan polimerlerdir. Kalıcı bir biçimde şekillendirilip kimyasal bir tepkime sonrası yeniden şekillendirilemezler ve çok yüksek sıcaklıklarda ısıtıldıkları takdirde bozunurlar.

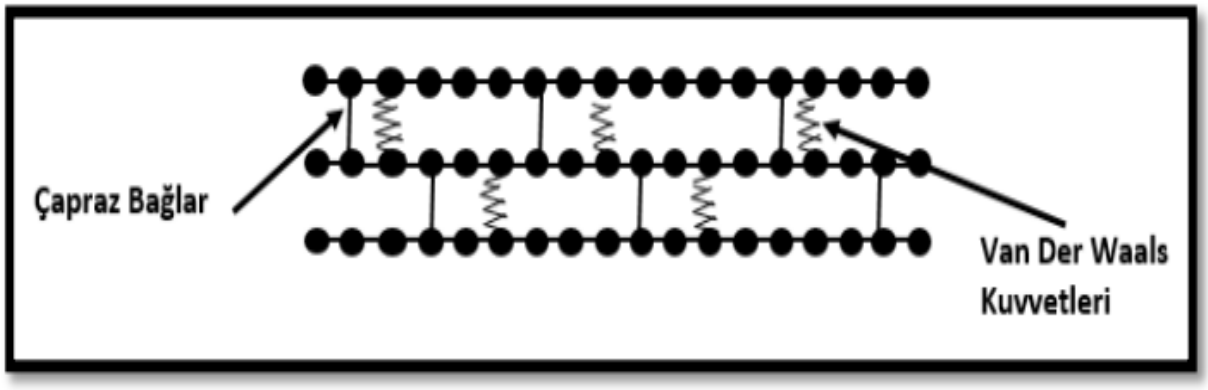
Bağlar, molekül içindeki atomları birlikte tutan kuvvetlerdir. Polimerlerde bağları, birincil bağlar ve ikincil bağlar olmak üzere iki grup altında incelenmektedir. Birincil bağlar, kovalent, koordine kovalent ve iyonik bağlardır. İkincil bağlar ise reaksiyona girmeyen polimer molekülleri arasında veya bir molekülün çeşitli bölümleri arasında oluşan bağlardır. Şekil 2.3'de termoplastiklerin, Şekil 2.4'de termosetlerin ve Şekil 2.5'de elastomerlerin yapısı gösterilmektedir.



Şekil 2.3: Termoplastiklerin yapısı



Şekil 2.4: Termosetlerin yapısı



Şekil 2.5: Elastomerlerin yapısı

Sonuç olarak polimer yapıdaki bağlar, polimerik malzemenin özelliklerini önemli ölçüde etkilemektedir. Genellikle birincil bağlar olan kovalent bağlar; yapının ısıl ve fotokimyasal kararlığını etkiler. İkincil bağlar ise polimerin; erime, çözünme, buharlaşma, adsorpsiyon, difüzyon ve deformasyon gibi fiziksel ve kimyasal özelliklerini etkiler.

Polimerler ısıl davranışlarına göre incelendiğinde ise termoset polimerler ve termoplastik polimerler olarak sınıflandırılırlar [3, 27].

2.1.2 Termoplastikler ve Termosetler

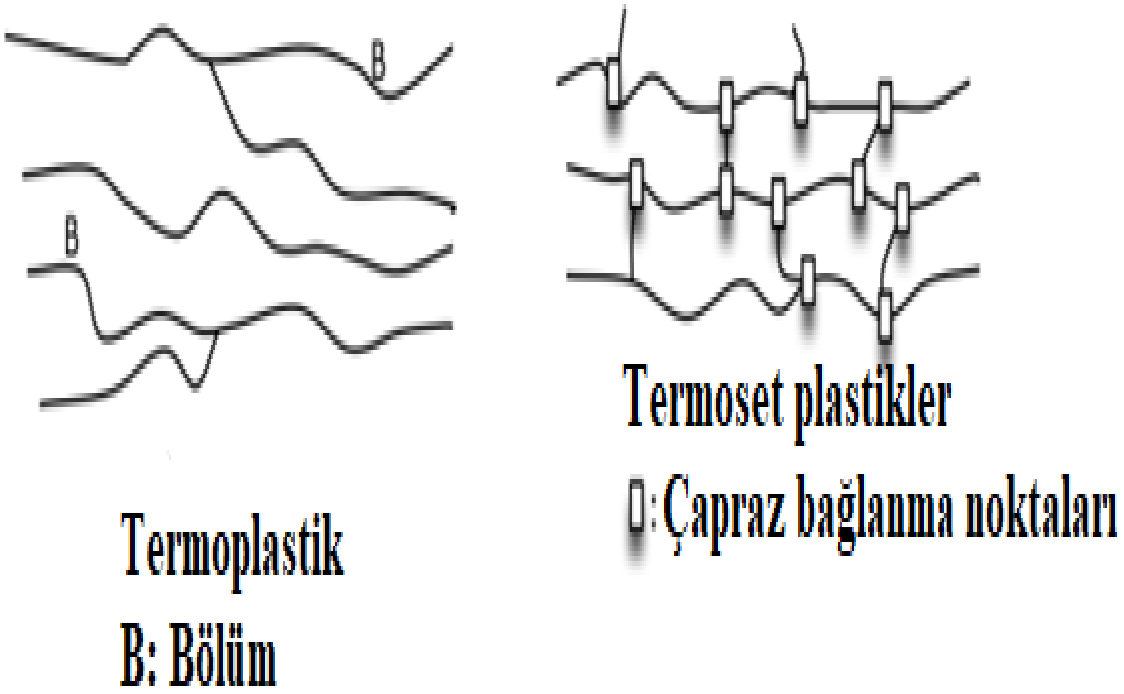
Plastik ve polimer terimleri endüstride sıklıkla birbirlerinin yerine kullanılmaktadır. Ancak literatürde plastikler polimerik malzemelerin alt grubu olarak tanımlanırlar. İkisini birbirinden ayıran özel bir durum vardır. Plastik terimi, polimerik malzemelerin ısı varlığında şekillendirilebildiğini ifade etmek için kullanılır. Bu şekillendirme sırasında sıcak ortamdaki davranışlarına göre farklılaşan iki ayrı polimer sınıfı olarak termoplastikler ve termosetler karşımıza çıkar [28, 29].

Termoplastikler ısıtılarak, tekrarlanabilir bir döngüde yumuşatılabilir, şekillendirilebilir, biçimlendirilebilir. Soğutulduğu takdirde katılaşır. Herhangi bir kimyasal bağlanma olmadığından dolayı yeniden işleme ve geri dönüşüme izin veren malzemeler olarak tanımlanır. Polietilen (PE), Polistiren, Polipropilen (PP), Polivinilklorür (PVC), Naylon (poliamid), Teflon, termoplastik malzemelere verilebilecek bazı örneklerdir [4].

Termosetler ise çapraz bağlanarak iki ayrı polimer zinciri arasında kimyasal bir bağ oluştururlar. Bu polimerler genellikle işlendikten sonra termoplastik polimerlerden karakteristik olarak daha güçlüdürler, ancak yeniden işleme ve geri dönüşüm söz konusu

değildir. Epoksiler (EP), Fenolik (PF), Poliüretan (PUR), doymamış polyester termosetlere verilebilecek bazı örneklerdir [30].

Bu durum termoplastikler ve termosetler arasındaki en temel farktır. Şekil 2.6'da tipik bir termoplastik ve termosetin bağ yapısı gösterilmektedir.



Şekil 2.6: Termoplastik ve termoset polimerik yapının şematik gösterimi [31].

2.1.3 Mühendislikte Plastikler

1970'lerin başlarında mühendislik biliminde plastikler yeni ürünlerin geliştirilmesinde pek tercih edilmemiştir. Bu yıllardan sonra plastik malzeme kullanımı istikrarlı bir şekilde artış göstermiştir. Fakat bu artışa rağmen plastik malzemelerin işleme yöntemleri üzerinde yeteri kadar durulmaması plastiklerin kullanım alanını kısıtlamıştır. Ancak 20. Yüzyılın sonlarına doğru termoplastik malzemelerin üzerindeki araştırmaların gelişmesi neticesinde plastikler en önemli mühendislik malzemeleri olarak ortaya çıkmışlardır [32].

Plastikler, önemli kombinasyon özelliklerine sahip oldukları için diğer tüm tasarım malzemelerinden farklı olarak çok daha geniş bir yelpazede, tasarımlarda ciddi olarak dikkate alınması gereken özelliklere sahiptirler.

Mühendislik biliminde plastik malzemeleri ve işleme yöntemlerini tanımak, performans farklılıklarını anlamak ürün tasarımlarını geliştirmeye yardımcı olacaktır.

Plastik malzemeler için performans özellikleri birçok farklı şekilde tanımlanabilir. Hafiflik, yüksek mukavemet, farklı ortamlarda bozulma direnci, seri üretim yöntemlerine uyumluluk, geniş renk ve görünüm yelpazesi, ısı ve ablatif direnç, işlenebilirlik, maliyet, bu performanslardan bazılarıdır. Bu nedenle dişliler, kamlar, yataklar, burçlar, valf yuvaları vb. uygulamalarda yaygın olarak kullanılmaktadırlar.

Plastik malzemelerin zayıf özelliklerine bakıldığında ise erime noktasının düşük olması yüksek çalışma sıcaklığındaki uygulamalar için uygun değildir. Ek olarak diğer malzemelere göre plastiklerin zayıf özelliği olarak termal genleşmelerinin yüksek olması gösterilebilir. Tablo 2.2'de polimerler ve metallerin önemli özellikleri karşılaştırılmıştır [4, 33].

Tablo 2.2: Polimerlerin ve metallerin önemli özellikleri

	Özellik	**Metaller**	**Polimerler**
1	Yoğunluk, gr/cm^3	2-22 (ortalama 8)	1-2
2	Erime Noktası	Düşük-Yüksek	Düşük
3	Sertlik	Orta	Düşük
4	İşlenebilirlik	İyi	İyi
5	Çekme Mukavemeti	2500'e kadar	140'a kadar
6	Basma Mukavemeti	2500'e kadar	350'e kadar
7	Young Modülü, GPA	15-400	0.001-10
8	Isıl Genleşme	Orta-Yüksek	Çok Yüksek
9	Isı İletkenliği	Orta-Yüksek	Çok Düşük
10	Elektriksel Karakteristikler	İletken	Yalıtkan
11	Kimyasal Direnç	Düşük-Orta	İyi
12	Rijitlik	Yüksek	Düşük
13	Genleşebilirlik	Yüksek	Yüksek

Yüksek dayanıklılığa ve ısı direncine sahip yüksek performanslı sentetik reçineler "mühendislik plastiği" olarak adlandırılırlar. Ayrıca bunlar arasında özellikle yüksek performansa sahip olanlar "süper mühendislik plastikleri" olarak adlandırılır ve önemli fonksiyonlar gerektiren endüstriyel parçalar için kullanılırlar. Genel amaçlı plastikler ile mühendislik plastikleri arasındaki temel fark mühendislik plastiklerinin yüksek işlevselliğe sahip olmalarıdır. Mühendislik plastikleri yüksek mekanik dayanıma ve ısı direncine sahiptir [34].

2.2. POLİMERLERİN MEKANİK ÖZELLİKLERİ

2.2.1. Mekanik Özellikler

Plastik malzemeler, hafiflik, esneklik, korozyona karşı direnç, renk, şeffaflık ve işlenme kolaylığı özellikleri ile onları diğer malzemelere göre daha önemli hale getiren çok fonksiyonlu özellikleri içerisinde barındırır. Bu bahsedilen özelliklerin genel bir değerlendirmesini yapmak mümkün değildir, her malzeme veya her ürün uygulandığı sisteme göre değerlendirilmelidir. Bu yüzden bu bölümde genel yaklaşımlara değinilmiştir [24].

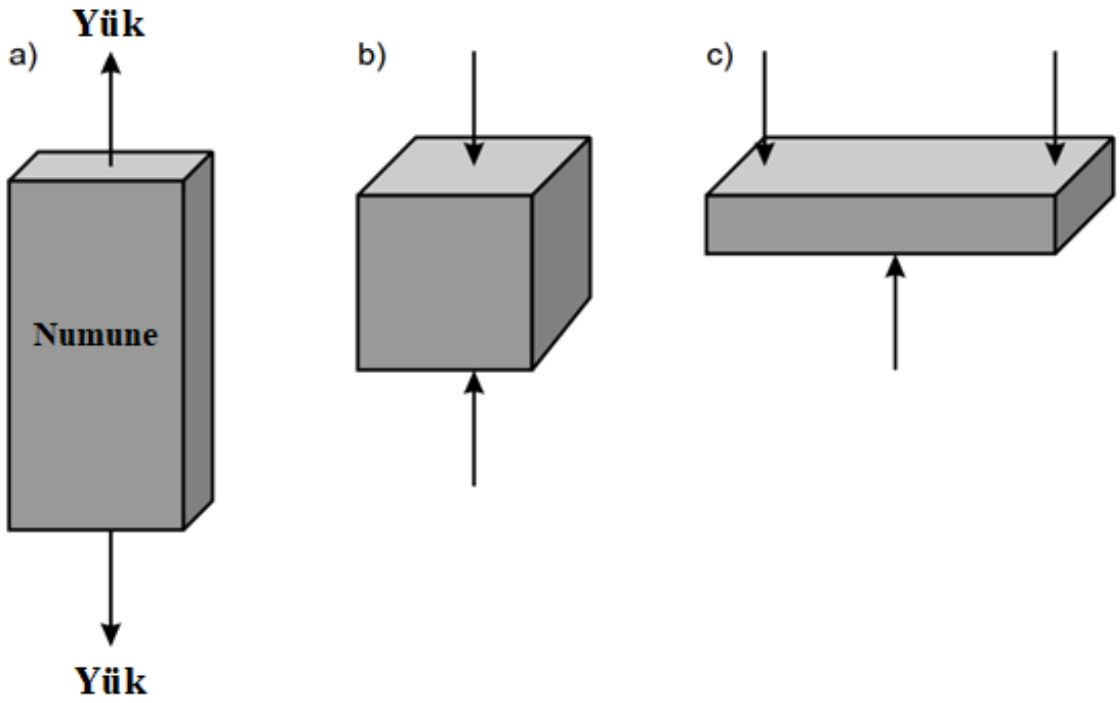
Plastik malzemeler, makro, mikro, nano ve moleküler seviyede çeşitli özellikler sunan farklı polimerik bileşim ve fiziksel yapı ile üretilirler. Bu şekilde farklı üretim yöntemleriyle üretilen malzemeler uygulama koşullarında dış kuvvetlere farklı yanıt verirler ve uygulanan yükün büyüklüğüne bağlı olarak kopma, uzama, bükülme, yırtılma, kırılma veya parçalanma gibi durumlar ortaya çıkar. Bir malzemenin mekanik özelliği malzemenin uygulanan kuvvetlere karşı göstermiş olduğu tepki olarak tanımlanır [35].

Uygulamalara bağlı olarak bir malzemenin mekanik özelliklerini nicel olarak ifade etmek amacıyla malzemelerin test edilmesi gerekir. Bu mekanik testleri standartlaştırmak ve mekanik parametreleri tanımlamak için evrensel standartlar belirlenmiştir. Bu standartlar ASTM ve ISO gibi kuruluşlar tarafından oluşturulmuştur. Tüm bu standartlar Dünya genelinde plastik endüstrisi tarafından kabul edilmektedir. Ancak bu kuruluşlar her zaman aynı fikirde olmazlar. ASTM ve ISO standartları arasında genellikle bire bir korelasyon olsa da, bunlar prosedür ve koşullar konusunda farklılık gösterebilirler. Bazı standart testler Tablo 2.3'de gösterilmiştir [36].

Tablo 2.3: Standart mekanik testler

Ölçüm	ASTM	ISO
Çekme Mukavemeti	ASTM D638	_
Basma Modülü	ASTM D695	ISO 604
Basma Mukavemeti	ASTM D695	ISO 604
Kopma noktasındaki birim uzama	ASTM D412	_
Akma noktasındaki uzama yüzdesi	ASTM D412	_
Eğme Modülü	ASTM D790	ISO 178
Eğilme Mukavemeti	ASTM D790	ISO 178
Poisson Oranı	ASTM E132	_
Shore Sertlik Değeri	ASTM D2240	ISO 868
Rockwell Sertlik Değeri	ASTM D785	ISO 2039-2
Yırtılma Mukavemeti	ASTM D624	ISO 34-1
Cam Geçiş Sıcaklığı	ASTM E1356	_
Darbe Mukavemeti	ASTM D638	_

Çok çeşitli polimer yapıları göz önüne alındığında, bunların mekanik özelliklerini yani çeşitli türlerdeki deforme edici kuvvetleri test etmek için buna uygun olarak geniş bir yöntem yelpazesi olması şaşırtıcı olmamalıdır. Dış kuvvetlerin etkisi altındaki malzemelerin deformasyon ölçümlerini gerçekleştirmenin klasik yolu, bir malzemeye döngüsel bir şekilde deformasyon uygulamaktır. Bu sayede malzemelerin strese, sıcaklığa, frekansa ve diğer değerlere yanıt vermelerinin incelenmesi sağlanmış olur. Genel olarak bu testleri Şekil 2.7'de A) çekme B) basma C) eğilme olmak üzere üç biçimden birinde gerçekleştirebiliriz. Kompleks olmaması için, çoğu test tek eksenlidir, fakat gerektiği durumlarda çift eksenli veya çok eksenli modüller kullanılabilir [37].



Şekil 2.7: Temel test konfigürasyonlarının şematik gösterimi: a) çekme b) basma c) eğilme [37].

2.2.2. Gerilme, Gerinim ve Deformasyon

Bir dış kuvvetin etkisini tanımlamadan önce kuvvetin kendisinin tanımlanması gerekir. Basit bir şekilde kuvvet tanımı, istenen etkiyi elde etmek için harcanan çabanın miktarıdır. Fakat uygulanan bir kuvvetin polimerik bir malzeme üzerindeki etkisini anlayabilmek ve ölçebilmek, kesin ve bilimsel bir tanımla mümkün kılınabilir. Kuvveti bilimsel olarak tanımlamak gerekirse kuvvet, serbest bir cismin hareketinde bir değişikliğe veya sabit bir cismin üzerinde gerilime neden olan dış etkidir. Kuvvet, yönü ve büyüklüğü olan vektörel bir niceliktir. Newton'un ikinci yasasına göre sabit kütleli bir cisim, üzerine uygulanan net kuvvetle doğru, cismin kütlesi ile ters orantılı bir şekilde hızlanır. Bir cisme uygulanan net kuvvet cismin kazandığı momentumun zamana bağlı değişimine eşittir [38, 39].

Bir traktörün arkasındaki römorku çekebilmek için ona bir kuvvet uygulanır. Traktörün arkasındaki römorku çekebilmek için istenen etkiyi elde edebilmek için harcanan enerji kolayca ölçülebilir. Polimer sistemlerdeki kuvvetler incelendiğinde daha kompleks bir durum ortaya çıkar. Örneğin, bir şeker torbasını açmak için gereken kuvvet, plastiği bir arada tutan moleküller arası kuvvetleri yenerek torbayı parçalayana kadar deforme etmek için gereken işle tanımlanır [38].

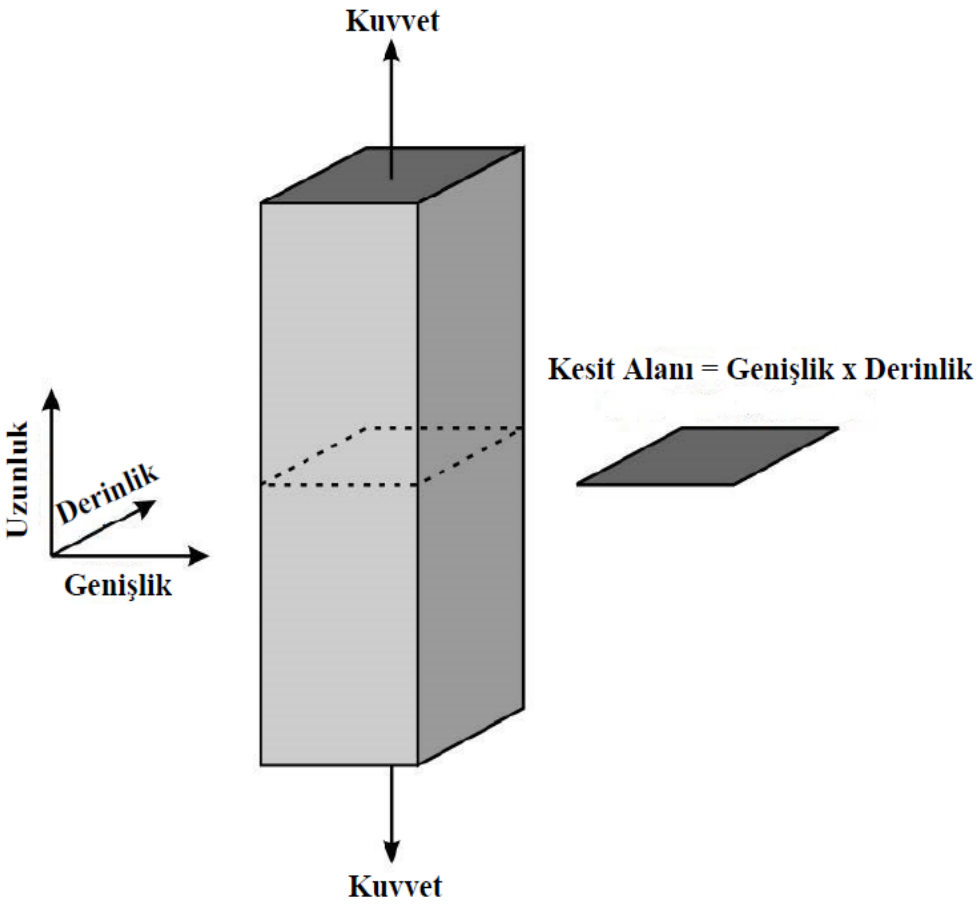
Plastik mühendisliğinde polimer bilimcileri tarafından kuvvet kavramı yerine gerilme kavramı kullanılır. Gerilme, birim alana etki eden kuvvet miktarı olarak tanımlanır. Cismin boyutundan bağımsız olarak bir sisteme uygulanan kuvvet hakkında konuşulmasını sağlar. Belirtilen alana etki eden kuvvet deformasyonun meydana geldiği enine kesit alanıdır. Gerilme(σ) yükün yapısına bağlı olarak çekme veya basma olabilir. Bu durum Şekil 2.8'de gösterilmektedir [38,40].

