

KOCAELİ ÜNİVERSİTESİ * FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

127580

**PEEK (POLYETHERETHERKETONE) ve KOMPOZİTLERİNDE KISA
FİBER TAKVİYESİ ve MİKRO YAPININ TRİBOLOJİK ÖZELLİKLERE
ETKİSİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Makine Müh. Taner YILMAZ

**TC. KOCaelİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

Anabilim Dalı: Makine Mühendisliği

Danışman: Yrd.Doç.Dr. Tamer SINMAZÇELİK

127580

HAZİRAN 2002

KOCAELİ ÜNİVERSİTESİ * FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**POLYETHERETHERKETONE (PEEK) MALZEMEDE KISA FİBER
TAKVİYESİ ve MİKRO YAPININ TRİBOLOJİK ÖZELLİKLERE ETKİSİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Makine Müh. Taner YILMAZ

Tezin Enstitüye Veriliş Tarihi : 06.06.2002

Tezin Savunulduğu Tarih : 03.07.2002

Tez Danışmanı

Yrd.Doç.Dr.Tamer SINMAZÇELİK

(T. Sinmazçelik)

Üye

Prof.Dr.Paşa YAYLA

(Paşa Yayla)

Üye

Prof.Dr.Ahmet ÜNAL

(Ahmet Ünal)

HAZİRAN 2002

**PEEK (POLYETHERETHERKETONE) ve KOMPOZTLERİNDE KISA
FBER TAKVYES ve MKRO YAPININ TRBOLOJK ÖZELLKLERE
ETKS**

Taner YILMAZ

Anahtar Kelimeler : Polyetheretherketone (PEEK), polimer kompozit, triboloji, mikro yap etkileri.

Özet : PEEK (Polyetheretherketone) ileri malzeme olarak adlandırılan bir polimerdir. Aromatik yapı nedeniyle malzemenin sıcaklık ve çevresel etkilere direnci yüksektir. Karmaşık moleküler yapı, mükemmel mekanik performans, düşük sürtünme katsayıları ve yüksek anma direnci nedeniyle PEEK stratejik malzeme haline gelmiş olup özellikle uzay ve havacılık endüstrisinde yatak malzemesi olarak kullanılmaktadır.

Bu çalışmada malzemenin anma karakteristikleri üzerinde etkili olan iki önemli parametre incelenmiştir. Birincisi takviye malzemesinin etkileri, ikincisi; mikro yapının PEEK ve kompozitlerinin anma davranışları üzerindeki etkileri. Deneysel çalışmalarda kullanılan malzemeler Victrex tarafından sağlanmıştır. Enjeksiyonla kalıplanmış takviyesiz PEEK polimer ve üç farklı rasgele dalmış kısa fiber takviyeli PEEK kompozitleri incelenmiştir.

Çalışmanın ikinci bölümünde ise sırasıyla işlemler yapılarak katkısız PEEK ve PEEK kompozitlerinde farklı moleküler yapılar elde edilmiştir. PEEK ve kompozitlerinde artan % kristalleme ve transkristalin tabaka oluşumu ve bunların anma davranışları üzerindeki etkileri incelenmiştir.

**SHORT FIBER REINFORCING and MICROSTRUCTURE EFFECTS on
TRIBOLOGICAL PROPERTIES of POLYETHERETHERKETONE (PEEK)
and ITS COMPOSITES**

Taner YILMAZ

Keywords : Polyetheretherketone (PEEK), polymer composite, tribology, microstructural effects.

Abstract : Polyetheretherketone (PEEK) is a polymer called as an advanced material. Aromatic backbone gives high temperature and environmental resistance. With a complex molecular structure and superb mechanical performance, PEEK becomes very strategic material because of their lower friction coefficient and wear resistance, PEEK is used as bearing materials especially in aerospace industry.

In this study we intend to show two important parameter effect of the wear characterization of the materials. First; the reinforcement type effects, second; microstructure effects on wear behavior of PEEK and its composites. Materials are kindly supplied from victrex. Injection molded, unreinforced and three different random oriented short fiber reinforced PEEK and it's composites are investigated.

In the second stage of study, with using thermal treatments we get different molecular structures of virgin PEEK and PEEK composites. An increase in % crystallization and transcrystalline layer formation and their effects on the wear behavior of PEEK and its composites are investigated.

ÖNSÖZ ve TEŞEKKÜR

Teknolojinin ulaştığı son noktada mühendislik uygulamalarında son derece gelişmiş makine ve ekipmanlarının kullanılması zorunluluğu ortaya çıkmıştır.

Denizaltıdan uzaya, savunma sanayi, kimya sektörü, tıp uygulamaları ve nükleer enerji üretimi gibi alanlarda kullanılmak üzere özellikleri son derece üst seviyede, ileri teknoloji ve bilgi birikimi ürünü yeni malzemelere ihtiyaç duyulmuştur.

Bu noktada “KOMPOZİT” yani “KARMA” malzemeler gündeme gelmiştir. Son yıllarda malzeme ve makine konstrüksiyonu ile ilgili pek çok araştırmacı bu malzemeler ve kullanım alanları ile ilgili çalışmaktadır. Çalışmalar üretim sırasında ve sonrasında maruz kalınan ısıl çevrimlerin, malzemenin ısıl, mekanik ve tribolojik özelliklerine olan etkileri konusunda yoğunlaştırılmıştır.

PLASTİK MALZEME ARAŞTIRMA MERKEZİ (PLASMAM) imkanlarını kullanmama izin veren, polimer ve polimer kompozitler gibi yeni mühendislik malzemeleri konusunda çalışmama imkan veren büyük destek gördüğüm danışman hocam sayın Yrd.Doç.Dr. Tamer SINMAZÇELİK' e teşekkür ediyorum.

Mayıs 2002

Taner YILMAZ

İÇİNDEKİLER

ÖZET	ii
ABSTRACT	iii
ÖNSÖZ ve TEŞEKKÜR.....	iv
İÇİNDEKİLER	v
SİMGELER DİZİNİ ve KISALTMALAR	viii
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	x
TABLolar DİZİNİ	xi
BÖLÜM 1. GİRİŞ.....	1
BÖLÜM 2. LİTERATÜR ÇALIŞMASI	3
2.1 Malzeme : PEEK (Polyetheretherketone)	3
2.1.1 Genel yapısı.....	3
2.1.2 Tribolojik özellikleri	5
2.1.3 Yüksek sıcaklıklardaki performansı.....	5
2.1.4 Aşınma direnci	6
2.1.5 Kimyasal direnç	6
2.2 Sürtünme ve Aşınmaya Giriş	6
2.2.1 Sürtünme ve aşınma	7
2.2.2 Temel triboloji terimleri.....	7
2.3 Sürtünmenin Mekanizması.....	8
2.3.1 Gerçek temas alanı	9
2.3.2 Sürtünmenin "adhezyon" bileşeni	12
2.3.3 Sürtünmenin "sürülme" bileşeni	14
2.3.4 Sürtünmenin "deformasyon" bileşeni	15
2.3.5 Kompleks sürtünme prosesi ve enerji kaybı mekanizmaları.....	17
2.4 Aşınma Mekanizmaları	18

2.4.1 Yüzey yorulması ve deformasyon aşınma mekanizması	19
2.4.2 Abraziv aşınma mekanizması	21
2.4.3 Tribo - kimyasal aşınma mekanizmaları	22
2.4.4 Adheziv aşınma mekanizması.....	24
2.4.5 Aşınma olayının sınıflandırılması	25
2.5 Sistem Özellikleri Olarak Sürtünme ve Aşınma	26
2.6 Fiberlerin ve Kendiliğinden Takviyenin Tribolojik Özelliklere Etkisi.....	28
BÖLÜM 3. DENEYSEL ÇALIŞMA.....	31
3.1 Malzeme.....	31
3.2 Isıl İşlemler	31
3.3 Isıl Analizler.....	33
3.3.1 Diferansiyel taramalı kalorimetre (DSC) deneyi	33
3.4 Mekanik Özelliklerin Tespit Edilmesi	34
3.4.1 Enstrumante edilmiş çentik darbe deneyi	34
3.4.2 Üç Nokta Eğme Deneyi	36
3.4.3 Aşınma deneyi.....	38
3.5 Fiziksel Özelliklerin Belirlenmesi.....	41
3.5.1 Kontak açısı ölçümü.....	41
3.5.2 Sertlik deneyi	43
BÖLÜM 4. DENEY SONUÇLARI.....	44
4.1 Diferansiyel Taramalı Kalorimetre (DSC) Deneyi	44
4.2 Çentik Darbe Deneyi.....	45
4.3 Üç Nokta Eğme Deneyi	47
4.4 Aşınma Deneyi.....	49
4.5 Kontak Açısı Ölçümleri	57
4.6 Sertlik Deneyi Sonuçları	57
BÖLÜM 5. SONUÇLAR.....	59
KAYNAKLAR	61

EKLER.....	63
ÖZGEÇMİŞ	67



SİMGELER DİZİNİ ve KISALTMALAR

A_r	: Gerçek temas yüzeyi
A_{or}	: Statik temas alanı
c	: Katsayı
d	: Aşınma parçacıklarının penetrasyon derinliği
d	: Tepecik kontak çapı
E	: Elastik modülü
E^I	: Kompozit young modülü
f	: Sürtünme katsayısı
f_a	: Sürtünme katsayısı (adhezyon bileşeni)
f_d	: Sürtünme katsayısı (deformasyon bileşeni)
F_S	: Sürtünme kuvveti
F_N	: Normal yük (newton olarak)
H	: Sertlik
k	: Archard aşınma katsayısı
k''	: Oksidasyon için hız faktörü
K_{Ic}	: Kırılma tokluğu
K_1	: Normal ve kesme gerilmesinde hafifleme
K_2	: Sertlik derecesi faktörü
n	: Pekleşme faktörü
P_y	: Akma basıncı
p	: Basınç
r	: Aşınma parçacığının yarı çapı
s	: Kayma mesafesi
t	: Zaman
T_g	: Cam geçiş sıcaklığı
T_m	: Kristal erime sıcaklığı
$\tan\delta$: Sürtünme mekanik kayıp faktörü

v	: kayma hız
w	: Çentik genişliği
W_v	: Aşınma hacmi
W_{12}	: Yüzey enerjisi
$\bar{\varepsilon}_1$: Tek yüklemde hasar gerçekleşen gerinim
η	: Tepeciklerin çizgisel dağılımı
α	: Büyüme faktörü
β	: Tepecik yarı çapı
δ_c	: Kritik çatlak açılma faktörü
γ	: Partikül büyüklüğü sabiti
γ_1	: 1. cismin yüzey enerjisi
γ_{12}	: 1. ve 2. cisim arasındaki yüzey enerjisi
γ_2	: 2. cismin yüzey enerjisi
ρ	: Abraziv/malzeme arayüzeyindeki sürtünme açısı
ρ	: Tribo-kimyasal reaksiyon tabakası kalınlığı
σ^1	: Tepecik yüksekliği dağılımı
σ_{12}	: Arayüzey çekme mukavemeti
$\tau_{s_{12}}$: Arayüzey kayma mukavemeti
τ_{maks}	: Maksimum kesme dayanımı
θ	: Tepecik eğimi
ξ	: Reaksiyon tabakası kritik kalınlığı
ASTM	: American Society of Mechanical Engineers
DMA	: Dynamic Mechanical Analysis
DMTA	: Dynamic Mechanical Thermal Analysis
DSC	: Differential Scanning Calorimeter
E _{max}	: Toplam kırılma enerjisi
E.F _{max}	: Plastik deformasyon öncesi elastik olarak depolanan enerji
F _{max}	: En yüksek darbe kuvveti

ISO	: International Standart Organization
KD	: Kristalleşme derecesi
S	: Su verilmiş deney örneği
PEEK	: Poly (ether ether ketone)
PPS	: Poly (phenylene sulfide)
X.Fmax	: En büyük darbe kuvvetine kadar olan yer değişimi
Xmax	: Kırılmaya kadar olan yer değişimi
Y	: Yaşlandırılmış deney örneği



ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 2.1	PEEK' in molekül yapısı	3
Şekil 2.2	PEEK birim hücresinin "100" düzlemi.....	4
Şekil 2.3	Tribo-kontak karakteristikleri	11
Şekil 2.4	Sürtünmenin adhezyon bileşeni	13
Şekil 2.5	Sürtünmenin sürülme bileşeni.....	14
Şekil 2.6	Sürtünmenin deformasyon bileşeni.....	15
Şekil 2.7	Sürtünmenin kayıp proses modelinin şematik gösterimi	17
Şekil 2.8	Tribolojik etkileşimler ve aşınma mekanizmaları.....	19
Şekil 2.9	Yüzey yorulması ve delaminasyon aşınması mekanizmaları	20
Şekil 2.10	Abraziv aşınma mekanizması	22
Şekil 2.11	Tribo-kimyasal aşınma modelinin karakteristikleri	23
Şekil 2.12	Adheziv aşınma mekanizması.....	25
Şekil 2.13	Tribolojik sistemlerin temel parametre grupları	27
Şekil 3.1	Su verme + ısıtma işleminin şematik gösterimi	32
Şekil 3.2	Isıtma işleminin şematik gösterimi	32
Şekil 3.3	Perkin-Elmer diferansiyel tarama kalorimetresi	33
Şekil 3.4	Deney örneğinin kırılma kesiti.....	34
Şekil 3.5	Deneyde kullanılan numunenin şekli ve boyutları.....	34
Şekil 3.6.a	Enstrumante çentik darbe cihazının mesnetleri arasına deney örneğinin yerleştirilmesi ve çekiç ile bilgisayar bağlantısı	35
Şekil 3.6.b	Ceast Resil 25 tipi çentik darbe cihazı.....	35
Şekil 3.7	Deneyde kullanılan numunenin şekli ve boyutları.....	36
Şekil 3.8	Instron 4411 testi cihazı.....	37
Şekil 3.9	Üç nokta eğme cihazını şematik gösterimi	37
Şekil 3.10	Şematik olarak çok amaçlı sürtünme ve aşınma düzeneği.....	39
Şekil 3.11.a	"Plint" çok amaçlı sürtünme ve aşınma cihazı (önden görünüş)	40
Şekil 3.11.b	"Plint" çok amaçlı sürtünme ve aşınma cihazı (yandan görünüş)	40
Şekil 3.12	Krüss G-10 tipi deney cihazı	41

Şekil 3.13	Spesifik yüzey enerjisi ile kontak açısı.....	42
Şekil 4.1	Örnek enstrumante edilmiş çentik darbe deney grafiği	46
Şekil 4.2	Isıl yaşlandırılmış 450 GL 30 malzemesinin çentik darbe test sonucu..	47
Şekil 4.3	Isıl yaşlandırılmış PEEK ve kompozitlerinin eğme modülü değerleri ..	49
Şekil 4.4	100 dev/dak' da 12 N' luk normal yük altında aşınma hacimleri.....	50
Şekil 4.5	900 dev/dak' da 12 N' luk normal yük altında aşınma hacimleri.....	50
Şekil 4.6	100 dev/dak' da 5.5 N' luk normal yük altında aşınma hacimleri.....	51
Şekil 4.7	900 dev/dak' da 5.5 N' luk normal yük altında aşınma hacimleri.....	51
Şekil 4.8	100 dev/dak' da 450 CA 30 malzemesinin sürtünme kuvvetleri.....	53
Şekil 4.9	900 dev/dak' da 450 CA 30 malzemesinin sürtünme kuvvetleri.....	53
Şekil 4.10	100 dev/dak' da 450 FC 30 malzemesinin sürtünme kuvvetleri.....	54
Şekil 4.11	900 dev/dak' da 450 FC 30 malzemesinin sürtünme kuvvetleri.....	54
Şekil 4.12	100 dev/dak' da 450 G malzemesinin sürtünme kuvvetleri.....	55
Şekil 4.13	900 dev/dak' da 450 G malzemesinin sürtünme kuvvetleri.....	55
Şekil 4.14	100 dev/dak' da 450 GL 30 malzemesinin sürtünme kuvvetleri	56
Şekil 4.15	900 dev/dak' da 450 GL 30 malzemesinin sürtünme kuvvetleri	56
Şekil 4.16	Malzemelerin sertliği	58
Şekil A.1	450 G / 5.5 N / 900 d/d / Y / x 100	63
Şekil A.2	450 G / 12 N / 900 d/d / Y / x 100	63
Şekil A.3	450 GL 30 / 5.5 N / 100 d/d / S / x 100.....	64
Şekil A.4	450 FC 30 / 12 N / 900 d/d / S / x 200	64
Şekil A.5	450 CA 30 / 5.5 N / 100 d/d / S / x 200	65
Şekil A.6	450 CA 30 / 5.5 N / 100 d/d / S / x 500	65
Şekil A.7	450 GL 30 / Çentik darbe / S / x 50	66

TABLULAR DİZİNİ

Tablo 2.1	PEEK'in birim hücre boyutları (A°).....	3
Tablo 2.2	PEEK ve diğer polimer malzemelere ait özellikler	4
Tablo 2.3	Farklı polimerlere ait ısıl eğilme sıcaklık değerlerinin karşılaştırılması ...	6
Tablo 4.1	Malzemelerin % kristalleşme değerleri	44
Tablo 4.2	Çentik darbe test sonuçları.....	46
Tablo 4.3	Üç-nokta eğme deney sonuçları.....	48
Tablo 4.4	Kontak açısı ölçümleri.....	57
Tablo 4.5	Rockwell R sertlik ölçümleri	58



BÖLÜM 1. GİRİŞ

Polimerlerin ve polimer kompozitlerin tribolojik özellikleri oldukça farklı ve karmaşıktır. Polimer malzemelerin mekanik özelliklerinden hareketle malzemenin tribolojik performansını ortaya koymak mümkün değildir, çünkü tribolojik performansa etki eden pek çok parametre mevcuttur ki bu parametreler arasında temas geometrisi, malzemenin pürüzlüğü, çevresel koşullar vb. yer alır. Diğer taraftan malzemeye ait birçok mekanik özellik polimerin tribolojik performansını etkiler. Bu parametreler arasında sertlik, modül, kayma mukavemeti, yüzey özellikleri vb. yer alır. Mikroyapı özelliklerinin iyileştirilmesiyle gelişmiş tribolojik performansa sahip polimerler elde etmek mümkün olmaktadır. Yarı kristalli termoplastik polimerlerde ve termoplastik matrisli kompozitlerde % kristalleşme, kristallerin oryantasyonu, yüzey özellikleri ısıl işlemlerle kontrol edilebilir ve geliştirilebilir. Bu çalışmada mikroyapının ısıl işlemlerle daha organize şekilde düzenlenmesinin yolları ve takviye malzemelerinin tribolojik performansı üzerindeki etkileri araştırılmıştır.

Sert ve yüzeyi çok düzgün olan çelik disk ile yumuşak polimer ve polimer kompozitler tribolojik etkileşimde olan malzeme çifti olarak seçilmiştir. Bu parametreler altında aşınmaya neden olan muhtemel mekanizma adheziv aşınmadır. Malzemelerin temel tribolojik karakteristiklerini ise takviyesiz saf PEEK oluşturur. Rastgele dağılımlı kısa fiber takviyeli PEEK kompozitleri ise takviye malzemelerinin özellikleri ile değişen karakteristikler gösterirler. Friedrich polimer kompozit tribolojisinde dört değişik aşınma mekanizması olduğunu belirtmiştir. Bunlar; 1 – Matris aşınması (plastik deformasyon, kazınma, kesilme ve çatlama), 2 – Fiber aşınması, 3 – Fiberleri çekip - çıkarma (pull-out) veya kırılma mekanizmaları, 4 – Fiber matris arayüzey deformasyonu [1].

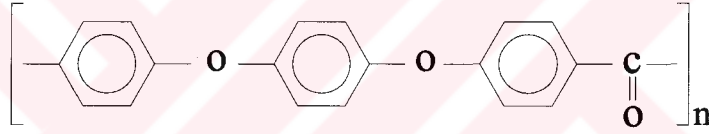
Polyetheretherketone (PEEK) yarı kristalli bir polimer olup mükemmel özellikleri nedeniyle mühendislik uygulamalarında kullanılmaktadır. PEEK ve kompozitleri mühendislik polimerlerinin yeni malzemelerinden biri olup yüksek sıcaklıklara dayanım özelliklerine sahiptir. Özellikle uzay ve havacılık endüstrisi tarafından çok kullanılan PEEK malzeme önemli ölçüde termoset reçinenin yerini almıştır. PEEK malzemesinin mikroyapısını, özellikle de kristalleşme derecesini uygun ısıtma ve soğutma çevrimleri kullanarak kontrol etmek mümkündür. Bilindiği gibi kristalleşme ve mekanik özellikler arasında önemli bir ilişki vardır. Örnek olarak, yapıdaki % kristalleşme miktarını arttırarak PEEK malzemesinin hem çekme hem de kayma dayanımını arttırabiliriz. Bununla birlikte malzemedeki % kristalleşme seviyesinin çevresel etkilere karşı olan direnci de etkilediği bilinmektedir. Kristalleşme derecesinin camsı geçiş sıcaklığı üzerine önemli etkileri söz konusudur [2]. Literatürde termoplastik matrisli kompozitlerin mekanik özelliklerinin, kristallerin mikroyapısıyla ve fiber yüzeyinde oluşan transkristalin tabaka ile ilişkili olduğu gösterilmişti. Fiberlerin özellikleri ve mikroyapı parametreleri (kristalleşme tipi ve derecesi, sferulitlerin büyüklüğü gibi) üretim esnasında kontrol prosesleri ile kontrol altında tutulur ve transkristalin tabakanın teşkil edilmesi sağlanır [3]. Isıl işlem esnasında kristal oluşumu ve olgunlaşması prosesleri devam etmektedir. Isıl işlem sıcaklığı ve ısıtma süresi iki önemli parametreyi teşkil etmektedir. Yüksek yaşlanma sıcaklıkları veya uzun ısıtma süreleri matris degradasyonuna (çözünme, bozunma) neden olur [4].

BÖLÜM 2. LİTERATÜR ÇALIŞMASI

2.1 Malzeme : PEEK (Polyetheretherketone)

2.1.1 Genel yapısı

PEEK yarı kristalli bir polimer olup kristal erime sıcaklığı, T_m 340° C, cam geçiş sıcaklığı ise, T_g 145° C civarındadır. PEEK' in molekül yapısı Şekil 2.1 de gösterilmiştir.