Mekanikte gerilim terimi, birim alana etkiyen kuvvet olarak tanımlanır.

$$\text{GERİLME} = \frac{\text{KUVVET}}{\text{ALAN}} \tag{2.1}$$

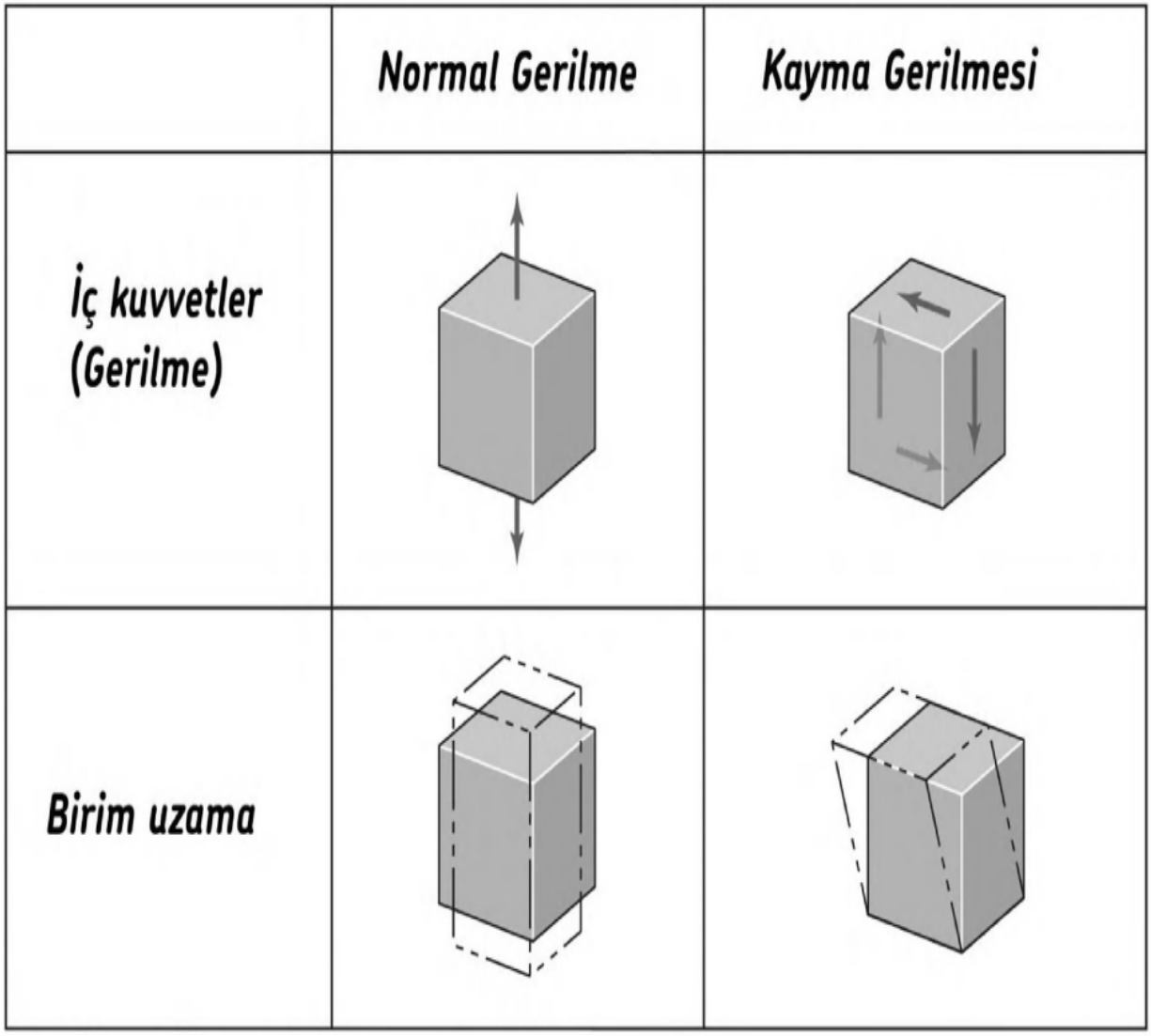
Pascal veya psi cinsinden ifade edilir.

$$1\ \text{MPa} = 145\ \text{psi} \tag{2.2}$$



Şekil 2.8: Çekme kuvvetine maruz kalan dikdörtgen numune [38].

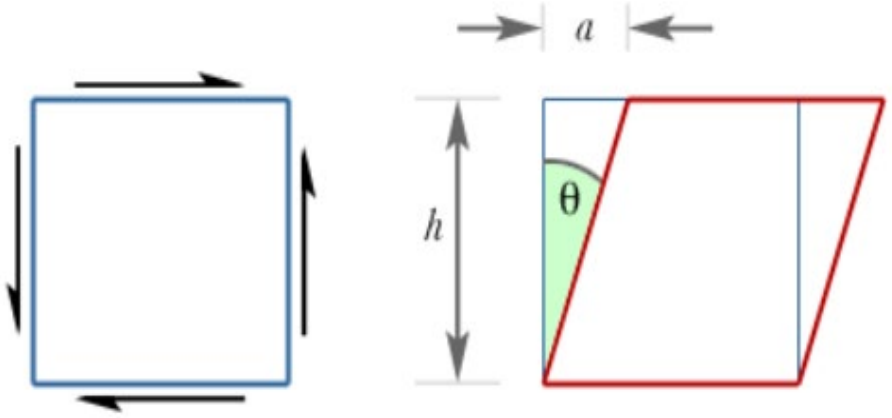
Gerilme esas olarak normal gerilme ve kayma gerilmesi olmak üzere ikiye ayrılır. Normal gerilmeler malzeme kesitine dik olan, kayma gerilmesi ise malzeme kesitine paralel olan kuvvetlerden kaynaklanır [40].



Şekil 2.9: Normal ve kayma gerilmeleri [41].

Gerinim, kuvvetler sistemi altındaki bir malzemenin yük uygulanmadan önceki duruma kıyasla şekil değişiminin oranını ifade eder. Burada ifade edilen şekil değişimi biçimsel bir değişimi değil, niceliksel bir değişimdir. Gerinim, uygulanan kuvvet ile aynı yönde oluşuyorsa normal gerinim olarak tanımlanır.

Normal gerinimden farklı olarak malzeme üzerine bir kesme kuvveti etki ediyorsa malzemede açısal bir şekil değişimi oluşur, bu durumda oluşan şekil değişimi ise kesme gerinimi olarak tanımlanır.



Şekil 2.10: Kesme kuvvetinin etki ettiği malzemede açısal şekil değişimi [42].

$$\gamma = \frac{\alpha}{h} = \tan\theta \qquad (2.3)$$

Gerinim, uzunluk değişiminin silindirin orijinal boyuna bölünmesi ile bulunur.

$$\text{Gerinim} = \frac{\text{Uzunluktaki değişim}}{\text{Gerçek uzunluk}} \qquad (2.4)$$



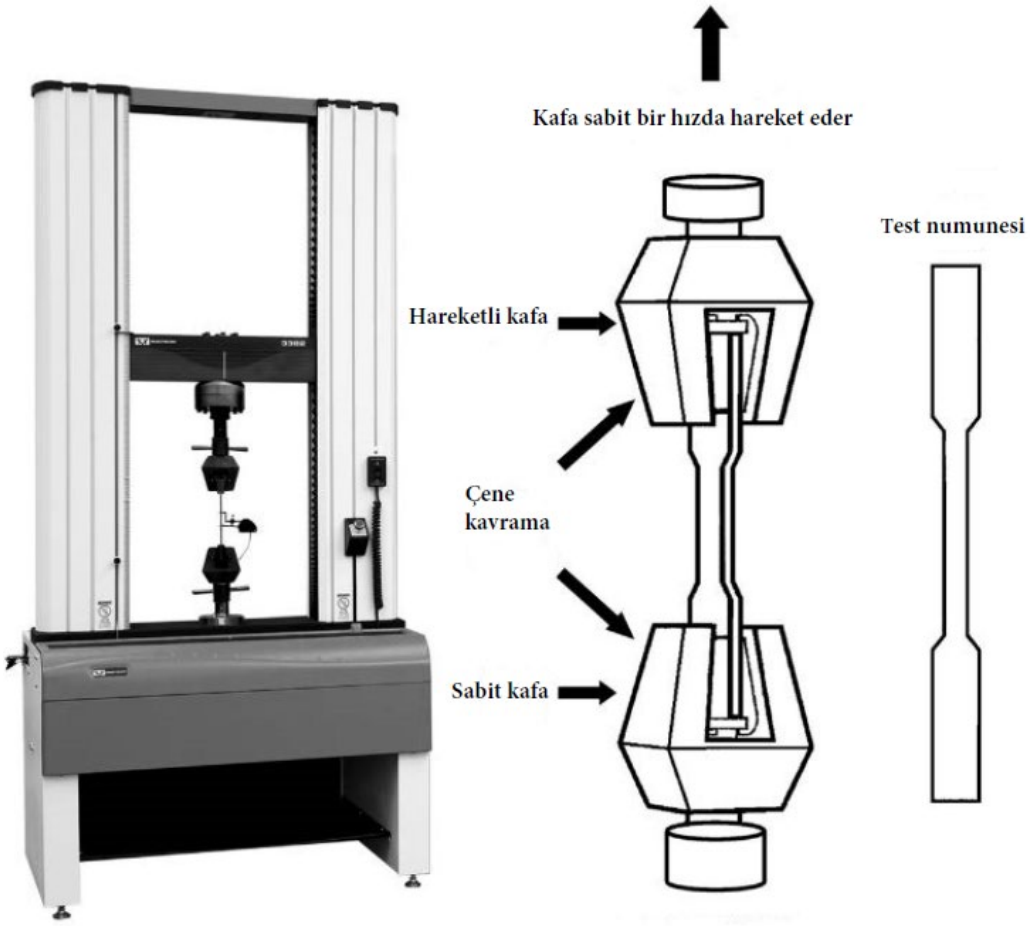
Şekil 2.11: Orijinal boydaki uzunluk değişimi – gerinim [43].

$$\text{Gerinim} = \varepsilon = \frac{dl}{l_o} \qquad (2.5)$$

Diğer malzemelerde olduğu gibi plastik malzemelerde de normal ve teğetsel gerilmeler, bu malzemelerin çeşitli deformasyonel kuvvetlere maruz kaldıklarındaki davranışlarından meydana gelir. Bu zorlanmalar; çekme-basma, kesme, eğilme, burulma olarak sınıflandırılabilir. Aşağıdaki bölümlerde bu zorlanmalarla alakalı araştırmalara yer verilecektir.

2.2.3. Çekme Özellikleri

Plastik malzemelerin mekanik özelliklerini belirlemek için kullanılan en yaygın deney çekme deneyidir. Bu deneyden elde edilen sonuçlar doğrudan mühendislik hesaplarında kullanılabilir. Çekme deneyinin amacı; malzemenin statik yük altındaki elastik ve plastik davranışlarını incelemektir. Bunun için boyutları standartlara uygun; daire veya dikdörtgen kesitli deney numunesi Şekil 2.12'de plastik malzemelerin çekme testi için tipik bir çekme cihazını göstermektedir [44].



Şekil 2.12: Tipik çekme testi ekipmanı [45].

Çekme cihazı Şekil 2.12'de görüldüğü gibi, birbirine göre aşağı ve yukarı hareket edebilen deney numunesinin bağlandığı iki çene ve bunlara hareket veya kuvvet veren, bu iki büyüklüğü ölçen ünitelerden oluşur. Bu deneyde deney numunesinin bir ucu sabit çeneye tutulur ve çenelerden birisi sabit hızda hareket ettirilerek deney numunesine değişken miktarlarda çekme kuvveti uygulanır ve bu kuvvete karşı gelen uzama kaydedilir [24, 44].

Elastisite Modülü, Çekme Mukavemeti, Kopma Noktasındaki Birim Uzama: Malzeme elastik olarak şekil değiştirdiğinde malzemeye uygulanan kuvvet ile malzemede meydana gelen şekil değişimi arasında sabit bir oran vardır. Bu oran elastiklik katsayısıdır. Malzemeye kuvvet uygulandığında, malzemede meydana gelen uzamalar elastik sınırlar içinde gerilmelerle orantılıdır. Bu bölgede malzemenin davranışlarına "Hooke Kanunu" adı verilir.

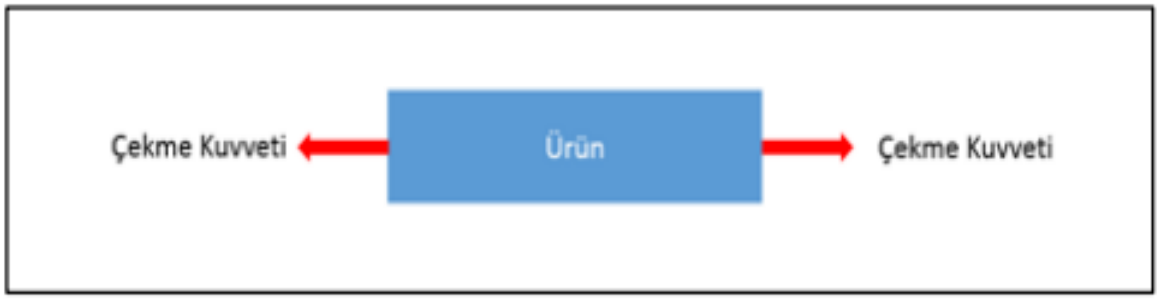
Malzeme için E değeri arttıkça malzeme daha az şekil değiştirme özelliği gösterir. Aynı şekilde E değeri azaldıkça malzemenin daha az rijit hale gelir ve malzemenin esnekliği artar, daha fazla şekil değiştirme özelliği gösterir.

Birim uzama ile normal gerilme arasındaki ilişki şu şekilde tanımlanabilir;

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon} \tag{2.6}$$

Elastisite modülü malzemeye ait karakteristik bir özelliktir [35, 44].

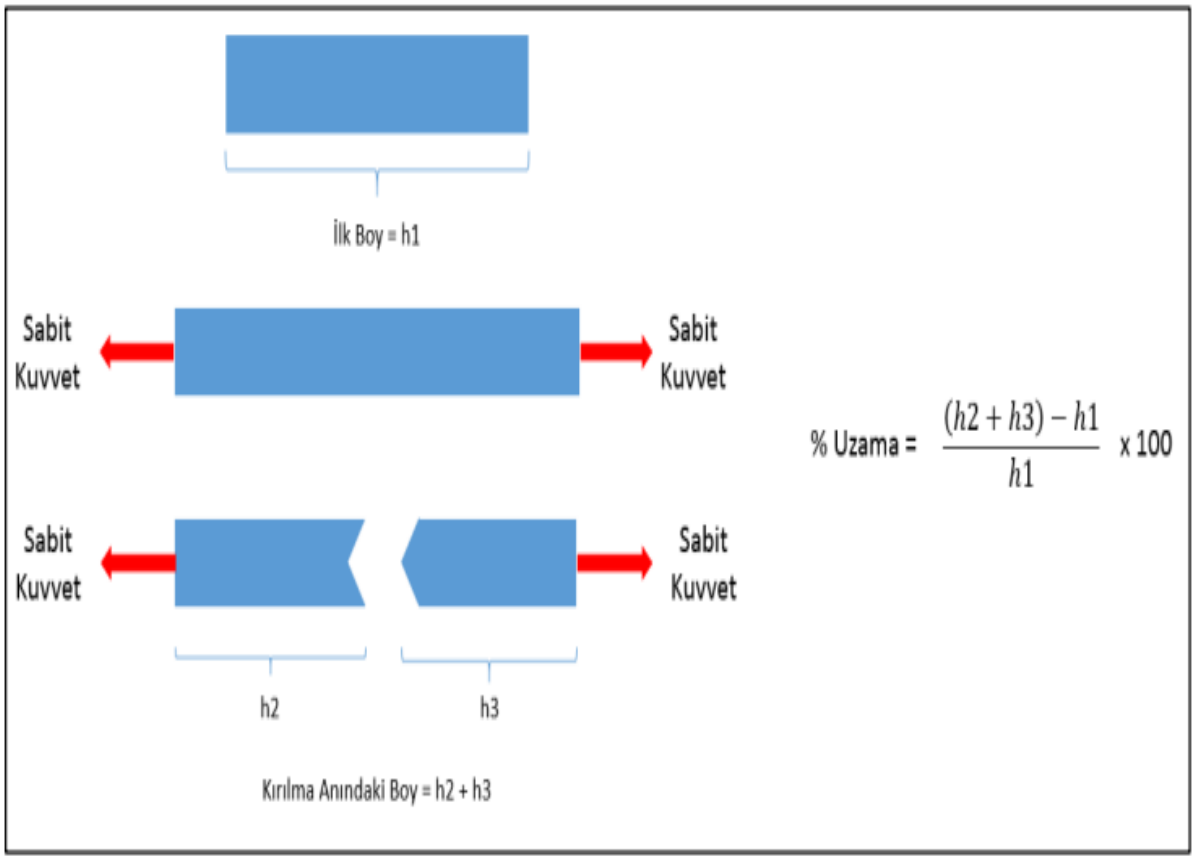
Çekme mukavemetine bakacak olursak, malzemeye Şekil 2.13'de görüldüğü gibi aynı doğrultuda ve zıt yönde iki kuvvet uygulandığı zaman malzemenin kırılmadan dayanabileceği maksimum yük miktarıdır. Burada uygulanan kuvvet malzemenin çekme mukavemetini geçtiği anda malzemede kopma meydana gelir.



Şekil 2.13: Çekme kuvveti [35].

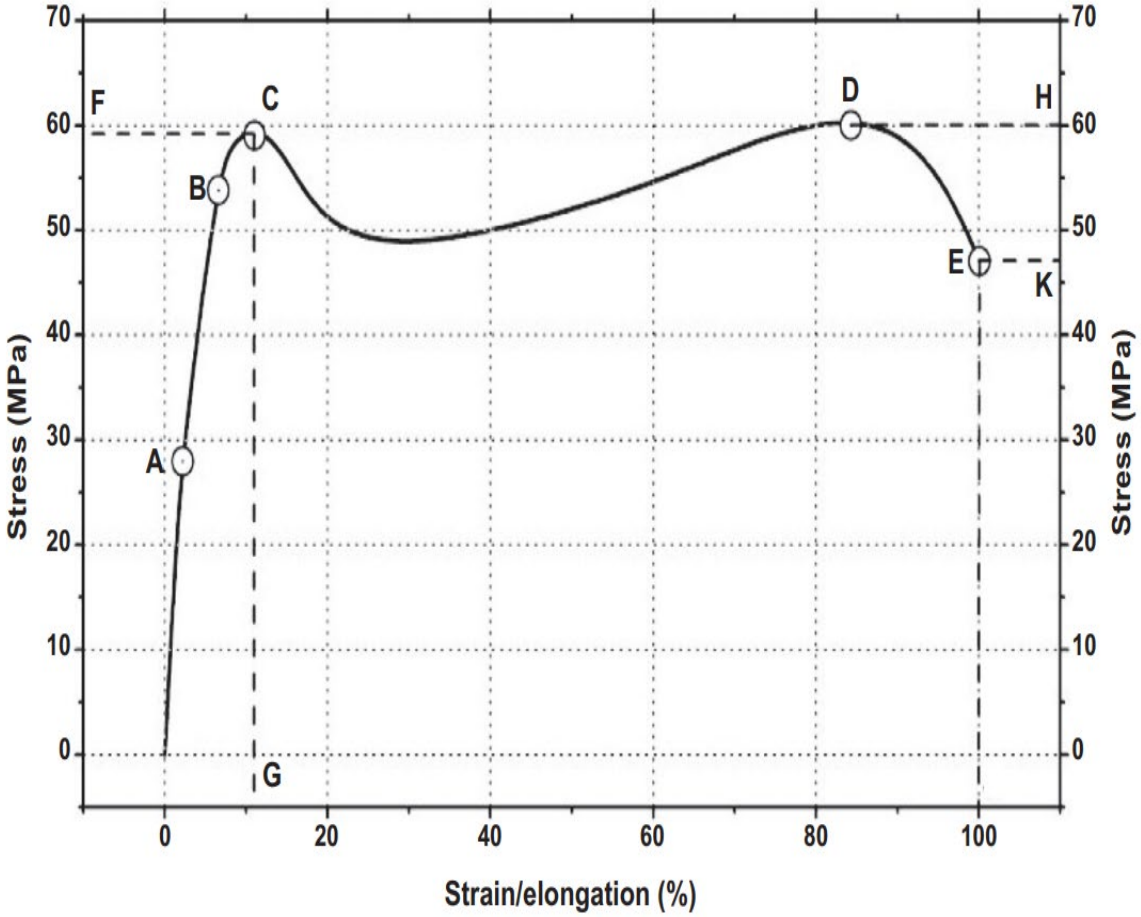
Bir polimer malzemenin çekme mukavemetine bakıldığında belirli bir uygulama için uygunluğu belirleyen en önemli özelliklerden biri olduğu görülür. Bu nedenle bazı uygulamalar için tipik olarak yüksek gerilme mukavemetine sahip polimerler tercih edilir [37].

Kopma noktasındaki birim uzamaya bakıldığında, malzemeye uygulanan çekme deneyi sırasında, malzemenin tam kopma anındaki uzama oranıdır. Şekil 2.14'de kırılma anındaki boydaki değişim gösterilmiştir. Uzama değeri yüzdesel olarak ifade edilir.



Şekil 2.14: Kırılma anında boydaki değişim [35].

Malzemenin mekanik özelliklerini matematiksel olarak ifade etmek amacıyla malzemelere çeşitli testler uygulanır. Yukarıdaki bölümde de ifade edildiği üzere bu mekanik testler standartlaştırılmıştır. ASTM D638 ve ISO 527, sert ve yarı sert plastik malzemelerin çekme özelliklerini belirlemek için standart deney prosedürünü belirtir. Bu deneyler sonucu ortaya çıkan gerilim-gerinim eğrisi malzemelerin doğrudan bir göstergesini sağlar. Şekil 2.15'deki grafik eğrisi, yarı kristal bir malzemenin gerilim-gerinim eğrisini göstermektedir [24].



Şekil 2.15: Yarı kristal bir malzemenin gerilim – gerinim eğrisi

"A" noktası malzemenin doğrusal gerilim-gerinim davranışında bulunduğu bölgenin sonu olan "orantılı sınır" olarak ifade edilir.

"B" noktası malzemenin akma dayanımın üzerine çıktığında malzemenin kalıcı olarak şekil değiştirdiği "elastik sınır" olarak ifade edilir.

"C" noktası malzemenin kalıcı olarak şekil değiştirmeden dayanabileceği maksimum yük miktarını ifade eden akma noktasıdır.

"D" noktası malzemeyi daha da uzatmak için gereken gerilim artışı belli bir noktadan sonra azalmaya başlar. Gerilmenin azalmaya başladığı bu noktada "boyun verme" durumu gerçekleşmektedir. Malzemenin kesit alanında daralma başlamaktadır. Eğri üzerinde oluşan bu nokta maksimum çekme noktasıdır. Maksimum çekme noktasından sonra kopma noktasına kadar malzeme bir miktar daha uzamaktadır.

"E" noktası kırılma noktasıdır [46].

2.2.4. Basma Özellikleri

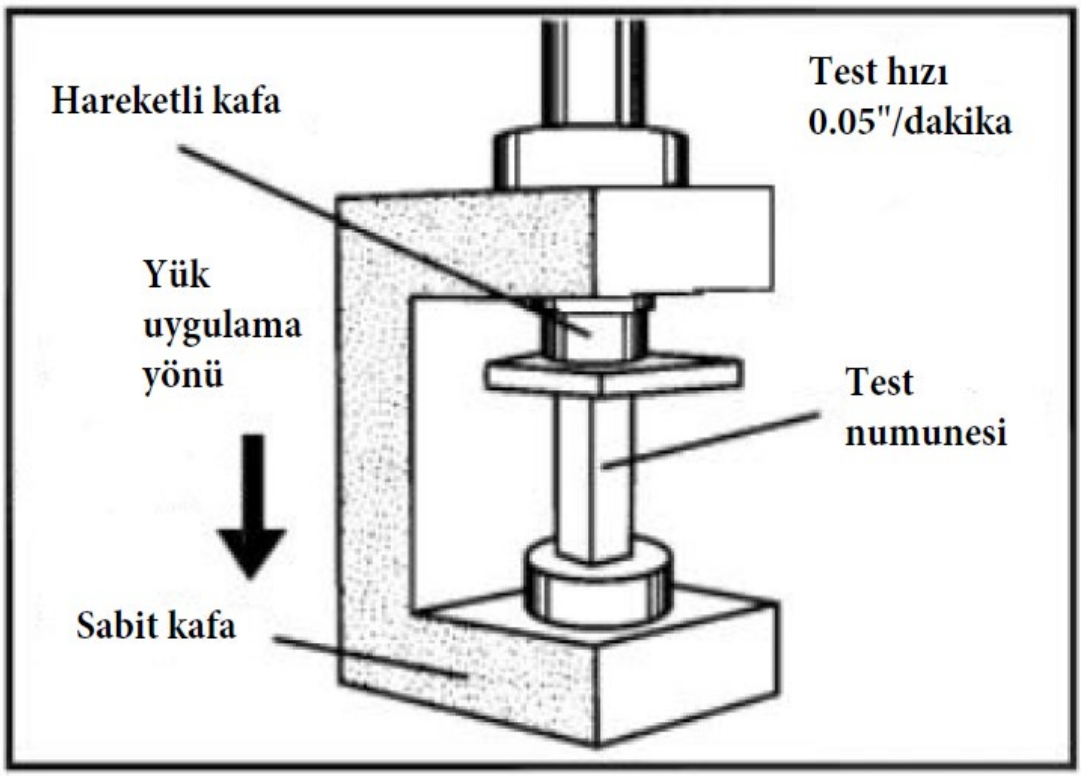
Tez çalışmasının diğer bölümlerinde de ifade edildiği üzere mühendislik malzemeleri uygulanan gerilmeler altında plastik şekil değişimine uğrama eğilimindedirler. Bilim insanlarının uygulamalarda kullandıkları bu malzemelerin hangi koşullar altında ve ne zaman kalıcı şekil değişimine uğrayacaklarını nicelik olarak bilmeleri çok önemlidir. Bir malzemenin basma mukavemeti de malzemenin kırılmadan dayanabileceği maksimum gerilmeyi ifade eder. Çekme mukavemetinin tersi olarak, malzemeye aynı doğrultuda 2 farklı kuvvetin basma etkisi oluşturacak şekilde uygulanması durumudur [35, 47].

Çekme mukavemeti gibi basma mukavemeti de uygulandıkları yüzeylere dik etki ettikleri için literatürde "normal gerilmeler" olarak adlandırılırlar [42].

Basma deneyi standartlara göre hazırlanan deney numunesinin (örneğin; ASTM tarafından geliştirilen "ASTM D695-15 Sert plastiklerin basınç özellikleri için standart test yöntemi") sabit sıcaklıkta, tek eksende malzeme kırılana kadar basılması işlemidir.

Bu deney sonucunda malzemelerin basma diyagramı elde edilir. Basma diyagramının elastik deformasyonu gösteren kısmı çekme diyagramının elastik kısmı gibidir. Malzemenin kalıcı olarak şekil değiştirmeden dayanabileceği yük miktarına ulaştığı noktadan sonra basma diyagramında da malzemede plastik deformasyon azalması meydana gelir. Basma diyagramındaki plastik deformasyonu gösteren kısım ile çekme diyagramındaki plastik deformasyonu gösteren kısmın ilk aşaması birbirini andırır. Ancak birbirleri arasındaki temel fark çekmede malzemeyi uzatmak için gereken gerilim artışı belli bir noktadan sonra azalmaya başlar, basma diyagramında ise gerilim artar [47].

Yukarıda da ifade edildiği gibi ASTM D695 sert plastiklerin basınç özelliklerini tayin etmek için kullanılan standart bir test yöntemidir. Şekil 2.16'de "Mitsubishi Chemical Advanced Materials'dan alınan test geometrisini göstermektedir.



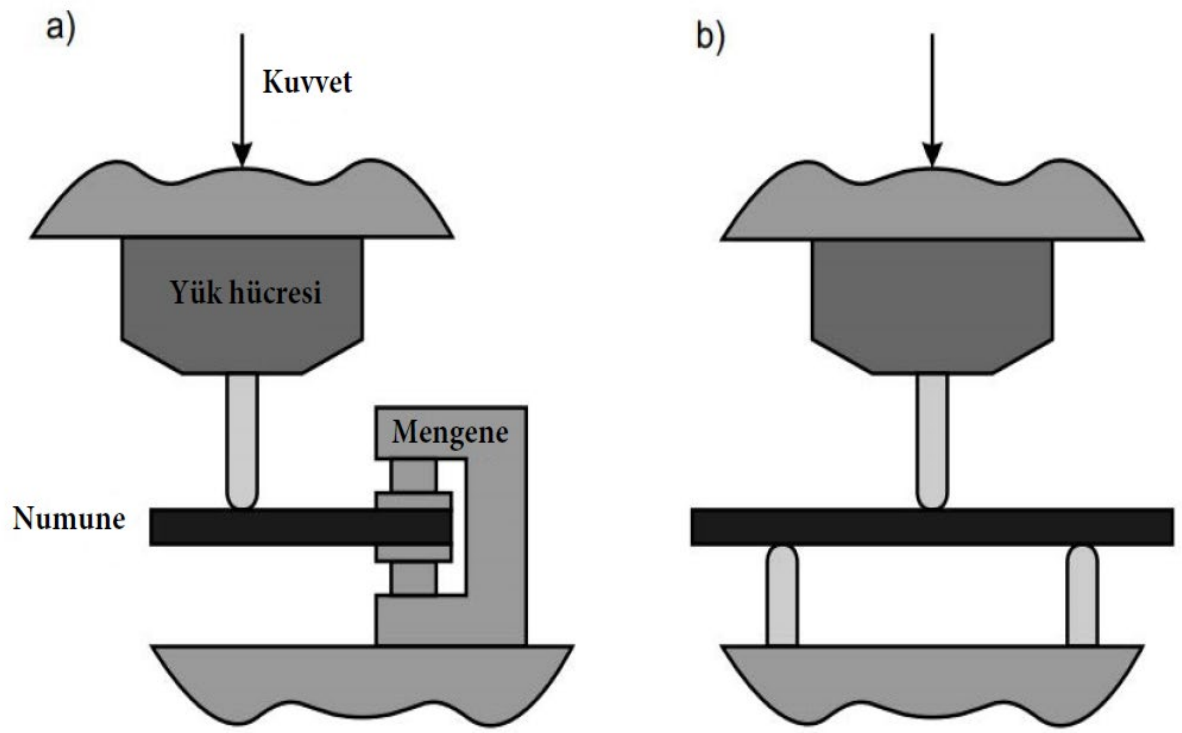
Şekil 2.16: Basma deneyi

1/2" x 1/2" x 1" numune sıkıştırma aparatına yerleştirilir ve bilinen bir yük uygulanır [48].

Plastiğin basınç dayanımı deneyi sonucunda malzemenin basma diyagramı elde edilir ve malzemenin akma ve çekme dayanımı gibi mukavemet değerleri ile kopma uzaması gibi değerler belirlenir. Bu kritik özellikler inşaat, mühendislik ve bunlara benzer birçok alan olmak üzere bu tür uygulamalarda dikkate alınması gerekir. Herhangi bir uygulamada kullanılan malzemenin güvenli ve uzun ömürlü olmasını sağlamak için yeterli basma dayanımına uygun plastiğin seçilmesi önem arz etmektedir.

2.2.5. Eğilme Özellikleri

Bir malzemenin eğilme mukavemeti yük altında kalıcı deformasyona karşı gösterdiği direnç olarak tanımlanır. Eğilme testi denilen, eğilmeye maruz kalan malzemenin mekanik özelliklerinin belirlenmesinde kullanılır. Eğme testleri ASTM D790 uluslararası standardına göre uygulanmaktadır. Bilinen en yaygın eğilme testleri Şekil 2.17'de gösterilen iki noktalı ve üç noktalı eğilme testleridir.



Şekil 2.17: Eğilme testi türleri a) iki noktalı eğme b) üç noktalı eğme [37].

2.2.6. Sertlik Özellikleri

Sertlik; esas olarak bir malzemenin yüzeyine batırılan cisme karşı durma özelliğidir. Metallerin sertlik ölçümleri, geleneksel test yöntemleri olarak bilinen Rockwells, Vickers, Brinell sertlik ölçüm yöntemleriyle yapılır. Sertlik, malzemenin kalıcı deformasyonuna karşı gösterdiği direnç olarak da ifade edilebilir. Bu nedenle plastik deformasyonla doğrudan ilişkili bir malzeme özelliğidir. Metallerin sertlik ölçümü elastik deformasyon aralığında çok küçük bir alanda gerçekleştirilir. Plastiklerin sertlik ölçümlerinde ise elastik deformasyon durumu dikkate alınmalıdır. Daha açık bir ifadeyle, basma mukavemetinin akma dayanımı çekme mukavemetinin akma dayanımından önemli ölçüde fazladır. Plastikler, yumuşak doku mekanik davranışı gösterirler, viskoelastiktirler.

Polimerlerin sertliği, malzemelerin yüzeylerine bir girinti kuvveti uygulanması ve bu girintinin oluşturduğu derinliğin ölçülmesiyle test edilir. Ağırlıklı olarak kauçuklar, elastomerler, kalıp reçineler vb. için bu testler shoremetre adı verilen test ölçüm cihazıyla yapılır. Ayrıca shoremetre termoplastik vb. malzemeler için uygulanan Shore D sertlik testi için kullanılan bir ölçüm cihazıdır.



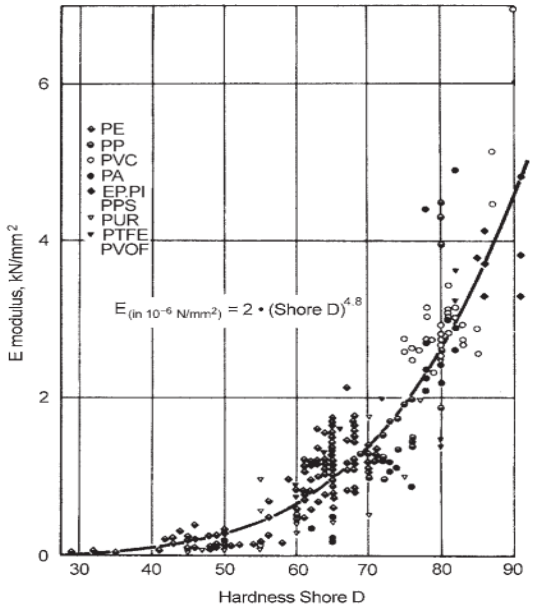
Şekil 2.18: Shore A – Shore D ölçüm cihazı

Sertlik (H) formül olarak ifade edilirse test kuvvetinin girinti yüzeyine bölünmesiyle elde edilir.

$$H = F/A \qquad (2.7)$$

F, Newton cinsinden test kuvvetini, A ise mm kare cinsinden girinti yüzeyini ifade eder. Bunun sonucunda plastikler için sertlik birimi N/mm kare olarak ortaya çıkar.

Esasen konu plastik malzemelerin mekanik özellikleri olduğunda ortaya çıkan en önemli özellik elastik şekil değiştirme durumudur. Buna bağlı olarak elastik modül ölçüsü plastikleri incelerken dikkat edilmesi gereken hususlardan biridir. Şekil 2.19 sert plastikler ve shore D ile elastik modül arasındaki yakın ilişkiyi göstermektedir.



Şekil 2.19: Shore D sertliği ile elastisite modülü arasındaki ilişki

Tablo 2.4 ise Shore testi için test prosedürlerini göstermektedir.

Tablo 2.4: Shore testi için test prosedürleri

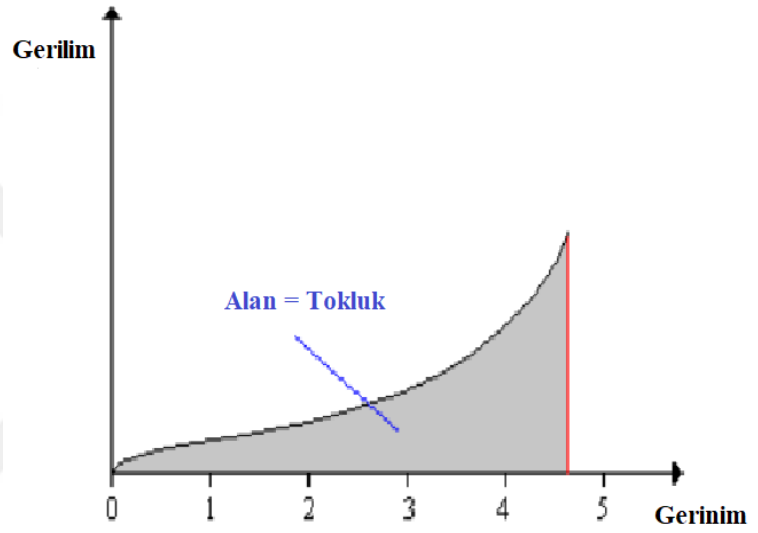
Prosedür	**Yay kuvveti F,N**	**Temas basıncı kuvveti F_A,N**	**İzaçar**	**Ölçüm Yolu *t*,mm**	**Numune kalınlığı, mm**	**Ölçüm aralığı**
Shore A	8.050	9.81	Kesik koni, koni açısı 35°	2.5	≥ 6	10-90 <20 Shore D
Shore A0 veya Shore E	8.050	9.81	Küre, çap 2.5 mm	2.5	≥ 6	<20 Shore A
Shore AM veya Shore M	0.764	2.45	30° açılı koni	1.25	≥ 1.25	10-90
Shore B	8.065	9.81	30° açılı koni	2.5	≥ 6	10-90
Shore C	44.5	49.0	Kesik koni, koni açısı 35° koni çapı 0.79 m	2.5	≥ 6	10-90
Shore D	44.5	49.0	30° açılı koni	2.5	≥ 6	30-90 >90 Shore A
Shore D0	44.5	49.0	Küre, çap 2.38 mm	2.5	≥ 6	10…90
Shore 0	8.05	9.81	Küre, çap 2.38 mm	2.5	≥ 6	10-90
Shore 00	1.111	3.924	Küre, çap 2.38 mm	2.5	…	10-90
Shore 000	1.111	…	Küre, radyus 6.36 mm	2.5	≥ 1.25	10-90
Shore 000-S	1.932	…	Küre, radyus 10.7 mm	5.0	≥ 1.25	…

2.2.7. Tokluk Özellikleri

Strese karşı zorlanma grafiği malzemenin mekanik özellikleriyle alakalı çok önemli bir bilgiyi gösterir. Gerilim – Gerinim eğrisinin altında kalan alan hesaplanarak malzemenin tokluğu bulunur. Eğrinin altında kalan alan, polimerin kırılmadan önce absorbe edebildiği mesafe kadar kuvvetin integraliyle orantılıdır.

$$\text{Alan} \propto \int F(L)dL \tag{2.8}$$

Tokluk, malzemenin deforme olana kadar absorbe edebileceği enerjinin ölçüsüdür.



Şekil 2.20: Gerilim – Gerinim eğrisinin altında kalan alan = tokluk

2.3. PLASTİKLERİN ISIL İŞLEMLERİ

Isıl işlem genel itibariyle malzemenin istenen özelliklerini elde etmek amacıyla katı haldeki parçalara uygulanan kontrollü ısıtma ve soğutma işlemidir. Talaşlı işlenebilirliği iyileştirmek, malzemenin mekanik özelliklerini iyileştirmek, sertliği ve darbe direncini iyileştirmek, elektrik ve manyetik özellikleri geliştirmek, tane yapısını olumlu yönde değiştirmek ısıl işlem uygulamanın temel amaçlarındandır [49].

Daha önceki bölümlerde de bahsedildiği üzere geri dönüştürülebilirliklerinin ve üstün performans özelliklerinin bir sonucu olarak termoplastikler, geleneksel malzemelerin yerini almaya aday malzemeler olarak gösterilmektedirler. Örneğin, önemli bir termoplastik olan PEEK şu anda havacılık uygulamaları için karbon fiber kompozitlerde matris sistemi olarak kullanılmaktadır. Bu kadar önemli uygulamalarda kullanılan termoplastiklerin mekanik

özelliklerini iyileştirmek için önemli çalışmalar yapılmaktadır. Termoplastikler genellikle yarı kristalli bir malzeme yapısına sahiptirler. Termoplastiklerin bu özelliği erime noktasındaki sıcaklıklarda tavlanarak morfolojisinin değiştirilebileceğini gösterir. Termoplastikler, mühendislik bileşenleri arasında yaygın bir uygulama alanına sahip olacaksa bu malzemelerin mekanik özelliklerini iyileştirmek, gerilim giderme işlemleriyle düşük malzeme performansını ortadan kaldırmak, ürünün genel kalitesini arttırmak ve malzemenin ömrünü arttırarak çevreye duyarlı olmalarını sağlamak önemli bir husustur [7].

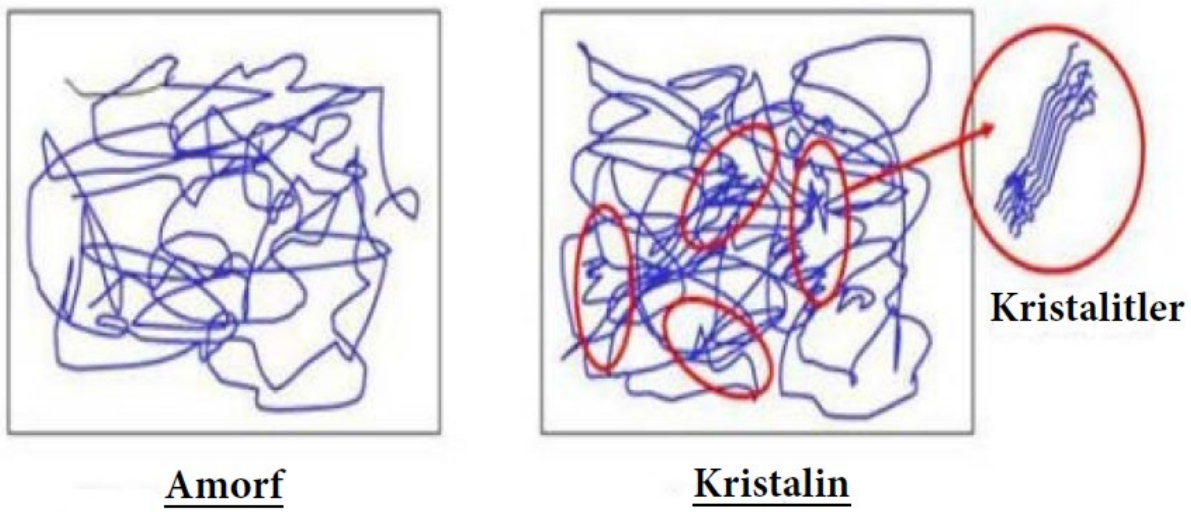
İşlenebilirliği kolaylaştıran ve malzeme özelliklerini değiştiren tavlama, bunu malzemenin kopmadan önce çekme gerilmesi altında plastik deformasyonunun sürdürebilirliğini arttırarak yapar. Plastik malzemeler, endüstriyel tavlama fırınlarında yeniden kristalleşme sıcaklığının üzerinde ısıtılırlar ve bu şekilde gerilim giderme işlemi gerçekleştirilir. Son olarak yeniden kristalleşme sıcaklığının üzerinde ısıtılan malzemeler tekrar soğutulur ve tavlama işlemi tamamlanmış olur. Bu endüstriyel tavlama fırınları doğru sonucu elde edebilmek için hassas sıcaklık ve zaman kontrolü sağlayan sistemlerden oluşmalıdır.

Şekil 2.21'de 650 fahreneit sıcaklık kapasitesine sahip bir endüstriyel tavlama fırını gösterilmektedir.



Şekil 2.21: Endüstriyel tavlama fırını

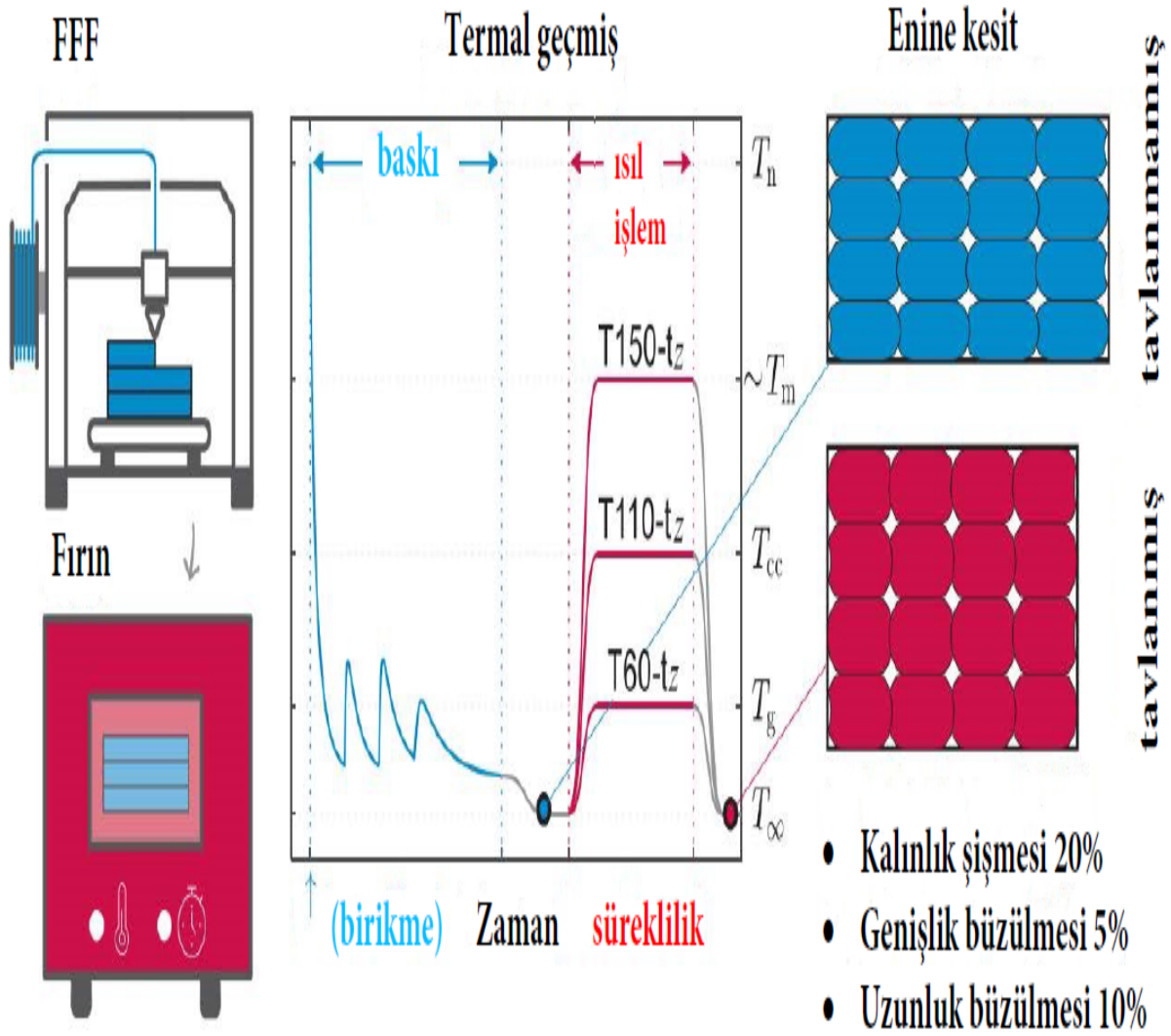
Son zamanlarda literatürde termal tavlamanın malzeme performası üzerindeki etkileri ile alakalı önemli çalışmalar bulunmaktadır. Bu çalışmalardan bahsetmeden önce polimerlerde ısıl işlemi daha iyi kavrayabilmek için polimerik yapılarda moleküler düzenin türlerine odaklanmak gerekir. Bu türlerden yaygın olarak bilinenleri amorf ve yarı kristalin yapılardır. Şekil 2.22'de bu yapılara ait görsellere yer verilmiştir [50].



Şekil 2.22: Amorf ve yarı kristal yapı

Amorf yapıya sahip bir polimer sıcaklığa bağlı olarak camsı, kauçuksu ve eriyik halde bulunabilir. Düşük sıcaklıklarda camsı halde bulunan amorf yapıya sahip bir polimer sert ve kırılgandır. Amorf yapıya sahip bir polimer camsı özelliklerini kaybedip viskoz özellikler kazanmaya başladığı sıcaklık sınırı olarak kabul edilen camsı geçiş sıcaklıklarının (Tg) üzerinde ısıtılarak kauçuk özellikleri gösterir. Burada T_g polimerik malzemelerin termal performansıyla alakalı ayırt edici özelliğidir. Aşağıdaki şekilde polimerik malzemelerin morfolojik yapılarının sıcaklığa bağlı olarak grafiksel durumu gösterilmektedir [51].

Son zamanlarda literatürde termal tavlamanın malzeme performası üzerindeki etkileri ile alakalı önemli çalışmalar bulunmaktadır. Wangwang Yu ve diğerleri tarafından 3D baskılı polimer malzemelerde termal tavlamanın malzeme performansı üzerine çalışma yapılmıştır. Çalışmada hem yarı kristalli hem de amorf yapıya sahip polimerler Tg sıcaklığının üzerinde farklı süre ve sıcaklıklarda tavlanmışlardır. Tavlama sonrası polimerlerin eğilme mukavemeti ve young modülü maksimum %10 oranında artış göstermiştir. Yapılan çalışmada bu artışın temel sebebi olarak kullanılan malzemelerdeki kristalleşmenin gelişimi gösterilmiştir. Çalışmanın grafiksel özeti Şekil 2.23'de gösterilmiştir [10].