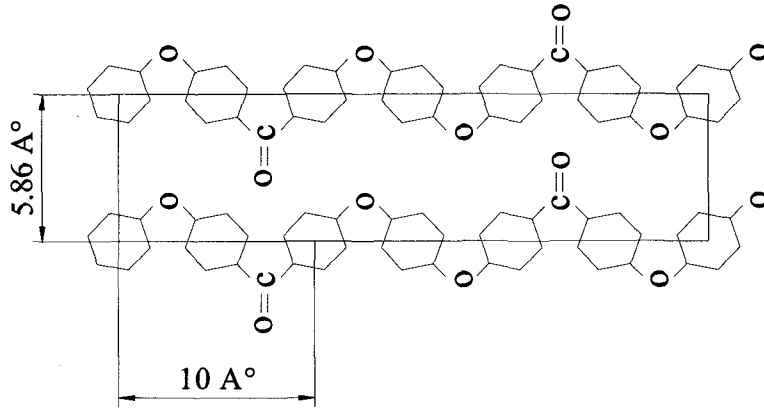


Şekil 2.1 PEEK' in molekül yapısı.

PEEK' in kristal yapısı, iki molekülün her birim hücreyi çaprazladığı ortorombik yapıdadır. Tablo 2.1 de Dawson ve Blundel tarafından hesaplanan hücre parametreleri verilmiştir. Şekil 2.2 de ise PEEK in “100” düzlemi görülmektedir. Bu malzemenin yapı ve özellikleri polimer zinciri üzerindeki yüksek konsantrasyonlu fenil halkaları ve diğer moleküllere güçlü hidrojen bağları ile bağlanmayı sağlayan karbon miktarı tarafından belirlenir. Bu, PEEK' in yüksek rijitlikte ve yüksek cam geçiş sıcaklığında olmasını sağlar.

Tablo 2.1 PEEK' in birim hücre boyutları (A°).

a	b	c
7.75	5.86	10.0



Şekil 2.2 PEEK birim hücresinin "100" düzlemi.

Tablo 2.2 PEEK ve diğer polimer malzemelere ait özellikler.

Malzeme	Yoğunluk (kg / m^3)	Çekme Dayanımı (MN / m^2)	Eğme Modülü (GN / m^2)	Kopma Uzaması (%)
ABS	1040	38	2.2	8
Epoksi	1200	70	3	3
Naylon 66	1140	70	2.8	60
Naylon 66 (% 33 cam)	1380	115	5.1	4
PEEK	1300	62	3.8	4
PEEK (% 30 karbon)	1400	240	14	1.6
PET	1360	75	3	70
PET (% 36)	1630	180	12	3
Fenolik	1690	55	8	0.8
Polykarbonat	1150	65	2.8	100
Polyamid	1420	72	2.5	8

PEEK lineer molekül yapısına sahiptir fakat lineer zincirler birbirine dolanmış durumdadır. Bu özellikler nedeniyle PEEK malzemesi dış etkenlere karşı daha dayanıklı olur. Böylelikle, çapraz bağlanma söz konusu olmadan, herhangi bir termoset kompozitten daha yüksek sünme direnci gösterir.

2.1.2 Tribolojik özellikleri

Triboloji, uygulanan yük altında bağıl hızla hareket eden temas halindeki yüzeylerin karşılıklı etkileşimi olarak tanımlanabilir. Diğer bir deyişle triboloji, sürtünme, aşınma ve yağlamadan oluşan üç terimli bir konuyu tek bir başlık altında toplayan bilim dalıdır. Malzemelerin yüzeyine çıplak gözle bakıldığında yüzey düzgün görünür, fakat yüzey mikroskop altında incelendiği zaman gerçekte böyle olmadığı, yüzeyde bir dizi minik tepelik (pürüzler) bulunduğu görülür. Bu nedenle iki malzeme birbiriyle temas edecek şekilde yerleştirildiğinde ve birbirine göre bağıl hızla hareket ettiklerinde malzemelerin her iki yüzeyindeki pürüzlerin birbirini koparması aşınma olarak, hareket anında harekete karşı meydana gelen direnç de sürtünme kuvveti olarak tanımlanmaktadır. Malzemelerin sürtünme ve aşınma davranışları değişik test yöntemleri uygulanarak değerlendirilebilir.

2.1.3 Yüksek sıcaklıklardaki performansı

PEEK™ polimer ve bileşikleri tipik olarak 143 °C'lık camı geçiş ve 343 °C'lık kristal erime sıcaklığına sahiptir. Birbirinden bağımsız yapılan testler PEEK™ polimerinin 315 °C'lık (ISO R75, cam fiber takviyeli) şekil değiştirme sıcaklığına ve 260°C'lık (UL 746B) sürekli kullanım sıcaklığına sahip olduğunu göstermiştir.

Mühendislik malzemelerinin diğer bir ısıl özelliği de ısıl eğilme sıcaklığıdır (ASTM D648). Bu deneyde, yüksek sıcaklıklarda malzemeye ait kısa süreli özelliklerin korunumu ölçülmektedir. Tablo 2.3' de, yük uygulanarak gerçekleştirilen ısıl eğilme sıcaklığı deneyleri sonucu cam fiberlerle takviye edilmiş farklı polimerlerin karşılaştırılması verilmiştir. Bu değerlere göre, PEEK' in sahip olduğu yüksek eğilme sıcaklığı ile, kısa süreli ısıl şoklara dayanıklı olduğu görülmüştür.



Tablo 2.3 Farklı polimerlere ait ısıl eğilme sıcaklık değerlerinin karşılaştırılması.

Polimer adı	Isıl eğilme sıcaklığı (°C)
Polyetheretherketone (PEEK)	312
Polyamideimide (Torlon)	274
Polyphenylene sulfide (PPS)	263
Nylon 6.6	254
Polybutylene terephthalate	220
Poyetherimide (Ultem)	216
Polyarylate	179
Polysulfone	177
Polycarbonate	149

2.1.4 Aşınma direnci

PEEK™ polimeri mükemmel sürtünme ve aşınma özelliklerine sahiptir. Bu özellikler özellikle karbon fiber ve teflon ile takviye edilen malzemelerde optimize edilmiştir. Bu malzemeler geniş bir basınç, hız ve sıcaklık bölgesinde oldukça yüksek aşınma direnci gösterirler.

2.1.5 Kimyasal direnç

PEEK™ polimeri kimyasal çevrelere karşı mükemmel direnç gösterir, hatta yüksek sıcaklıklarda dahi bu özelliğini devam ettirmektedir. PEEK™ polimerini çözen tek kimyasal konsantre (derişik) sülfirik asittir.

2.2 Sürtünme ve Aşınmaya Giriş

Triboloji; sürtünme, aşınma ve yağlamadan oluşan üç terimli konuyu tek bir başlık altında toplayan bilim dalıdır.

2.2.1 Sürtünme ve aşınma

Sürtünme ve aşınma tribolojinin bir alt koludur. Triboloji birbiri arasında moleküler etkileşim olan, temas halinde ve bağıl bir hızla hareket eden cisim veya partiküller arasındaki olaydır. Triboloji bu şekilde birbiri ile bağıl hareket sonucu iletilen yada kaybolan enerji ve malzeme kayıplarına yol açan sürtünme, aşınma ve yağlama ile ilgilenen bir bilimdir.

2.2.2 Temel triboloji terimleri

Triboloji disiplinler arası bir bilim dalıdır ve mekanik, malzeme, akışkanlar mekaniği ve çeşitli bilim dalları ile yakından ilişkilidir. Standart terimlerin kullanılması ve bu konuda bir eşgüdüm sağlanması amacıyla 1969 yılında Uluslararası Mühendislik Malzemeleri aşınmasını inceleyen araştırma grubunun çalışmaları neticesi 1980 yılında ASME yayını olarak "Wear Control Handbook" yayımlanmış ve triboloji ile ilgili önemli tanım ve terminoloji üzerinde uzlaşmıştır. Bu şekilde tribolojinin üç temel tanımı aşağıdaki şekilde yapılmıştır.

Sürtünme kuvveti : Bir cisim diğer bir cisim yüzeyinde bağıl olarak hareket ederken yada hareket etmek üzere iken dışarıdan bir kuvvetin etkisi altında iki cismin temas ettiği ara kesit düzlemi boyunca teğetsel olarak etkiyen direnç kuvvetidir.

Aşınma : Cisim yüzeyinde bağıl hareket neticesi gerçekleşen malzeme kaybı.

Yağlama : Yağlayıcı kullanmak sureti ile yük taşıyan iki yüzey arasındaki sürtünme direnci, aşınma ve diğer yüzey bozulmalarının azaltılmasıdır.

Tribolojik özellikler oldukça karmaşık ve aynı anda pek çok parametrenin etkili olduğu bir olaydır. Sürtünme, aşınma ve yağlamanın farklı tip, mod ve prosesleri ile meydana gelmesi nedeniyle doğru saptamaların yapılabilmesi için bu farklılıkların dikkate alınması gereklidir. Triboloji üç farklı alt başlıkta incelenmektedir.

- a) Hareketin kinematiği veya tipi : (kayma, yuvarlanma, darbe vs.)
b) Malzemenin tipi : (katı, sıvı, metal, polimer vs.)
c) Tribolojik proses tipleri : (hidrodinamik, adhezyon, abrazyon vs.)

2.3 Sürtünmenin Mekanizması

Kayma yüzeyleri arasındaki sürtünme kompleks moleküler-mekanik etkileşimleri neticesinde ortaya çıkmaktadır.

Bu etkileşimler pürüzlerin deformasyonu, kırılmış parçalar nedeni ile sürülmesi (ploughing) ve temas yüzeyinde sert dış yüzey ile aradaki adhezyon neticesinde oluşmaktadır. Sürülme bir çeşit deformasyondur. Sürtünme kuvveti iki önemli parçadan oluşmaktadır; deformativ bileşen ve adheziv bileşen.

$$F_f = F_a + F_d \quad (2.1)$$

F_f sürtünme kuvveti, F_a adheziv sürtünme kuvveti ve F_d deformativ sürtünme kuvvetidir. Benzer şekilde sürtünme katsayısı da şöyle yazılabilir.

$$f = f_a + f_d \quad (2.2)$$

İki cisim eğer F_N normal kuvveti ile birleştirilirse, kaymayı başlatmak ve devam ettirmek için belirli bir kuvvete ihtiyaç duyulur. Bu “Sürtünme kuvvetidir” (F_s). Bu durumda;

a) Temas eden iki cisim arasında relatif bir hareket olduğunda sürtünme kuvveti, F_s yüzeylerin relatif hızlarının zıt yönünde etkili olur.

b) Sürtünme kuvveti F_s , F_N normal kuvveti ile orantılıdır.

$$F_s = f.F_N \quad (2.3)$$

Bu eşitlikten sürtünme katsayısı;

$$f = \frac{F_S}{F_N} \text{ olur.} \quad (2.4)$$

c) Sürtünme kuvveti temas bölgesi geometrisinden bağımsızdır. Amontons-Coulomb bağıntısı olarak bilinen (kuru sürtünme) bağıntı tribolojik uygulamalarda kılavuzluk eden önemli bir bağıntıdır.

Uzun yıllarca yapılan araştırmalara rağmen temas halindeki iki malzemenin sürtünmesini hesaplayacak basit bir model kurulamamıştır. Sürtünme karmaşık moleküler-mekanik etkileşimler sonucu oluşmaktadır. Bunların dışında kaymanın şekli, temastaki malzemeler, yüzey topoğrafyası ve etkileşimde bulunan çevre etkili olmaktadır.

Tabor' un çalışmaları neticesi kuru sürtünme üç temel unsurdan etkilenmektedir [5].

- a) Gerçek temas halindeki kayan yüzeylerin alanı.
- b) Kontak esnasında arayüzeyde oluşan bağın mukavemeti ve tipi.
- c) Kayma esnasında temas bölgesinin içindeki ve etrafındaki malzemenin hareketi (kayma-kırılma).

Sürtünme aynı zamanda bir enerji kaybı-dönüşümü prosesidir. Sürtünmenin enerji yaklaşımı oldukça önemlidir. Bu yüzden mekanik enerjide sürtünme nedenli kayıplar gerçekleşmektedir. Öncelikle, mekanik enerji temas bölgesinde gerçek temas alanının oluşumunda kullanılmaktadır. İkinci olarak mekanik enerji plastik deformasyonlara, sürülmeye ve adhezyon transformasyonuna neden olmaktadır. Üçüncü olarak da termal kayıplar, depolama ve iletimler sonucu olmaktadır.

2.3.1 Gerçek temas alanı

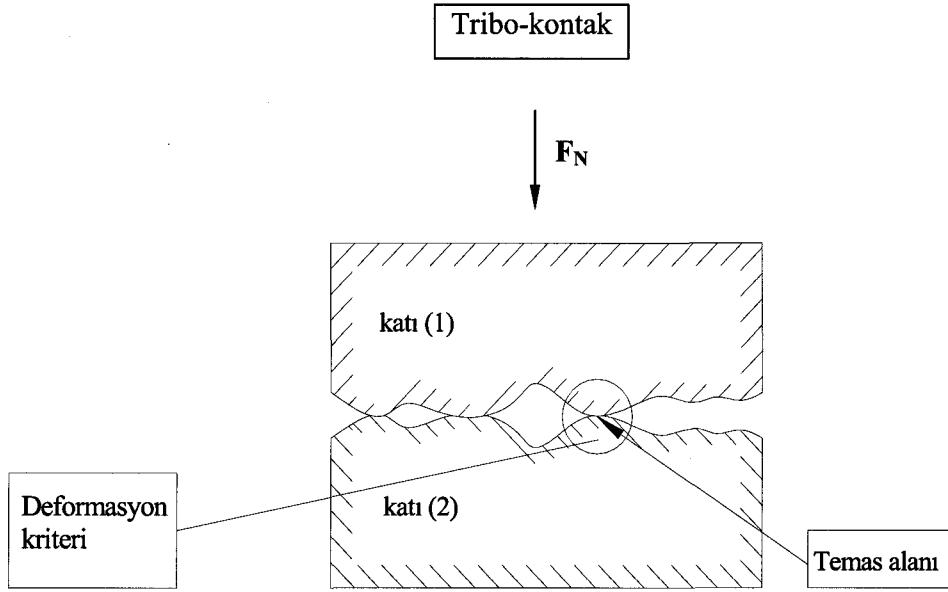
İki düz yüzeye sahip katı cisimlerin temas halinde olduğunu düşünelim. Yüzey topoğrafyasının tribolojik performanstaki etkisi son derece önemlidir. Temas halindeki yüzeylerde belirli bir yükseklik dağılımı (tepecik dağılımı) söz konusudur. Bu tepecikler tatbik edilen yük altında elastik yada plastik deformasyonlarla şekil

değiştirir. Bağımsız temas noktalarının toplamı ile oluşan gerçek temas alanı geometrik temas alanından çok daha küçüktür. Tribo-temas alanındaki gerçek temas alanını etkileyen özellikler ve parametreler Şekil 2.3' de görülmektedir. Bu noktada iki önemli unsur söz konusudur.

- a) Deformasyon özellikleri.
- b) Yüzey topoğrafyası karakteristiği.

Polimer malzemelerde viskoelastik ve viskoplastik etkiler ve gevşeme (relaxation) davranışları dikkate alınmalıdır.





Deformasyon Kriteri	Temas alanı
$\psi = \frac{E'}{P_y} \cdot \left(\frac{\sigma'}{\beta} \right)^{\frac{1}{2}}, \psi < 0,6 : \text{plastik}$ $\psi > 1 : \text{elastik}$	elastik : $A_{or} = C \cdot \left(\frac{F_N}{E} \right)^n, \frac{2}{3} < n < 1$
	plastik : $A_{or} = C \cdot \frac{F_N}{P_y} \approx \frac{F_N}{H}$
	Temas oluşumu : $A_r = A_{or} \cdot \left[1 + a \cdot \left(\frac{F_S}{F_N} \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}}, a \approx 9$

Deformasyon özellikleri	Yüzey topoğrafyası
Elastik modül, E	Tepecik dağılımı
Akma basıncı, P_y	Tepe yarı çapı, B
Sertlik	Tepecik yüksekliği dağılımı, σ'
	Tepecik eğimi, θ

Sekil 2.3 Tribo-kontakt karakteristikleri.

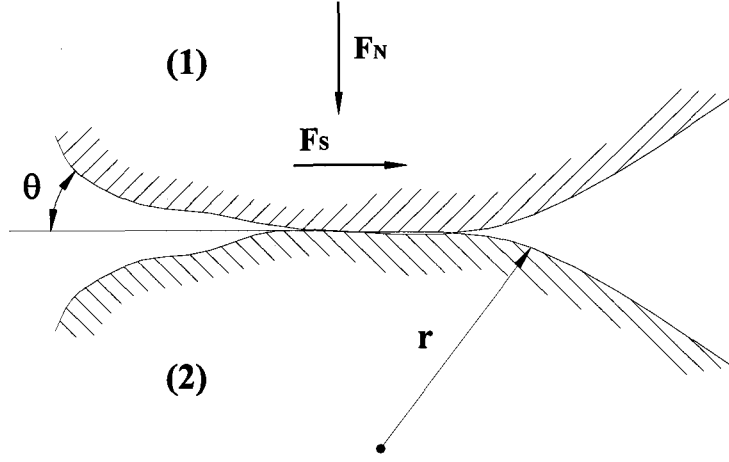
2.3.2 Sürtünmenin “adhezyon” bileşeni

Sürtünmenin adhezyon bileşeni arayüzey adhezyon bağlarının oluşması ve kopması ile gerçekleşmektedir. Temiz yüzeyli metallerde temas halindeki malzemelerin moleküler yapıları ile açıklanmaktadır. Teorik olarak iki temas halindeki katı arasındaki çekim kuvveti (moleküler) söz konusu olmaktadır. Buna katıların “kohezyonu” denilmektedir. Metalik, iyonik, kovalent gibi birincil kimyasal bağlar ile Van der Waals bağları gibi bağ oluşumları söz konusu olmaktadır. Örneğin, iki parça temiz altın temas ederse metalik bağ oluşur. Oluşan bağ altının kendi moleküler çekim kuvvetine sahip olmaktadır. Kaya tuzunda yüzey kuvvetleri kısmen iyoniktir. Polimer malzemelerde ise ağırlıklı olarak Van der Waals kuvvetleri etkili olmaktadır.

Sürtünmenin adhezyon bileşeni çok basit şekli ile Bowden ve Tabor tarafından açıklanmıştır. Bu modelde arayüzey kayma dayanımı ve tepeliklerin kayma gerilmesi değerleri kullanılmıştır (Şekil 2.4). Bowden ve Tabor’ un bu basit modeli (sürtünmedeki adhezyon bileşeni) bazı teorilerle genişletilmiştir. Bunlar;

- a) Yüzey enerjisi teorisi : Temastaki elemanların yüzey enerjileri.
- b) Adheziv birleşen bölgelerin kırılma mekaniği modeli : Çatlak açılma faktörü ile [6].

Bunun yanı sıra sürtünmenin adhezyon bileşeni düşünüldüğünde etkili bazı diğer parametreler söz konusudur. Bunlar “arayüzey kayma dayanımı” ve “yüzey enerjisi” dir.



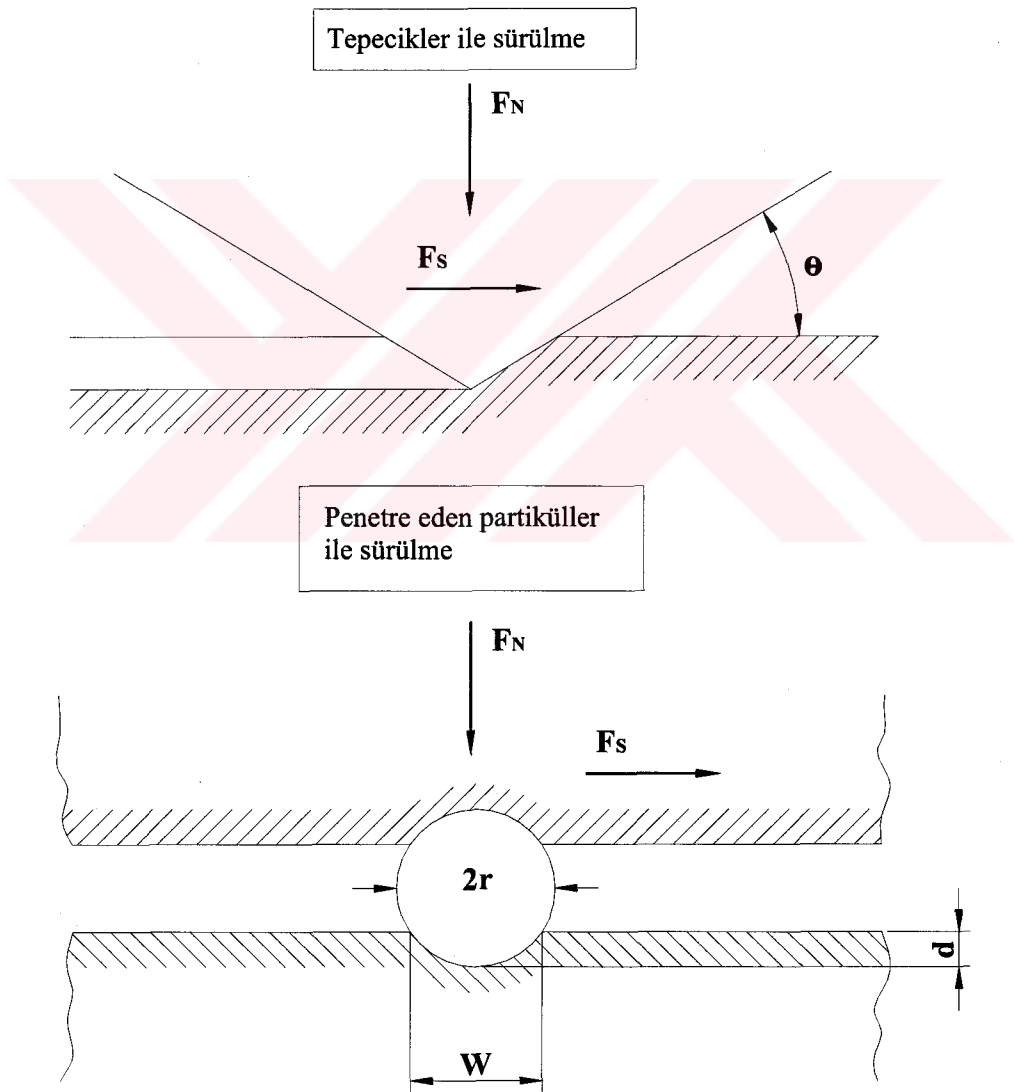
Basitleştirilmiş model :	$f_a = \frac{F_S}{F_N} \approx \frac{\tau_{s_{12}}}{P_y}$ <p>$\tau_{s_{12}}$: Arayüzey kayma mukavemeti P_y : Akma basıncı</p>
Yüzey enerjisi teorisi : (W_{12}) : Yüzey enerjisi	$f_a = \frac{\tau_{s_{12}}}{P_y} \cdot \left[1 - 2 \cdot \frac{W_{12} \cdot \tan \theta}{\beta \cdot P_y} \right]^{-1}$ <p>$W_{12} = \gamma_1 + \gamma_2 - \gamma_{12}$</p>
Kırılma mekaniği modeli :	$f_a = c \cdot \frac{\sigma_{12} \cdot \delta_c}{n^2 \cdot (F_N \cdot H)^{\frac{1}{2}}}$ <p>σ_{12} : Arayüzey çekme mukavemeti δ_c : Kritik çatlak açılma faktörü n : Pekleşme faktörü H : Sertlik</p>

Şekil 2.4 Sürtünmenin adhezyon bileşeni.