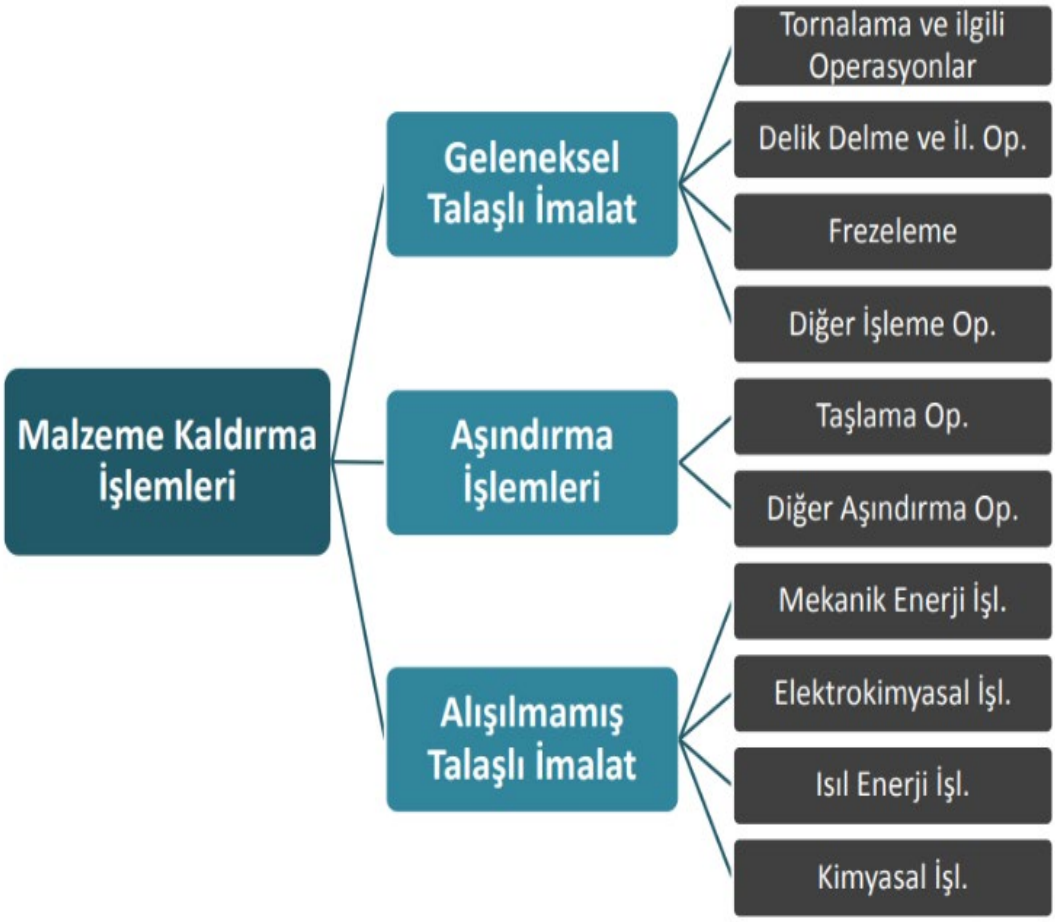


Şekil 2.23: Polimerik malzemelerin morfolojik yapılarının sıcaklığa bağlı olarak grafiksel durumu

Weihua Wang ve diğerleri [11] tarafından yapılan çalışmada tavlama işleminin parametreleri olan tavlama sıcaklığı, tavlama süresi ve soğutma hızının PP'nin mekanik özelliklerindeki değişimi ve yüzey kalitesi üzerindeki etkilerini incelemişlerdir. Çalışma sonucunda ancak doğru ve yeterli tavlama sıcaklığında malzemelerin ikincil kristalleşme evresine geçtiği gözlemlenmiştir. Çalışmadaki tüm tavlanmış numunelerin, tavlanmamışlara oranla kristalliği daha fazla olduğu gözlemlenmiştir. Ayrıca tavlama sonrasında soğutma hızının artması kristallikte azalma meydana getirmiştir. Çalışmada, plastik parçaların yüzey sertliğinin temel olarak yüzey tabakasının kristalliğine bağlı olduğu, yüzey pürüzlülüğünün ise sadece kristalliğe değil, artık gerilmesine de bağlı olduğu bilgisine yer verilmiştir. Tavlama proses parametrelerinin değişmesi ile çekme ve darbe dayanımlarında da değişimler göstermiştir.

2.4. PLASTİKLERİN TALAŞLI İMALATI

Talaşlı imalat, keskin kesici takımlar kullanılarak iş parçası üzerinden kayma deformasyonu ile talaş şeklinde malzeme kaldırılarak yeni yüzeyler açığa çıkartılma işlemidir.



Şekil 2.24: Malzeme kaldırma işlemlerinin sınıflandırılması [52].

Son zamanlarda sanayinin hızla gelişmesi ve bunun neticesinde çevrenin kirlenmesinin doğrudan bir sonucu olarak doğal kaynakları korumaya yönelik çaba giderek artmaktadır. Bu nedenle, geri dönüşüm yerine üretilen ürünlerin daha uzun ömürlü olmaları gerektiği düşünülmektedir. Yüksek performans için kaliteli ürünler üretmenin gerekliliği doğmuştur [13].

Plastik malzemeler , son yıllarda sanayinin hızla gelişmesiyle birlikte endüstrinin her alanında kullanılır hale gelmişlerdir. Medikal, optik, elektronik, hassas makineler gibi alanlarda üstün özelliklerinin vermiş olduğu avantaj neticesinde kullanımları artmıştır. Bu tür hassasiyet beklenen alanlarda kullanılan plastik parçalar, kalıplama işlemleri yerine talaşlı imalat yöntemleriyle üretilmelidirler [14].

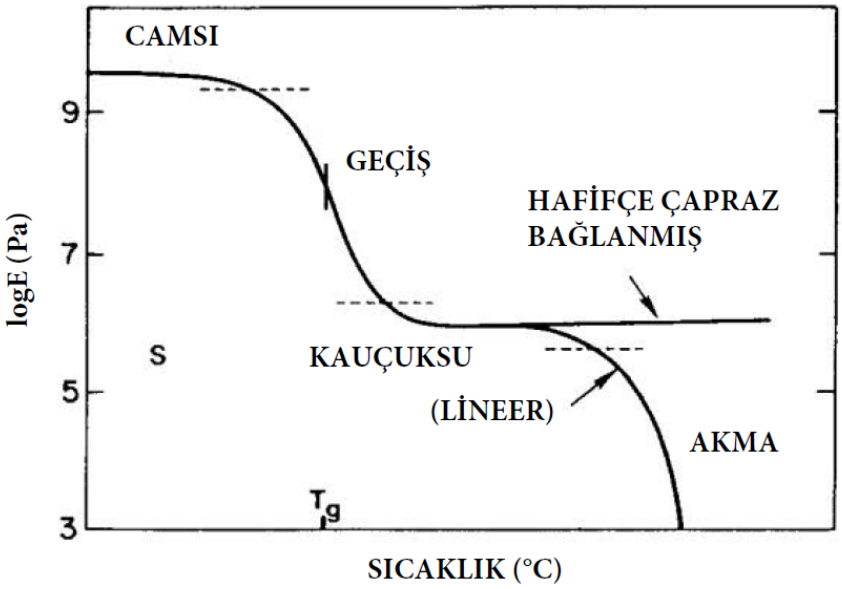


Şekil 2.25: Plastik işleme uygulamaları

2.4.1. Polimer Özelliklerinin İşleme Üzerindeki Etkileri

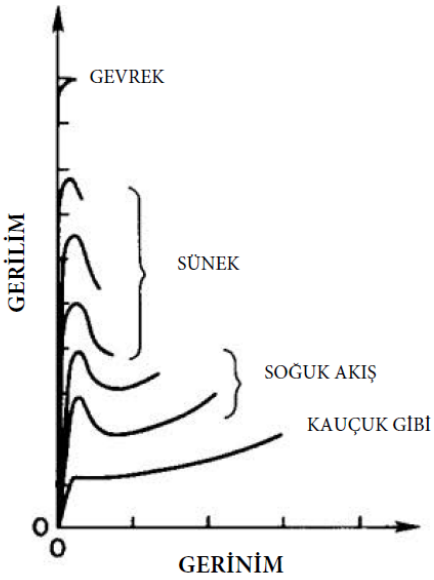
Daha önceki bölümde camsı geçiş sıcaklığının polimerik malzemelerin termal performansıyla alakalı ayırt edici bir özellik olduğunu yazmıştık.

Carr ve Feger [15] tarafından yapılan bir çalışmada zaman sabit tutulmuş, geniş bir aralıkta bir polimerin sıcaklığa bağlı hacmindeki değişim ele alınmıştır ve polimerlerin üç farklı davranış gösterdikleri gözlemlenmiştir. Bu davranışlar Şekil 2.26'da gösterildiği gibi camsı hal, kauçuk hal ve akış halidir. Camsı hal ile diğer haller arasındaki geçiş camsı geçiştir. Camsı geçiş görüldüğü üzere keskin bir geçiş olduğundan bir deney sırasında numuneyi bu geçiş sınırları içerisinde tutmak oldukça zordur.



Şekil 2.26: Sıcaklığın bir fonksiyonu olarak hacim modülü

Carr ve Feger yaptığı çalışmada aynı zamanda, kesme bölgesinin sıcaklığının camsı geçiş sıcaklığı T_g'nin üzerine çıktığı durumda, malzeme sünek bir halden uzaklaştığı için iyi bir yüzey kalitesi elde edilebileceği bulunmuştur. Bunun nedeni olarak Şekil 2.27'de gösterildiği üzere Tg'nin üzerinde malzemenin, düşük akma mukavemeti ile kauçuk benzeri bir durumda olmasıdır. Bunun tam aksine yapılan çalışmada T_g'nin altında camsı halde bulunan polimerde pürüzlü bir yüzey elde edilmiştir. Polimerlerin mekanik özelliklerini karakterize etmenin en önemli yöntemi olarak gerilim – gerinim eğrileri oluşturmak olduğundan bahsedilmiştir [15].



Şekil 2.27: Polimerlerin mekanik özelliklerini karakterize eden gerilim – gerinim eğrileri

Sonuç olarak bir malzemenin fiziksel ve kimyasal özelliklerine bağlı olarak işlemeye karşı vermiş olduğu tepki yüzey pürüzlülüğü, yüzey kalitesi ve ölçüsel doğrulukları üzerinde etkili bir faktördür.

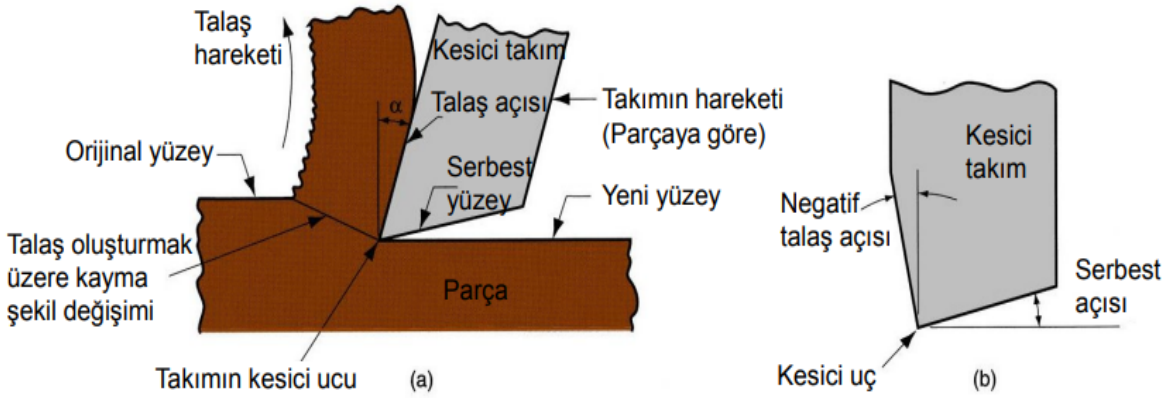


Şekil 2.28: Endüstriyel uygulamalarda kullanılmak üzere işlenmiş PEEK malzemeler

2.4.2. Takım Geometrisi ve İşleme Parametrelerinin Etkileri

Talaş kaldırma işlemi sistematik olarak kesici takım ile iş parçası arasındaki izafi hareketlere, kullanılan kesici takımın geometrisine bağlıdır.

Şekil 2.29'da talaş kaldırma işleminin kesit görünüşü, talaş açısı, boşluk açısı görülmektedir [52].

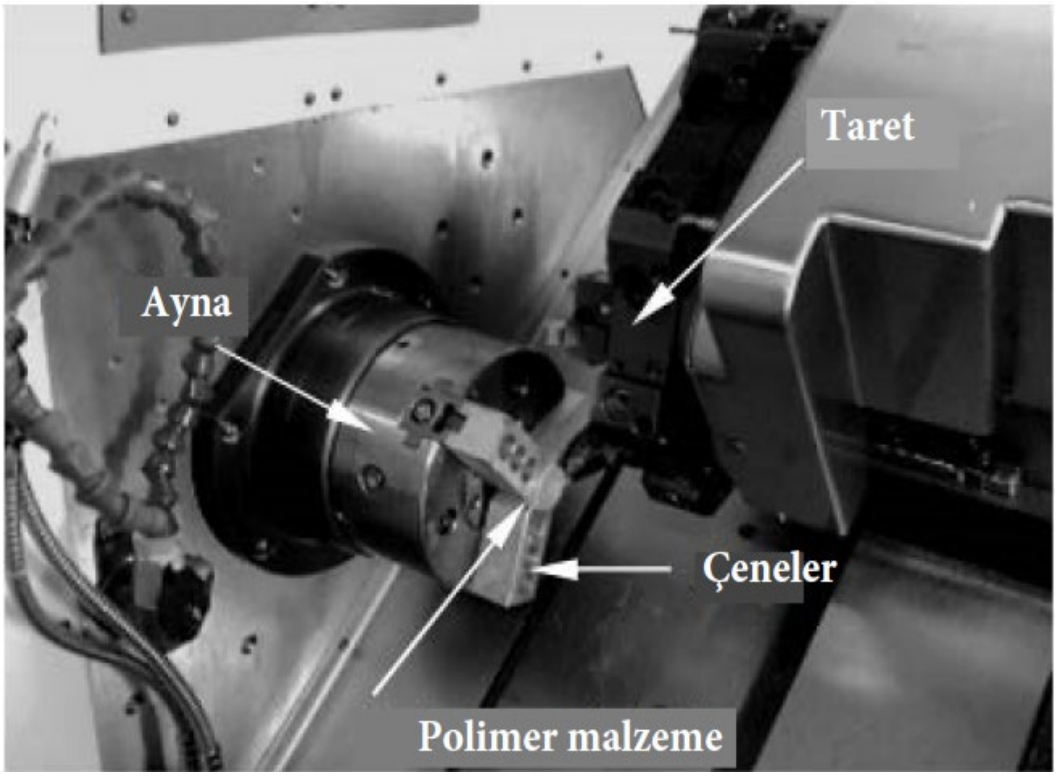


Şekil 2.29: Talaş kaldırma işlemi a) talaş kaldırma işleminin kesit görünüşü (pozitif talaş açısı)

b) negatif talaş açısına sahip kesici takım

Jagtap ve diğerleri [16] tarafından yapılan bir çalışmada hassasiyet ekipmanları, eletronik ve optik gibi alanlarda üstün özellikler gösteren plastiğin bu alanlardaki yüksek boyutsal doğruluk

ve iyi yüzey kalitesi ihtiyacı nedeniyle kalıplama işlemleri yerine talaşlı imalat işlemleriyle üretilmesi gerektiğine dikkat çekmiştir. Çalışmasında iki plastik türü olan Naylon ve Polipropileni kullanmıştır. Çalışmanın ana odak noktası işleme parametrelerinin naylon ve Polipropilenin yüzey paralelliği üzerindeki etkisini incelemektir. Çalışmada yapılan tornalama işlemi için kullanılan parametreler ilerleme hızı, kesme hızı, kesme derinliği ve kesici uç boşluk açısıdır.



Şekil 2.30: Çalışmada kullanılan CNC tornalama işleminin kurulum görünümü

Naylon ve Polipropilen malzeme üzerinde uygulanan bu deneysel çalışmanın neticesinde, ilerleme hızının bu iki polimer malzeme için de etkili bir parametre olduğu görülmüştür. Hassas tornalama için kullanılan kesici takımlar arasında, daha büyük kesici uç boşluk açısına sahip olan takımın, daha küçük kesici uç boşluk açısına sahip takıma göre daha iyi yüzey kalitesi çıkardığı sonucuna varılmıştır. Çünkü kesici uç boşluk açısı artarsa, kesici takım ile iş parçası arasında daha az sürtünme olur. Kesme derinliğinin makaledeki sonuçlarının etkilerine bakıldığında ise minimum kesme derinliği durumunda işleme sonuçları daha yüksek kesme derinliğine göre daha iyi sonuçlar vermiştir. Ayrıca çalışma sonuçlarından bir diğeri Polipropilenin yüzey kalitesi sonuçlarının, naylonun yüzey kalitesi sonuçlarından daha iyi olduğunu göstermektedir. Bu durumda bir önceki bölümde bahsedilen malzeme özelliklerinin işleme özellikleri üzerindeki etkisini göstermektedir.

3. YÖNTEM

Malzeme ve yöntem bölümünde, mühendislikte birçok pratik uygulamada tercih edilen ve deneylerde kullanılacak en uygun malzemelerin seçimine, bu malzemelerin fiziksel ve kimyasal özelliklerine ve kullanım alanlarına yer verilecektir. Daha sonraki aşamada seçilen malzemeler için deneysel metodoloji belirlenecektir.

Bu metodolojinin ilk aşaması, seçilen malzemeler için ikinci aşamadaki deneyler sonrası yapılacak ölçüm sonuçlarını doğru bir şekilde elde edebilmek için en uygun tasarımları belirlemektir.

Üçüncü aşamada bu malzemelerin işlenebilirliğini iyileştirebilmek için seçilen malzemeler Elektromag M6040 P Kuru Hava Sterilazatöründe gerilim giderme ve tavlama işlemine tabii tutulacaktır.

Dördüncü aşamada seçilen malzemelerin talaşlı imalatı için Autodesk Fusion360 CAD/CAM programında deneysel numunelerin CAM programları hazırlanacaktır.

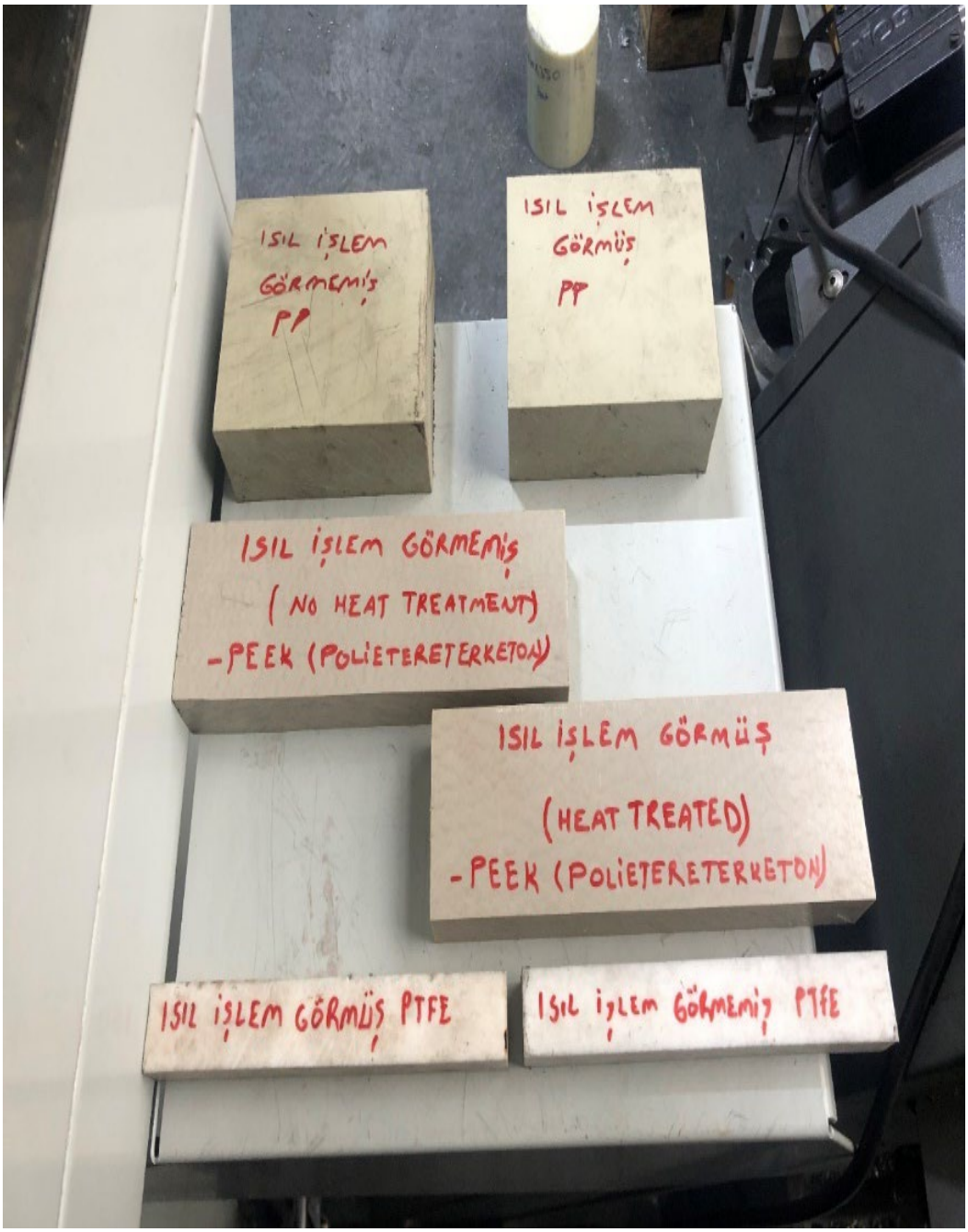
Beşinci aşamada CAM programları hazırlanan ve işleme parametreleri belirlenen deneysel numunelerin (ısıl işlem görmüş ve ısıl işlem görmemiş) Haas UMC-750 | 5-Eksenli Freze tezgahında talaşlı imalatı yapılacaktır.

3.1. DENEYSEL NUMUNELER VE ÖZELLİKLERİ

Çalışmada iş parçası malzemeleri olarak 3 farklı polimer tipi seçilmiştir. Bu polimerler PEEK, PP, PTFE'dir. Bu bölümde deneylerde kullanılan polimer malzemelerin fiziksel ve kimyasal özellikleri, kullanım alanları, avantajları, dezavantajlarıyla alakalı bilgilere yer verilmiştir.

Tablo 3.1: Deneylerde kullanılan stok malzeme ölçüleri

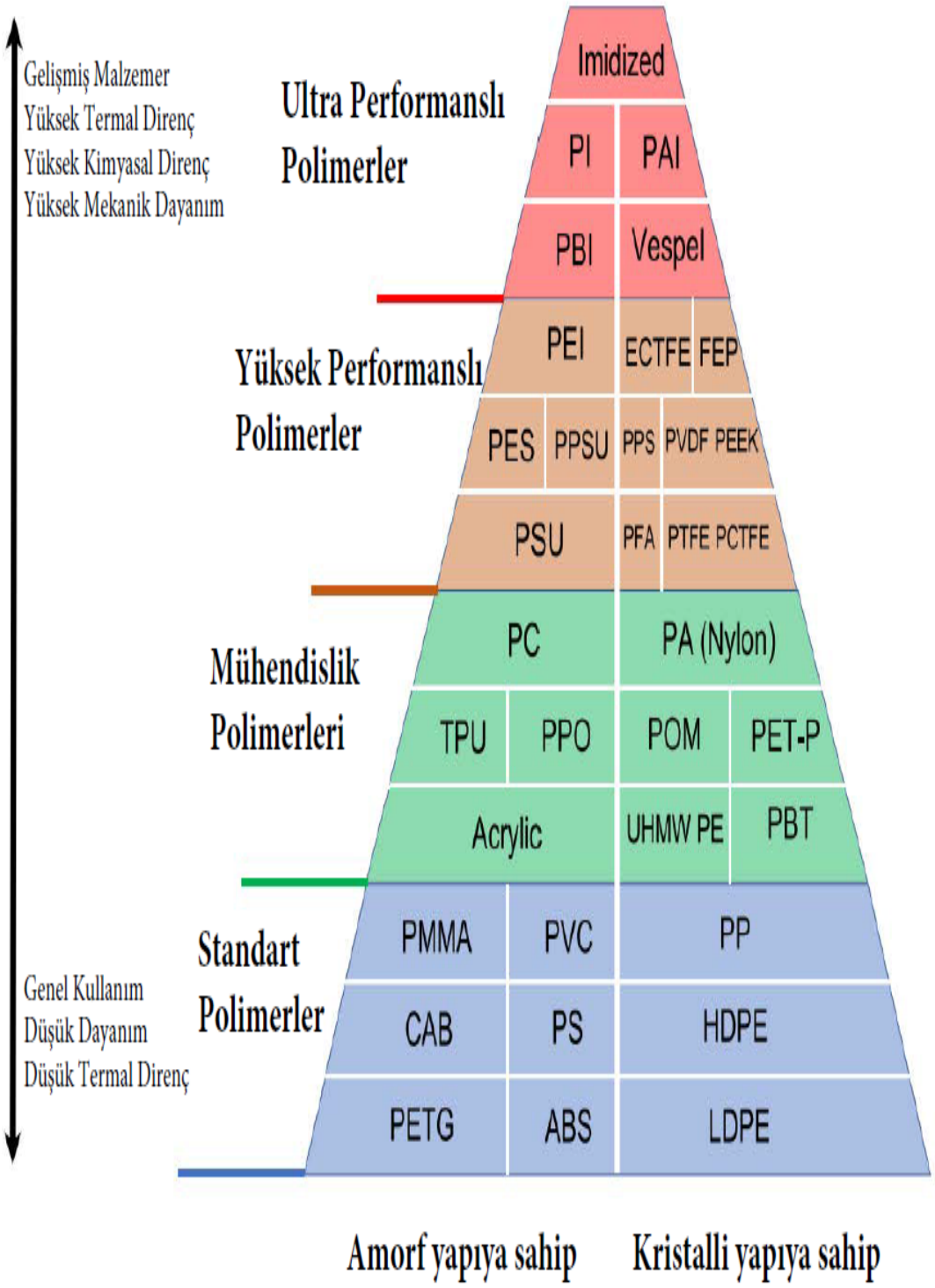
	X	Y	Z
PEEK	230 mm	70 mm	30 mm
PP	135 mm	115 mm	50 mm
PTFE	190 mm	27 mm	20 mm



Şekil 3.1: Deneylerde kullanılan malzemeler

3.1.1. Polietereterketon (PEEK)

PEEK yarı kristalli bir termoplastiktir. Kimyasal malzemelere karşı direnç gösterebilen ve 260° sıcaklıklara kadar sürekli olarak çalışabilen bir yapıya ve gelişmiş mekanik özelliklere sahiptir. Bu gelişmiş mekanik özellikler aşınma direnci, biyouyumluluk, yüksek kimyasal direnç, hafiflik, geri dönüştürülebilirlik, CNC işlemeye uygunluk olarak açıklanabilir. Şekil 3.2'de polimer malzemelerin sıcaklık, kimyasal ve mekanik özelliklerine göre sıralandırılması gösterilmiştir.