2.3.3 Sürtünmenin “sürülme” bileşeni

Eğer bir yüzey diğerinden daha sert ise, sert tepecikler yumuşak yüzey içine girebilmektedir (penetrasyon). Yüzeye teğet olan harekette sürülme direnci nedeniyle belirli bir kuvvet oluşur. Bu doğal olarak sürtünme direncini etkilemektedir.

Şekil 2.5’ de görüldüğü gibi “sürülme” tepecikler etkisiyle yada penetre etmiş aşınma ürünleriyle olabilmektedir. Bu modele kayan konik tepecik örnek verilmiştir. Sürtünme kuvveti tepecik eğiminin tanjantı ($\tan \theta$) ile orantılıdır.



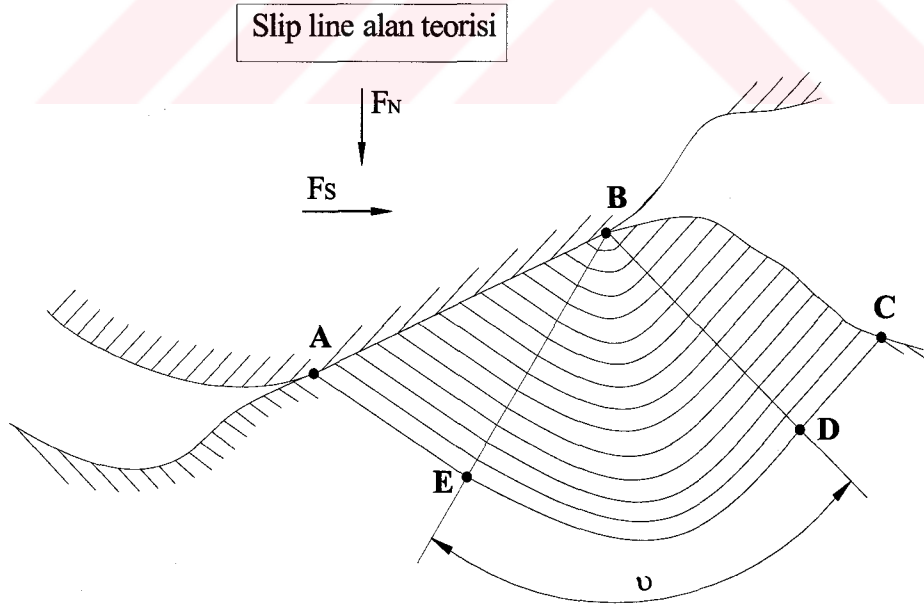
Şekil 2.5 Sürtünmenin sürülme bileşeni.

Yüzeyi kırılğan malzemelerde sürülme esnasında mikro – kırılma oluşabilmektedir. Genişletilmiş bu model Zum Gahr tarafından ortaya konulmuştur [7]. Sürülmenin kırılma mekaniği modelinde kırılma tokluğu, elastik modül ve sertlik ana parametrelerdir. Diğer sürülme prosesi malzemeye penetre eden aşındırıcı partiküllerin etkisi ile gerçekleşmektedir. Bu davranış Suh ve arkadaşları tarafından açıklanmıştır [8].

Sürülmenin sürtünmeye katkısı partikülün eğrilik yarıçapının penetrasyon derinliğine oranı ile çok yakından ilişkilidir. Malzemenin özelliklerinin yanı sıra tepeciklerin geometrik özellikleri veya penetre etmiş aşınma partikülleri kayan yüzeylerin sürtünme davranışlarını etkilemektedir.

2.3.4 Sürtünmenin “deformasyon” bileşeni

Kayma teması süresince oluşan deformasyonlar ile, mekanik enerji plastik deformasyonlar şeklinde kaybolur. Green [9] kontak halindeki yüzey tepeciklerinin deformasyonlarını analiz etmiştir (Şekil 2.6).



Şekil 2.6 Sürtünmenin deformasyon bileşeni.

Şekil 2.6' de görüldüğü gibi temas esnasında üç ana bölge oluşmaktadır. ABE, BED ve BDC bölgeleri.

λ faktörü bu bahiste önemli bir faktördür. λ ; elastik modülün sertliğe oranıdır. Eğer tepecik teması tamamen plastik ise ve tepecik eğimi 45° ise, sürtünme katsayısı $f = 1$ ' dir. Bu değer $f = 0.55$ ' e kadar inmektedir, tepecik eğiminin 0° a gitmesi ile sürtünmenin deformasyon bileşeni dikkate alındığında diğer malzeme özelliklerinin, malzeme mikroyapısı, termal yumuşama ve malzeme tabakaları etkili olmaktadır.

Kısaca deformasyon bileşenine etki eden faktörler;

- a) Gerçek temas alanı.
- b) Kayma esnasındaki malzemenin kayma dayanımı.
- c) Kayma esnasında arayüzeydeki ortalama kayma dayanımı. Bu değer işletme şartlarına (yük, kayma, hız, sıcaklık ve diğer malzeme karakteristiklerine, kristal yapıya, mikroyapıya ve pekleşmeye (work-hardening)) bağlıdır.

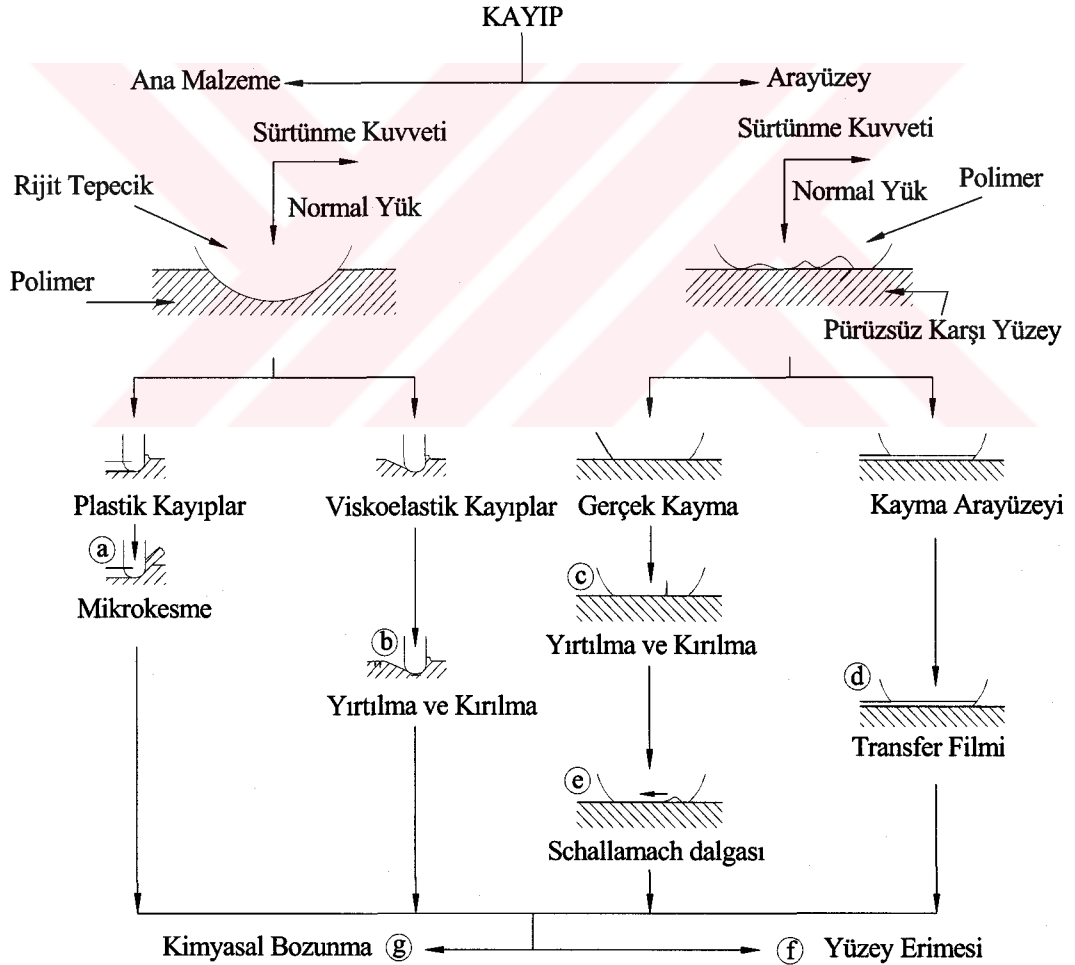
Sürtünmenin deformasyon bileşeni ve malzemenin mikroyapısı ile ilgili bağıntı aşağıda verilmektedir [10],

$$f_d = \zeta \cdot \left(\frac{P}{E} \right) \cdot \tan \delta \quad (2.5)$$

Burada ξ yüzey karakteristiği ile ilgilidir. $\tan \delta$ değeri ise özellikle kompozit malzemelerde arayüzey mukavemetinin büyüklüğünü gösteren önemli bir değerdir. $\tan \delta$ ' nın yüksek olması kompozit arayüzey mukavemetinin kötü olması demektir. $\tan \delta$ DMTA deneyleri ile ölçülür. $\tan \delta$ ' sı küçük malzemelerde fiber-matris arayüzey değerleri yüksek demektir. Bu malzemelerde fiberlerin kırılmaları ve yapıdan uzaklaşmaları zorlaşır.

2.3.5 Kompleks sürtünme prosesi ve enerji kaybı mekanizmaları

Bu konu ile ilgili olarak Briscoe' nun [11] detaylı çalışmaları bulunmaktadır. Şekil 2.7' de sürtünme kaynaklı enerji kaybı, iki terimli etkileşimsiz kayıp prosesleri modeli ile açıklanmaktadır. Sürtünme işinin iki ayrı bölgede (arayüzey bölgesi) olduğu düşünülür. Arayüzey bölgesi oldukça dar ve yüksek miktarda enerji kaybının olduğu bölgedir. Bu kayıplarda sürtünmenin adhezyon modelinin ağırlıklı olduğu varsayılmaktadır. Diğer prosesler daha fazla hacimde malzeme deformasyonuna ve düşük seviyelerde enerji kayıplarına neden olduklarından dikkate alınmamıştır. Sürülme ve deformasyon mekanizmaları bu kategoridedir.



Şekil 2.7 Sürtünmenin kayıp proses modelinin şematik gösterimi.

Şekil 2.7' de görülen prosesleri aşağıdaki maddeler ile daha ayrıntılı olarak açıklayabiliriz;

- a) Plastik yırtılmalar ve sonucunda mikro kesme.
- b) Viskoelastik yırtılmalar sonucunda yorulma çatlağı ve kırılma, yüzey altı ısınması ve hasarı.
- c) Gerçek arayüzey kayması, yüksek yüzey gerinimi ve ısınma, önemli kimyasal bozunumlar için potansiyel oluşturur.
- d) Arayüzey bölge kayması, polimer içinde kırılma (kopma) ve transfer aşınması.
- e) Gerçek arayüzey kayması alt grubu, Schallamach dalgası oluşumu.

2.4 Aşınma Mekanizmaları

Sürtünme gibi aşınma da oldukça kompleks bir olaydır. Pek çok mekanizma ve pek çok faktör etkili olmaktadır. 1950' lerde Burwell [12] aşınma mekanizmalarının temel olarak 4' de ayrılabilceğini göstermiştir. Bu başlıklar abrazyon, adhezyon, yüzey yorulması ve tribo kimyasal proseslerdir.

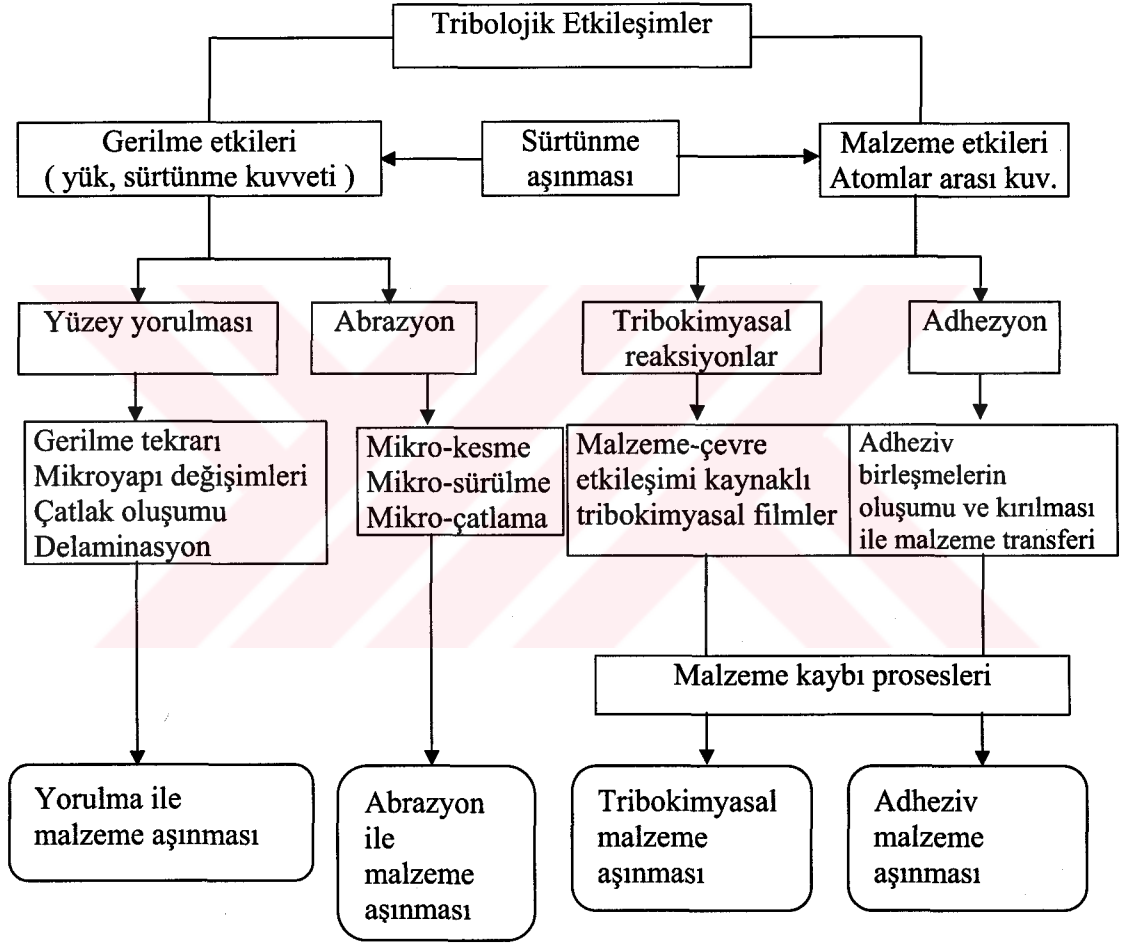
Aşınma kısaca tanım olarak "bağıl hareket eden temas halindeki yüzeylerde meydana gelen malzeme kaybıdır". Temel olarak aşınma miktarı yada aşınma davranışı malzemeye, çevresel ve operasyon şartlarına ve aşınan cisimlerin geometrisine bağlıdır.

Aşınma mekanizmalarını, malzemelerin mikroyapıları ve mekanik özellikleri belirlemektedir. Bu davranış ve özellikleri ise çalışma şartları ve sıcaklık yakından etkilemektedir. Aşınmayı kayan yüzeylerin adhezyonu, adheziv olmayan prosesler, adheziv ve adheziv olmayan etkileşimlerle açıklayabiliriz. Sürtünme prosesleri, kayan yüzeylerin kimyasal ve fiziksel özelliklerinde değişikliklere yol açar.

Pek çok parametrenin etkilediği olaylar neticesi cisimlerde aşınma sonucu malzeme kaybı söz konusu olmaktadır. Şekil 2.8' de gösterildiği gibi aşınma, iki ana nedene dayanır.

a) Gerilme etkileşimleri : Yük kuvvetinin ve sürtünme kuvvetlerinin kombine etkisiyle aşınma prosesleri, yüzey yorulması ve abrazyon olarak sonuçlanmaktadır.

b) Malzeme etkileşimleri : Temas halindeki moleküler kuvvetler temas eden iki katı cisim arasında yada katı cisimler ile çevresel atmosfer arasında aşınmaya sebep olur.



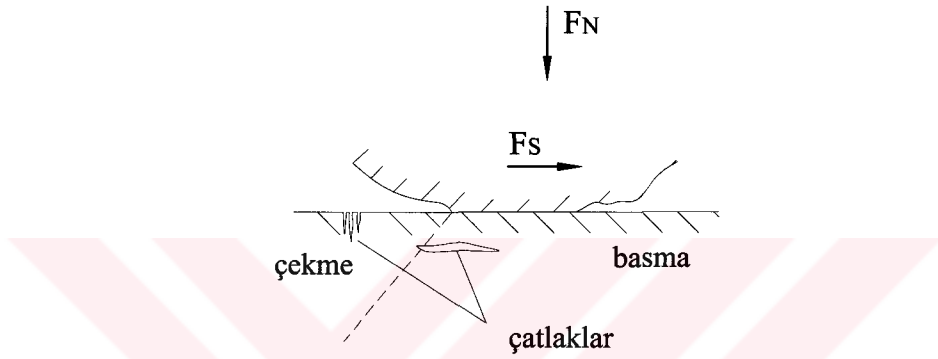
Şekil 2.8 Tribolojik etkileşimler ve aşınma mekanizmaları.

2.4.1 Yüzey yorulması ve deformasyon aşınma mekanizması

Malzemelerde tekrarlı yüklemeler sonrası mikroyapı değişimleri ve hasarları oluşmaktadır. Benzer şekilde tekrarlı tribolojik yüklemeler neticesi yüzey yorulması olayı sonucunda aşınma parçacıklarının oluşumu söz konusu olmaktadır.

Yorulma aşınması genellikle tekrarlı gerilmelerin olduğu yuvarlanma temaslarında olmaktadır. Ancak tepecikler kayma esnasında tekrarlı gerilmelere de maruz kalmaktadır. Bu etki gerilme konsantrasyonuna ve çatlak oluşumu ve ilerlemesine yol açmaktadır.

Yüzeysel yorulma modelindeki aşamalar ve etki eden unsurlar Şekil 2.9' da gösterilmiştir.



Yorulma-Aşınma Modeli	Delaminasyon Aşınma Modeli
$W_v = c \cdot \frac{\eta \cdot \gamma}{\epsilon_1^2 \cdot H} \cdot F_N \cdot S$	(a) Temas noktalarında gerilmelerin iletimi
<p>η : Tepeciklerin çizgisel dağılımı</p> <p>γ : Partikül büyüklüğü sabiti</p> <p>ϵ_1 : Tek yüklemde hasar gerçekleşen gerinim</p> <p>H : Sertlik</p>	(b) Her tekrarda artan plastik deformasyon
	(c) Yüzey altı boşluk ve çatlak oluşumu
	(d) Çatlak oluşumu ve ilerlemesi
	(e) Aşınma parçacıklarının düzlemsel parçalar halinde delaminasyonu

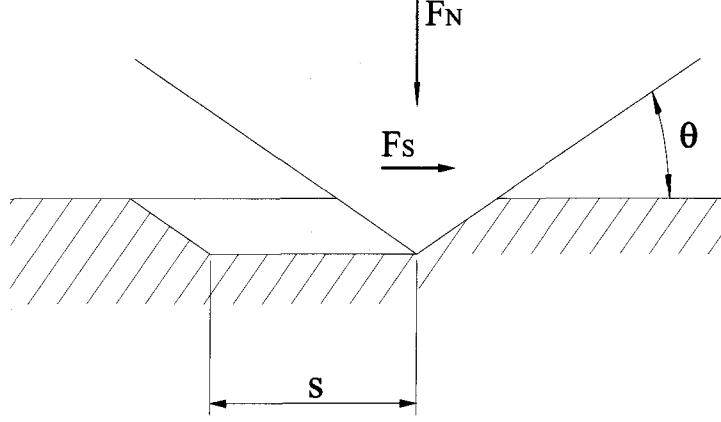
Şekil 2.9 Yüzey yorulması ve delaminasyon aşınması mekanizmaları.

Yüzey altı bölgelerde kayan tepeciklerin temasları sonucu aşınmadaki “delaminasyon teorisi” Suh [13] tarafından ortaya konulmuştur. Kısaca özetlemek gerekirse Şekil 2.9' de görülen çekme ve basma bölgeleri arasında çatlak oluşur ve

çatlağın hemen ucunda kayma gerilmeleri oluşur. Bu şekilde çatlak giderek ilerler. Yüzeyin belirli bir mutlak alanında oluşan bu çatlak daha sonra “delaminasyon” yani tabaka ayrışması şeklinde ayrılıp gider. Aşınma bölgesine bakıldığında çatlağın ilerleme ve durma bölgeleri görülebilmektedir. Yüzeyde dalgalı bir denizi andıran bir görüntü oluşmaktadır.

2.4.2 Abraziv aşınma mekanizması

Abraziv aşınma, bir yüzeyin diğerinden daha sert olduğu durumlarda ortaya çıkmaktadır. Sert olan yüzey tepecikleri plastik deformasyonla birlikte yumuşak yüzeye penetre eder. Teğetsel hareketin etkisi ile sert olan yüzey, yumuşak olan yüzeyden mikro sürülme, mikro kesme ve mikro çatlama etkilerinin kombine bileşimi sonucu malzeme kaldırır. Şekil 2.10’ da belirtildiği gibi abraziv aşınma basitçe modellenebilir. Aşınma hacmi penetre eden abraziv partikülün tepe eğimi ile ilişkilidir. Aşınma hacmi aynı zamanda aşınan malzemenin sertliğine bağlıdır. Malzemenin sertliğini ve yüzey çizilme direncini arttıran her türlü faktör malzemenin abraziv aşınma direncini artırır.



Basitleştirilmiş Model	Genişletilmiş Model
$W_v = \frac{2}{\pi} \cdot \frac{\tan \theta}{H} \cdot F_N \cdot s$	$W_v = n^2 \cdot \frac{P_y \cdot E \cdot F_N^{\frac{3}{2}}}{K_{Ic}^2 \cdot H^{\frac{3}{2}}} \cdot s$
<p>E : Elastik modül H : Sertlik K_{Ic} : Kırılma tokluğu n : Pekleşme faktörü P_y : Akma dayanımı s : Kayma mesafesi</p>	

Şekil 2.10 Abraziv aşınma mekanizması.

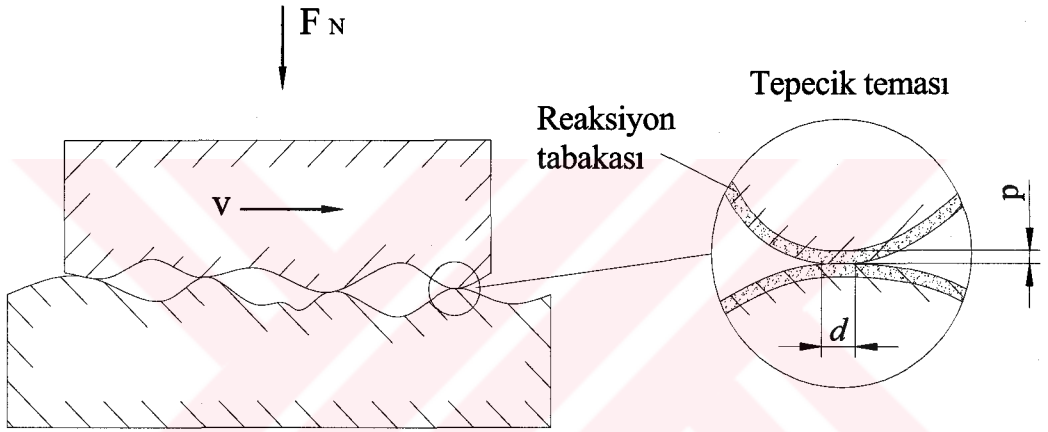
2.4.3 Tribo – kimyasal aşınma mekanizmaları

Daha önce açıklanan yüzey yorulması, abrazyon gerilme etkileşimleri ve deformasyon özellikleri yanında tribokimyasal aşınma da üçüncü bir etkidir. Ortam (çevre) ve makine parçaları ile çevre arasındaki dinamik etkileşimler aşınma proseslerinde etkili olmaktadır (Şekil 2.11).

Tribokimyasal aşınma aşağıdaki şekilde özetlenebilir :

- a) Birinci safhada malzeme yüzeyi, çevre ile reaksiyona girer. Bu proseste yüzeyde reaksiyon ürünleri oluşur.
- b) İkinci safhada reaksiyon ürünleri çatlak oluşumu ve abrazyon etkisi ile yüzeyden uzaklaşır. Bu tabakanın ortadan kalkmasıyla yeni bir yüzey oluşmuş olur ve proses bu şekilde devam eder.

Sıcaklık bu reaksiyonları hızlandıran önemli bir faktördür. Genellikle çevresel etkiler ile oluşan oksidasyon sonucu yüzeyde kırılğan bir yapı oluşur ve bu yapının kırılıp deforme olması ana malzemeden daha kolaydır.



Tribo-kimyasal Aşınma Mekanizması	
$W_v = \frac{k''}{\xi^2 p^2} \cdot \frac{d}{H} \cdot \frac{F_N}{v} \cdot s$	
k''	: Oksidasyon için hız faktörü
d	: Tepecik kontak çapı
p	: Reaksiyon tabakası kalınlığı
ξ	: Reaksiyon tabakası kritik kalınlığı
H	: Sertlik
s	: Kayma mesafesi

Şekil 2.11 Tribo-kimyasal aşınma modellerinin karakteristikleri.

2.4.4 Adheziv aşınma mekanizması

Adheziv aşınma prosesleri temas halindeki katı malzemelerde atomik ölçekte arayüzey adheziv birleşmeleri olması halinde gerçekleşmektedir. Şekil 2.12' de adheziv aşınma oluşumu gösterilmiştir. Pek çok parametre adheziv aşınma mekanizmasını etkilemektedir. Adhezyon ve kırılma ile ilgili olan her parametre adheziv aşınmada etkili olmaktadır. Hem adhezyon hem de kırılma, yüzey kirlenmesi ve çevrenin etkileri ile yakından ilişkilidir. Adheziv aşınma aynı zamanda malzemenin yapısal özellikleri ile de yakından ilişkilidir. Adheziv aşınma vakumlu ortamda ve diğer etkilerden arındırılmış şartlarda incelendiğinde aşağıdaki parametreler etkili olmaktadır.

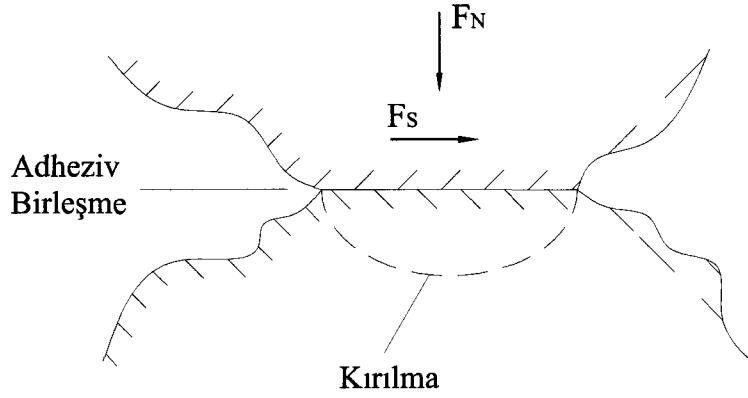
a) Arayüzey adhezyon bağı: Bu olay malzemelerin atomik ölçüdeki etkileşimi ile ilgilidir. Birisi etraftan almak diğeri ise vermek isterse bu bağ çok kuvvetli olmaktadır.

b) Metalik sistemlerde kristal yapı adheziv aşınmayı etkilemektedir. Hegzagonal yapı merkezi kübik ve yüzey merkezli kübik yapıya kıyasla daha düşük aşınma karakteristiği sağlar. Bu olay da kristallerin kayma sistemleri yapısı ve sayısı ile ilişkilidir.

c) Kristal oryantasyonu adheziv aşınmayı etkiler. Genellikle yüksek atom yoğunluklu ve düşük yüzey enerjili yapılar düşük adhezyon gösterirler ve az miktarda adheziv aşınmaya uğrarlar.

d) Farklı metallerin temasları ile adheziv aşınma prosesi genellikle koheziv olarak daha zayıf olan partiküllerin diğeri malzemeye transferi ile gerçekleşir.

Şekil 2.12' de Archard eşitliği [14] adheziv aşınma prosesini açıklayan en fazla kabul gören eşitliktir. Burada malzeme sertliği sadece malzeme ile ilgili bir özellik olarak alınmıştır. "k" Archard aşınma katsayısı temas halindeki malzeme özelliği ile ilişkilidir.



Basitleştirilmiş reaksiyon	Adheziv aşınma modeli
$W_V = k \cdot \frac{F_N}{H} \cdot s$	(a) Tepecik kontak deformasyonu
k : Aşınma katsayısı	(b) Yüzey filminin ayrılması
H : Sertlik	(c) Adheziv birleşme oluşumu
s : Kayma mesafesi	(d) Birleşmelerin kırılması ve malzeme kırılması
	(e) Yorulma, kırılma, abrazyon

Şekil 2.12 Adheziv aşınma mekanizması.

2.4.5 Aşınma olayının sınıflandırılması

Aşınma, moleküler seviyeden başlayan, malzeme, temas şekli, çevresel etkiler vs. gibi pek çok parametre ile değişen bir olaydır. 1979 yılında Alman standartları DIN aşınma ve aşınma hasarlarını standart halinde tanımlamak üzere bir çalışma yapmıştır. Buna göre malzemenin mukavemet, deformasyon ve hasar durumlarına göre;

- Malzemenin tipi.
- Dışarıdan uygulanan gerilme tipi (basma, çekme, eğilme).
- Malzeme içindeki deformasyonlar ve kırılma mekanizması (sünek kırılma, gevrek kırılma) önem kazanır.

Aşınmanın tipinin tanımlanabilmesi için yukarıdaki parametrelerin bilinmesi gerekir.

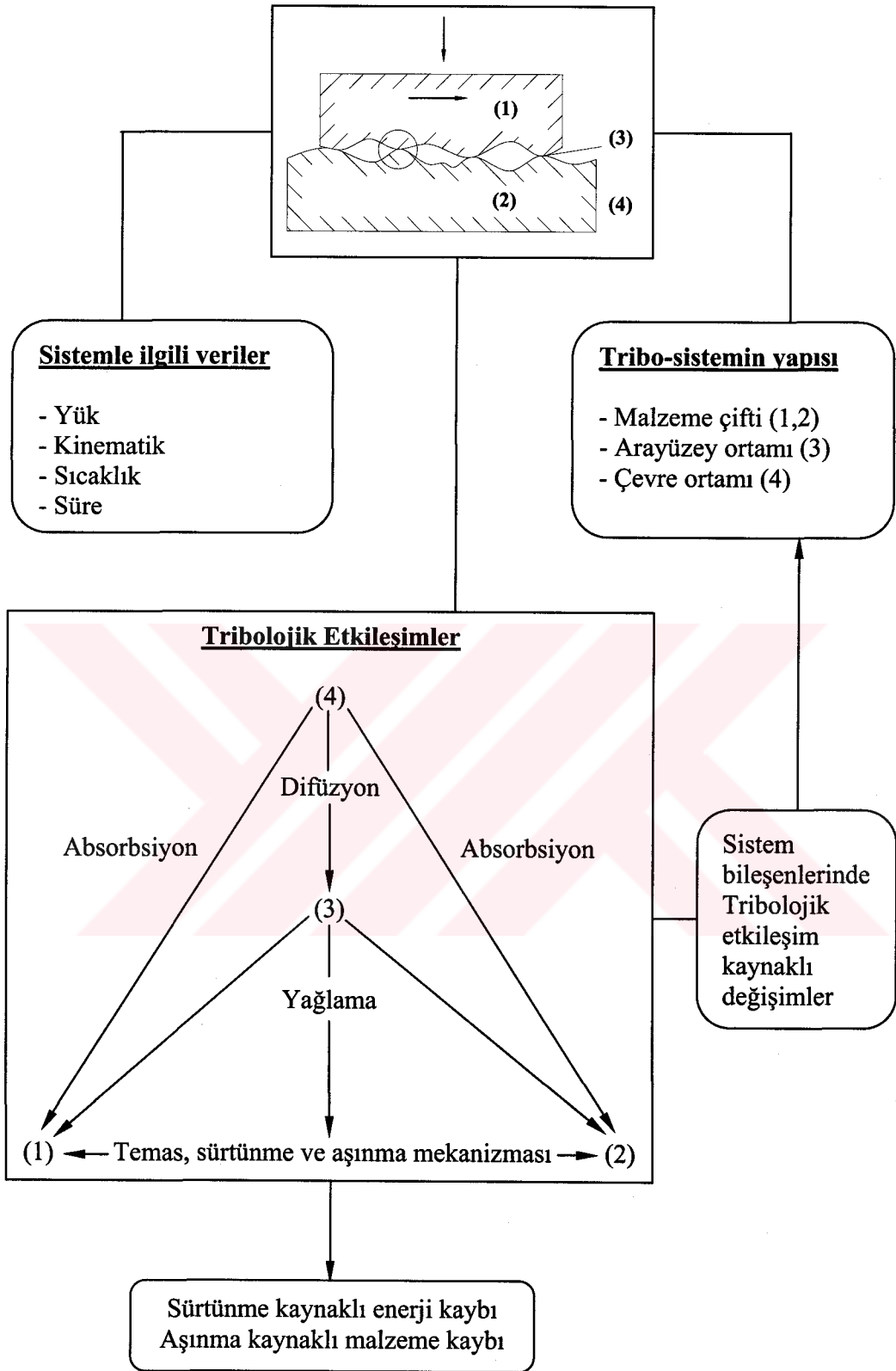
2.5 Sistem Özellikleri Olarak Sürtünme ve Aşınma

Sürtünme ve aşınma pek çok parametrenin etki ettiği kompleks bir özelliktir. Sürtünme ve aşınma, sürtünme katsayısı yada aşınma miktarı aşağıdaki temel gruplarla sınıflandırılmaktadır.

- a) Tribolojik sistemin yapısı, sistemin malzeme bileşenleri.
- b) Operasyon parametreleri, yük, gerilme, kinematik, sıcaklık, operasyon süresi.
- c) Sistem bileşenleri arasındaki tribolojik etkileşimler.

Aşağıda görülen Şekil 2.13' de bu ilişkiler şematize edilmiştir.





Şekil 2.13 Tribolojik sistemlerin temel parametre grupları.

2.6 Fiberlerin ve Kendiliğinden Takviyenin Tribolojik Özelliklere Etkisi

Fiber veya yağlayıcı amaçlı takviye elemanları ile polimerik malzemelerin tribolojik özelliklerinde ilerleme söz konusu olmaktadır [15]. Grafit karbon veya karbonun diğer modifikasyonları ile Molibden di Sülfid (MoS_2), PTFE, PE ve sentetik yağlar sıkça yağlayıcı takviye elemanı olarak kullanılırlar. Bu sayede direkt adheziv etkileşim azaltılır veya yok edilir.

Polimer esaslı fiberlerin yağlayıcı etkileri kısmen yüzey enerjisindeki azalma ile elde edilir. Kopolimerin yüzey enerjisi aşağıdaki eşitlik ile belirlenir [16].

$$\gamma = y_a \gamma_a + y_b \gamma_b \quad (2.6)$$

Burada “ γ ” yüzey enerjisi ve “ y ” ise mol fraksiyonudur. Fiber fraksiyonu ile toplam yüzey enerjisi arasında önemli bir bağıntı söz konusudur. Yağlayıcı takviye elemanlarının malzeme içersinde zayıf bağlara sebebiyet verdikleri ve malzemenin dayanımını düşürdükleri bilinmektedir.

Cam fiberler, karbon ve aramid fiberler, cam küreler, metal tozları ve mineral tozlar polimer malzemelerin mukavemet ve aşınma dayanımlarını yükseltmek için kullanılmaktadır. Çok çeşitli takviye elemanlarının farklı şekillerde üretilmeleri söz konusudur [17].

Fiberler eğer polar ise sürtünme katsayıları yükselir, zira yüksek yüzey enerjisi ve yüksek kayma dayanımı vardır. Bunun yanında aşınmaya dirençli fiberler kullanılarak abrazivlikte yükselme olur [18].

Kendinden takviye tribolojik özelliklerin iyileştirilmesinde daha az bilinen bir yöntemdir. Polimer malzemelerde kendinden takviye çeşitli şekillerde elde edilebilir [19].

- a) Yönlendirilmiş kristalleşme ile kendinden takviye.
- b) Sıvı kristal polimer ile kendinden takviye.

Yarı kristalli polimerik malzemelerde kendinden takviye yardımıyla, esnek zincir molekülleriyle YYPE (yüksek yoğunluklu polietilen) ve PP' de olduğu gibi "Flow Induced" kristalleşme ile şiş kebab yapılar oluştururlar [20]. Şiş kebab yapılar oldukça yüksek yönlendirilmiş kristal yapılarıdır.

Polimer molekülleri kovalent bağlara sahip olup yüksek mukavemetlidir (bağ enerjileri 200 ila 400 KJ/mol), aksel yönde ve moleküller arası bağlar (daha çok Van der Waals bağları) düşük mukavemetlidir. Bağ enerjileri eksene dik yönde kovalent bağların yaklaşık 1/50'sidir.

YYPE ile ilgili araştırmaların sonuçları enjeksiyon kalıplamanın değişen parametreleri eritmede geometrik sınır şartları, erime sıcaklığı, enjeksiyon hızı, tutma basıncı gibi parametreler yüksek oranda yönlendirilmiş şiş kebab yapıların oluşmasını sağlar. Bu ise yarı kristalli termoplastiklerin mekanik özelliklerini önemli derecede artırır. Tribolojik özellikler ile mekanik özellikler arasında karşılaştırılmalı analizler yapıldığında dayanım ve modül değerlerinin tribolojik özellikleri arttırdığı görülmüştür.

Sürtünme ve aşınma oldukça kompleks bir süreçtir. Karşı malzemenin karakteristiği önemli bir rol oynamaktadır. Özellikle sürtünmenin etkisi ile oluşan lokal ısılarda sonucunda meydana gelen topoğrafik ve yapısal değişikliklerin malzeme üzerinde önemli etkileri vardır.

Bu süreçleri matematiksel olarak açıklamak zordur. Yukarıdaki çalışmada sadece malzeme özelliklerinin etkileri analiz edilmiştir ki malzemeciler için bu yönü ile ilgilendirir. Tribolojik özellikler ile malzeme özellikleri arasındaki ilişkiler polimerin mekanik özelliklerinde önemli bir değişim olmadan adhezyonun ve temas alanının azalması ile tribolojik özelliklerin iyileştiğini göstermiştir. Polimer malzemelerde tribolojik özelliklerin artırılmasında önemli kavramlar :

a) Düşük yüzey enerjili takviye elemanları ve yağlayıcılar kullanılarak polimer malzeme sürtünmenin adhezyon bileşenin azaltılması.

b) Sürtünmenin adhezyon bileşeninin azaltılması gerçek temas yüzeyinin azalması ile olur.

c) Polimer malzemenin rijitliği ve yüksek akma noktasına sahip olması sürtünmenin hem adhezyon hem deformasyon bileşenini düşürür.

d) Düşük sürtünme katsayısı, yüksek modül ve yüksek dayanım düşük aşınma meydana getirir.

Fiberler yardımı ile mekanik özelliklerin iyileştirilmesi çok önemli bir avantajdır. Tasarımcılara istenen malzemenin tasarımını istendiği gibi yapılması fırsatını verir. Fakat fiber takviyesinin bir takım sakıncaları söz konusudur. Kendinden takviye ile mekanik özellikler önemli ölçüde artırılır. Sürtünmenin deformasyon bileşeni düşer, aşınma dayanımı ve adhezyon özellikleri artar. Kendinden takviye, fiberlerin abraziv aşınmaya yatkın özelliklerinden dolayı malzemenin daha fazla aşınmasını engelleyen mekanizmadır.

BÖLÜM 3. DENEYSEL ÇALIŞMA

3.1 Malzeme

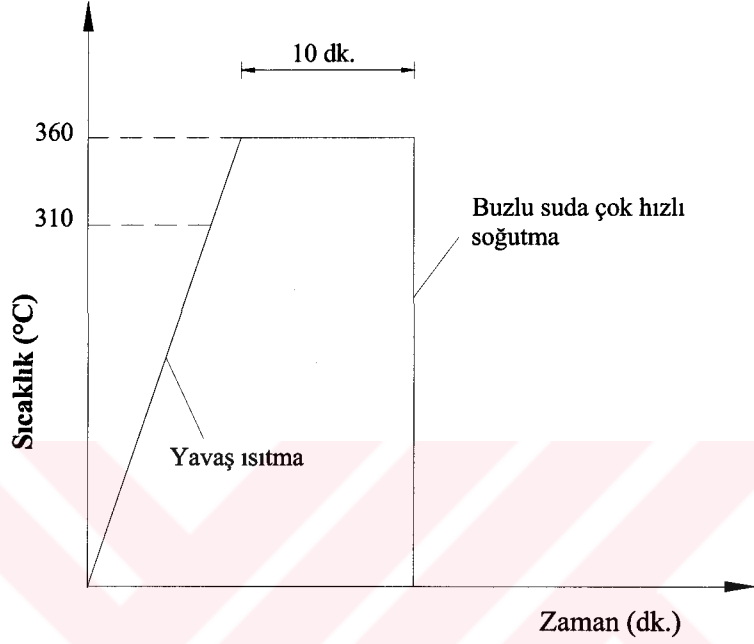
Çalışmada kullanılan malzemeler Victrex™ tarafından sağlanmıştır. Malzemelerin ticari isimleri şunlardır; 450 G: basınçla kalıplama ve enjeksiyon için dolgunsuz standart viskozite dereceli. 450 CA 30: enjeksiyonla kalıplama için standart viskoziteli % 30 kısa karbon fiber takviyeli. 450 FC 30: ekstrüzyon ve enjeksiyonla kalıplama için standart viskoziteli % 30 kısa karbon fiber / PTFE takviyeli ve 450 GL 30: enjeksiyon için genel amaçlı % 30 kısa cam fiber takviyeli. Deneysel çalışmaların kolay takip edilebilmesi için malzemeler kendi ticari isimlerine benzer şekilde 450 G, 450 CA 30, 450 FC 30 ve 450 GL 30 şeklinde kodlanmıştır.

Deney örnekleri, ilgili deney standartlarına uygun boyutlarda, mekanik olarak (testere ile) kesilmiştir. Deney örneklerinin kesimi sırasında, enjeksiyonla kalıplama sonucu yüzeyde meydana gelen fiber yönlenmesi dikkate alınmıştır.

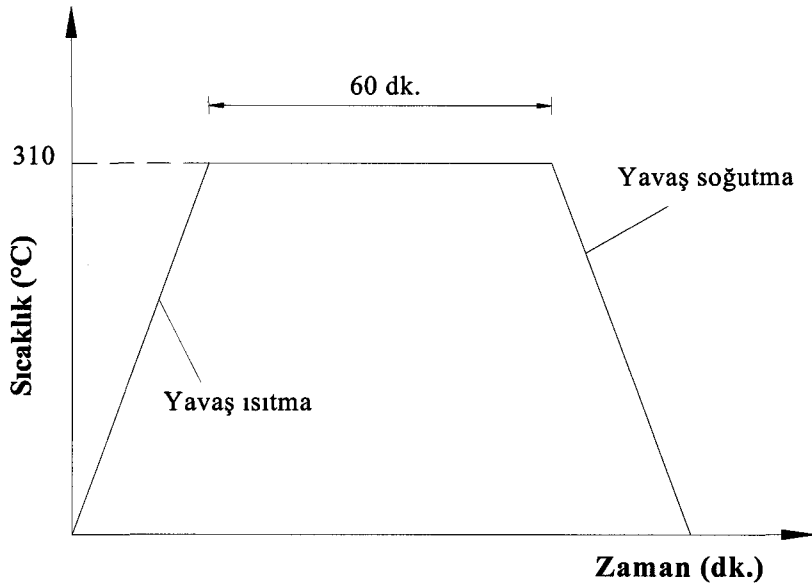
3.2 Isıl İşlemler

Kristalleşmenin fiber yüzeyi merkezli (orijinli) olmasını sağlamak, yani fiber ile matris arasında transkristalin tabakanın oluşturulması ve bu tabakanın etkisinin net olarak incelenebilmesi için ısıl işlemler gerçekleştirilmiştir. Bu amaçla bütün deney numuneleri oda sıcaklığından 360 °C dereceye kadar 10 °C/dk lık sıcaklık artış hızıyla fırında ısıtılmıştır. Numunelerin tümü 360 °C' da 10 dakika bekletildikten sonra buzlu suya atılmıştır. Gerçekleştirilen bu işlem su verme (quenching) işlemi olarak adlandırılır (Şekil 3.1). Su verilmiş olan malzemeler "S" kodu ile belirtilmiştir. Su verilen malzemelerin yarısı tavlama fırınına yerleştirilerek yaşlandırılmıştır. Fırındaki numuneler oda sıcaklığından 310 °C' a kadar 10 °C/dk' lık sıcaklık artış hızıyla ısıtılmıştır. Deney numuneleri bu sıcaklıkta 60 dakika tutulduktan sonra fırın atmosferinde 10°C/dk' lık sıcaklık düşüş hızıyla oda

sıcaklığına kadar soğutulmuştur. Gerçekleştirilen bu prosese ise ısıl yaşlandırma (heat ageing) işlemi adı verilir (Şekil 3.2). Yaşlandırılmış olan numuneler de “Y” kodu ile belirtilmiştir.