Şekil 3.2: Polimer malzemelerin sıcaklık, kimyasal ve mekanik kararlılıklarına göre sınıflandırılması [53].

PEEK malzemenin fiziksel ve kimyasal özellikleri: PEEK polimerler arasında en yüksek sıcaklık dayanımına sahip plastiktir. 260° derecede 5000 saat kullanımda uzun süreli dayanıklılığa sahiptir [54].

Tablo 3.2: PEEK malzemenin ısı direnci ve ısı kararlığı

Uzun süreli sıcaklık dayanımı	260°C
Kısa süreli sıcaklık dayanımı	300°C
Camsı geçiş sıcaklığı	143-155°C
Erime noktası	341°C
Yük altında deformasyon sıcaklığı	162°C

Plastik malzemelerin mekanik yüke dayanıklı olacak şekilde tasarlandığı uygulamalarda polimerlerin mekanik özellikleri önemlidir.

Tablo 3.3: PEEK polimerinin mekanik özellikleri

PEEK Polimerinin Mekanik Özellikleri	
Sertlik (Shore D)	62.0 – 89.0
Çekme Mukavemeti	65.0 – 120 MPa
Kopma Noktasındaki Birim Uzama	1.5 – 110 %
Eğilme Mukavemeti	86.2 – 380 MPa
Akma Noktasındaki Uzama Yüzdesi	4 – 45.0 %
Elastisite Modülü	2.14 – 7.58 GPa
Eğilme Modülü	2.48 – 24.0 GPa

PEEK kullanım alanları ve uygulama örnekleri: PEEK polimeri, mukavemet özellikleri, termal özellikleri, kimyasallara karşı dayanımı, aşınma dayanımı, elektrik özellikleri, ışınlara karşı dayanımı ve diğer özellikleri sebebiyle günümüzde endüstride birçok alanda kullanılmaktadır. Literatür taraması bölümünde de görüldüğü üzere özellikle dental alanda PEEK malzemesinin kullanımı artmıştır. Bu bölümde PEEK polimerinin kullanım alanları ve uygulama örnekleri resimlerle anlatılmıştır. Şekil 3.3'de PEEK'in kullanım alanları gösterilmiştir.



Şekil 3.3: PEEK'in kullanım alanları

PEEK malzemelerin yüksek erime noktasına sahip olması parça üretimini zorlaştırır. Fakat yapılan araştırmalarda PEEK+%30 karbon fiber ilavesi, PEEK malzemenin basma mukavemetini ve tokluğunu arttırır, genleşme oranını düşürür. Aynı zamanda karbon fiber ilavesi termal iletkenliği iyileştirir. Bu yüzden yatak malzemesi olarak kullanıldığında önemli derecede verim alınabilir. PEEK+%30 cam fiber katkılı duruma baktığımızda ise 150°C'nin üzerindeki sıcaklıklarda dayanıklılığının öneminin olduğu uygulamalarda kullanım için idealdir [3].

Endüstriyel PEEK uygulamalarına odaklandığımızda, havacılık endüstrisinde motor parçaları, sürtünme temas malzemeleri, uçakların dış parçaları, kablo koruması için kablo kanalları örnekleri mevcuttur. Şekil 3.4'de iç sabitleme sistemi olarak kullanılan PEEK malzemeden üretilen hedefleme kolu parçası gösterilmektedir.



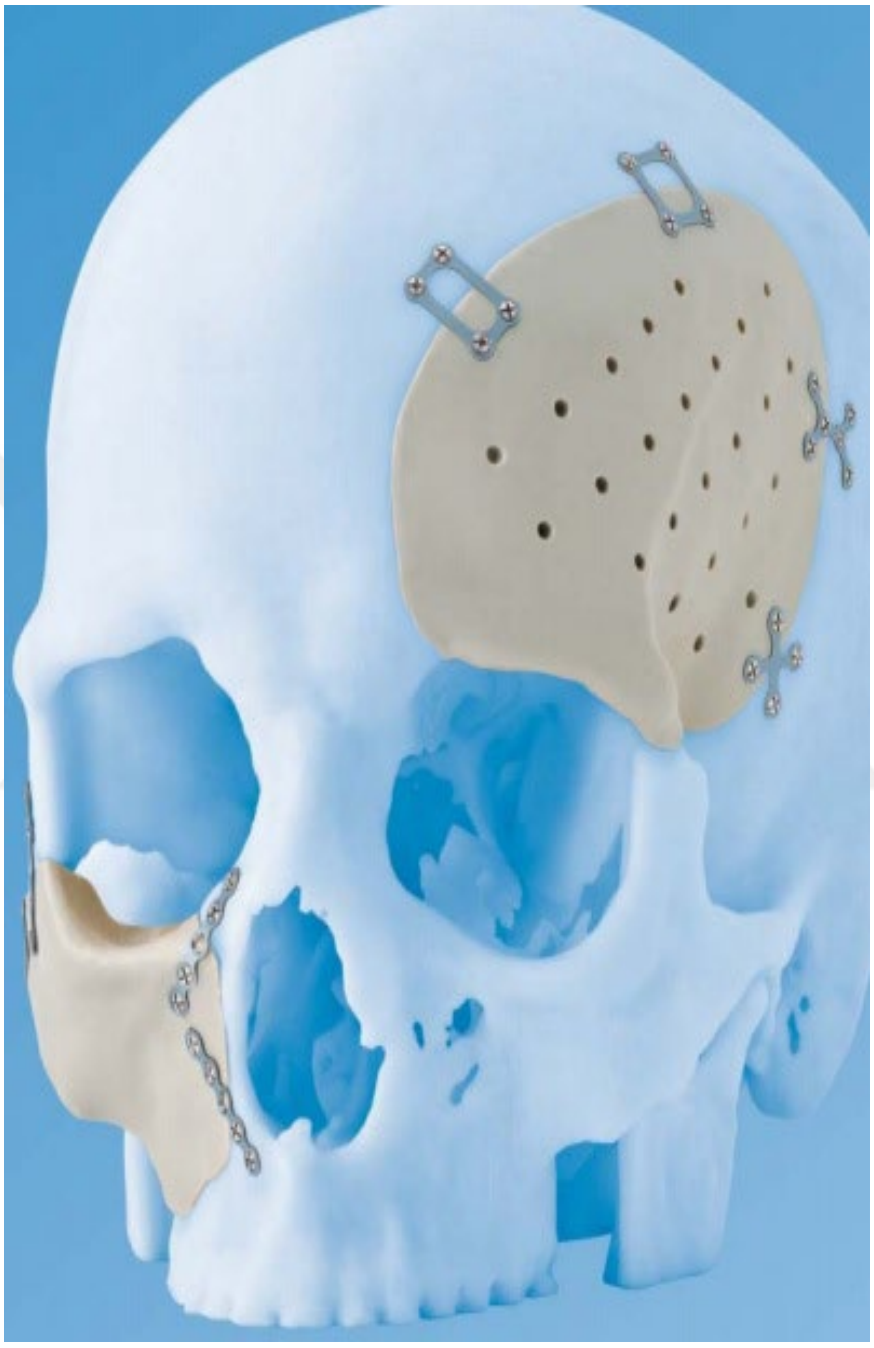
Şekil 3.4: PEEK malzemeden üretilen hedefleme kolu [54].

Medikal ve sağlık uygulamalarına baktığımızda dental şırınga tutma kolları, steril kutular, yük taşıyan implantlar vb. uygulamaları mevcuttur. Özellikle biyouyumluluk özelliği, gıda artıklarının kimyasallığına karşı gösterdiği direnç sayesinde diş tedavisi uygulamalarında kullanımı ve buna dair araştırmalar oldukça fazladır.



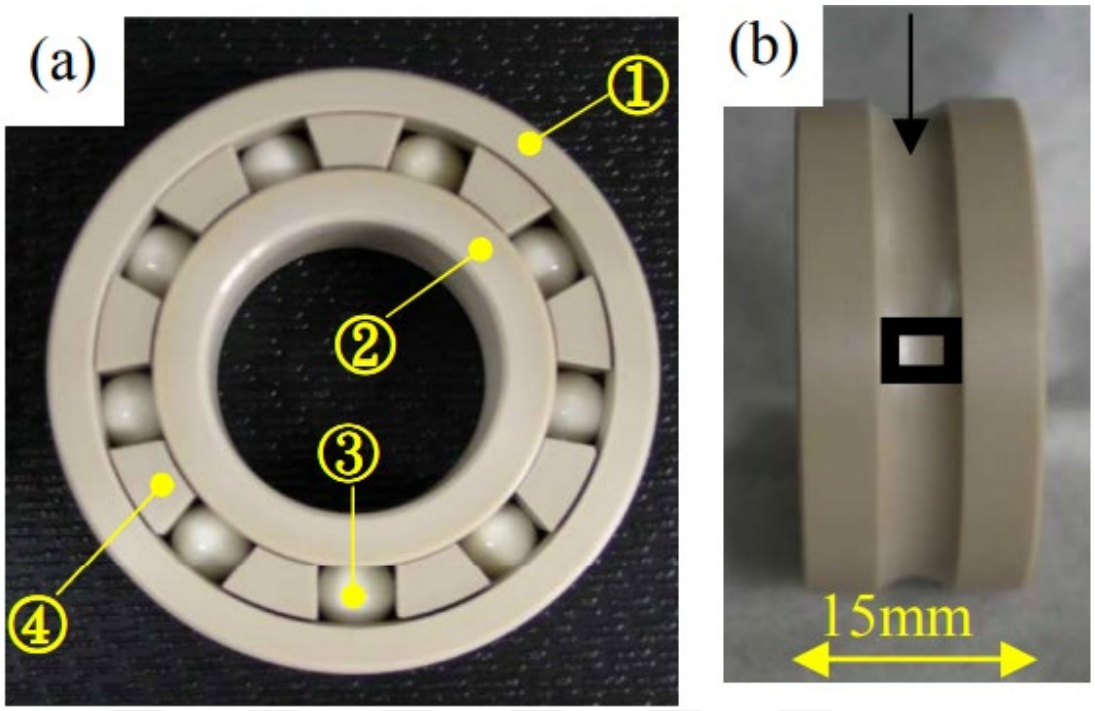
Şekil 3.5: PEEK malzemenin dişçilik alanında kullanımı A) geçici diş dayanakları, B) diş implantları [55].

Özellikle kafatasının bütünlüğünü daha iyi hale getirmek ve beyin dokusunu korumak için araştırmalar PEEK malzemenin insan kemiklerine benzerliğiyle alakalı en iyi performansı gösterdiği görülmüştür.



Şekil 3.6: PEEK malzemenin kranioplasti uygulamalarında kullanımı

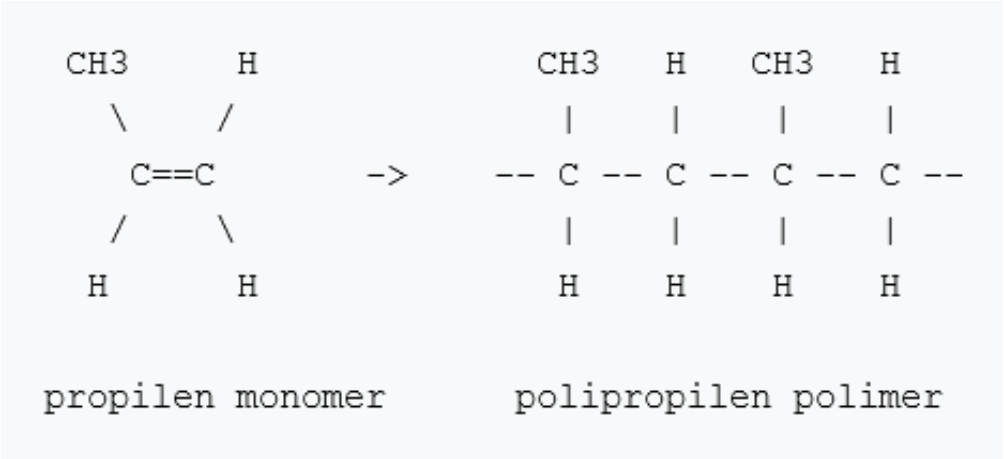
Otomotiv sektöründe PEEK malzemenin kullanılmasıyla alakalı yapılan araştırmalarda ağırlık ve yakıt tüketiminin düştüğü, CO2 emisyonlarının, gürültünün ve titreşimin azaldığı görülmüştür. PEEK malzeme otomotiv sektöründe piston kolları, pul, dişli, conta ve keçe, rulman muhafazaları gibi parçalarda metallerin yerini almaya başlamıştır.



Şekil 3.7: (a) Torna işlemi ile üretilmiş radyal bilyalı rulman; (1) dış bilezik, (2) iç bilezik, (3) yuvarlanma elemanları, (4) kafes (b) 15 mm kalınlık [56].

3.1.2. Polipropilen (PP)

Polipropilen, kimyasala ve ısıya karşı dirençli, düşük yoğunluğa sahip, kolay bir şekilde kaynak edilebilen, nem emilimi düşük, çekme dayanımı yüksek, elektrik yalıtım özelliği bulunan yarı-kristal bir termoplastiktir. PP ayrıca büyük boyutsal kararlığa sahiptir ve işlenmesi kolay bir malzemedir. Şekil 3.8'de gösterildiği gibi propilenin katalitik polimerizasyonu ile oluşur [3].



Şekil 3.8: Propilenin katalitik polimerizasyonu

Ayrıca yanıcı olması, boyaması zor olması, UV ışığında bozunur olması ve yüksek termal genleşme katsayısı PP malzemenin dezavantajları olarak gösterilir.

PP malzemenin fiziksel ve kimyasal özellikleri: Termoplastiklerin özellikleri hakkında bilgi sahibi olmak bir uygulama için en doğru termoplastik seçimini yapmaya yardımcı olur. Polipropilenin bazı temel özellikleri, test metotları Tablo 3.4'de gösterilmiştir.

Tablo 3.4: PP'nin temel özellikleri ve test metodları

Genel Özellikler	**Test Metodu (ISO)**	**Test Metodu (ASTM)**	**Değer**
Özgül Ağırlık	1183	D792	0.92 gr/cm3
Su emme (doymuş)	62	D570	% 0.1
Mekanik Özellikleri	**Test Metodu (ISO)**	**Test Metodu (ASTM)**	**Değer**
Çekme Dayanımı	527	D638	300 kg/cm2
Elastik Modül	527	D638	1250 MP3
Kopma Uzaması	527	D638	>50 %
Darbe Dayanımı	180	D256	7 kj/m2
Sertlik	868	D2240	70 (shore d)
Termal Özellikleri	**Test Metodu (ISO)**	**Test Metodu (ASTM)**	**Değer**
Maks. Çalışma Sıcaklığı	-	-	100°C
Min. Çalışma Sıcaklığı	-	-	5°C
Isı Genleşme Katsayısı	11359	E831	1.6x10^-4 °C-1
Elektriksel Özellikleri	**Test Metodu (ISO)**	**Test Metodu (ASTM)**	**Değer**
Dielektriksel Dayanımı	60243	D149	55 kv/mm

PP kullanım alanları ve uygulama örnekleri: PP malzeme özellikle sahip olduğu düşük yoğunluk ve işlenme kolaylığı sebebiyle birçok uygulamada kullanılmaktadır. Makine

parçaları, paketleme, bez çantalar, şişe kapakları, tıbbi ekipmanlar, ağırlık azaltma için otomotiv parçalarının birçoğunda PP malzeme kullanılması yaygın hale gelmiştir.



Şekil 3.9: PP malzemeden üretilmiş otomotiv parçası [57].

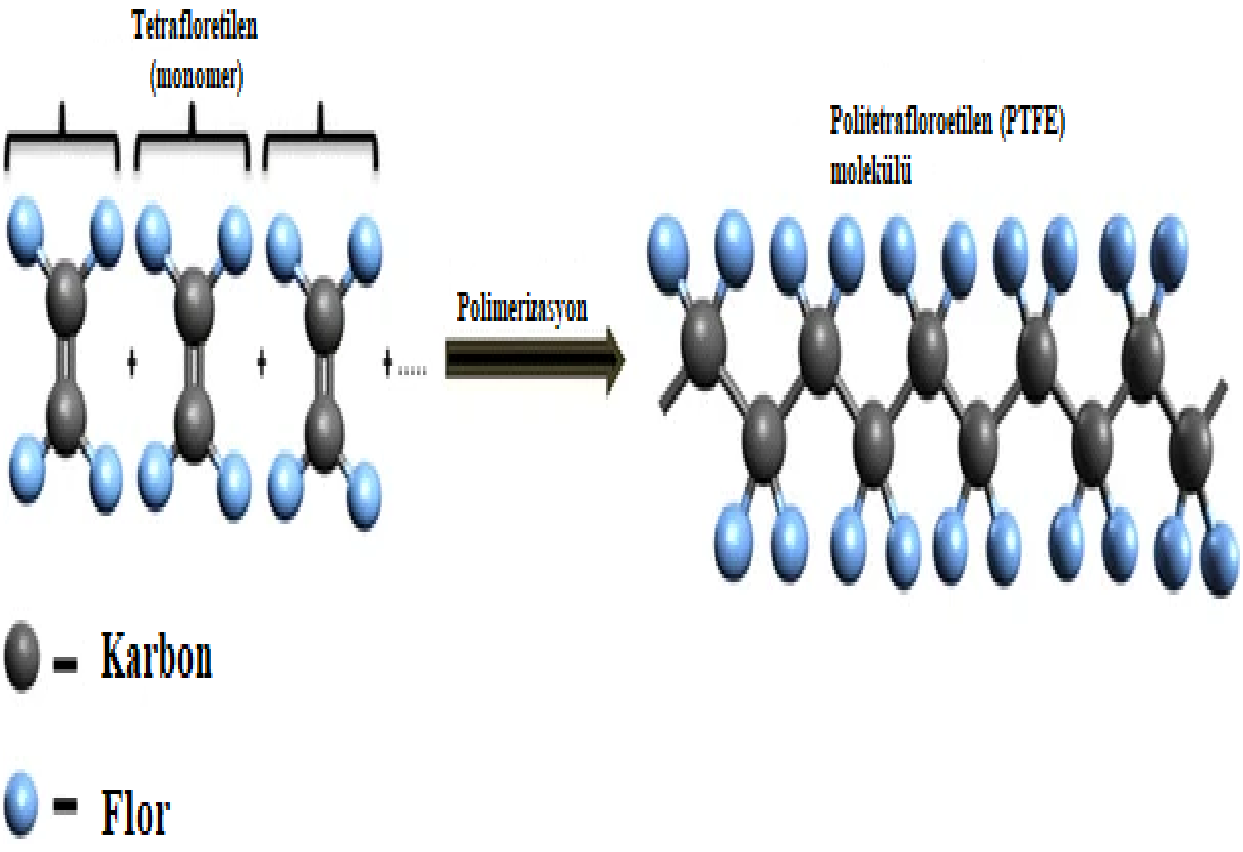


Şekil 3.10: HVAC uygulamalarında kullanılan polipropilen boru

3.1.3. Politetrafloroetilen (PTFE)

Politetrafloretilen (PTFE), geniş bir sıcaklık aralığında çalışma koşullarına elverişli bir polimerdir. -260 °C ile 327 °C arasındaki sıcaklıklara dayanıklıdır. PTFE polimerik malzeme olmasına karşın yüksek ergime noktasına, yüksek viskoziteye ve yüksek ısıl kararlığa sahiptir. Elektrik gerilimlerine dayanıklı bir malzeme olduğu için yüksek yalıtkanlık özelliği gösterir. Kimyevi maddelere oldukça dayanıklı bir malzemedir. PTFE'nin oldukça önemli özellikleri olmasına karşın elde edilecek üründen yüksek performans elde edebilmek için işlenebilirliği arttırmak için özel teknikler uygulamak gerekmektedir [20].

PTFE malzemenin fiziksel ve kimyasal özellikleri: PTFE diğer polimer malzemelerle karşılaştırıldığında üstün performans özelliklere sahiptir. Bu özelliklerin temel sebebi karbon ve flor atomları arasındaki kuvvetli kimyasal bağlardır. Şekil 3.11'de PTFE'nin moleküler yapısı gösterilmektedir [58].



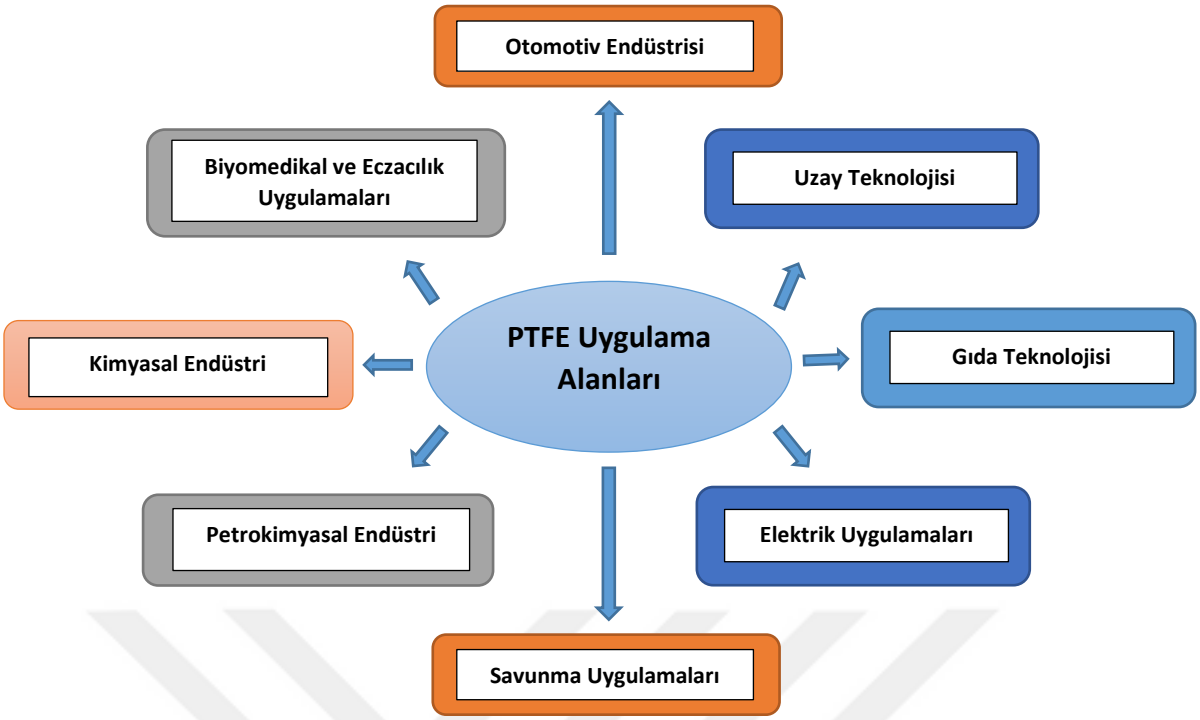
Şekil 3.11: PTFE'nin moleküler yapısı

PTFE malzemenin genel özellikleri Tablo 3.5'de verilmiştir.