Şekil 3.1 Su verme işleminin şematik gösterimi.

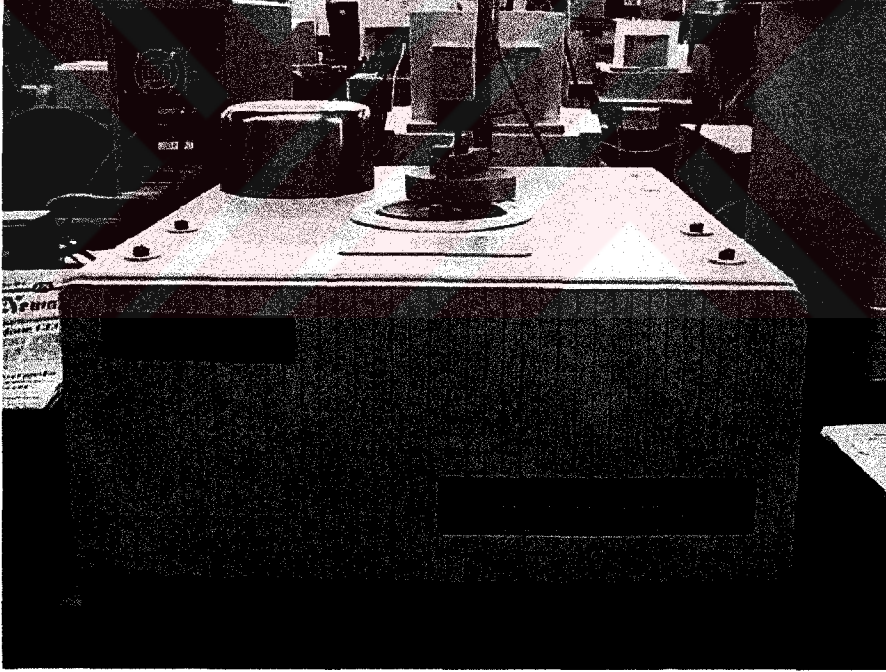


Şekil 3.2 Isıl yaşlandırma işleminin şematik gösterimi.

3.3 Isıl Analizler

3.3.1 Diferansiyel taramalı kalorimetre (DSC) deneyi

Deney malzemelerinin kristalleşme özelliklerini belirlemek için Perkin-Elmer diferansiyel tarama kalorimetresi kullanılmıştır. Perkin-Elmer DSC cihazı Şekil3.3' de gösterilmiştir. 10 – 15 mg ağırlığında deney örnekleri kesilerek alüminyum hücrelere konulmuştur. Isıtma hızı olarak $10^{\circ}\text{C} / \text{dk}$. seçilmiştir. Deney örneklerinin kristalleşme dereceleri (KD), erime tepciklerine ait alanların göz önüne alınmasıyla hesaplanan ısıl füzyon değerlerinin %100 kristal referans malzemesinin ısıl füzyon değeriyle karşılaştırılması sonucu hesaplanmıştır. Tamamen kristal deney örneğinin ısıl füzyon değeri 130 J/g olduğu varsayılarak numunelerin kristalleşmesi hesaplanmıştır [21].

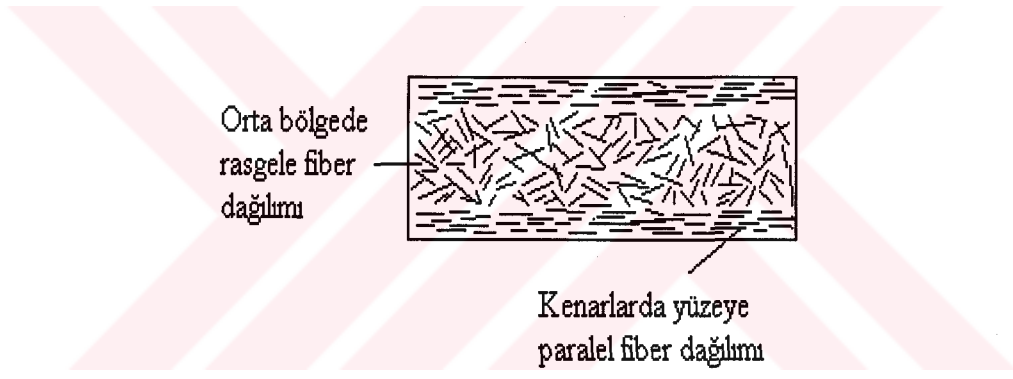


Şekil 3.3 Perkin-Elmer diferansiyel tarama kalorimetresi.

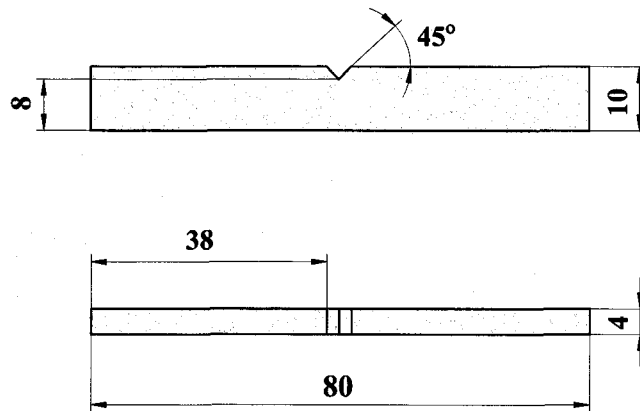
3.4 Mekanik Özelliklerin Tespit Edilmesi

3.4.1 Enstrumante edilmiş çentik darbe deneyi

Deneyler Ceast Resil 25 marka enstrumante edilmiş çentik darbe deney cihazı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Deney örnekleri ISO 179 standardına uygun olarak 4x80x10 mm boyutlarında hazırlanmıştır. Deneyde kullanılan mesnetler arası mesafe 40 mm' dir. Darbe, deney örneklerine yan yüzeyden uygulanmıştır. Enstrumante edilmiş çekiç, 30 ° lik açıdan bırakılarak deneyler yapılmıştır. Çentik darbe deney numunelerinde kalıp yüzeyinde paralel yönlenme, numunelerin orta noktasında ise rastgele yönlenme söz konusudur. Şekil 3.4' de belirtilen bu yönlenme mikroskop incelemelerinde tespit edilmiştir. Çentik darbe deney numuneleri Şekil 3.5' teki formda hazırlanmıştır. Her bir parametre için ortalama beş deney yapılmıştır.

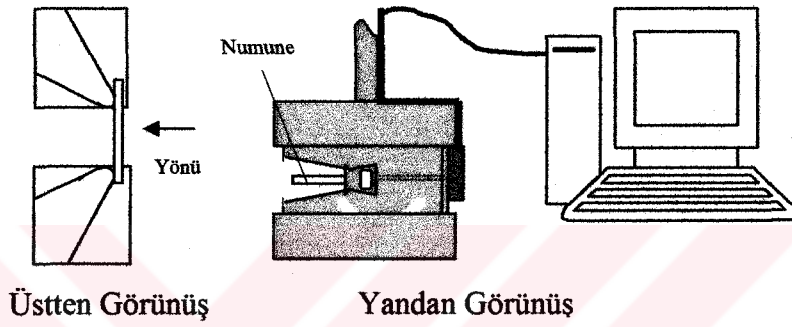


Şekil 3.4 Deney örneğinin kırılma kesiti.

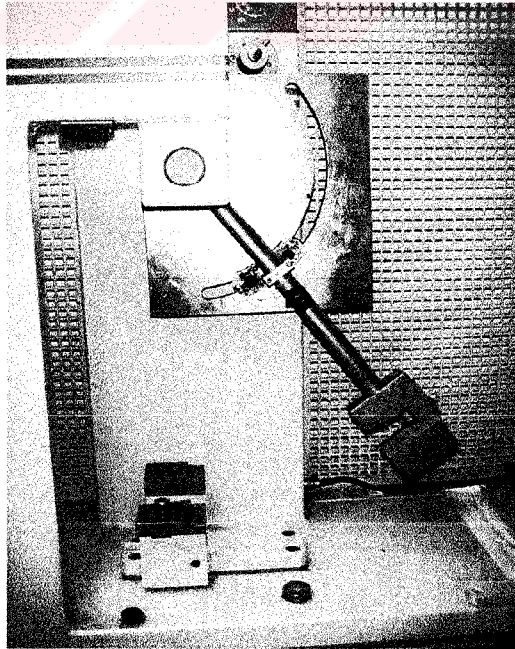


Şekil 3.5 Deneyde kullanılan numunenin şekli ve boyutları.

Enstrumante edilmiş çentik darbe cihazının dinamik kırılma tokluğunu belirlemede çok geniş kullanım alanı vardır. Diğer ağırlık düşürme ve benzeri test cihazları arasında kullanım açısından en gelişmiş olanıdır. Ceast Resil 25 tipi enstrumante edilmiş çentik darbe cihazının şematik gösterimi Şekil 3.6.a' daki gibidir. Ceast Resil 25 tipi deney cihazı Şekil 3.6.b' de gösterilmiştir. Bu şemada mesnetler arasına yerleştirilen numunenin üstten görünüşü ve çekicinin bilgisayar bağlantısı ile yandan görünüşü verilmektedir. Darbe yönünde istenilen açılardan çekiç düşürülür ve çekiç üzerindeki transducer vasıtasıyla veriler bilgisayara kaydedilir [22].



Şekil 3.6.a Enstrumante Çentik darbe cihazının mesnetleri arasına deney örneğinin yerleştirilmesi ve çekiç ile bilgisayar bağlantısı.



Şekil 3.6.b Ceast Resil 25 tipi çentik darbe cihazı.

3.4.2 Üç Nokta Eğme Deneyi

Numunelerde ısıtma prosesinin statik şartlar altındaki eğilme özellikleri üzerindeki etkilerini görmek için üç nokta eğme testleri Instron 4411 çekme testi cihazında ISO 178 standardına göre yapılmıştır. Deneyde kullanılan numunelerin boyutları Şekil 3.7’ de gösterilmiştir. Deneylerde 4x80x10 mm ölçülerine sahip enjeksiyonla kalıplanmış numuneler kullanılmıştır. Deneysel parametreler olarak 64 mm’ lik mesnetler arası mesafe ve 50 mm / dk’ lık çene hızı seçilmiştir. Hesaplamalarda kullanılan formüller aşağıda verilmiştir.

$$\sigma = \frac{3PL}{2bh^2} \quad (3.1)$$

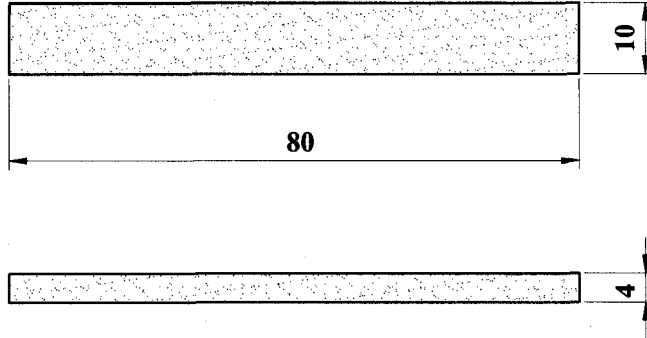
σ = örnek merkezindeki maksimum gerilme

P = uygulanan yük

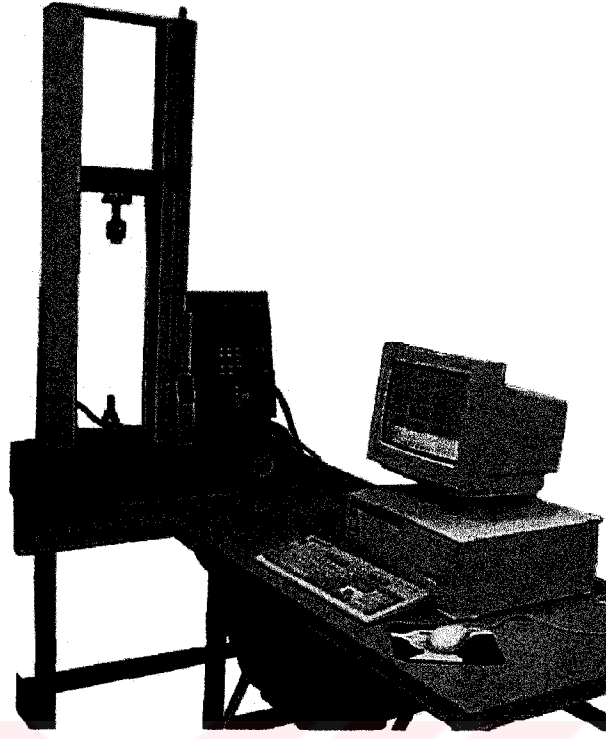
L = mesnetler arası uzaklık

b = genişlik, h = kalınlık ve

Instron 4411 çekme testi cihazı Şekil 3.8’ de gösterilmiştir.

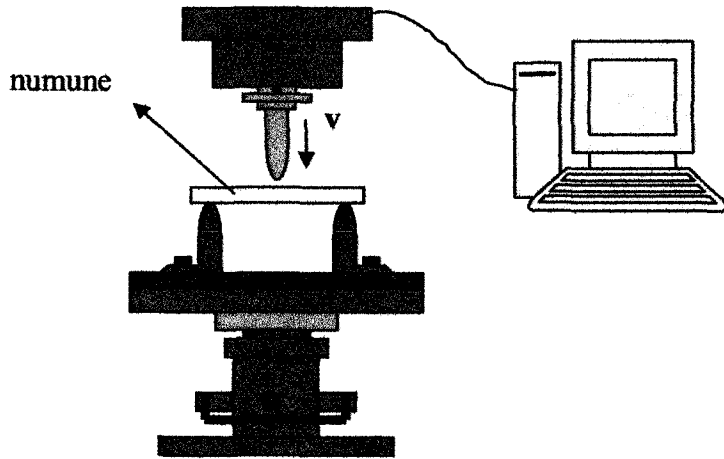


Şekil 3.7 Deneyde kullanılan numunenin şekli ve boyutları.



Şekil 3.8 Instron 4411 çekme testi cihazı.

Instron 4411 tipi üç nokta eğme cihazının şematik gösterimi Şekil 3.9' daki gibidir. Alttaki iki mesnet üzerine standartlara uygun numune yerleştirilir ve üst çene "v" hızı ile ok yönünde hareket ettirilmek suretiyle numune eğmeye zorlanır. Eğmeye ilişkin tüm datalar bilgisayar ortamına aktarılmaktadır. Deneye ilişkin tüm hesaplamalar bu bilgisayardaki yazılım tarafından yapılmaktadır.



Şekil 3.9 Üç nokta eğme cihazının şematik gösterimi.

3.4.3 Aşınma deneyi

Tribolojik araştırmalar “Plint” çok amaçlı sürtünme ve aşınma cihazı ile ASTM G 77 standardına göre yapılmıştır. “Plint” çok amaçlı sürtünme ve aşınma cihazı Şekil 3.11 a ve b’ de gösterilmiştir. “Pin on Ring” tipi aşınma cihazı kompozit malzemelerin tribolojik özelliklerini belirlemek üzere kullanılmıştır. Başlangıçta malzemelerde çizgisel temas oluşmaktadır. İlerleyen aşamalarda ise çizgisel temastan alan temasına geçilmektedir. Bu çalışmada sürtünme süresi boyunca sürtünme katsayısındaki değişim incelenmiştir. Aşındırıcı disk 60 mm çapında ve 2 mm kalınlığında SAE 1040 malzemesinden yapılmıştır. Karşı diskin yüzey pürüzlülük değeri $R_a = 0.04 - 0.05 \mu m$ dir.

Literatürde polimer kompozitlere ilişkin gerçekleştirilen çalışmalarda görülmüştür ki tribolojide çok önemli bir parametre olan “Pv” büyüklüğü polimer kompozitler ve polimer malzemelerde geçerliliğini yitirmektedir. Diğer malzemelerde farklı “P” ve “v” değerlerinden oluşan aynı “Pv” değerleri sonucunda aynı tribolojik performanslara rastlanırken polimer ve polimer esaslı kompozitlerde “v” hızının ve “P” yani yüzeye normal uygulanan basınç değerinden daha etkin rol oynadığı belirlenmiştir [23].

PEEK kompozitlerde özellikle kayma hızının değişimi ile tribolojik özelliklerin değişiminin incelenmesi önem kazanmıştır. Deneysel çalışmalar çerçevesinde tüm parametreler sabit tutulmuş, kayma hızının değişmesi ile tribolojik özelliklerde görülen değişimler incelenmiştir. Aşınma deneyleri orta derecede nemli ortamda 22 °C’ de atmosferi kontrol edilen laboratuvar şartlarında yapılmıştır. Normal yük olarak 5.5 ve 12 Newton’ luk yükler ve dakikada devir sayısı olarak 100 ve 900 dev / dak seçilmiştir. Her iki normal yük altında tribolojik test parametreleri 15000 toplam devir sayısı süresince incelenmiştir. Her bir numune için ortalama üç ölçüm yapılmıştır. Sürtünme kuvveti ölçümleri deney cihazına bağlı bir transducer tarafından yapılmıştır. Aşınmış yüzeylere ait fotoğraflar yüzeye herhangi bir müdahale bulunulmadan mikroskop kullanılarak çekilmiştir. Mitotoyo ölçüm mikroskobu kullanılarak aşınma izinin boyutları ölçülmüş ve bu değerler kullanılarak aşınma hacimleri matematiksel olarak hesaplanmıştır.

$$V_{aş} = h \cdot r^2 \left[\frac{\pi \cdot \text{ArcSin}\left(\frac{a}{2r}\right)}{180} - \frac{1}{2} \cdot \text{Sin}\left(2 \cdot \text{ArcSin}\left(\frac{a}{2r}\right)\right) \right] \quad (3.2)$$

$V_{aş}$: aşınma hacmi (mm³)

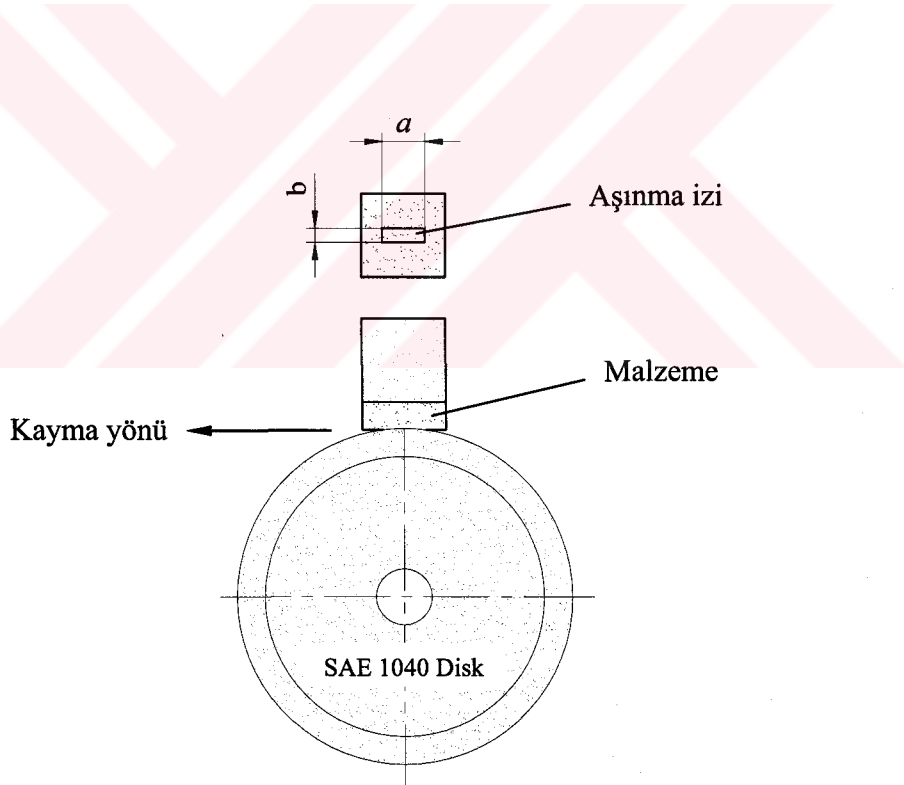
h : aşındırıcı disk kalınlığı (mm)

r : disk yarı çapı (mm)

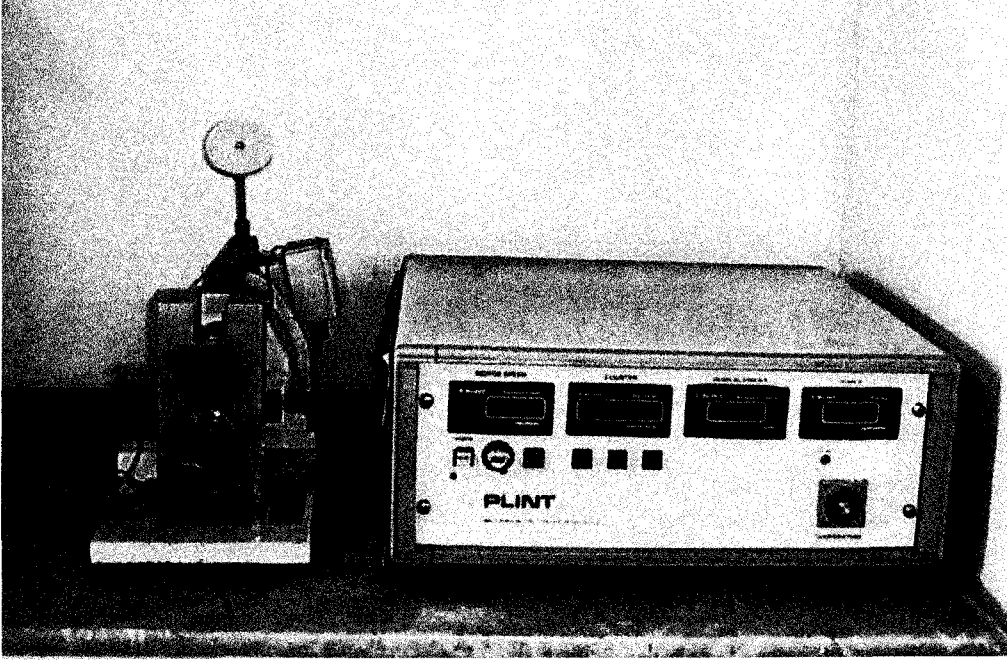
a : aşınma izi boyu (mm)

b : aşınma izi genişliği (mm)

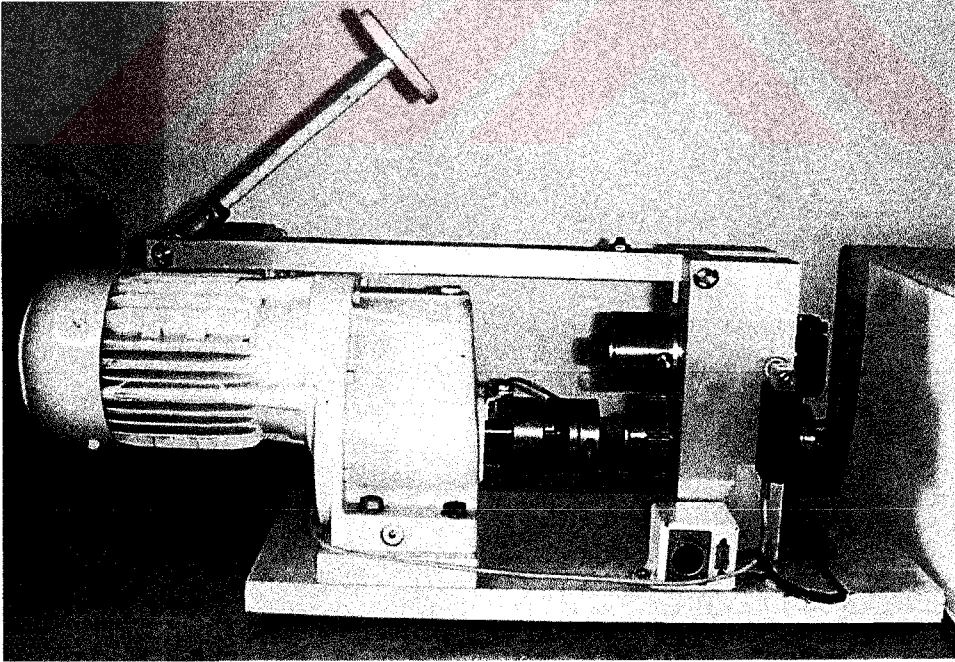
Şekil 3.10' de çok amaçlı sürtünme ve aşınma düzeneği şematik olarak gösterilmiştir.



Şekil 3.10 Şematik olarak çok amaçlı sürtünme ve aşınma düzeneği.



Şekil 3.11.a "Plint" çok amaçlı sürtünme ve aşınma cihazı (önden görünüş).

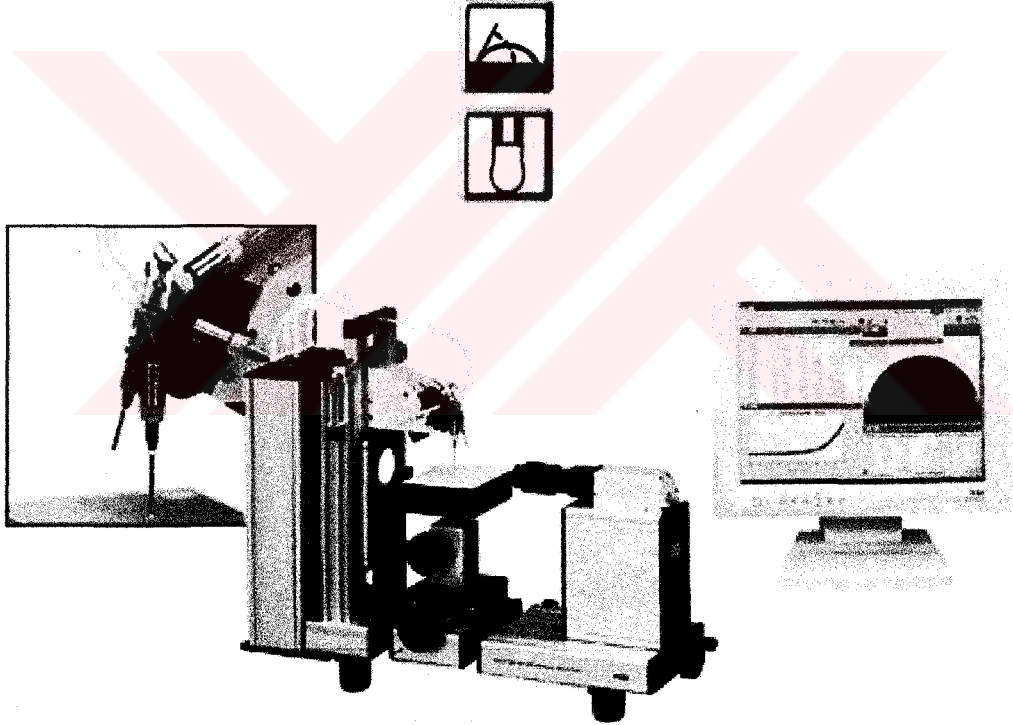


Şekil 3.11.b "Plint" çok amaçlı sürtünme ve aşınma cihazı (yandan görünüş).

3.5 Fiziksel Özelliklerin Belirlenmesi

3.5.1 Kontak açısı ölçümü

Isıl yaşlandırılmış malzemelerin yüzey özelliklerindeki değişimlerin araştırılması için kontak açısı ölçümleri yapılmıştır. Bu ölçümler Krüss G – 10 model cihaz kullanılarak oda sıcaklığında, iki kere damıtılmış 15 µl (mikrolitre) saf suyun deney örneğinin üzerine damlatılması suretiyle yapılmıştır. Krüss G-10 tipi deney cihazı Şekil 3.12’ de gösterilmiştir. Kontak açısı değerleri deney örneği üzerine damlatılan damlanın yüzeyle yaptığı açı ölçülerek elde edilmiştir. Her bir numune için ortalama 7-10 ölçüm yapılmıştır.



Şekil 3.12 Krüss G-10 tipi deney cihazı.

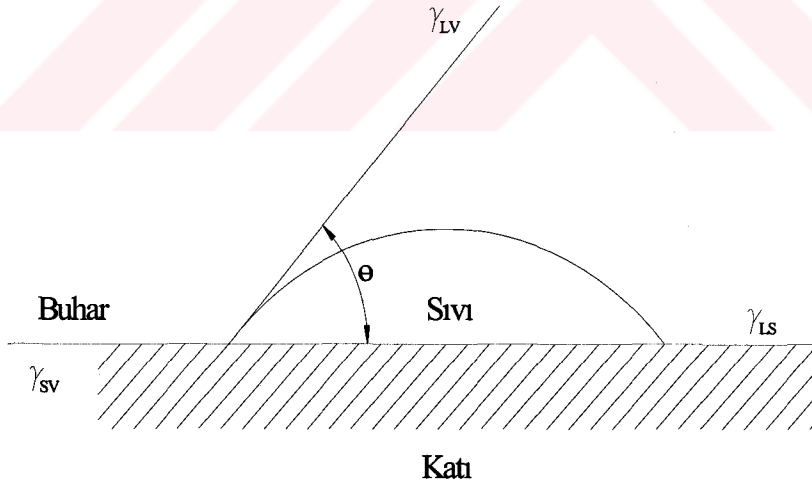
Adhezyona yardımcı olma veya karşı çıkma mekanizmaları sonucunda malzemelerin yüzeysel özellikleri belirlenmektedir. Yüzey ıslatma bu olayı ifade eden en önemli kavramdır. Bir sıvının katı cisim üzerinde ne derece yayıldığı bu sistemin net serbest enerji dönüşümünün ifadesidir. Açık atmosferde katı cisim üzerine damlatılan sıvı

damlasına etkiyen kuvvetlerin eşitliğinden giderek verilen sıvı ve katı cisme ait değerleri bulabiliriz. Sıvı damla giderek yayılır ve yüzeyin tamamını ıslatır. Şekil 3.13' de bu durum şematize edilmektedir. Katı-buhar arayüzeyi, katı-sıvı arayüzeyinden çıkarılır, sonuç olarak yüzey ıslatma koşulu aşağıdaki şekilde yazılabilir.

$\gamma_{LS} + \gamma_{LV} < \gamma_{SV}$, γ spesifik yüzey enerjisini temsil etmektedir. S , L , V ise sırasıyla katı, sıvı ve buharı temsil etmektedir. Katı – buhar arayüzeyi sistemin serbest enerjisindeki artışı kapsamaktadır. Bu koşullar altında sıvı, yüzey üzerine etkiyen kuvvetler dengeyi sağlayana kadar katı üzerinde yayılır. Böylece kısmi nemlenme elde edilir. θ açısı damlanın yüzeyle yaptığı açıdır ve kontak açısı olarak isimlendirilir. Şekil 3.10' daki kuvvet eşitliğinden

$$\gamma_{LS} + \gamma_{LV} \cdot \cos \theta = \gamma_{SV} \quad \text{veya} \quad \theta = \cos^{-1} \left(\frac{\gamma_{SV} - \gamma_{LS}}{\gamma_{LV}} \right) \quad (3.3)$$

yazılır.



Şekil 3.13 Spesifik yüzey enerjileri ile kontak açısı.

3.5.2 Sertlik deneyi

Rockwell R sertlik ölçümleri Brooks sertlik cihazı ile ASTM 2039 standardına göre oda sıcaklığında yapılmıştır. Her bir numune için ortalama on ölçüm değeri alınmıştır. Sertlik ölçümlerinde 12.7 mm çapında bilye kullanılmıştır. Sertlik testinde 10 kg'lık ön ve 50 kg'lık ana yük olmak üzere toplam 60 kg'lık yük kullanılmıştır.



BÖLÜM 4. DENEY SONUÇLARI

4.1 Diferansiyel Taramalı Kalorimetre (DSC) Deneyi

Isıl yaşlandırma sonrasında malzemelerin % kristalleşme sonuçları Tablo 4.1' de gösterilmiştir. Katkısız PEEK malzemeler için ısıl işlemlerin etkileri takviyeli PEEK malzemelere nazaran daha fazla etkili olmuştur. Takviye edici malzemeler moleküler hareketliliği (mobilitiyi) azaltmaktadır. Sonuçlara bakıldığında ısıl işlemlerin % kristalleşme derecesinde önemli değişikliklere neden olduğu görülmektedir. Su verilmiş PEEK numuneler ile yaşlandırılmış numuneler karşılaştırıldığında kristalleşme derecesinin ısıl işlemlerdeki küçük değişimlerden bile etkilendiği görülmüştür. Su verilecek numuneleri ısıtmak için kullanılan 360 °C' lık sıcaklık bütün kristalin bağlarını eritmek için yeterli olmamaktadır. Sıcaklık yeterli olmasına rağmen malzemenin kalın olması tüm kesitte verilen sürede kristallerin tamamen erimesine yeterli olmamaktadır. Deney malzemelerini 360 °C' lik sıcaklıkta 10 dakika bekletmek numunenin tavlınmasına ve kristalleşme miktarını artmasına neden olmaktadır [3]. Su vermeyi takiben yapılan ısıl yaşlandırma neticesi malzemelerin % kristalleşme değerlerinde düşüşler görülmüştür.

Tablo 4.1 Malzemelerin % kristalleşme değerleri.

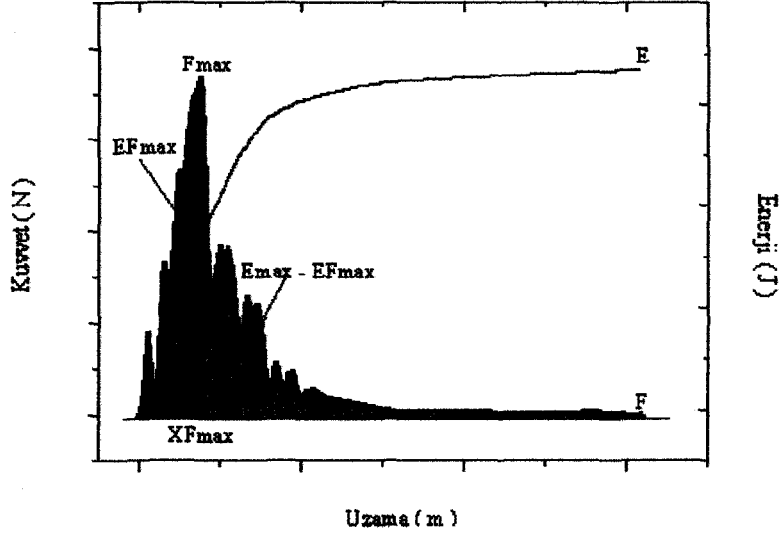
Malzeme	% kristalleşme
450 G / S	25.81
450 G / Y	24.60
450 FC 30 / S	34.48
450 FC 30 / Y	29.42
450 GL 30 / S	26.36
450 GL 30 / Y	37.61
450 CA 30 / S	25.93
450 CA 30 / Y	12.83

Cam fiber takviyeli malzemelerde farklı bir durum söz konusudur. Sonuç olarak takviye elemanının tipi malzemelerin kristalleşmesini çok yakından etkilemektedir.

% kristalleşme polimerin performansını tespit etmede kullanılan tek mikroyapı parametresi değildir. Mikroyapıda kristallerin oryantasyonu bir diğer önemli parametre olup polimerin mekanik özelliklerini önemli ölçüde etkilemektedir. Isıl yaşlandırmanın % kristalleşme miktarını azalttığı tespit edilmiştir.

4.2 Çentik Darbe Deneyi

Şekil 4.1' de örnek olarak, polimer matrisli bir kompozit malzemeye ait genel karakteristiği yansıtan enstumante edilmiş çentik darbe deney grafiği görülmektedir. Kuvvet – yer değişim grafiği üzerinde, çeşitli noktaların ve bölgelerin isimleri verilmiştir. Kuvvetin en yüksek değerine ulaştığı nokta F_{max} olarak isimlendirilmekte ve deney örneği üzerinde ilk çatlak oluşma kuvvetini ifade etmektedir. $X_{F_{max}}$ da, bu noktaya kadar olan yer değişim miktarını vermektedir. Deney örneğinin tamamen kırılmasına kadar absorbe ettiği toplam enerji E_{max} olarak isimlendirilir ve X_{max} da, bu noktaya kadar olan yer değişim miktarını vermektedir. Deney örneğinin toplam kırılma enerjisi (E_{max}) iki ayrı bölgeye ayrılmaktadır. İlk bölge F_{max} değerine kadar deney örneğinin absorbe ettiği enerji miktarı olan $E.F_{max}$, yani çatlak başlangıç bölümüdür. Bu bölge, akma kuvvetinin çatlak oluşum kuvvetine yani F_{max} ' a denk geldiği kabulü ile, aynı zamanda elastik şekil değişiminin olduğu bölge olarak da düşünülmektedir. İkinci bölge ise, oluşan çatlak gelişim bölgesidir. Bu bölgedeki enerji değeri, $E_{max} - E.F_{max}$ enerji farkından elde edilir ve çatlak oluşuktan sonra kırılıncaya kadar absorbe edilen, plastik şekil değişimi için harcanan enerjiyi verir.



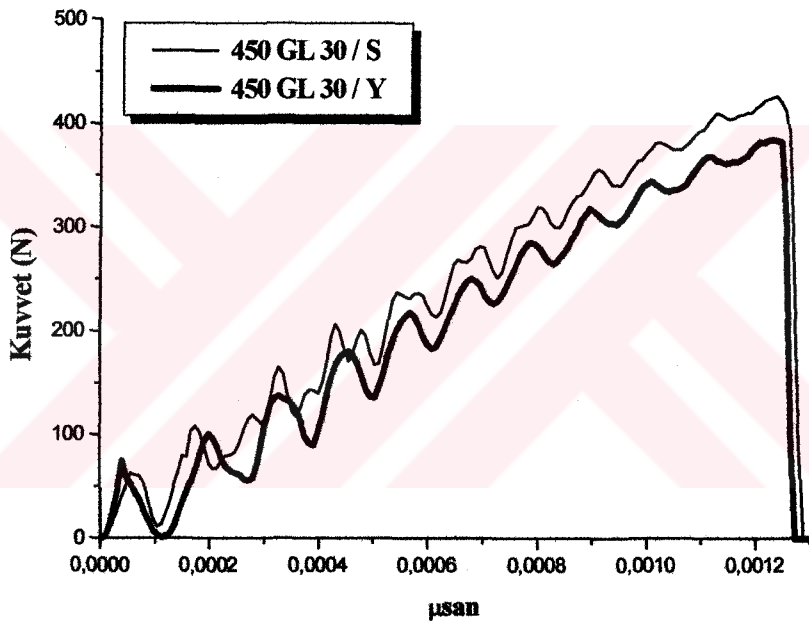
Şekil 4.1 Örnek enstrumante edilmiş çentik darbe deney grafiği.

Çentik darbe test sonuçları Tablo 4.2' de verilmektedir. Değerlerden de anlaşılacağı gibi malzemelerin tamamı gevrek kırılma göstermiştir. Tablodaki sonuçlar, polimerlerin takviye edilerek özelliklerinin büyük ölçüde değiştiğini göstermektedir. Rijit polimerlerdeki rijit dolgular genellikle polimer malzemelerin kırılma dayanımlarını azaltmaktadır. Polimer malzemelerin takviye edilmesi F_{maks} sonuçlarını arttırmakta, fakat E_{maks} ve $E.F_{maks}$ sonuçlarını ise Tablo 4.2' de görüldüğü gibi oldukça azaltmaktadır.

Tablo 4.2 Çentik darbe test sonuçları.

Malzeme	F_{maks} (N) x 10^3	E_{maks} (J)	$E.F_{maks}$ (J)
450 G / S	0.308	0.257	0.255
450 G / Y	0.280	0.204	0.201
450 FC 30 / S	0.303	0.120	0.116
450 FC 30 / Y	0.295	0.103	0.100
450 GL 30 / S	0.426	0.200	0.192
450 GL 30 / Y	0.386	0.177	0.171
450 CA 30 / S	0.519	0.179	0.170
450 CA 30 / Y	0.496	0.163	0.145

Isıl yaşlandırma, takviyeli ve takviyesiz PEEK malzemesinin çentik darbe özelliklerini çok büyük ölçüde etkilemiştir. Aynı şekilde takviyeli ve takviyesiz PEEK malzemesinin F_{maks} , E_{maks} , ve $E.F_{maks}$ sonuçlarının çok büyük ölçüde azaldığı tespit edilmiştir. Isıl yaşlandırma malzemeleri daha kırılğan hale getirmekte ve görüldüğü gibi malzemelerin tokluk değerlerinde belirgin bir düşüşe neden olmaktadır. Şekil 4.2’ de “v” tipi çentikli ısıl yaşlandırılmış 450 GL 30 malzemesinin test sonuçları gösterilmiştir. Yaşlandırılmış 450 GL 30 malzemesi su verilmiş 450GL 30 malzemesi ile karşılaştırıldığında F_{maks} değerlerinin daha düşük olduğu görülmektedir. Sonuç olarak yaşlandırılmış malzemelerin E_{maks} ve $E.F_{maks}$ değerlerinin su verilmiş malzemelere kıyasla daha düşük olduğu görülmüştür.



Şekil 4.2 Isıl yaşlandırılmış 450 GL 30 malzemesinin çentik darbe test sonucu.

4.3 Üç Nokta Eğme Deneyi

Tablo 4.3’ de üç nokta eğme sonuçları verilmiştir. Deney sonuçlarından takviye edici malzemelerin, deney numunelerinin eğilme özelliklerini önemli ölçüde etkilediği görülmektedir. Takviye edilmiş polimerler takviyesiz polimerlerle karşılaştırıldığında daha yüksek modül ve maksimum gerilme değerlerine fakat daha düşük kırılma enerjisi değerlerine sahiptir. Isıl yaşlandırılmış takviyesiz polimerler ile su verilmiş takviyesiz polimerler karşılaştırıldığında ise ısıl yaşlandırılmış takviyesiz

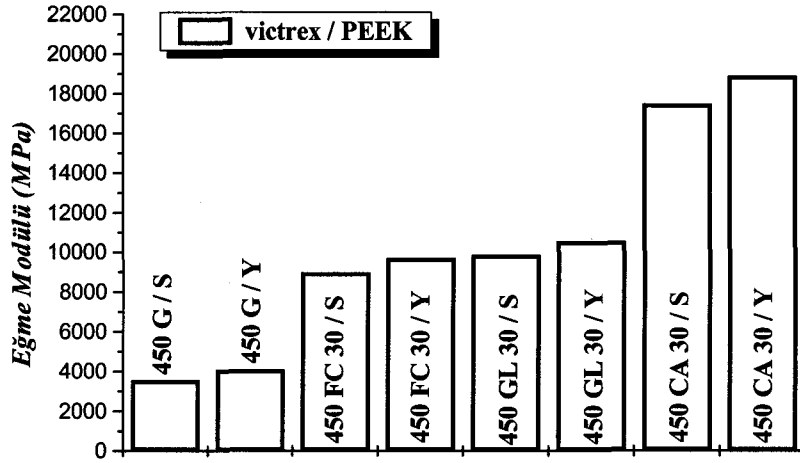
polimerlerin modül, maksimum gerilme ve kırılma enerjisi değerlerinin su verilmiş takviyesiz polimerlere nazaran daha yüksek olduğu görülmüştür.

Tablo 4.3 Üç-nokta eğme deney sonuçları.

Malzeme	Modül (Mpa)	Maks.Gerilme (Mpa)	Kırılma enerjisi (J)
450 G / S	3562	145.6	3.3154
450 G / Y	4074	173.2	4.0250
450 FC 30 / S	8969	204.8	1.0260
450 FC 30 / Y	9685	200.9	0.7794
450 GL 30 / S	9833	242.2	0.9163
450 GL 30 / Y	10516	234.1	0.7798
450 CA 30 / S	17442	323.7	1.1678
450 CA 30 / Y	18850	331.1	0.9904

Isıl yaşlandırılmış malzemelerin eğme modülü değerlerinde önemli bir artma söz konusudur. Malzemelerin modül değerlerindeki değişimler Şekil 4.3' de gösterilmiştir. Görüldüğü gibi maksimum gerilme ve kırılma enerjisi değerlerinde belirgin bir düşüş söz konusudur. Isıl yaşlandırılmış malzemeler yüksek modüllü ve daha rijit malzemeler haline gelmiştir fakat bu malzemelerin tokluk ve mukavemet değerlerinde nispeten bir azalma gerçekleştirilmiştir.