Tablo 3.5: PTFE malzemenin genel özellikleri

ÖZELLİK	DEĞER
Özgül ağırlığı (gr/cm3)	2.1 – 2.2
Çekme mukavemeti (kg/cm2)	140 – 380
Basma Mukavemeti (kg/cm2)	45 – 50
Eğilme Modülü (kg/cm2)	3500 – 6300
Sürtünme Katsayısı (dinamik)	0.06
Isı İletkenliği (cal/cm °C)	$5.5 - 6.6x10^{-4}$
Çalışma Sıcaklığı (°C)	-260+270
Dielektrik Mukavemeti (KV)	40 – 80 (0.1 mm)
Kimyevi Maddelere Mukavemeti	Mükemmel

PTFE kullanım alanları ve uygulama örnekleri: Politetrafloroetilen (PTFE), evsel, endüstriyel ve savunma uygulamalarında en çok tüketilen floropolimer olarak kabul edilmiştir. PTFE'nin birbirinden farklı uygulamalarda kullanımı Şekil 3.12'de gösterilmektedir. Bu bölümde PTFE'nin çeşitli alanlardaki uygulamaları tartışılmaktadır [58].



Şekil 3.12: PTFE uygulamaları alanları

Sürtünme katsayısının düşüklüğü nedeniyle otomotiv endüstrilerinde PTFE'nin kullanım alanı oldukça yaygındır. Bu kullanıma otomobillerde önemi büyük olan sürtünme contaları örnek olarak gösterilebilir. Ayrıca bilyalı yatak kullanımı olan yerlerde yağlama oldukça önemlidir. Fakat PTFE'nin düşük yüzey enerjisi harici bir yağlama gerektirmez. PTFE'nin geniş bir sıcaklık aralığında dahi çalışma koşullarına elverişli olması petrokimya tesislerinde kullanılabilmesini ortaya çıkarır. PTFE malzemenin düşük yüzey enerjisi özelliği sayesinde diğer moleküllerin yüzeyine yapışması söz konusu olmaz. Bu nedenle hijyenik gerektiren uygulamalarda oldukça tercih edilen bir polimer malzemedir [58].

Floropolimerler çözücülere, asitlere ve bazlara karşı yüksek direnç göstermektedir. Onların bu özelliği nedeniyle kimyasal işleme endüstrilerinde tercih edilmelerini sağlamaktadır [59].

PTFE malzemenin hafif olması, korozyana karşı dayanımı, yüzey enerjisinin düşük olması sebebiyle yağlama gerektirmeden kullanılabilmesi, elektriksel özellikleri bu malzemenin savunma ve uzay teknolojilerinde kullanımını arttırmıştır.

Rao ve diğerleri tarafından yapılan bir çalışmada PTFE'nin kayma+yuvarlanma sürtünmesindeki tribolojik etkisi araştırılmıştır. Çalışmada PTFE malzemenin aşınma direncinin düşük olduğuna ve bu nedenle uygulamada tek başına değil, kompozit malzeme olarak kullanılmıştır. PTFE'nin polioksietilene (POM) ve PA66'ya eklenmesi sürtünme

katsayısında önemli düşüşler sağladığı görülmüştür. Tribolojik performansın önemli ölçüde arttığı bildirilmiştir [60].

Dearn ve diğerleri [61] tarafından yapılan çalışmada polimer dişlilerin düşük yüzey enerjisi nedeniyle yağlama gerektirmeden kullanılabildiği fakat aşınma nedeniyle belirli problemlerle karşılaşıldığı bildirilmiştir. Bu makale, polimer dişlilerin çalışma sıcaklıklarını düşürerek sürtünme ve aşınmayı kontrol altında tutmayı amaçlamıştır. En iyi polimer dişliyi belirleyebilmek için dört farklı kaplama kullanılmıştır. PTFE'de sürtünme kuvvetlerinde büyük bir azalma meydana geldiği görülmüştür. Diğer polimerlerle karşılaştırıldığında PTFE polimerinin 30°C çalışma sıcaklığında önemli bir performans gösterdiği bildirilmiştir.

3.2. ISIL İŞLEM DENEYLERİ

Deney numuneleri, sıcaklık aralığı 5°C ile 300°C arasında değişen ve dijital kontrollü elektrikli termometresi bulunan Elektro-mag marka kuru hava sterilazötöründe ısıl işleme tabii tutulmuşlardır. Şekil 3.13'de kuru hava sterilazötörü gösterilmiştir. Ayrıca kuru hava sterilazötörü ile ilgili teknik bilgiler Tablo 3.6'da gösterilmiştir. Aşağıdaki bölümlerde PEEK, PP ve PTFE için deney yöntemi açıklanmıştır.



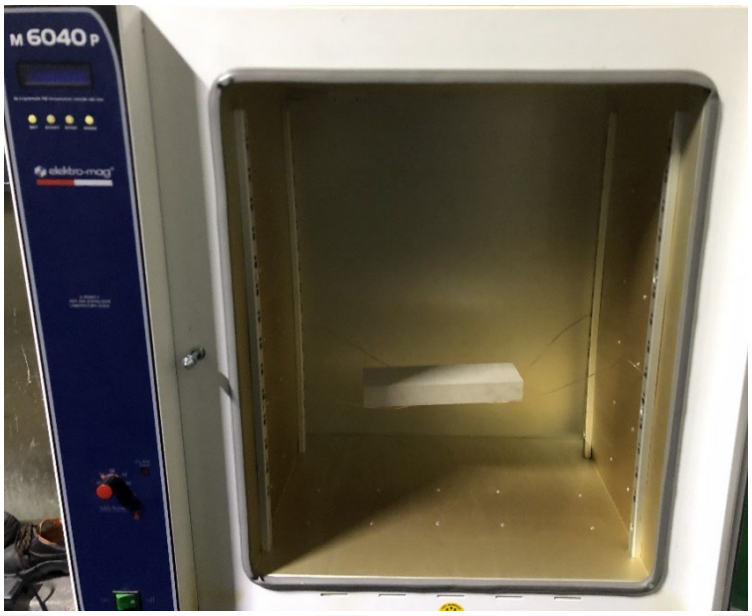
Şekil 3.13: Kuru hava sterilazatörü

Tablo 3.6: Elektro-mag M6040 P kuru hava sterilazatörünün teknik özellikleri

Elektro-mag M6040 P Kuru Hava Sterilazatörünün Teknik Özellikleri	
Sıcaklık Aralığı	5°C-300°C
Isıtma Süresi	1….9999 dakika
İç Hacmi	120 litre
Termostat Çalışma Hassasiyeti	± 1 ºC
Termostat Ayar Hassasiyeti	1 ºC
Dış Kabin Malzemesi	Elektrostatik fırın boyalı çelik
İç Kabin Malzemesi	Eloksallı alüminyum
İç Sıcaklık Farkları	± 2 ºC
Isıtıcı Gücü	1750 W
Dış Ölçüleri	79 x 79 x 53 cm
İç Ölçüleri	50 x 60 x 40 cm
Net Ağırlığı	53 kg

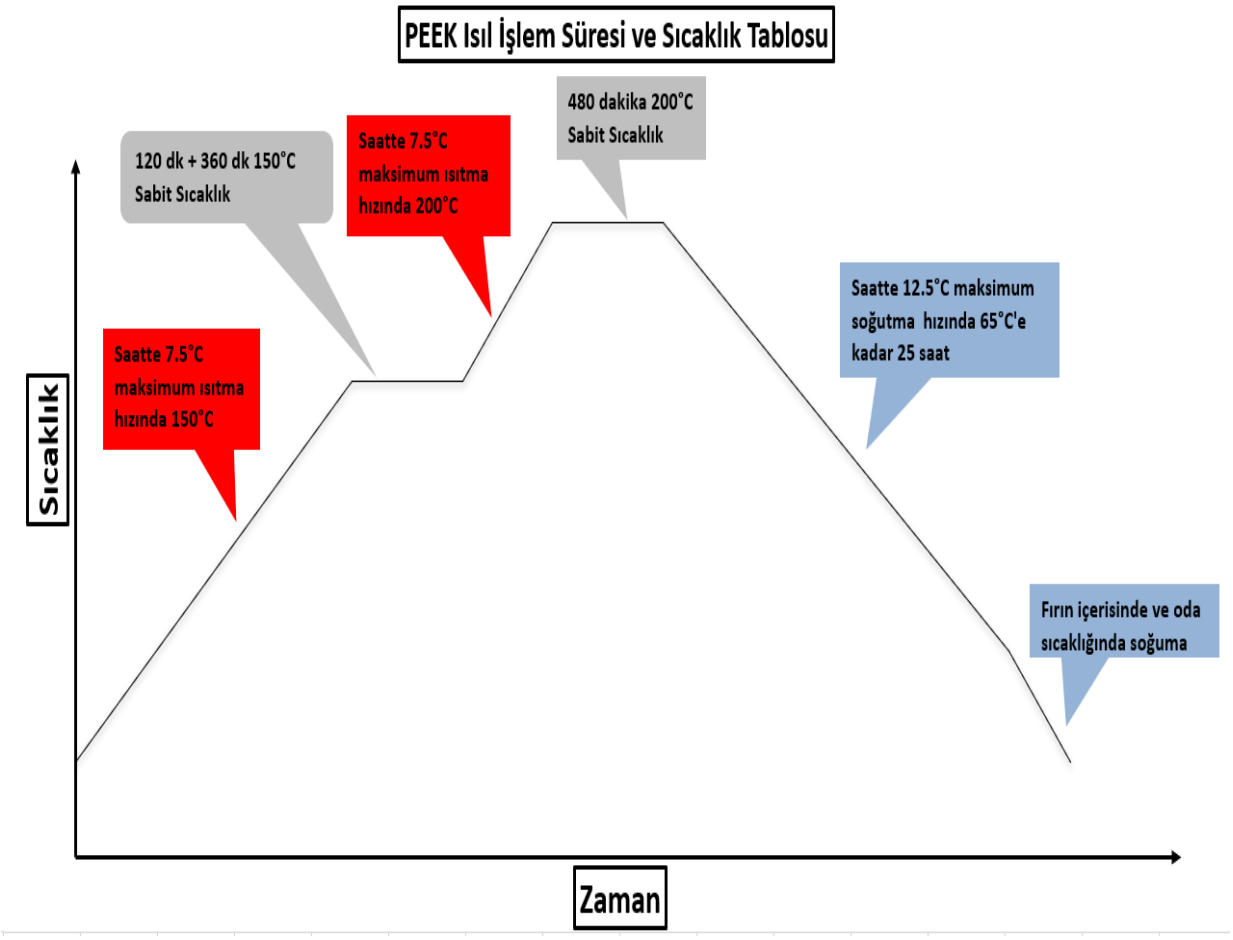
3.2.1. Deneylerde Kullanılan PEEK Polimerinin Tavlanması

PEEK malzeme hava dolaşımlı fırının içerisine etrafında hava dolaşabilecek şekilde yerleştirilmiştir. Fırın saatte 7.5°C maksimum ısıtma hızında 150°C'ye kadar ısıtılmıştır. Fırın sıcaklığı 120 dakika için 150°C'de tutulmuş ve ek olarak her 1/8 inçlik kalınlık için artı 30 dakika eklenmiştir. Deneylerde kullanılan PEEK malzemenin kalınlığı 30 mm olduğu için 120 dakikaya ek olarak 360 dakika daha fırın içerisinde 150°C'de tutulmuştur. Daha sonra fırın saatte 7.5°C maksimum ısıtma hızında 200°C'ye kadar ısıtılmıştır. Aynı şekilde fırın sıcaklığı 120 dakika için ve her 1/8 inçlik kalınlık için artı 30 dakika eklenerek toplamda 480 dakika 200°C sıcaklıkta tutulmuştur. Daha sonra fırının saatte 12.5°C maksimum soğutma oranında ve 25 saatin üzerinde 65°C'ye kadar soğutulmuştur. Deney numunesi çıkarılmadan önce 65°C sıcaklıktayken fırın kapatılmış ve oda sıcaklığında soğumaya bırakılmıştır. Şekil 3.14'de PEEK malzemenin fırın içerisindeki görüntüsü gösterilmiştir.



Şekil 3.14: PEEK malzemenin ısıl işlemi

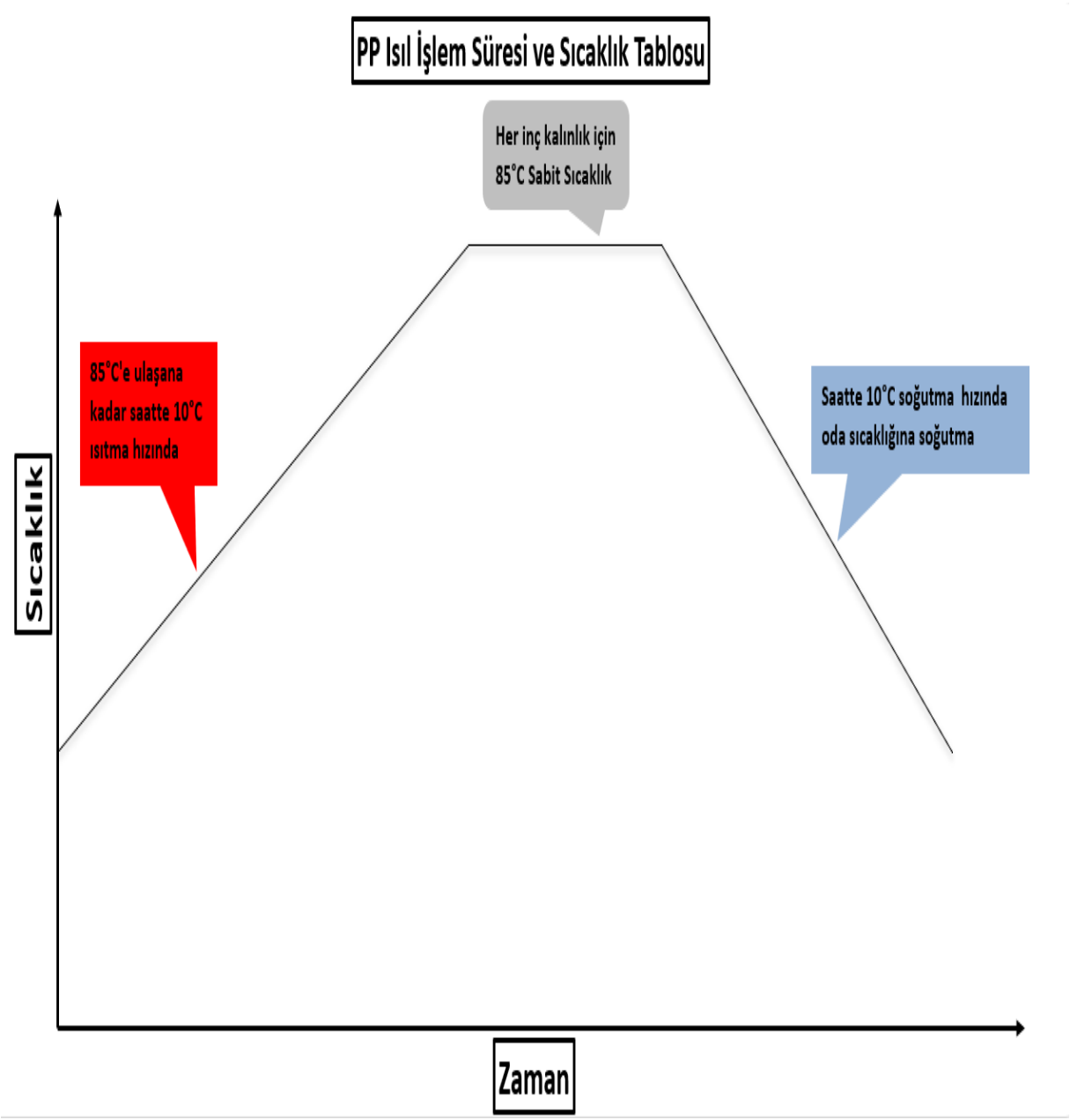
Şekil 3.15'de PEEK polimerinin ısıl işlem prosesi grafiksel olarak gösterilmiştir.



Şekil 3.15: PEEK ısıl işlem süresi ve sıcaklık tablosu

3.2.2. Deneylerde Kullanılan PP Polimerinin Tavlanması

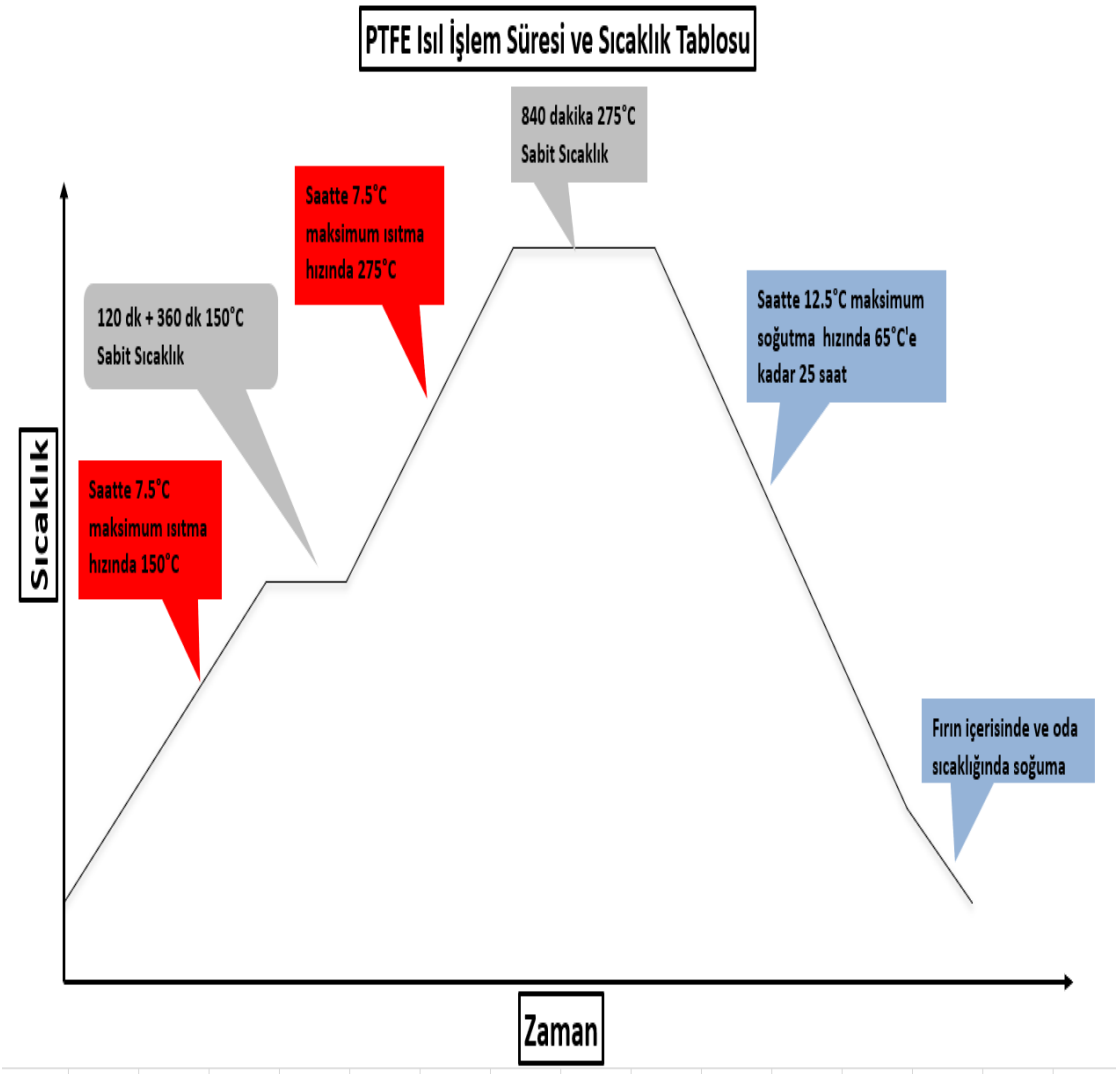
PP malzeme hava dolaşımlı fırının içerisinde etrafında hava dolaşabilecek şekilde yerleştirilmiştir. Fırın 85°C'ye ulaşıncaya kadar saatte 10°C arttırılmıştır. Deney numunesi her inç kalınlık için 2 saat olacak şekilde 85°C'de tutulmuştur. Daha sonra bu döngü süresi tamamlandıktan sonra fırın, saatte 10°C düşecek şekilde oda sıcaklığına getirilmiştir. Fırın oda sıcaklığına ulaştıktan sonra malzeme fırın içerisinden çıkarılmıştır. Şekil 3.16'da PP polimerinin ısıl işlem prosesi grafiksel olarak gösterilmiştir.



Şekil 3.16: PP ısıl işlem süresi ve sıcaklık tablosu

3.2.3. Deneylerde Kullanılan PTFE Polimerinin Tavlanması

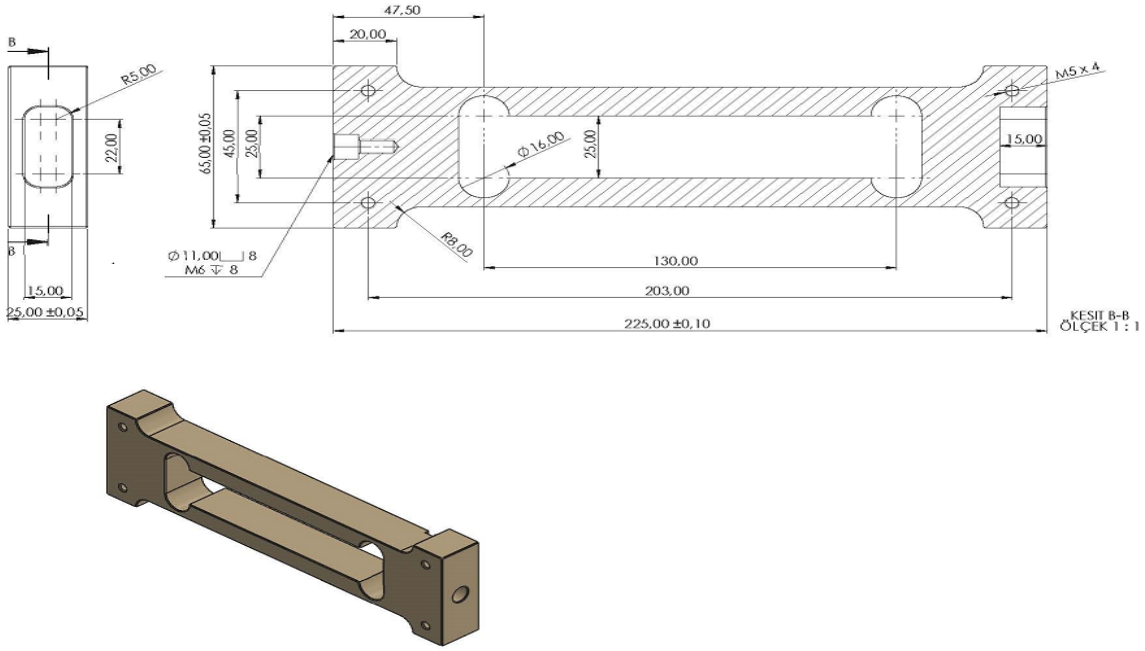
PTFE malzeme hava dolaşımlı fırının içerisine etrafında hava dolaşabilecek şekilde yerleştirilmiştir. Fırın saatte 7.5°C maksimum ısıtma hızında 150°C'ye kadar ısıtılmıştır. Fırın sıcaklığı 120 dakika için 150°C'de tutulmuş ve ek olarak her 1/8 inçlik kalınlık için artı 60 dakika eklenmiştir. Deneylerde kullanılan PTFE malzemenin kalınlığı 20 mm olduğu için 120 dakikaya ek olarak 360 dakika daha fırın içerisinde 150°C'de tutulmuştur. Daha sonra fırın saatte 7.5°C maksimum ısıtma hızında 275°C'ye kadar ısıtılmıştır. Fırın sıcaklığı 240 dakika için ve her 1/8 inçlik kalınlık için artı 60 dakika eklenerek toplamda 840 dakika 275°C sıcaklıkta tutulmuştur. Daha sonra fırının saatte 12.5°C maksimum soğutma oranında ve 25 saatin üzerinde 65°C'ye kadar soğutulmuştur. Deney numunesi çıkarılmadan önce 65°C sıcaklıktayken fırın kapatılmış ve oda sıcaklığında soğumaya bırakılmıştır. Şekil 3.17'de PTFE polimerinin ısıl işlem prosesi grafiksel olarak gösterilmiştir.