% kristalleşme miktarı polimerlerin performansını ortaya koyan yegane parametre değildir. Mikroyapıya etki eden diğer önemli bir parametre de kristallerin oryantasyonudur ki bu polimerlerin mekanik özelliklerinde önemli rol oynar. Isıl yaşlandırmanın % kristalleşme miktarını azalttığını ve kristallerin oryantasyonunda değişim meydana getirdiğini söylemek mümkündür. Yapılan incelemeler sonucunda ısı yaşlandırmanın statik (eğilme) özelliklerini önemli miktarda etkilediği görülmüştür.



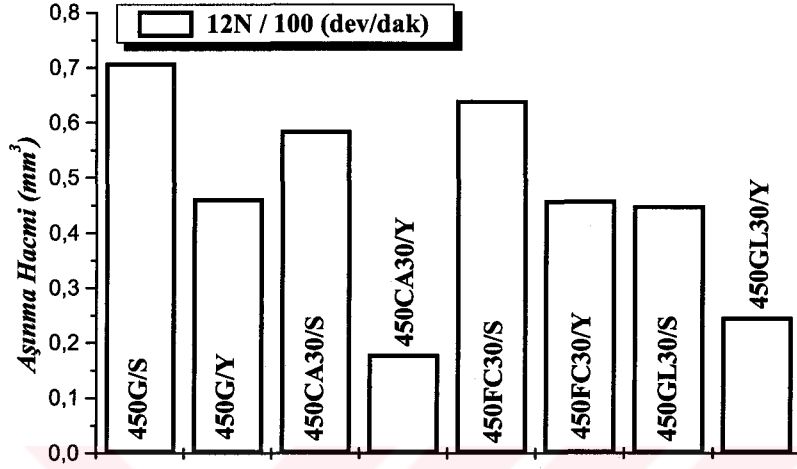
Şekil 4.3 Isıl yaşlandırılmış PEEK ve kompozitlerinin eğme modülü değerleri.

4.4 Aşınma Deneyi

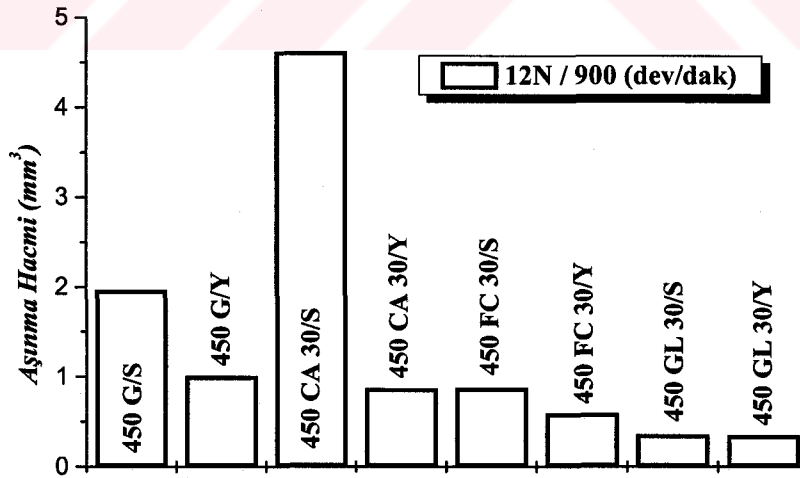
Şekil 4.4' de görüldüğü gibi fiber takviyesi malzemelerin aşınma miktarını azaltmaktadır. Yüksek kristalleşme miktarına sahip su verilmiş örneklerin aşınma hacimleri büyüktür. Yüksek modüllü ve sertlikteki yaşlandırılmış malzemeler 12 N' luk normal yük altında düşük aşınma hacimlerine sahiptir. Şekil 4.4' deki aynı normal yüke sahip malzemelerin 900 dev/dak' daki aşınma hacimleri Şekil 4.5' de gösterilmiştir. Takviyesiz PEEK' in aynı normal yük altında 900 dev / dak' ki aşınma hacmi 100 dev / dak' ki aşınmış hacminden 2.8 kat daha yüksektir. Su verilmiş 450 CA 30 malzemeleri ise 900 dev / dak' da 7.5 kattan fazla aşınmıştır. 450 FC 30 ve 450 GL 30 malzemelerinde önemli değişiklikler tespit edilmemiştir. 450 FC 30 malzemesi PTFE partikül takviyesine sahiptir ki bu kontak açılı ölçümlerinden görüldüğü gibi malzemelerin adheziv özelliklerini etkiler.

Şekil 4.4 ve Şekil 4.5 bütün yaşlandırılmış malzemeler düşük aşınma hacmi oranlarını göstermektedir. Şekil 4.6 ise 5.5 N' luk normal yük altında ve 100 dev / dak' ki aşınma hacimlerini ifade etmektedir. Takviyesiz PEEK olan 450 G malzemesinin aşınma oranı 100 dev / dak kayma hızındaki ve 12 N' luk normal yük altındaki aşınma hacimleri ile kıyaslandığında 3.5 kat daha düşük olduğu görülmektedir. Aynı parametrelere sahip, yaşlandırılmış malzemelerle

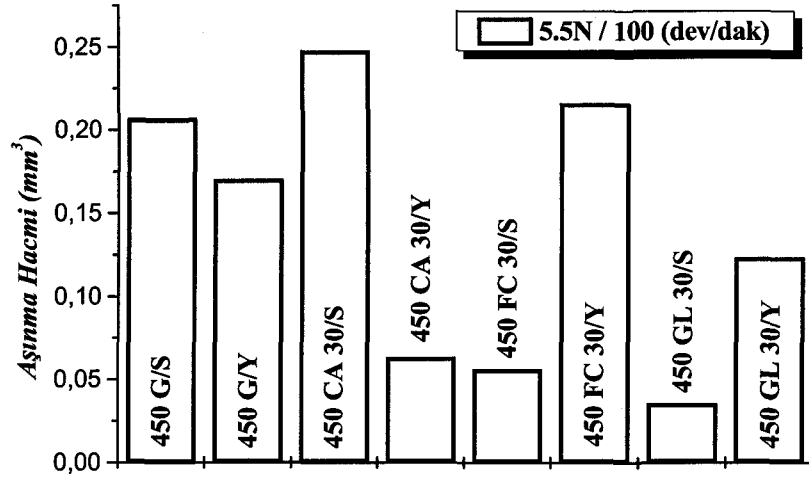
karşılaştırıldığında 450 FC 30 ve 450 GL 30 malzemeleri (yüksek % kristalleşme oranlı) üç kat daha düşük aşınmış hacim oranları göstermektedir.



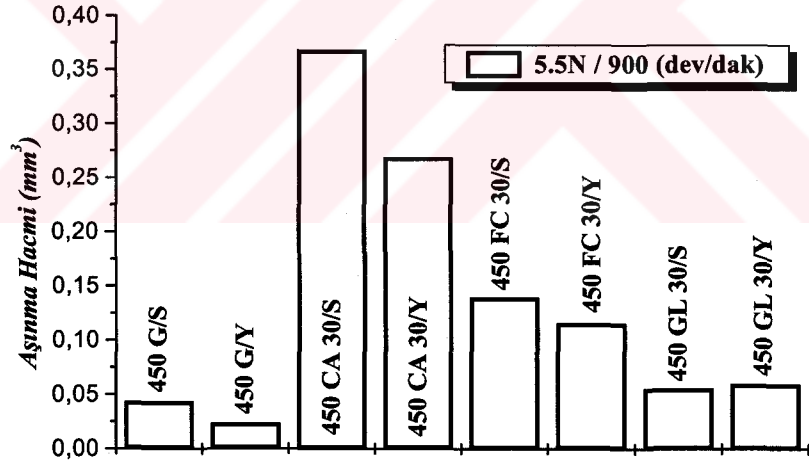
Şekil 4.4 100 dev / dak' da 12 N' luk normal yük altında aşınma hacimleri.



Şekil 4.5 900 dev / dak' da 12 N' luk normal yük altında aşınma hacimleri.



Şekil 4.6 100 dev /dak' da 5.5 N' luk normal yük altında aşınma hacimleri.



Şekil 4.7 900 dev / dak' da 5.5 N' luk normal yük altında aşınma hacimleri.

5.5 N' luk normal yük altında ve 900 dev / dak' da malzemelerin aşınma sonuçları Şekil 4.7' de gösterilmiştir. Şekil 4.7' deki sonuçlarla Şekil 4.6' deki sonuçlar karşılaştırılırsa, 450 G takviye edilmemiş malzeme için aynı normal yük altında fakat farklı kayma hızında deney numunesinin aşınma hacmi dört kat daha azdır. Bu olay sürtünme katsayısını düşüren erimiş PEEK ara tabaka oluşumuna (formasyonuna)

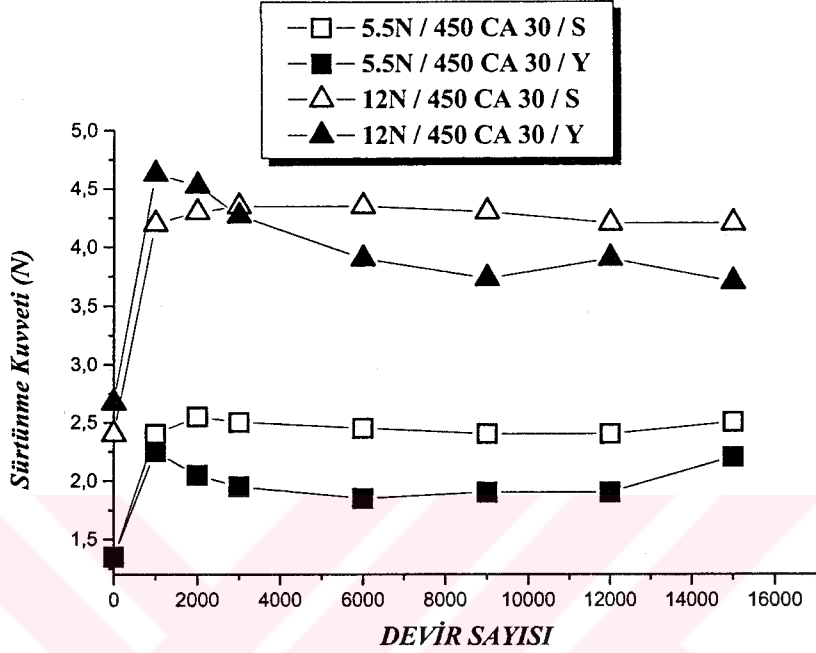
neden olur. Aynı zamanda düşük devir sayılarında (stick-slip) yapışma-kayma etkisi çok daha fazladır. Devir sayısının yükselmesi ile bu etki giderek azalır ve sürtünme kuvveti değerleri düşer. 5.5 N' luk normal yük altında, yüksek kayma hızlarındaki 450GL 30 malzemelerinin aşınma hacimlerinde belirgin değişiklikler görülmemiştir. Şekillerden de anlaşılacağı gibi yaşlandırılmış malzemeler daha düşük aşınma hacimlerine sahiptir. 450 CA 30 malzemelerini ele aldığımızda, aynı normal yük altında fakat farklı kayma hızlarındaki hem su verilmiş hem de yaşlandırılmış numunelerin aşınma hacimlerinde yükselme gözlenmiştir. Diğer taraftan aynı normal yük altında fakat farklı kayma hızlarındaki su verilmiş 450 CA 30 malzemeleri birbiri ile kıyaslandığında 5.5 N' luk normal yüke ve 100 dev / dak kayma hızına sahip olanların aşınma hacimleri, 5.5 N' luk normal yüke ve 900 dev / dak kayma hızına sahip olanların aşınma hacimlerinden daha düşüktür. Yani su verilmiş malzemelerin ısıtılmış malzemelere nazaran aşınma hacimleri daha yüksektir. 450 GL 30 malzemelerinin aşınma hacimlerinde önemli değişiklikler yoktur. Sadece yaşlandırılmış 450 GL 30 malzemeleri 900 dev / dak' da ve 5.5 N' luk normal yük altında iki kat daha düşük aşınma hacimleri ölçülmüştür.

Aşınma testlerinin kayma mesafesi boyunca (toplam 15000 devir) sürtünme kuvveti ölçümleri Şekil 4.8-4.15 arasında gösterilmiştir. İlk olarak başlangıçtaki sürtünme kuvvetleri şekillerden de görüldüğü gibi düşüktür. Bunun sebebi ise başlangıçta deney numunesi ile sürtünme diski arasındaki temasın çizgisel olmasıdır. Test süresi ilerledikçe test başlangıcındaki çizgi şeklindeki temas zamanla belirgin yüzeysel temasa dönüşür ki bu sürtünme kuvvetinin artmasına neden olur.

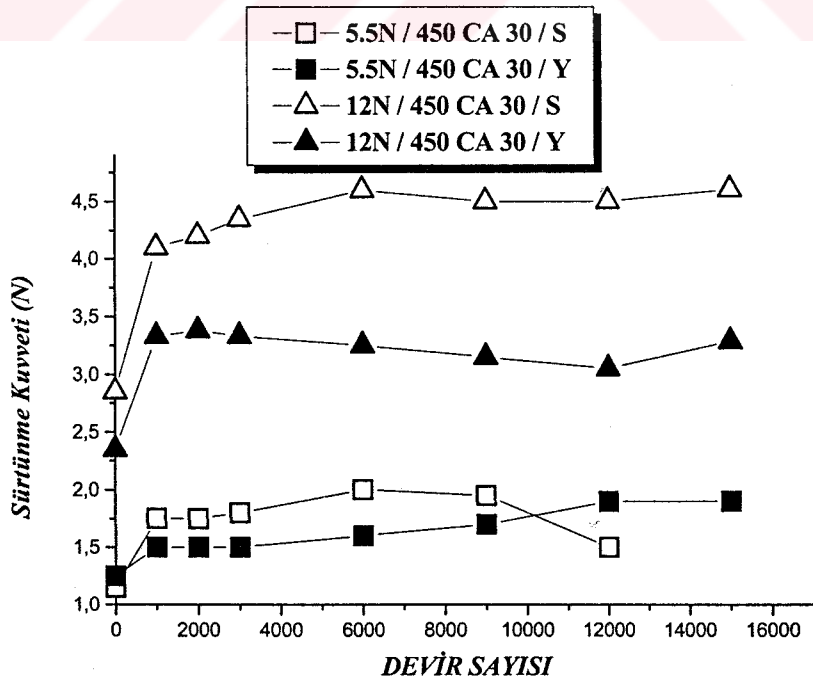
12 N' luk normal yük altında deney devam ederken bütün malzemeler 3.5 ile 5.5 N arasında sürtünme kuvveti değerleri verir. Fakat deney 5.5 N' luk normal yük ile yapıldığı zaman elde edilen sürtünme kuvveti değerleri 1.5 ile 2 N arasında değişmektedir.

Su verilmiş malzemelerde yüksek sürtünme kuvveti değerleri ölçülmüştür. Sadece 450 G takviye edilmemiş malzemeler farklı bir durum göstermiştir. Bu durumun sebebi ise yüksek kristalleşme derecesine sahip malzemenin sürtünme kuvveti değerlerinin yaşlandırılmış malzemenin sürtünme kuvveti değerlerinden daha düşük

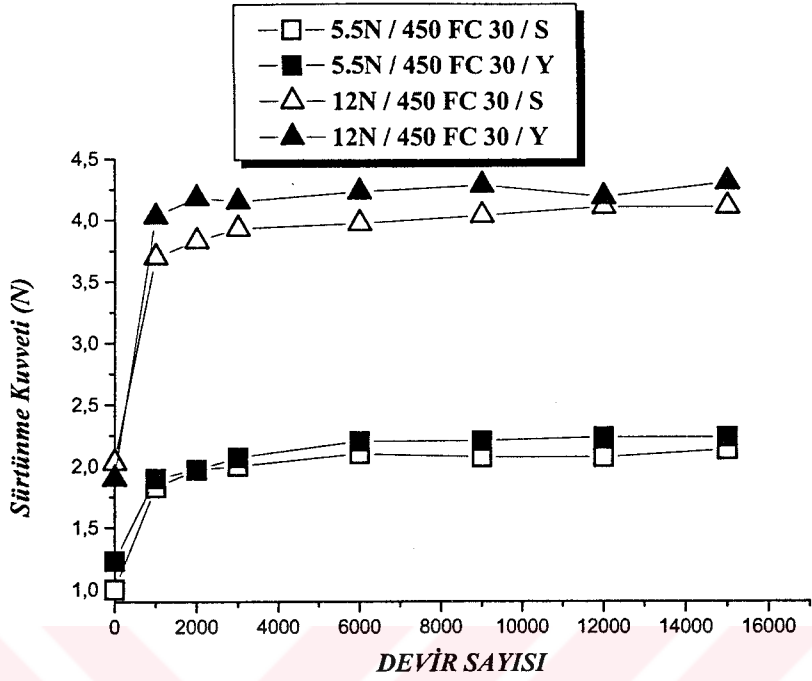
olmasıdır. Bu aşama da kristallerin plastik deformasyonuna katkı sağlar. Böylece sferulitlerin katlanmış zincirlerinin açılması mümkün olur ve sürtünme katsayısı düşer.



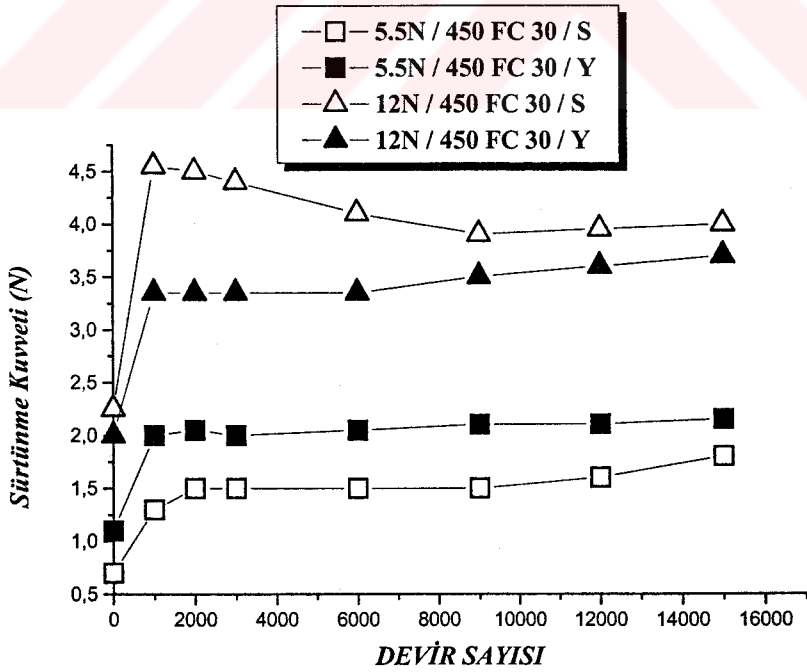
Şekil 4.8 100 dev / dak' da 450 CA 30 malzemesinin sürtünme kuvvetleri.



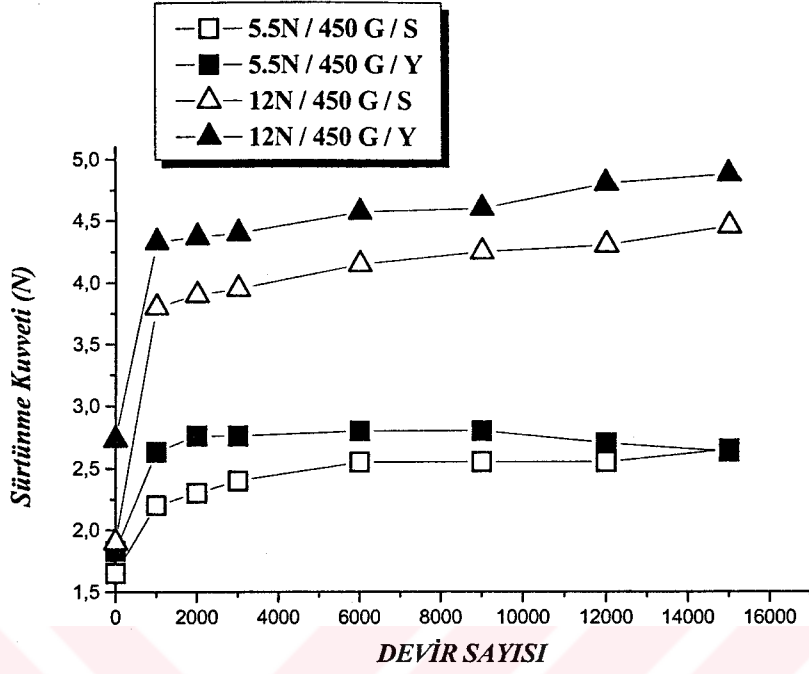
Şekil 4.9 900 dev / dak' da 450 CA 30 malzemesinin sürtünme kuvvetleri.



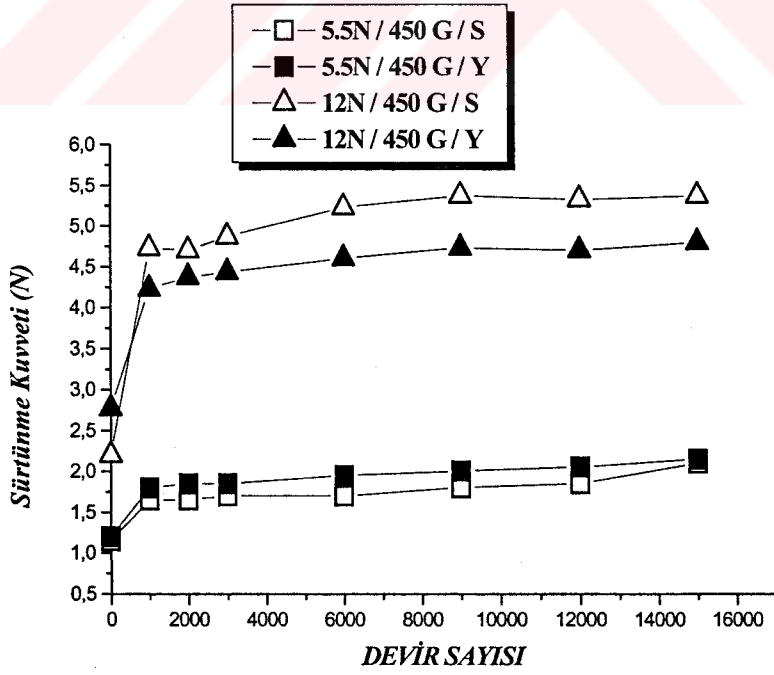
Şekil 4.10 100 dev / dak' da 450 FC 30 malzemesinin sürtünme kuvvetleri.