Şekil 3.17: PTFE ısıl işlem süresi ve sıcaklık tablosu

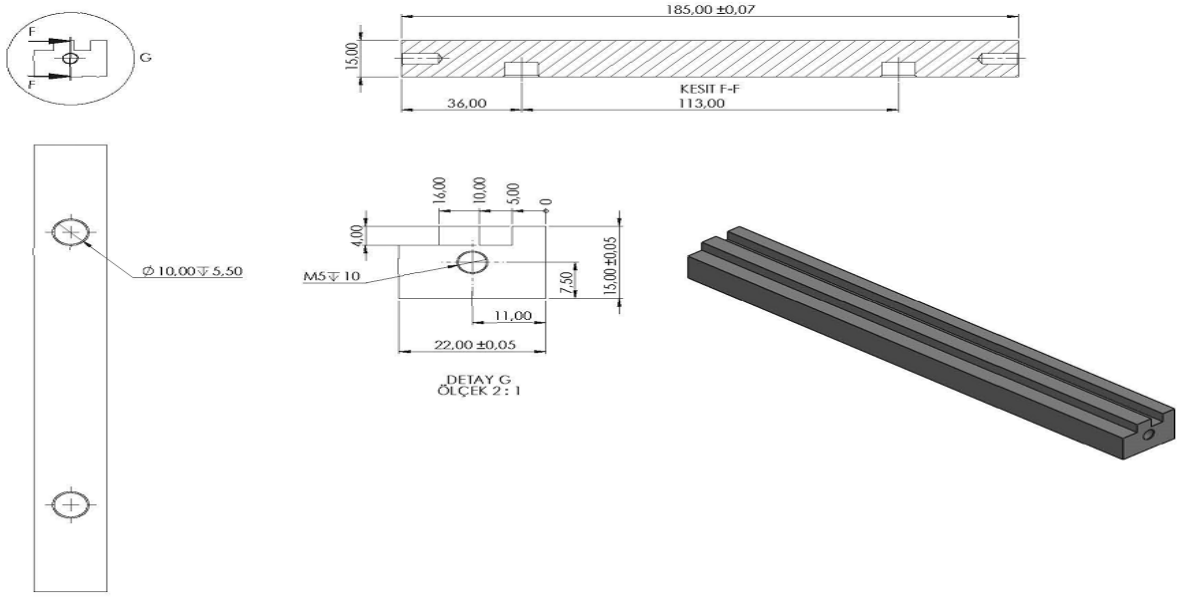
3.3. İŞLENEBİLİRLİK DENEYLERİ

İşlenebilirlik deneylerinde ısıl işlem görmüş PEEK, PTFE, PP polimerler ile ısıl işlem görmemiş PEEK, PTFE, PP polimerlerin talaşlı imalatı gerçekleştirilmiştir. Şekil 3.18'de deneylerde kullanılan PEEK polimerinin teknik resmi gösterilmektedir.



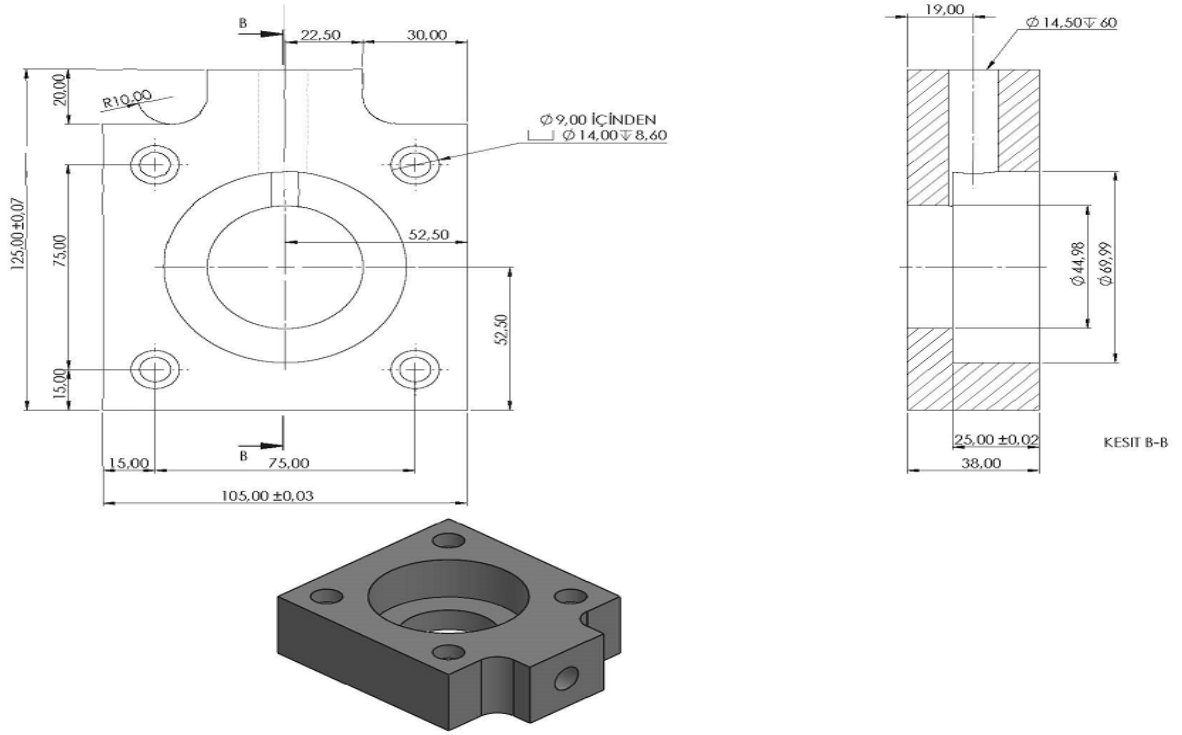
Şekil 3.18: PEEK polimerinin teknik resmi

Şekil 3.19'da deneylerde kullanılan PTFE polimerinin teknik resmi gösterilmektedir.



Şekil 3.19: PTFE polimerinin teknik resmi

Şekil 3.20'de deneylerde kullanılan PP polimerinin teknik resmi gösterilmektedir.



Şekil 3.20: PP polimerinin teknik resmi

İşlenebilirlik deneyleri HAAS UMC750 marka CNC 5-Eksenli Freze tezgahında yapılmıştır. Tablo 3.7'de tezgâhın teknik özellikleri hakkında bilgilere yer verilmiştir.

Tablo 3.7: CNC 5-Eksenli Freze tezgahının teknik özellikleri

CNC 5-Eksenli Freze Tezgahının Teknik Özellikleri	
X ekseni	762 mm
Y ekseni	508 mm
Z ekseni	508 mm
Maksimum Güç	22.4 kW
Maksimum Hız	8100 rpm
B Eksen	120 ° ila 35- °
C Eksen	360 °
Tabla Çapı	500 mm
Konik	CT40 | BT40 | HSK-A63

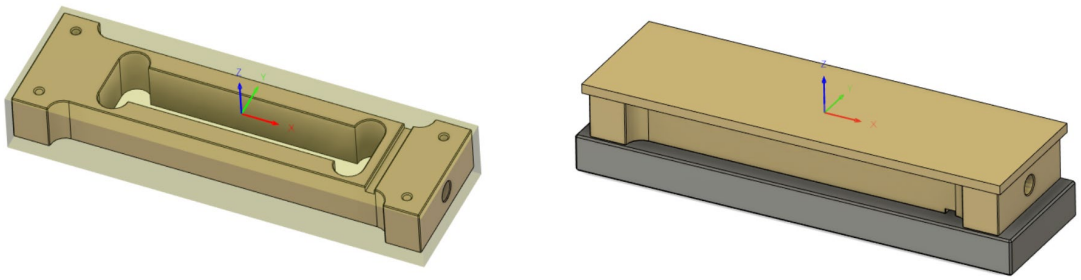
Şekil 3.21'de deneylerde kullanılan HAAS UMC750 marka CNC 5-Eksenli Freze tezgahının resmi gösterilmektedir.



Şekil 3.21: Deneylerde kullanılan CNC 5-Eksenli Freze Tezgahı

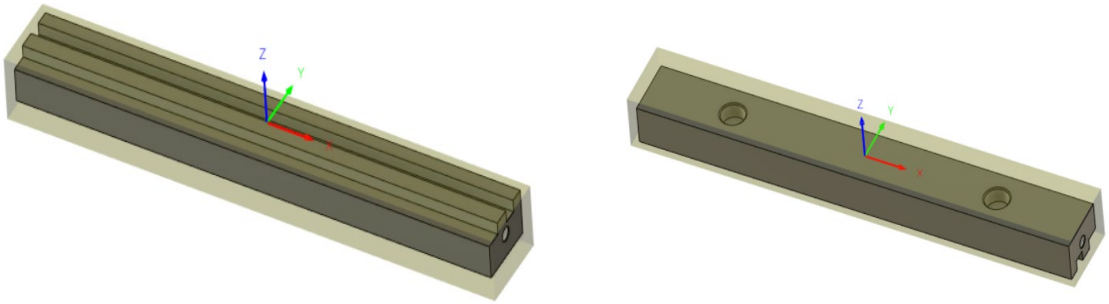
Deneysel numunelerin imalatında takım tezgahını kontrol etmek için Autodesk tarafından geliştirilmiş bilgisayar destekli mühendislik yazılımı olan Fusion 360 kullanılmıştır. İş parçalarının diğer yönleri işlemeye tabii tutulurken mekanik deformasyonu en aza indirgemek için parçalar tasarlanan aparata cıvatalar yardımıyla tutturulmuştur.

Şekil 3.22'da PEEK polimerlerinde kullanılan iş parçası modeli gösterilmektedir.



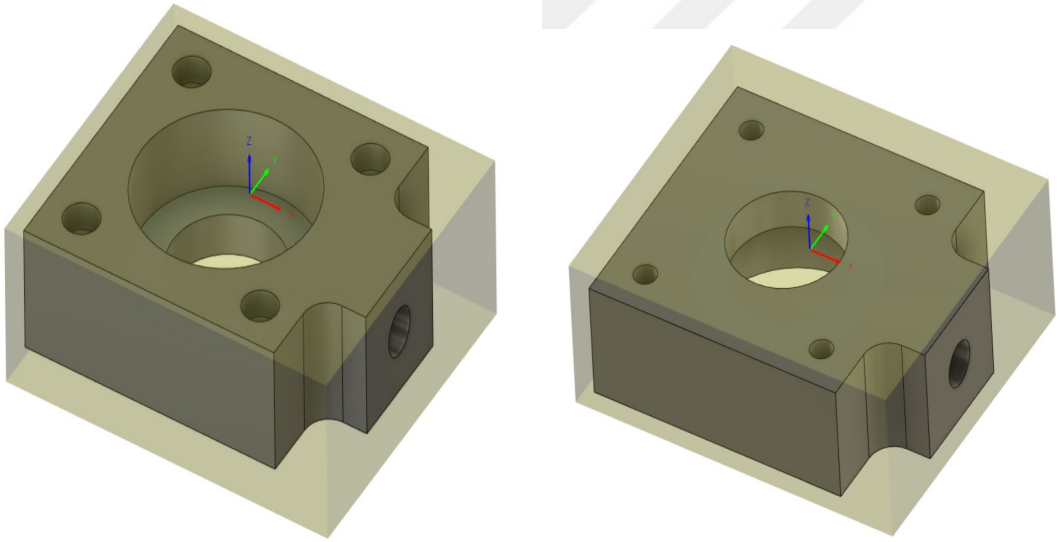
Şekil 3.22: PEEK polimerlerinde kullanılan iş parçası modeli

Şekil 3.23'de PTFE polimerlerinde kullanılan iş parçası modeli gösterilmektedir.



Şekil 3.23: PTFE polimerlerinde kullanılan iş parçası modeli

Şekil 3.24'de PP polimerlerinde kullanılan iş parçası modeli gösterilmektedir.



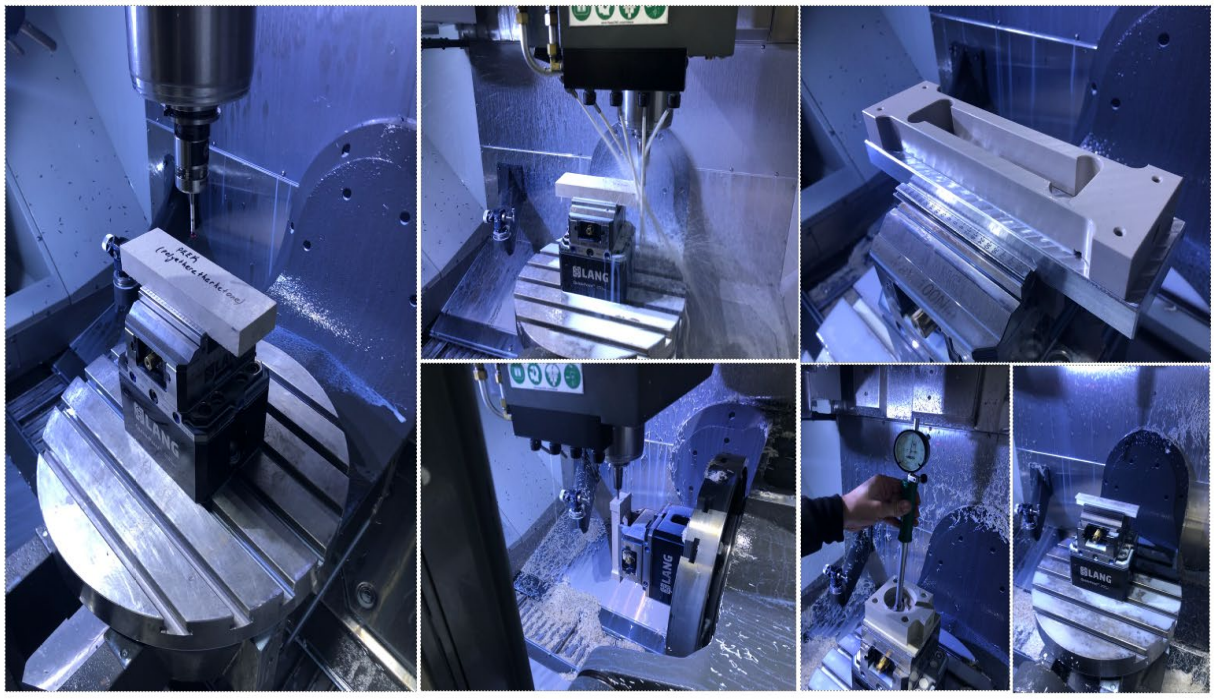
Şekil 3.24: PP polimerlerinde kullanılan iş parçası modeli

Deneysel çalışmalar Walter marka kesici takımlar kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Deneylerde kullanılan kesici takımlar uygun operasyona göre seçilmiş olup, devir ve ilerleme değerleri Walter'in katalog verileri üzerinden hesaplanmıştır. Ayrıca deneysel çalışmada Haimer marka takım tutucular kullanılmıştır. Kılavuzlar, puntalar, pah çakıları ve hss matkaplar ISO 15488 normlu ER pens ile pensli tutuculara bağlanmıştır. Freze kesici uçları ise yüksek hassasiyet ve mikro-işleme istenildiği için yüksek performans elde etmek için Haimer marka shrink fit cihazı kullanılarak Haimer marka shrink fit tutuculara rijit bir şekilde bağlanmıştır. Şekil 3.25'de deneylerde kullanılan kesici takımlar ve tutucular gösterilmektedir.



Şekil 3.25: Deneylerde kullanılan kesici takımlar ve tutucular

Şekil 3.26'de deneyler esnasında çekilmiş görüntüler gösterilmektedir.



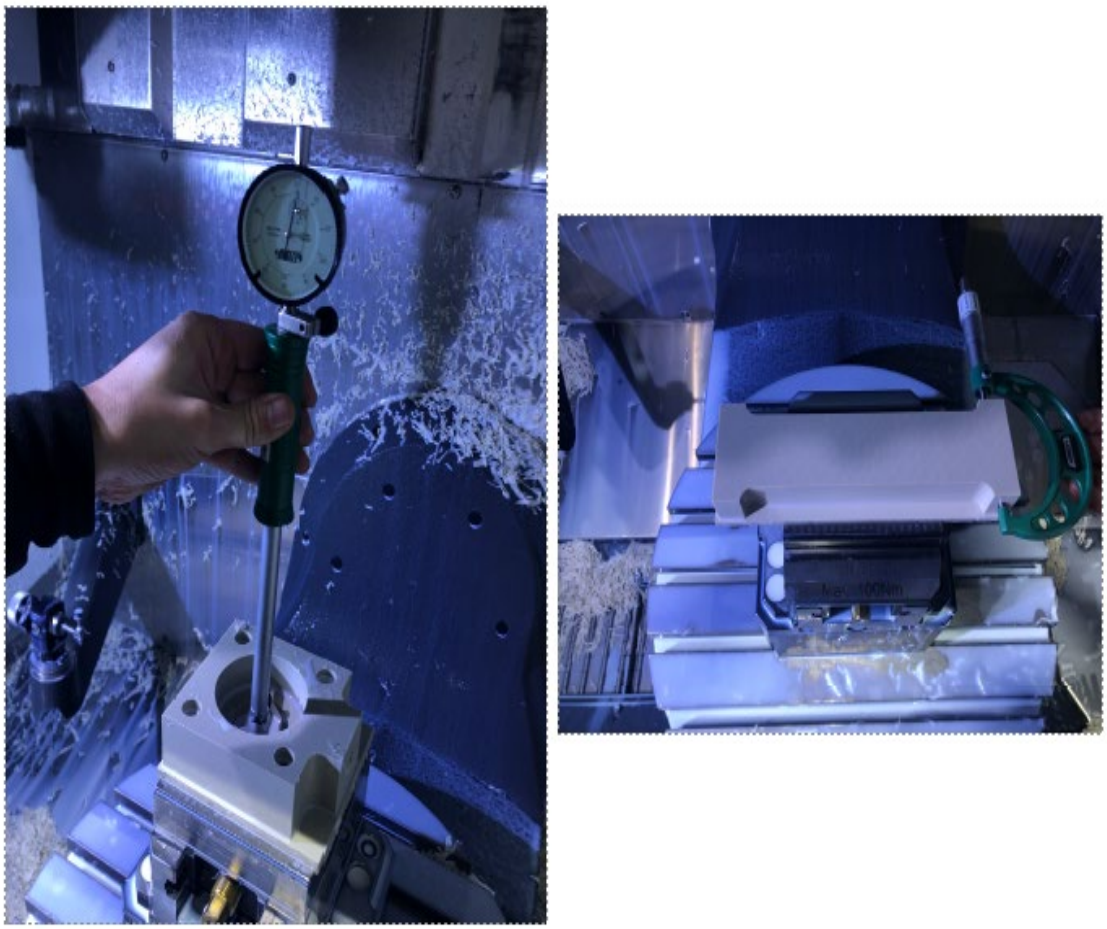
Şekil 3.26: Deneyler esnasında çekilmiş görüntüler

4. BULGULAR

Tezin bu bölümünde, ısıl işlemin işlenebilirliğe ve mekanik özelliklere etkisini gözlemlemek üzere deneysel numunelere boyut analizi, sertlik ölçümleri ve yüzey pürüzlülük ölçümleri yapılmıştır.

4.1. BOYUT ANALİZİ

Talaşlı imalatı yapılmış numuneler mekanik özelliklerinin doğası gereği deformasyona eğilimlidirler. Isıl işlem görmüş ve ısıl işlem görmemiş olarak talaşlı imalatı yapılan numunelerin üç ekseninden (X, Y, Z) herhangi birinde büzülme veya genleşme durumu oluşabilir. Bu nedenle numunelerin boyutlarını karşılaştırmak oldukça önemlidir. Özellikle hassasiyet istenilen yerlerde ölçümler, Mitutoyo marka delik komparatörü, mikrometre ve kumpas kullanılarak yapılmıştır. Şekil 4.1'de boyutsal analiz ölçümleri gösterilmektedir.



Şekil 4.1: Boyutsal Ölçümler

Isıl işlemin polimer malzemelerin mekanik özelliklerini iyileştirmesi neticesinde deformasyona karşı göstermiş olduğu direnç artmıştır. Boyutsal ölçümler sonucu ısıl işlem görmüş PEEK malzemenin ısıl işlem görmemiş PEEK malzemeye göre ölçüm sonuçları istenilen tolerans değerlerine daha yakın gelmiştir. PTFE malzemede de iyileşmeler görülmüştür. Fakat PP malzemede ısıl işlemin boyutsal analizde etkisi kayda değer bulunmamıştır. Tablo 4.1, 4.2 ve 4.3'de deneysel numunelerin boyutsal analiz sonuçları verilmiştir.

Tablo 4.1: PEEK boyutsal analiz sonuçları

PEEK BOYUTSAL ANALİZ SONUÇLARI			
	X **225±0.1 mm**	**Y** **65±0.05 mm**	**Z** **25±0.05 mm**
ISIL İŞLEM GÖRMÜŞ PEEK	224.92 mm	64.98 mm	24.97 mm
ISIL İŞLEM GÖRMEMİŞ PEEK	225.3 mm	65.1 mm	25.07 mm

Tablo 4.2: PTFE boyutsal analiz sonuçları

PTFE BOYUTSAL ANALİZ SONUÇLARI			
	X **185±0.07 mm**	**Y** **22±0.05 mm**	**Z** **15±0.05 mm**
ISIL İŞLEM GÖRMÜŞ PTFE	185.03 mm	22.02 mm	14.94 mm
ISIL İŞLEM GÖRMEMİŞ PTFE	185.10 mm	22.08 mm	14.90 mm

Tablo 4.3: PP boyutsal analiz sonuçları

PP BOYUTSAL ANALİZ SONUÇLARI			
	X **125±0.05 mm**	**Y** **105±0.03 mm**	**Z** **38±0.02 mm**
ISIL İŞLEM GÖRMÜŞ PP	124.85 mm	105.11 mm	38.12 mm
ISIL İŞLEM GÖRMEMİŞ PP	124.78 mm	105.18 mm	38.21 mm

4.2. SERTLİK TESTİ

Deneylerde kullanılan numunelerin sertlik testleri ASTM D2240 standardına göre Shore D sertlik ölçüm cihazı kullanılarak yapılmıştır. Şekil 4.2'de sertlik ölçüm testleri gösterilmektedir.



Şekil 4.2: Sertlik ölçüm testleri

Tablo 4.4'de shore D sertlik testi sonuçları gösterilmektedir. Sonuçlara bakıldığında ısıl işlemin farklı malzemelerin tümünde mekanik özelliklere etkisi görülmektedir.

Tablo 4.4: Shore D sertlik testi sonuçları

Shore D Sertlik Testi Sonuçları	
Isıl İşlem Görmüş PEEK	92
Isıl İşlem Görmemiş PEEK	86
Isıl İşlem Görmüş PTFE	62
Isıl İşlem Görmemiş PTFE	55
Isıl İşlem Görmüş PP	77
Isıl İşlem Görmemiş PP	72

4.3. YÜZEY PÜRÜZLÜLÜK TESTİ

Deneylerde kullanılan numunelerin yüzey pürüzlülük ölçümleri Mahr marka yüzey pürüzlülük ölçüm cihazıyla yapılmıştır. Şekil 4.3'te yüzey pürüzlülük ölçümleri sırasında çekilen görüntüler yer almaktadır.



Şekil 4.3: Yüzey pürüzlülük ölçümleri

Tablo 4.5, 4.6 ve 4.7'de yüzey pürüzlülük testi sonuçları verilmiştir. Buna göre ısıl işlemin mekanik özelliklere etkisi neticesinde ısıl işlem görmüş deneysel numunelerin tümünde yüzey pürüzlülük değerlerinde iyileşmeler görülmüştür. PEEK malzemenin yüzey pürüzlülüğünde iyi sonuçlar elde edilmiştir, fakat en iyi sonuç totalde PP malzemede görülmüştür.