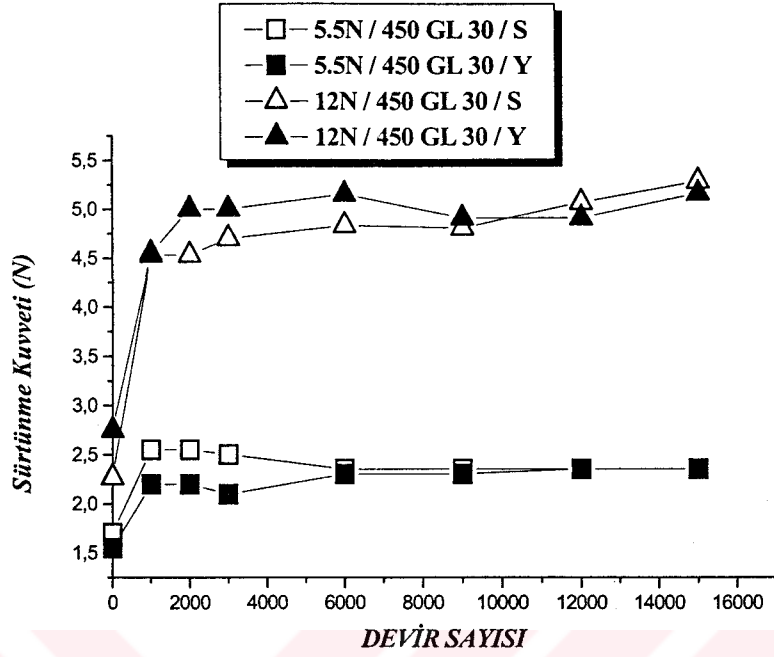
Şekil 4.11 900 dev / dak' da 450 FC 30 malzemesinin sürtünme kuvvetleri.



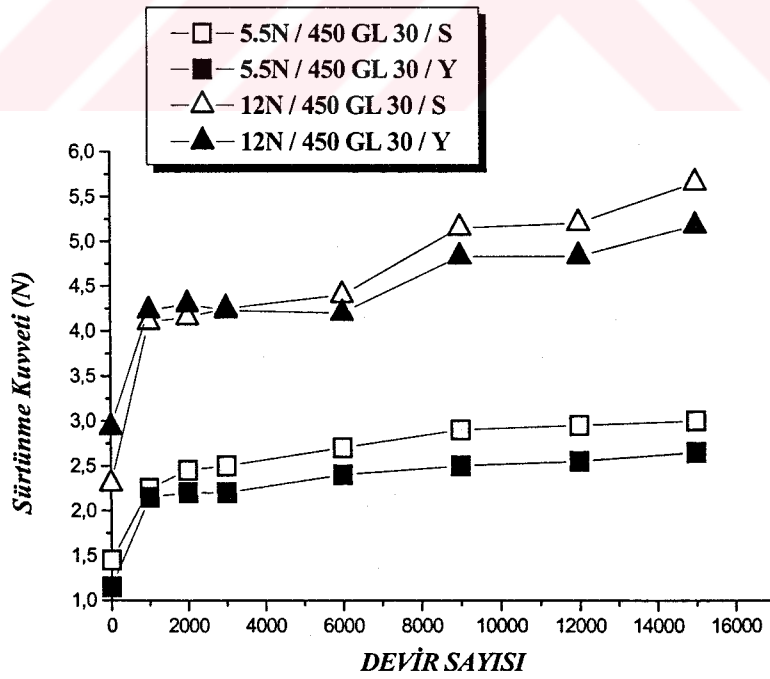
Şekil 4.12 100 dev / dak' da 450 G malzemesinin sürtünme kuvvetleri.



Şekil 4.13 900 dev / dak' da 450 G malzemesinin sürtünme kuvvetleri.



Şekil 4.14 100 dev / dak' da 450 GL 30 malzemesinin sürtünme kuvvetleri.



Şekil 4.15 900 dev / dak' da 450 GL 30 malzemesinin sürtünme kuvvetleri.

Sadece 900 dev / dak' da 12 N' luk normal yük altında 450 G malzemeleri için farklı bir durum söz konusudur, çünkü yaşlandırılmış malzemelerin sürtünme kuvvetleri, yüksek kristalleşme miktarına sahip malzemelerin sürtünme kuvveti değerlerinden daha düşüktür.

4.5 Kontak Açısı Ölçümleri

Kontak açısı sonuçları araştırıldığında, yüksek kristalleşme derecesine sahip malzemelerde yüksek kontak açısı değerleri söz konusu olmaktadır. Dolayısı ile % kristalleşme ile yüzey özellikleri arasında güçlü bir ilişki olmaktadır. Takviyeli malzemelerin kontak açı ölçüm değerleri, takviyesiz olanlara nazaran daha yüksektir. Bununla birlikte takviye malzemeleri kontak açısı değerlerini büyük ölçüde etkilemektedir. Tablo 4.4' de ısıl yaşlandırma prosesinden sonra yapılan kontak açı ölçümlerinin sonuçları görülmektedir

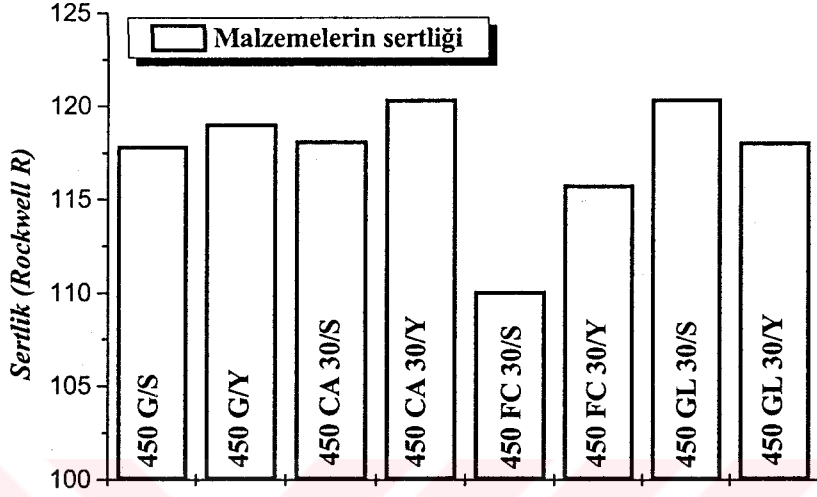
Tablo 4.4 Kontak açı ölçümleri.

Malzeme	Kontak Açısı (°)
450 G / S	58.25
450 G / Y	59.70
450 FC 30 / S	77.05
450 FC 30 / Y	73.57
450 GL 30 / S	60.00
450 GL 30 / Y	66.60
450 CA 30 / S	69.30
450 CA 30 / Y	68.28

4.6 Sertlik Deneyi Sonuçları

Kısa fiber takviyesi genelde malzemenin sertliğini arttırmaktadır. Modül değerlerinde olduğu gibi ısıl yaşlandırılmış malzemelerin sertlik değerlerinde

belirgin bir artış vardır. Sadece 450 GL 30 malzemesinde değişiklik söz konusudur, fakat malzemenin modülü ile sertliği arasında lineer orantı (korelasyon) olduğunu söylemek mümkündür.



Şekil 4.16 Malzemelerin sertliği.

Malzemelerin Rockwell R sertlik ölçümleri sonuçları Tablo 4.5' de verilmiştir.

Tablo 4.5 Rockwell R sertlik ölçümlerinin nümerik değerleri.

Malzeme	Ortalama Sertlik (Rockwell R)
450 G / S	117.9
450 G / Y	119.1
450 FC 30 / S	110.1
450 FC 30 / Y	115.8
450 GL 30 / S	120.4
450 GL 30 / Y	118.1
450 CA 30 / S	118.2
450 CA 30 / Y	120.4

BÖLÜM 5. SONUÇLAR

Yapılan çalışmalarda, malzeme biliminin ana konusu olan malzeme özelliklerinin tribolojik özelliklere etkileri incelenmiştir. Özet olarak polimerlerin mekanik özelliklerinin iyileştirilmesiyle tribolojik özelliklerinin geliştirilebildiği anlaşılmıştır. Termoplastik polimer matrisli kompozit malzemenin mikroyapısı, üretim sırasında ve sonrasındaki ısı işlemlerden oldukça etkilenmektedir. Kristal erime sıcaklığında bekleme ve ardından yapılan ani soğutma ile, malzemenin bir çeşit ısı işleme tabi olduğu söylenebilir. Devamında, camsı geçiş sıcaklığının üzerinde yapılan tavlama ile ısı yaşlandırma yapılmakta ve farklı % kristalleşme derecesine ve oryantasyonuna sahip yarı kristal matris malzeme elde edilmektedir.

Yapmış olduğumuz çalışmalar sonucunda kayma hızının iki önemli etkisi olduğunu söyleyebiliriz. Yapışma – kayma (stick-slip) mekanizması üzerindeki kayma hızının etkisi. Kayma hızının artırılmasıyla sürtünme katsayısının düşürülmesi stick – slip etkisinin azalmasına neden olur. Stick – slip davranışı özellikle düşük hız ve yüksek temas basıncında meydana gelir. Yüksek kayma hızı, yüksek temas sıcaklığı meydana getirir ki bu polimer malzemesinin yumuşamasına ve mekanik özelliklerinin kötüleşmesine neden olur.

Kristalleşme miktarı artırılmış PEEK malzemedeki sürtünme katsayısı ve aşınma davranışı üzerinde normal yükün etkisi incelenmiştir. Normal yükün artırılması ile aşınma oranında hafif bir artış olmaktadır. Bu nedenle malzemelerin birbirleriyle kıyaslanabilmesi için yapılan testlerde aynı normal yük kullanılmıştır.

Uygulanan normal yük malzemelerin aşınma özelliklerini karmaşık bir şekilde etkiler. Gerçek temas yüzeyi, deformasyon bölgesinin alanından tespit edilir ve uygulanan normal yük ile yakından ilişkilidir. Yüksek normal yük, yüksek temas yüzeyi sıcaklığına neden olur.

Modülün yüksek olması karşı diskin penetresyonunu engeller ve gerçek temas alanını azaltır bu düşük adhezyona neden olur. Böylece kayma yönünde düşük direnç kuvveti ortaya çıkar ki buda düşük sürtünme meydana getirir.

% kristalleşme miktarı ve kristal oryantasyonu yarı kristalli bir polimer için çok önemli parametrelerdir. Çalışmalar sonunda yaşlanma etkisiyle mikroyapıdaki sferulitlerin birbirini etkilemeleri ve hareketlerini kısıtlamaları nedeniyle % kristalleşmenin azaldığı fakat yaşlanma prosesi ile kristallerin daha organize bir şekilde oryante oldukları ve modül değerlerini arttırdıkları ve bunun da tribolojik özellikleri % kristalleşme miktarından daha fazla ve olumlu etkilediği tespit edilmiştir.

Malzemelerin özelliklerini iyileştirmede en önemli özelliklerden biri de takviye edici malzemelerdir. Malzemelerin adhezyon (yapışma) özelliğini kötüleştirmeden sürtünmenin deformasyon bileşenini azaltabilir ve aşınma direncini arttırabiliriz. Fakat takviye tipi, takviye malzemelerinin yük taşıma kapasitesi ve tribolojik özellikleri kompozit malzemelerin performansını yakından etkilemektedir. Fiberler düşük sürtünme katsayısına ve yüksek aşınma direncine sahip olmalıdır. Eğer fiber, matris malzemesinden kolayca çıkarsa (pull-out) veya polimer matrisin içinde kırılırlarsa bunun sonucunda üç cisimli aşınma mekanizması oluşacak ki sonunda çok büyük bir aşınmaya neden olacaktır. Transkristalin tabaka oluşumu veya arayüzey bağ kuvveti fiberlerin çıkmasını (pull-out) engelleyerek fiberlerin polimer gövdesinde kalmasını sağlar. Bunun sonucunda sert ve rijit polimer gövdesi varlığını uzun süre boyunca sürdürür. Bundan dolayıdır ki karşı diskin penetrasyonu azalır ve böylece aşınma miktarında ve sürtünme kuvvetinde düşüş meydana gelir.

Sonuç olarak polimer malzemelerin mikroyapısının tribolojik performansı çok fazla etkilediği, buna bağlı olarak fiberlerin tipi ve deneysel parametrelerin çok büyük önem taşıdığı tespit edilmiştir.

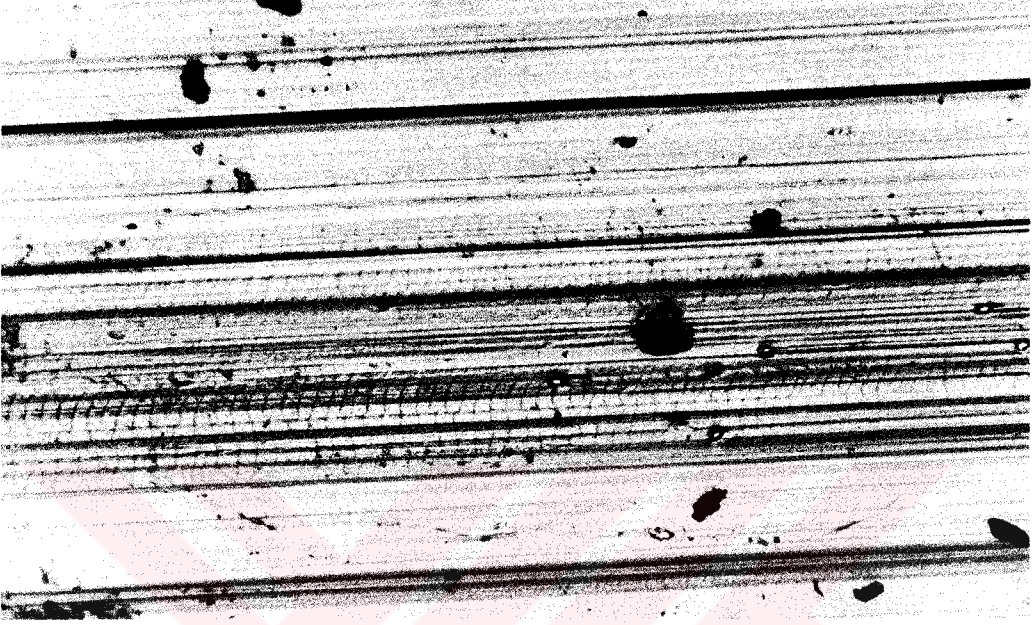
KAYNAKLAR

1. FRIEDRICH, K., CIRRINO, M. and PIPES, R.B., 1988. Evaluation of Polymer Composites for Sliding and Abrasive Wear Applications, *Composites*, 19, 383-392.
2. FOLKES, M.J. and KALAY, G., 1993. *Composites Sci. Tech.* 46, 77, Ankara.
3. TREGUP, A., HAREL, H., MAROM, G. and MIGLIARESI, C., 1994. *Composites Sci. Tech.*, 48, 185.
4. BUGGY, M. and CAREW, A., 1994. *Journal of Mat. Sci.*, 19, 2255.
5. TABOR, D., *Trans. ASME*, 1981. 103, 169.
6. MARX, U. AND FELLER, M.G., 1979. *Metallurgie*, 33, 380, German.
7. ZUN GAHR, K.H., 1981. Abrasive Wear of Metallic Materialy, *VDI-Fortschr, Ber., Reihe 5, Nr. 57, VDI-Verlag, Düsseldorf, German.*
8. SIN, H.C., SAKA, N. And SUH, N.P., 1979. *Wear*, 55, 163.
9. GREEN, A.P., MECH, J., 1955. *Phys. Solids*, 2, 197.
10. MOORE, D.F., 1975. *Principles and Applications of Tribology*, Oxford.
11. BRISCOE, B.J., 1983. *Physicochemical Aspects of Polymer Surfaces*, (Plenum Press, New York), 387-412.
12. BURWELL, J.T., 1959. *Wear*, 1 (1959) 119.
13. SUH, N.P., 1973. *Wear*, 25 (1973) 111.
14. ARCHARD, J.F., PETERSON, M.B. and WINER, W.O., 1980. *Wear Control Handbook*, American Society of Mechanical Engineers, 35-80, New York.
15. FRIEDRICH, K., 1986. *Friction and Wear of Polymer Composites*, 233, Amsterdam.
16. WU, S., 1982. *Polymer Interface and Adhesion*, Marcel Dekker, New York.
17. TSAI, W.W., 1980. *Intrudaction to Composite Materials*, Technomic Publishing Company, Westport.
18. SONG, J., 1990. *DGM Informations Gesellschaft Verlag*, Oberursel.

19. PETERMANN, J., 1982. Verbundwerkstoffe und Werkstoffkunde in der Kunststofftechnik, 83-99, D usseldorf.
20. PENNING, A.J., 1971. Hydrodynamic Induced Crystalization of Polymers from Solution, Rheol, Acta 10, 174-186.
21. LEE, T.H., BOEY, F.Y.C. and KHOR, K.A., 1995. On the Determination of Polymer Crystallinity for a Thermoplastic PPS Composite by Thermal Analysis, Composite Science and Technology, 53, 259-274.
22. SINMAZ CELİK, T.,  AHİN, T. ve ARICI, A.A., 2001. II. Makine Malzemesi ve İmalat Teknolojisi Sempozyumu, 408-417, Manisa.
23. LU, Z.P. and FRIEDRICH, K., 1995. On Sliding Friction and Wear of PEEK and Its Composites, Wear. 181-183.



EKLER



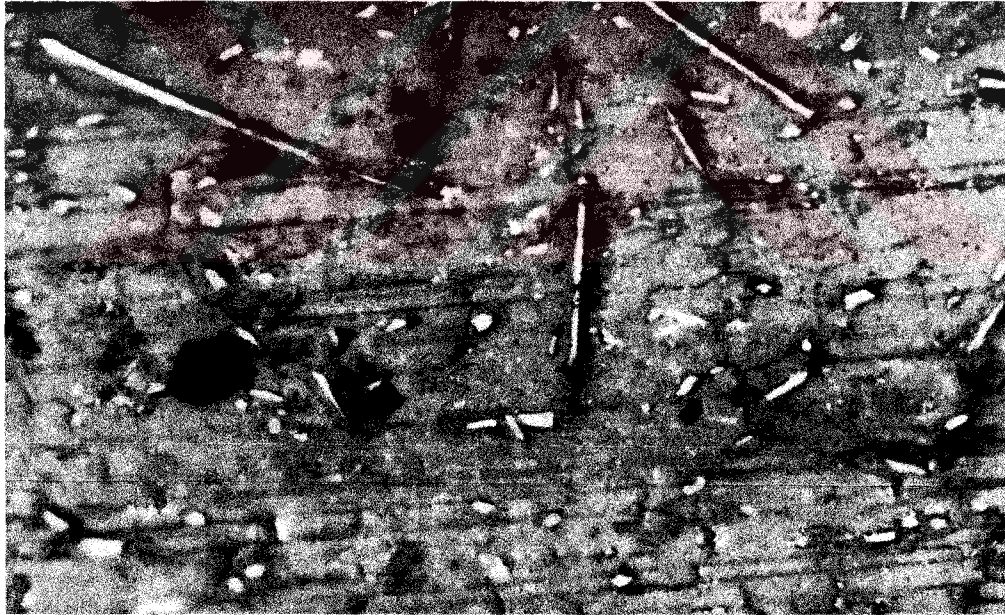
Şekil A.1 450 G / 5.5 N / 900 d/d / Y / x 100



Şekil A.2 450 G / 12 N / 900 d/d / Y / x 100



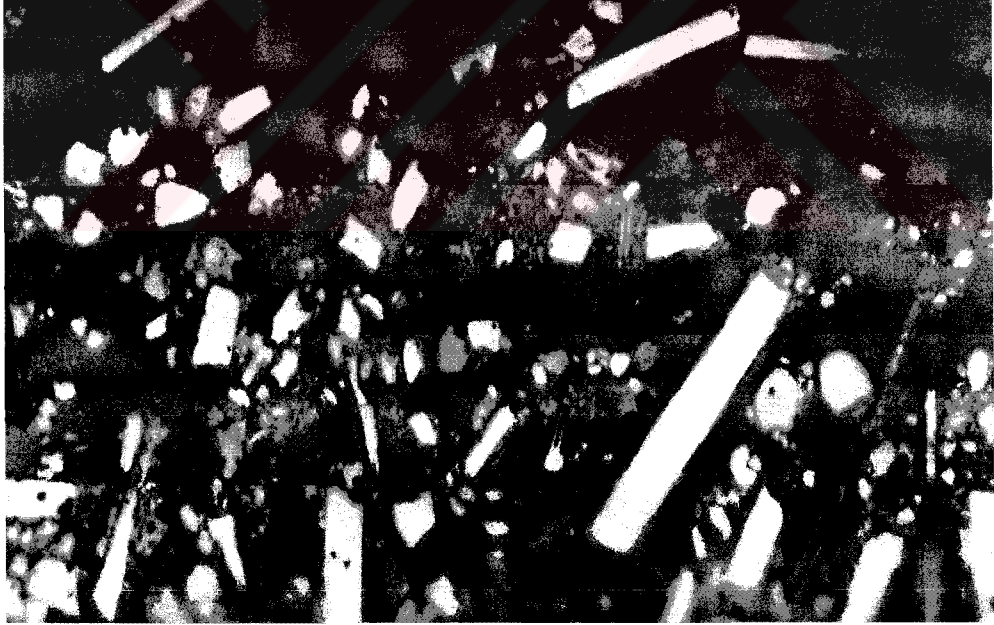
Şekil A.3 450 GL 30 / 5.5 N / 100 d/d / S / x 100



Şekil A.4 450 FC 30 / 12 N / 900 d/d / S / x 200



Şekil A.5 450 CA 30 / 5.5 N / 900 d/d / S / x 200



Şekil A.6 450 CA 30 / 5.5 N / 900 d/d / S / x 500



Şekil A.7 450 GL 30 / Çentik darbe / S / x 50

ÖZGEÇMİŞ

Bulgaristan' da doğdu. İlk öğrenimini Bulgaristan' da, orta ve lise öğrenimini Çerkezköy' de tamamladı. 1996 yılında girdiği Kocaeli Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü' nden 2000 yılında Makine Mühendisi olarak mezun oldu.

2001 yılından beri Kocaeli Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölüm' ünde Araştırma Görevlisi olarak çalışmaktadır.