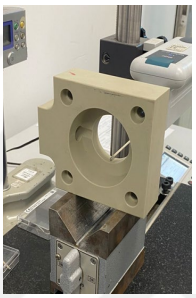
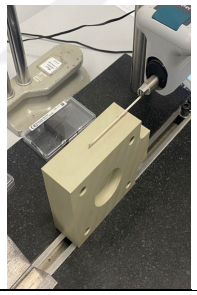
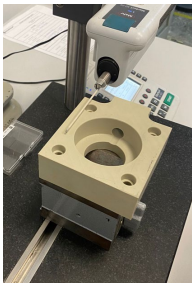
Tablo 4.5: PEEK numunelerin yüzey pürüzlülük testi sonuçları

Kesme Parametreleri							
Devir (dev/dak)	**Kesme Hızı (m/dk)**	**Kesme Derinliği (mm)**	**İlerleme Hızı (mm/dev)**	**Takım / Kullanım Yeri**	**Malzeme**	**Ra**	**Rz**
11000	402.124	0.1	0.091	16 R0.5 Freze / Üst yüzey  	Isıl İşlem Görmüş PEEK	0.814	6.166
					Isıl İşlem Görmemiş PEEK	0.938	8.108
6000	301.593	0.15	0.066	16 R0.5 Freze / Yan yüzey  	Isıl İşlem Görmüş PEEK	0.438	2.940
					Isıl İşlem Görmemiş PEEK	0.496	3.565
9000	282.743	0.15	0.044	10 mm'lik Freze / İç yüzey  	Isıl İşlem Görmüş PEEK	0.544	3.627
					Isıl İşlem Görmemiş PEEK	1.341	8.207
8000	201.062	0.15	0.05	8 mm'lik Freze / Kenar slot  	Isıl İşlem Görmüş PEEK	0.574	4.242
					Isıl İşlem Görmemiş PEEK	0.882	6.262

Tablo 4.6: PTFE numunelerin yüzey pürüzlülük testi sonuçları

Kesme Parametreleri							
Devir (dev/dak)	**Kesme Hızı (m/dk)**	**Kesme Derinliği (mm)**	**İlerleme Hızı (mm/dev)**	**Takım / Kullanım Yeri**	**Malzeme**	**Ra (µm)**	**Rz (µm)**
11000	552.92	0.1	0.091	16 R0.5 Freze / Üst yüzey arka 	Isıl İşlem Görmüş PTFE	0.461	3.835
					Isıl İşlem Görmemiş PTFE	0.830	5.469
6000	301.593	0.075	0.066	16 R0.5 Freze/Büyük yan yüzey 	Isıl İşlem Görmüş PTFE	0.475	2.670
					Isıl İşlem Görmemiş PTFE	0.588	3.736
6000	301.593	0.075	0.044	16 R0.5 Freze/Küçük yan yüzey 	Isıl İşlem Görmüş PTFE	0.516	3.008
					Isıl İşlem Görmemiş PTFE	0.592	3.517
14000	219.111	0.5	0.107	5 mm'lik Freze / İç kısım 	Isıl İşlem Görmüş PTFE	2.311	18.88
					Isıl İşlem Görmemiş PTFE	2.292	21.64

Tablo 4.7: PP numunelerin yüzey pürüzlülük testi sonuçları

Kesme Parametreleri							
Devir (dev/dak)	**Kesme Hızı (m/dk)**	**Kesme Derinliği (mm)**	**İlerleme Hızı (mm/dev)**	**Takım / Kullanım Yeri**	**Malzeme**	**Ra (µm)**	**Rz (µm)**
3000	150.796	0.15	0.133	16 R0.5 Freze / Büyük delik  	Isıl İşlem Görmüş PP	0.299	2.574
					Isıl İşlem Görmemiş PP	0.346	2.974
3000	150.796	0.15	0.133	16 R0.5 Freze/Küçük delik  	Isıl İşlem Görmüş PP	0.806	6.125
					Isıl İşlem Görmemiş PP	0.783	5.489
3000	150.796	0.15	0.333	16 R0.5 Freze/Yan Yüzey  	Isıl İşlem Görmüş PP	0.754	4.758
					Isıl İşlem Görmemiş PP	0.721	4.755
11000	552.92	0.1	0.091	16 R0.5 Freze / Üst yüzey  	Isıl İşlem Görmüş PP	1.401	8.207
					Isıl İşlem Görmemiş PP	2.19	12.77

5. TARTIŞMA

Tez çalışmasında yüksek lisans tezine konu olan polimer malzemeler, polimer malzemelerin mühendislik malzemeleri haline gelme süreci, fiziksel ve mekanik özellikleri, bu özelliklerin avantajları, mekanik özelliklerini iyileştirmek için polimer malzemelerin tavlanması, işlenebilirliği, hassas işlenebilmesi için talaşlı imalatı ve işlenebilirliğini etkileyen parametreleri için literatür araştırılması yapılmıştır.

Yapılan bu çalışmada son yıllarda iyi özelliklerinin vermiş olduğu avantaj neticesinde kullanımları artan mühendislik plastiklerinin ısıl işlemler sonucunda yüzey pürüzlülük, sertlik ve boyutsal değerlerindeki durumlar test ortamında incelenmiştir. Çalışmada polietereterketon (PEEK), politetrafloretilen (PTFE) ve polipropilen (PP) olmak üzere 3 farklı polimer malzeme kullanılmıştır. Deneysel numuneler, ısıl işlemlerin polimer malzemelere etkisini incelemek için ısıl işlem görmüş ve ısıl işlem görmemiş olarak kategorilendirilmiştir.

PEEK malzeme için belirli periyotlar ile sıcaklık arttırılmak suretiyle 200°C'de tavlama işlemi yapılmıştır. Isıl işlem görmemiş ve talaşlı imalatı yapılmış PEEK malzemenin Shore D sertlik testinde sertlik değeri 86, ısıl işlem görmüş PEEK malzemenin sertlik değeri 92 olarak ölçülmüştür. Malzemedeki iç gerilimlerin azalması sonucunda yüzey pürüzlülük değerinde, ısıl işlem sonrası 0.938'den 0.814'e kadar iyileşme görülmüştür. Boyutsal değerlere bakıldığında, X uzunluğunda tasarımda tolerans değeri 225±0.1 mm olarak verilmiştir ve ısıl işlem görmüş PEEK malzeme işleme sonrası bu değer içerisinde kalmıştır. Isıl işlem görmemiş PEEK malzemede tolerans değerinden 0.2 mm'lik bir sapma tespit edilmiştir.

PTFE malzeme için 275°C'de tavlama işlemi yapılmıştır. Shore D sertlik testinde sertlik değeri 55, ısıl işlem görmüş PTFE malzemenin sertlik değeri 62 olarak ölçülmüştür. Yüzey pürüzlülük değeri, ısıl işlem görmemiş PTFE malzemede 0.830, ısıl işlem görmüş PTFE malzemede ise 0.461 olarak ölçülmüştür. Boyutsal analizler göz önüne alındığında malzemenin X uzunluğu 185±0.07 mm değeri içerisinde istenilmiş, ısıl işlem görmüş PTFE malzeme işleme sonrası dijital mikrometreyle 185.03 mm olarak ölçülmüştür. Isıl işlem görmemiş PTFE malzeme ise X uzunluğunda 185.10 mm olarak ölçülmüştür. PTFE malzemenin, PEEK malzemeye göre tolerans değerlerine yakın olması ve yüzey pürüzlülük değerinin iyi olmasının en önemli sebebi olarak X uzunluğu gösterilebilir.

Deneylerde kullanılan PP malzeme 85°C'de tavlama işlemi yapılmıştır. Isıl işlem görmemiş PP malzemenin sertlik değeri 72 olarak ölçülürken, ısıl işlem görmüş malzemenin sertlik değeri 77 olarak ölçülmüştür. Isıl işlem görmemiş PP malzemeden yüzey pürüzlülük değeri 2.19 olarak, ısıl işlem görmüş PP malzemede ise 1.401 olarak ölçülmüştür.

Deneysel çalışmadaki en yüksek pürüzlülük değeri ısıl işlem görmemiş PP malzemede 2.19 olarak ölçülmüştür. Bu değerlere bakıldığında metallerin yerine kullanılması düşünülen polimer malzemelerin işlenebilirlikleri kendi içerisinde de değerlendirilmelidir. Deneyler sonucunda yüzey pürüzlülüğünde etkili olan parametreler ısıl işlem, devir, kesme hızı, kesme derinliği ve ilerleme hızı olarak tespit edilmiştir. Deneyler sırasında malzemeleri ek bir parça üzerine sabitlemenin, ısıl işlem uygulanırken malzemelerin deformasyona uğrama riskini azalttığı tespit edilmiştir.

6. SONUÇ VE ÖNERİLER

Çalışma sonucunda ısıl işlemler yardımıyla polimer malzemelerin sünekliğinin arttırılması ve iç gerilimlerin yok edilmesiyle birlikte polimer malzemelerde işlenebilirliğin arttığı, boyutsal dengelilik sağlandığı ve mekanik özelliklerinin iyileştiği tespit edilmiştir.

Bundan sonraki çalışmalarda kesme hızı, kesme derinliği ve ilerleme miktarı gibi kesme parametrelerinin değiştirilmesi, aynı zamanda işleme stratejilerinin değiştirilmesi ile birlikte bu koşullar içerisinde işlenebilirlik incelenebilir. Öte yandan kesici uç malzemesi ve geometrisinin işlenebilirliğe etkisinin irdelenmesi gerekmektedir. Farklı takım geometrileri ve farklı takım malzemeleri kullanılarak deneyler gerçekleştirilebilir.

Malzemelerin iç yapı özelliklerine bağlı olarak, işlenmesi sonucu elde edilen talaş geometrileri oldukça farklılık göstermektedir. Buna bağlı olarak, bundan sonra yapılacak çalışmalarda işlenme sonrası oluşan talaş geometrilerinin işlenebilirlik hakkında oluşturacağı veriler incelenebilir.

Talaş kaldırma sırasında oluşan kesici takım aşınma mekanizmaları incelenebilir. Kesici takım aşınması ve kullanım ömrü ile yüzey pürüzlülüğü arasındaki bağıntı araştırılabilir. Talaş kaldırma sırasında meydana gelen titreşimlerin yüzey pürüzlülüğü üzerindeki etkisi incelenebilir.

Bu çalışmada ölçüsel analizler, sertlik testi, yüzey pürüzlülük testi gibi mekanik testler ile ısıl işlemin mekanik özellikler üzerindeki etkisi incelenmiştir. Aynı kapsamlı çalışmalarda, ısıl işlemin mekanik özelliklere etkisini incelemek için ultrasonik deneyler, çekme deneyleri, mikroyapısal analiz gibi mekanik testler uygulanabilir.

İleri imalat yöntemleri kullanılarak talaşlı imalat işlemleri gerçekleştirilebilir ve bu bağlamda işleme özellikleri incelenebilir.

Bundan sonra yapılacak çalışmalarda farklı ısıl işlem parametreleri kullanılarak farklı sıcaklık ve soğutma hızlarında, mekanik özellikleri iyileştirilmiş ve işlenebilirliği daha uygun iç yapılar elde edilerek talaşlı imalat deneyleri yapılabilir.

KAYNAKLAR

[1]. Patil, A., Patel, A., and Purohit, R., 2017, An overview of polymeric materials for automotive applications, *Materials Today: Proceedings,* 4(2), 3807-3815.

[2]. Aklonis, J. J., 1981, Mechanical properties of polymers.

[3]. Kurt, M., 2011, *Yüksek performanslı endüstriyel termoplastiklerin yüksek sıcaklıklardaki tribolojik davranışları,* Thesis (PhD), Sakarya University.

[4]. Jeet, S., Barua, A., and Kar, S., 2018, An Overwiew on Machining of Engineering Polymers, *Int. J. Sci. Eng. Res.,* 9(4), 46-50.

[5]. Crawford, R.J. and Martin, P.J., 2020, Plastics engineering, Butterworth-Heinemann, Cambridge, MA 02139, USA, ISBN: 978-0-08-100709-9.

[6]. Xiao, K. Q., and Zhang, L. C., 2002, The role of viscous deformation in the machining of polymers, *International journal of mechanical sciences,* 44(11), 2317-2336.

[7]. Jar, P.Y., Kausch, H.H., Cantwell, W.J., Davies, P. and Richard, H., 1990, The effect of annealing on the short and long term behavior of PEEK, *Polymer Bulletin,* 24, 657-664.

[8]. Ji, S., Yang, J., Zhao, J., Hu, Y., and Gao, H. 2018, Study about mechanical property and machinability of polyimide, *Polymers,* 10(2), 173.

[9]. Amza, C.G., Zapciu, A., Constantin, G., Baciu. F. and Vasile, M.I., 2021, Enhancing Mechanical Properties of Polymer 3D Printed Parts, *Polymers,* 13, 562.

[10]. Yu, W., Wang, X., Yin, X., Ferraris, E. and Zhang, J., 2023, The effects of thermal annealing on the performance of material extrusion 3D printed polymer parts, *Materials & Design, 226.*

[11]. Wang, W., Zhao, G., Wu, X. and Zhai, Z., 2015, The effect of high temperature annealing process on crystallization process of polypropylene, mechanical properties, and surface quality of plastic parts, *Journal of Applied Polymer Science,* 132, 42773.

[12]. Gnatowski, A., Gołębski, R., and Sikora, P., 2020, Analysis of the impact of changes in thermomechanical properties of polymer materials on the machining process of gears, *Polymers,* 13(1), 28.

[13]. Nakayama, K., 1997, Topics on fundamentals of precision machining, *Machining Science and Technology,* 1(2), 251-262.

[14]. Kobayashi, A., 1984, Ultra-precision machining of plastics, *In Production Aspects of Single Point Machined Optics,* 31-37.

[15]. Carr, J. W., and Feger, C., 1993, Ultraprecision machining of polymers, *Precision Engineering,* 15(4), 221-237.

[16]. Jagtap, K.A., Pawade, R.S., and Balasubramaniam, R., 2000, Some Investigations on Surface characteristics in Precision Turning of Nylon and Polypropylene, *Power,* 100.

[17]. Yan, Y., Mao, Y., Li, B., and Zhou, P., 2020, Machinability of the Thermoplastic Polymers: PEEK, PI, and PMMA, *Polymers,* 13(1), 69.

[18]. Butt, J., and Bhaskar, R., 2020, Investigating the effects of annealing on the mechanical properties of FFF-printed thermoplastics, *Journal of Manufacturing and Materials Processing,* 4(2), 38.

[19]. Özden, S., and Demir, H., 2020, Polieter eter keton (PEEK) diş hekimliğinde yükselen materyal, *Necmettin Erbakan Üniversitesi Diş Hekimliği Dergisi,* 2(2), 76-85.

[20]. Atasoy, C., 1993, Endüstride PTFE kullanımı.

[21]. Small, G., 2014, Outstanding physical properties make PEEK ideal for sealing applications, *Sealing Technology,* 2014(4), 9-12.

[22]. Dinçtosun, M., 2019, *Tekrarlı temperleme ısıl işleminin vermiküler dökme demirlerin işlenebilirliği üzerine etkisi*, (Master's thesis, Pamukkale Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü).

[23]. Mazumdar, S.K., 2002, Plastics composites manufacturing materials, product, and process engineering, CRC Press LLC, Florida, USA, ISBN: 0-8493-0585-3.

[24]. Shrivastava A., 2018, Introduction to plastics engineering, FluoroConsultants Group, LLC Chadds Ford, PA, USA, ISBN: 978-0-323-39500-7.

[25]. Mandelkern, L., 1983, Introduction to macromolecules, Springer New York, USA, ISBN: 978-0-387-90796-3.

[26]. Kulkarni, S., 2010, *Introduction to polymers and plastics*, Robust process development and scientific molding, In: Kulkarni, S. (ed.), Chapter 2, Hanser Publications, Munich, Germany ISBN: 978-3-446-42275-9, 9-26.

[27]. Ögmen, G., 2008, *Kitosan ve ikili polimer karışımlarının hazırlanması ve özelliklerinin incelenmesi,* Thesis Master, Istanbul University.

[28]. Tucker, N. and Lindsey, K., 2002, *Composite ingredients*, An introduction to automotive composites, In: Tucker, N. and Lindsey, K. (ed.), Chapter 3 Rapra Technology Limited, UK, ISBN: 1-85957-279-0, 39-58.

[29]. Strong, A.B., 2008, *Thermoplastics composites,* Fundamentals of composites manufacturing: materials, methods, and applications, In: Csizmadia, R. (ed.), Chapter 6, Society of Manufacturing Engineers, Michigan, ISBN: 0-87263-854-5, 159-161.

[30]. Cantor K.M. and Watts P., 2011, *Plastics materials,* Applied plastics engineering handbook, In: Kutz M. (ed.), Chapter 1, Elsevier, Oxford, United Kingdom, ISBN: 978-1-4377-3514-7, 1-3.

[31]. Chauvel-Lebret, D.C., Auroy, P. and Bonnaure-Mallet, M., 2002, *Biocompatibility of elastomers,* Polymeric biomaterials, In: Dumitriu, S. (ed.), Chapter 13, Marcel Dekker, Inc., New York, USA, ISBN: 0-8247-0569-6, 315-364.

[32]. Pouzada, A.S., 2021, Design and manufacturing of plastics products, Elsevier, Oxford, United Kingdom, ISBN: 978-0-12-819775-2.

[33]. Rosato D. and Rosato D., 2003, Plastics enginereed product design, Elsevier, Oxford, United Kingdom, ISBN: 1856174166.

[34]. Micro Fasteners, 2020, *What is engineering plastic? Explains the difference from normal plastic,* http://micro-f.co.jp/en/colum_20200212.html, [Ziyaret tarihi: 2 Kasım 2022].

[35]. Artı90, 2018*, Malzemelerin mekanik özellikleri*, https://arti90.com/wp-content/uploads/2018/07/Malzemenin-Mekanik-%C3%96zellikleri.pdf, [Ziyaret tarihi: 2 Kasım 2022].

[36]. McKeen, L., 2021, *Introduction to the physical, mechanical, and thermal properties of plastics and elastomers,* The effect of long term thermal exposure on plastics and elastomers, In: Ebnesajjad S., (ed.), Chapter 1, Elsevier, Oxford, United Kingdom, ISBN: 978-0-323-22108-5, 43-71.

[37]. Peacock, A.J and Calhoun, A., 2006, *Solid state properties of polymers,* Polymer Science, In: Peacock, A.J. and Calhoun A. (ed.), Chapter 8, Hanser, Cincinnati, OH, 137-170.

[38]. Peacock, A.J and Calhoun, A., 2006, *Rheological properties of polymeric materials,* Polymer Science, In: Peacock, A.J. and Calhoun A. (ed.), Chapter 6, Hanser, Cincinnati, OH, 103-113.

[39]. Feynman, R., 2010, *Newton's Laws of Dynamics,* The Feynman lectures on physics, Chapter 9, Basic Books, New York, ISBN: 978-0-465-02562-6, 9-1-9-2.

[40]. Ashter, S.A., 2014, *Mechanics of materials,* Thermoforming of single and multilayer laminates, In: Ashter, S.A. (ed.), Chapter 6, William Andrew Publishing, Oxford, 123-145.

[41]. Temiz, V., 2022, *Makine elemanlarının mukavemeti,* https://web.itu.edu.tr/temizv/Sunular/Mukavemet.pdf, [Ziyaret tarihi:10 Kasım 2022].

[42]. Mühendishane, 2012, *Malzemelerin mekanik davranışı, gerilim ve gerinim,* https://muhendishane.org/kutuphane/malzemelerin-mekanik-davranisi/gerilim-ve-gerinim, [Ziyaret tarihi:10 Nisan 2023].

[43]. DTA, 2020, *Gerilme ve gerinim nedir,* https://blog.dta.com.tr/gerilme-ve-gerinim-nedir/, [Ziyaret tarihi: 10 Nisan 2023].

[44]. Dokuz Eylül Üniversitesi, 2021, *Çekme Deneyi,* https://makina.deu.edu.tr/wp-content/uploads/2021/10/2Cekme.pdf , [Ziyaret tarihi: 15 Nisan 2023].

[45]. L.W. McKeen, Effect of Temperature and Other Factors on Plastics and Elastomers, third ed., William Andrew Publishing, Oxford, 2014, 9780323310178pp. 1-45.

[46]. L.W. McKeen, Introduction to the physical, mechanical, and thermal properties of plastics and elastomers, The Effect of Long Term Thermal Exposure on Plastics and Elastomers, William Andrew Publishing, Oxford, 2014, 9780323221085, pp. 43-71.

[47]. Isparta Üniversitesi, 2022 *Basma Deney Foyu,* https://teknoloji.isparta.edu.tr/assets/uploads/sites/436/files/makine-basma-deney-foyu-09052022.pdf, [Ziyaret tarihi: 18 Nisan 2023].

[48]. Matweb, *Compressivestrength,* https://www.matweb.com/reference/compressivestrength.aspx, [Ziyaret tarihi: 20 Nisan 2023].

[49]. Yangaz, M., 2019, *Yüksek sıcaklık şartlarında çalışan vana çeliğinin kaynak sonrası mikroyapısal ve mekanik özellikleri üzerine ısıl işlemin etkisi,* Yüksek Lisans, Sakarya Üniversitesi.

[50]. Aktaş, H., 2017, *Polimer Morfolojisi-Brightworks Engineering,* https://brightworksengineering.com/upload/4/teknik-bulten-ocak-2017.pdf, [Ziyaret tarihi: 5 Mart 2023].

[51]. Ankara Üniversitesi, 2023, *Polimerlerin Yapısı,* https://acikders.ankara.edu.tr/pluginfile.php/99508/mod_resource/content/1/KYM%20445%20Polimerlerin%20Yap%C4%B1s%C4%B1%20%28Tg%29%20-2018.pdf, [Ziyaret tarihi: 12 Mart 2023].

[52]. Groover, M.P., 1996, *Modern İmalatın Prensipleri,* Nobel Akademik Yayıncılık, Ankara, ISBN: 978-60320-054-3.

[53]. Al Christopher, C., da Silva, Í. G., Pangilinan, K. D., Chen, Q., Caldona, E. B. and Advincula, R. C., 2021, High performance polymers for oil and gas applications, *Reactive and Functional Polymers,* 162, 104878.

[54]. Ensinger Plastics, *PEEK,* https://www.ensingerplastics.com/tr-tr/yari-mamul/torlon-pai-polyamide-imide/PEEK, [Ziyaret tarihi: 5 Mart 2023].

[55]. Panayotov, I. V., Orti, V., Cuisinier, F., and Yachouh, J., 2016, Polyetheretherketone (PEEK) for medical applications, *Journal of Materials Science: Materials in Medicine,* 27, 1-11.

[56]. Koike, H., Honda, T., Kida, K., Santos, E. C., Rozwadowska, J., Houri, K., ...and Kanemasu, K., 2011, Influence of radial load on PEEK plastic bearings life cycle under water lubricated conditions, *In Advanced Materials Research* (Vol. 217, pp. 1260-1265). Trans Tech Publications Ltd.

[57]. Plastics Today, 2022, *Automotive and mobility,* https://www.plasticstoday.com/automotive-and-mobility/sabic-launches-pp-compounds-automotive-structural-applications, [Ziyaret tarihi: 8 Mayıs 2023].

[58]. Dhanumalayan, E., & Joshi, G. M., 2018, Performance properties and applications of polytetrafluoroethylene (PTFE)—a review, *Advanced Composites and Hybrid Materials, 1,* 247-268.

[59]. Ebnesajjad, S., and Khaladkar, P. R., 2017, *Fluoropolymer applications in the chemical processing industries: the definitive user's guide and handbook,* William Andrew.

[60]. Rao, M., Hooke, C. J., Kukureka, S. N., Liao, P., and Chen, Y. K., 1998, The effect of PTFE on the friction and wear behavior of polymers in rolling-sliding contact, *Polymer engineering & science,* 38(12), 1946-1958.

[61]. Dearn, K. D., Hoskins, T. J., Petrov, D. G., Reynolds, S. C., and Banks, R., 2013, Applications of dry film lubricants for polymer gears. *Wear,* 298, 99-108.

İNTİHAL RAPORU İLK SAYFASI

4801190699-Muhammet Faruk TOPRAK

ORİJİNALLİK RAPORU

%11	%10	%1	%5
BENZERLİK ENDEKSİ	İNTERNET KAYNAKLARI	YAYINLAR	ÖĞRENCİ ÖDEVLERİ

BİRİNCİL KAYNAKLAR

1	acikbilim.yok.gov.tr İnternet Kaynağı	%3
2	Submitted to The Scientific & Technological Research Council of Turkey (TUBITAK) Öğrenci Ödevi	%2
3	docplayer.biz.tr İnternet Kaynağı	%1
4	www.turkcebilgi.com İnternet Kaynağı	%1
5	tr.wikipedia.org İnternet Kaynağı	%1
6	acikerisim.sakarya.edu.tr İnternet Kaynağı	<%1
7	Submitted to Suleyman Demirel University Öğrenci Ödevi	<%1
8	Submitted to Ege Üniversitesi Öğrenci Ödevi	<%1
9	www.zwickroell.com İnternet Kaynağı	<%1

ETİK KURUL İZİN YAZISI

Uyarı: Canlı denekler üzerinde yapılan tüm araştırmalar için Etik Kurul Belgesi alınması zorunludur.

☐ **Etik Kurul izni gerekmektedir.**

☒ **Etik Kurul izni gerekmemektedir.**

Muhammet Faruk TOPRAK

KURUM İZNİ YAZILARI

Uyarı: Canlı ve cansız deneklerle yapılan tüm çalışmalar için kurum izin belgelerinin eklenmesi zorunludur. Gizlilik ve mahremiyet içeren durumlarda kurum adı kapatılmalıdır.

☐ **Kurum izni gerekmektedir.**

☒ **Kurum izni gerekmemektedir.**

Muhammet Faruk TOPRAK